

水泥科技 2

2024

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CEMENT

善用资源 服务建设



主办单位：

合肥水泥研究设计院有限公司

Email: snkj@hcrdi.com

水泥科技

(季刊 1988年创刊)

2024年第2期

主办单位:

合肥水泥研究设计院有限公司

编委会

名誉主任: 朱 兵

主 任: 张永龙

副 主 任: 王虔虔 郑 青

主 编: 陆树标

委 员: (按姓氏笔划排序)

王仕群 王 庆 叶卫东 许 涛

李 宁 李运军 李林桃 沈玉祥

周巧林 单矩程 侯贵斌 徐松波

徐 睿 高 霖 崔洪坤 韩修铭

褚 彪 魏 铸

责任编辑: 解姗姗

编辑出版: 《水泥科技》编辑部

地 址: 合肥市望江东路60号

邮 编: 230051

编辑部电话: (0551) 63439575

广告部电话: (0551) 63439575

传 真: (0551) 63439575

网 址: <http://snkj.hcrdi.com>

投稿邮箱: snkj@hcrdi.com

目 次

双碳背景下市政污泥协同处置技术路径碳足迹分析	张山、李宁、黄婷等/1
浅谈对华为IPD研发体系的认识	胡光/14
辊压机辊面磨损在线监测技术的研究与应用	黄贺、张文进、高霖/23
基于DEM的废弃混凝土砂浆剥离性能研究	杨凯/29
限流电抗器在国外水泥生产线15MW燃煤电站的应用探讨	邵芹芹/40
水泥工厂设计中建筑防火间距问题的探讨	张媛媛/48
稳流仓仓重自抗扰控制	刘双飞/55
半干法砂石骨料生产线主要工艺设计和设备选型	吉小兰/62
建筑施工中桩基施工关键技术及管理分析	李朋菲/70
基于Solidworks的分气箱放样在除尘器加工中的应用	光辉/77

双碳背景下市政污泥协同处置技术 路径碳足迹分析

张山^{1,2} 李宁^{1,2} 黄婷^{1,2} 苏明雪^{1,2} 陈磊^{1,2}

(1 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230000;

2 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230000)

0 引言

温室气体排放导致的全球气候变暖正在威胁人类社会可持续发展。目前,我国二氧化碳排放量居于全世界首位,占全世界总排放量的25%左右。2020年9月22日,国家主席习近平在第七十五届联合国大会上宣布,中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和目标。为实现该目标,“双碳”战略倡导绿色、环保、低碳,优化能源资源的配置和结构以降低整体能耗,鼓励碳减排技术的创新以加速碳排放总量的快速降低,为建设美丽中国提供有力支撑。

随着我国城镇化进程的推进,我国污水处理规模超过2亿 m^3/d ,相应产生的污泥量超过6000万吨/年(以含水率80%计)^[1]。为实现污泥的资源化利用,污泥的处理过程尤其是干化脱水过程会消耗大量的能源,而后续的焚烧、填埋等处置方式也会伴随着大量温室气体的排放对环境及气候变化产生影响。因此,污泥处理处置全流程的碳减排评估及优化对于我国“双碳战略”的实现具有重要的意义^[2-3]。目前,污泥资源化处理的方式主要包括厌氧消化、好氧堆肥、焚烧发电、卫生填埋和建材利用等,不同技术方法所产生的碳排放均不相同^[4-6]。精确核算污泥处理处置全流程的碳足迹将有利于在不同工况下选择最合适的处理路线,从而为污泥资源化领域碳减排目标的实现提供理论选择的依据^[7-8]。

水泥窑协同处置是近年来涌现出的极具推广潜力的污泥后端处置利用技术^[9-12]。与传统的污泥单独焚烧技术相比,水泥窑系统超过 1400°C 的煅烧高温可以

有效避免二噁英等有毒有害物质的产生，同时将污泥中重金属等物质稳定固化在水泥熟料中，从而大大减少单独焚烧过程中尾气处理和残渣处置环节所消耗的能源和药剂，降低相应的间接碳排放^[13]。此外，干化后的污泥本身具有一定热值，且污泥燃烧后的灰分中含有大量二氧化硅、氧化钙等成分，可以作为水泥生产的替代原料和燃料进一步降低碳排放^[14-16]。因此，水泥窑协同处置对比单独焚烧技术在碳减排领域具有明显的优势。此外，水泥窑协同处置污泥也可以与厌氧消化、生物干化等前端处理技术进行串联，通过对污泥中可利用资源的回收利用实现碳减排^[17-19]。因此，厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热解+水泥窑协同处置三种不同方案在理论上具备碳减排的潜力。本文根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）提供的方法，对上述三条技术路线的碳足迹进行核算和分析，提出针对性的优化方案和改进建议。

1 研究方法

1.1 碳足迹计算模型

为精准核算污泥处理全过程的碳足迹，需要综合考虑所有可能涉及到的工艺步骤，并确立相应的计算模型。目前，常用的碳足迹计算方法主要包括排放因子法和实测法等。实测法是指在全处理过程中对不同工艺流程中的碳排放量进行实地检测和汇总，从而得出碳排放总量。实测法的结果较为准确，但是数据的采集较为复杂，且很难对碳汇进行精准测算。排放因子法是 IPCC 提出的一种碳足迹估算方法，主要通过活动水平与排放因子的乘积求和得到碳排放总量。本文选用碳排放因子法，结合工程案例中的实际运行参数和相应的排放因子，对污泥处理全过程的碳足迹进行核算。

不同技术路线的碳足迹为：

$$\begin{aligned}
 \text{Total CO}_2\text{-eq} &= \text{CO}_2\text{Emission} + \text{CO}_2\text{-eq of CH}_4\text{ Emission} + \text{CO}_2\text{-eq of N}_2\text{O Emission} - \text{CO}_2\text{ Avoided} \\
 &= \text{CO}_2\text{ Emission}(\text{direct}) + \text{CO}_2\text{ Emission}(\text{indirect}) + 25 \times \text{CH}_4\text{ Emission} + 298 \\
 &\quad \times \text{N}_2\text{O Emission} - \text{CO}_2\text{ Avoided} \\
 &= \text{CO}_2\text{ Emission}(\text{direct}) + \sum M_{si} \times \text{EF}_i + 25 \times \text{CH}_4\text{ Emission} + 298 \times \text{N}_2\text{O Emission} - \text{CO}_2\text{ Avoided} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中， M_{si} 和 EF_i 分别为消耗的能源或药剂的量和对应的碳排放因子，并取 CH_4 和 N_2O 的温室气体增温潜势为 25 和 298。碳排放总量由 CO_2 排放量（包括 CH_4 、 N_2O 排放核算转化后的 CO_2 排放当量）减去因替代燃料或原料等产生的碳减排量计算得出。其中， CO_2 排放量可分为直接碳排放和间接碳排放，前者可通过实地测量或者理论计算得出，后者则由排放因子法进行核算。需要注意的是，生物质在生物处理过程中释放的二氧化碳来源于其生长过程中吸收的二氧化碳。因此，在污泥生物处理或焚烧的过程中，生物成因的 CO_2 排放不计入碳排放总量^[20]。

运输过程中产生的碳排放为：

$$CO_{2\text{运输}} = (T_1 + T_2) \times \frac{m}{M} \times D \times EF \quad (2)$$

式中， T_1 为运输车满载时油耗，取 0.255kg 柴油/km； T_2 为运输处空载时油耗，取 0.153kg 柴油/km； m 为运输污泥质量，t； M 为运输车辆满载质量，t； D 为运输距离，km； EF 为柴油的排放因子，取 3.186kg CO_2 /kg 柴油^[21]。

厌氧消化过程中产生的碳排放为：

$$CO_{2\text{厌氧消化}} = CH_4\text{管道泄露} \times 25 + \sum M_{si} \times EF_i \quad (3)$$

式中， CH_4 管道泄露取沼气产量的 5%^[7,20]， M_{si} 为厌氧消化过程中消耗的能源或药剂的量， EF_i 为对应的排放因子。1m³ 的沼气可发电 1.7kW h，产热 2kW h^[22]。

热干化过程中产生的碳排放为：

$$CO_{2\text{热干化}} = M \times T \times EF \quad (4)$$

式中， M 为烘干水分质量，kg； T 为热干化单位脱水量能耗，取 1kW h/kg； EF 为电能排放因子，取 0.5810kg CO_2 /kW h。

生物干化过程中产生的碳排放为：

$$CO_{2\text{生物干化}} = M_1 \times T \times EF_1 + M_2 \times EF_2 + CO_{2\text{直接}} \quad (5)$$

式中， M_1 为脱去水分质量，kg； T 为生物干化脱水单位能耗，取 0.0495kW h/kg； EF_1 为电能排放因子，取 0.5810kg CO_2 /kW h； M_2 为菌剂用量，L； EF_2 为菌剂排放

因子，取 $1.034\text{kgCO}_2/\text{L}^{[23]}$ ；来源于 CH_4 和 N_2O 的直接碳排放取 $3.61\text{kg}/\text{t DS}^{[24]}$ 。

污泥热解过程中产生的碳排放为：

$$\text{CO}_2_{\text{热解}} = \text{CH}_4_{\text{管道泄露}} \times 25 + \text{N}_2\text{O}_{\text{燃烧排放}} \times 298 - M \times \text{EF} \quad (6)$$

式中， CH_4 泄露取热解气产量的 5%；M 为发电量，kW h；EF 为电能排放因子，取 $0.5810\text{kgCO}_2/\text{kW h}$ 。

水泥窑协同处置过程中产生的碳排放为：

$$\text{CO}_2_{\text{水泥窑}} = \text{CH}_4_{\text{燃烧排放}} \times 25 + \text{N}_2\text{O}_{\text{燃烧排放}} \times 298 - M_1 \times \text{EF}_1 - M_2 \times \text{EF}_2 \quad (7)$$

式中， M_1 为替代原料质量，kg； EF_1 为原料排放因子，取 $8.76\text{kgCO}_2/\text{t}^{[25]}$ ； M_2 为替代燃料质量，kg； EF_2 为燃料排放因子，取 $2.191\text{kgCO}_2/\text{kg}^{[26]}$ 。

1.2 碳足迹核算参数

研究中通过排放因子法核算厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热解+水泥窑协同处置三种不同技术路线的碳足迹，上述公式以及计算过程中所涉及到的排放因子如表 1 所示，主要来源于 IPCC 和文献中所提供的数据。

为便于统一运输过程中的核算标准，根据合肥市实际工厂选址情况，污泥在不同处理环节中的运输距离统一为 10km，处理后运往水泥厂的距离统一为 50km，且热干化与水泥窑协同处置均在水泥厂厂区内完成。

表 1 排放因子统计表

类别	排放因子
柴油	$3.186\text{kgCO}_2/\text{kg}$
天然气	$56.1\text{kgCO}_2/\text{GJ}$
煤（作为水泥窑燃料） ^[21]	$2.191\text{kgCO}_2/\text{kg}$
电力	$0.5810\text{kgCO}_2/\text{kW h}$
生石灰	$1.74\text{kgCO}_2/\text{kg}$
PAM	$20\text{kgCO}_2/\text{kg}$
FeCl_3	$8.3\text{kgCO}_2/\text{kg}$

1.3 核算对象

为便于不同技术路线碳足迹的核算与比较，本文的核算对象统一为 1 吨污水厂

的出厂污泥，以合肥市区不同污水厂的污泥进行取样分析所得结果均值为基准，如表 2 所示。

表 2 合肥市区不同污水厂污泥性质分析

污水厂	污水处理量 (t/d)	污泥产量 (t/d)	污泥含水率 (%)	污泥灰分 (%)	污泥干基热值 (MJ/kg)
小仓房	400000	250	80.89	50.51	10.6115
经开区	300000	110	57.66	51.22	10.1990
十五里河	240000	120	79.47	46.79	11.8480
王小郢	300000	225	86.42	36.31	14.7840
朱砖井	65000	60	86.95	42.36	12.9030

经过调研和取样测试，取核算对象的污泥含水率为 80%，灰分取平均值为 45%，污泥的干基热值取平均值为 12MJ/kg。进入水泥窑协同处置的物料含水率统一为 40%。

1.4 工程案例

本研究中所涉及厌氧消化工艺参考合肥市某污泥处理企业案例，该厂每日可处理 80% 含水率污泥 120t，沼气产量为 3120m³，电力消耗为 4500 kW h。经过厌氧消化和脱水（离心+深度脱水）处理后，出厂污泥含水率为 46.7%，干基热值为 6.926MJ/kg，灰分含量为 62%。

本研究中所涉及生物干化工艺参考合肥市某公司中试效果，污泥生物干化系统单位能耗脱水水量约为 20 kg/kW h。干化过程中需添加各种废弃物（如锯末，秸秆等）作为辅料，其中辅料的含水率取 12.5%，干基热值为 18MJ/kg。生物干化前混合料含水率为 63%，干化结束后含水率为 40%。干化前混合料灰分为 20%，干化后混合料灰分为 25%，干化后混合料的干基热值为 15.7MJ/kg。

鉴于合肥市暂无大型污泥热解工程项目，本研究中所涉及污泥热解工艺参数以河南省某公司工程参数为基准，该厂每日可处理 60% 含水率污泥 25t，热解气产量为 15000m³，热解气密度为 1.2419kg/m³，热值为 3.837MJ/m³。该厂通过可燃气体发电机组进行发电，扣除厂区自身电耗后平均每吨污泥发电量为 120.24 kW h，发电尾气排放量 1032Nm³/h，尾气中 N₂O 含量为 20ppm^[27]。

2 碳足迹核算

2.1 厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置技术路线碳足迹

在碳足迹核算过程中，需要明确整个工艺路线的核算边界，对所有可能涉及碳排放的工艺流程进行计算。图 1 为该技术路线的碳足迹核算边界。

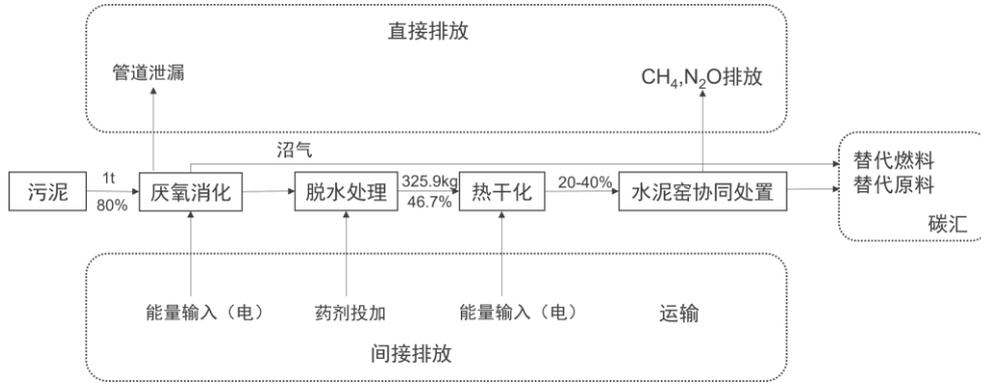


图 1 “厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置”技术路线碳足迹核算边界

在该技术路线全过程中，管道泄露和沼气燃烧会产生二氧化碳的直接排放，热干化后的污泥在水泥窑中焚烧时同样会释放少量 CH_4 和 N_2O （ $0.024\text{kg}/\text{tds}$ ， $0.99\text{kg}/\text{tds}$ ）^[28]。全过程中的间接碳排放主要由电能输入、运输和药剂消耗构成，而沼气燃烧产热发电以及处理后的污泥作为水泥窑生产中的替代燃料、原料所产生的碳减排则是碳汇的主要组成部分。具体计算结果如图 2 所示，全过程所产生的碳排放为 90.61kg 。其中，运输所产生的碳排放占比较小，全过程仅有 3.42kg 。碳排放最高的工艺流程为厌氧消化-脱水处理，碳排放量

E_0 为 115.28kg ，其中超过一半来源于调理及脱水药剂的消耗，在全过程碳源中所占比例为 49.86% ，也是所有碳源项目中占比最高的。目前，国内厌氧消化工艺对有机质的降解效率普遍不高（约 40% ），后续沼气发电虽然可以减少用电量而产生碳汇，但仍无法完全弥补药剂投加所带来的碳排放。因此，开发新型低碳污泥调理剂，减少药剂消耗并提高厌氧消化产气效率是厌氧消化低碳减排的重要发展方向。此外，污泥在厌氧消化过程中因管道泄漏而产生的碳排放为 15.09kg ，对厌氧消化系统的改进和优化也是碳减排的关键环节。在水泥窑协同处置工艺中，由于污泥在厌氧消化工艺中有机质降解效率较低，因而在煅烧过程中会释放 CH_4 和 N_2O ，该部分的碳排放量为 35.47kg 。但是其作为替代原料和替代燃料可以大量减少水泥生料和煤的使用量，产生的碳汇为 84.70kg 。因此，污泥的水泥窑协同处

置过程为负碳排放，从而降低了整个技术路线的碳排放。

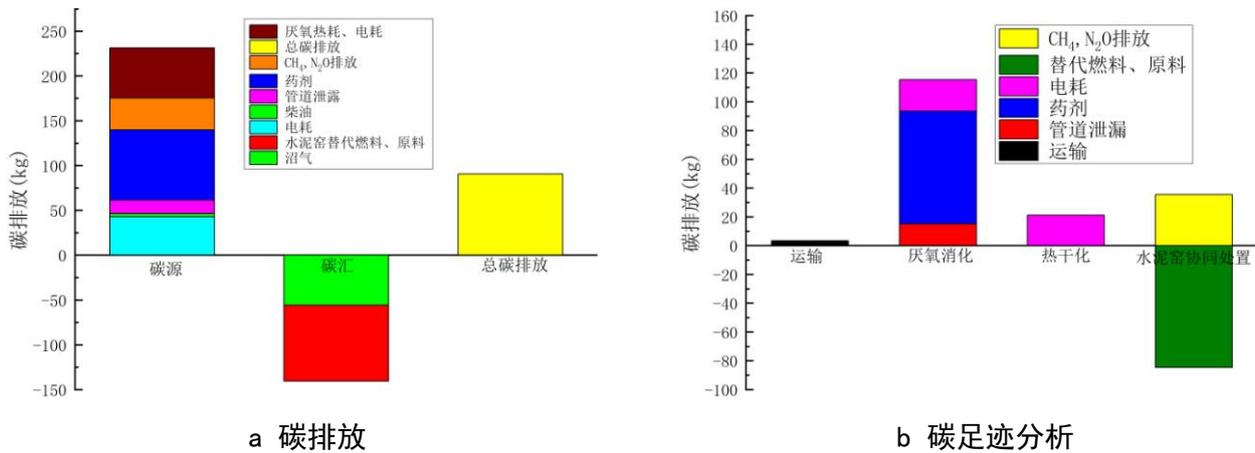


图2 “厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置”技术路线不同工艺流程的(a)碳排放和(b)碳足迹分析

此外，该工艺流程中，厌氧消化后的污泥经过脱水处理，污泥的含水率降低至 46.7%，通过热干化后含水率进一步降低至 40%后进入水泥窑。由于热干化脱水较少，因此产生的碳排放较低，为进一步明确热干化过程中的碳排放，探究工艺条件对碳足迹的影响，本研究改变热干化后污泥含水率参数（20%，30%，40%），分别计算全过程的碳足迹，结果如图所示。随着热干化后污泥含水率的降低，全过程碳排放量增高，表明热干化效率较低，过度的热干化反而会使得碳排放增高。当污泥的掺入量较小（低于 10%），此时污泥中的水分对水泥窑熟料的生产影响较小，厌氧消化-深度脱水后的污泥直接入窑可以在水泥窑中完成干化，不再需要额外的热干化过程，避免了热能的转化过程且能充分利用水泥窑中多余的热量，更有利于全过程的碳减排。

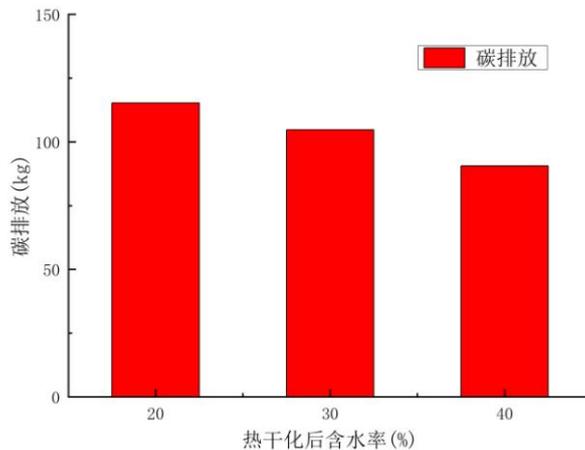


图3 工艺条件对全过程碳足迹的影响

2.2 生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线碳足迹

图 4 为生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线的碳足迹核算边界。

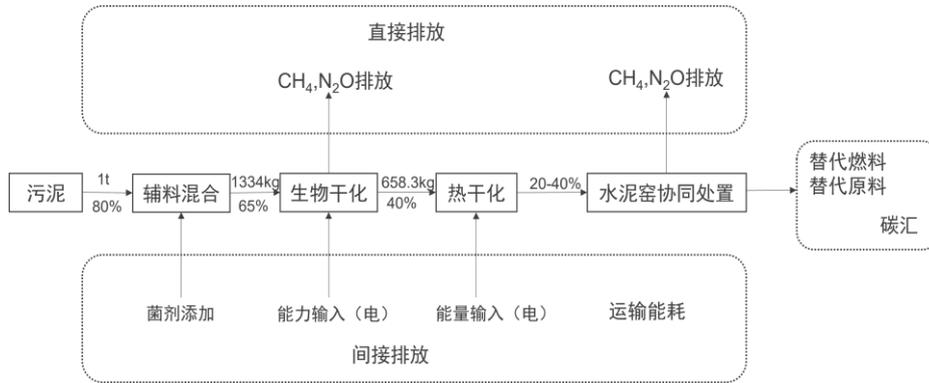


图 4 “生物干化+热干化+水泥窑协同处置”技术路线碳足迹核算边界

在该技术路线全过程中，由于污泥生物处理产生的碳排放不纳入核算范围，因此整个过程中的直接碳排放包括生物干化处理过程和处理后的污泥在水泥窑中煅烧产生的 CH_4 和 N_2O 排放。间接碳排放主要来源于电能消耗和菌剂消耗，其中辅料主要为各种生物质废弃物如秸秆、麦麸、锯末等，因此只计算其收集和运输过程中产生的碳排放。生物干化过程中，水分的蒸发吸热主要来源于干化系统中微生物有氧呼吸所释放的热能，该部分能量也是碳汇的重要组成部分。具体计算结果如图 5 所示。

生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线全过程的碳排放为-16.72kg，即整个处理过程中实现了负碳排放。其中，运输过程产生的碳排放因为辅料的运输而略有增加，而生物干化过程中因电力消耗而产生的碳排放较高，为 19.64kg，主要用于干化设备的运行和控制。在水泥窑协同处置环节，由于生物干化对污泥中有机质的降解率较低（约 20-25%），干化后混合物料中仍含有较多有机质，因此在水泥窑中煅烧时释放的热量相对较高，虽然也导致煅烧时释放的 CH_4 和 N_2O 的量增加，但总体上水泥窑协同处置环节仍为负碳工艺。全过程中主要的碳汇来源于生物干化过程中微生物有氧呼吸产生的热量以及混合物料对水泥生产原料和燃料的替代效果，产生的碳汇分别为 165.89kg 和 88.82kg。需要指出的是，辅料本身的热值较高，在水泥窑中煅烧时同样可以起到替代燃料的作用，为便于不同技术路线的碳足迹比较，以上核算结果已将辅料的影响排除。

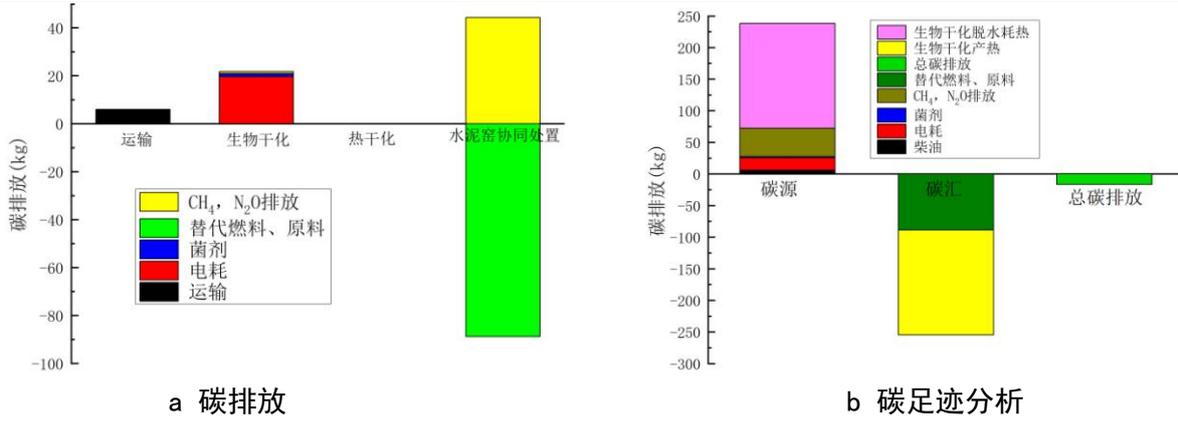


图 5 “生物干化+热干化+水泥窑协同处置”技术路线不同工艺流程的 (a) 碳排放和 (b) 碳足迹分析

由于生物干化后混合料的含水率已降低至 40%，已经基本满足进入水泥窑协同处置的条件，因此在核算中没有考虑其它技术路线中所需热干化工艺的影响。当水泥窑容易受到混合料中水分的影响而造成减产，或者为提高水泥窑对污泥的协同处置量时，往往需要对混合料进行进一步的热干化。为研究热干化对全过程碳足迹的影响，通过改变入窑的含水率参数（20%，30%，40%），分别计算全过程的碳足迹，结果如图 6 所示。随着含水率的降低，全技术路线的碳排放呈现上升趋势，其原因前文已有所分析。与热干化相比，生物干化的能耗仅为前者的 5% 左右，从理论上分析，生物干化后直接入窑更有利于处理过程中的碳减排。但是，目前生物干化对有机质的降解率较低，含水率降低至 40% 以后其体系温度降低，很难继续完成高效脱水。外加酶、调理剂等手段^[29]可以在一定程度上促进微生物对有机质的利用，提高生物干化的温度并延长高温期，有望实现更高效的生物干化，从而进一步降低全过程的碳排放。

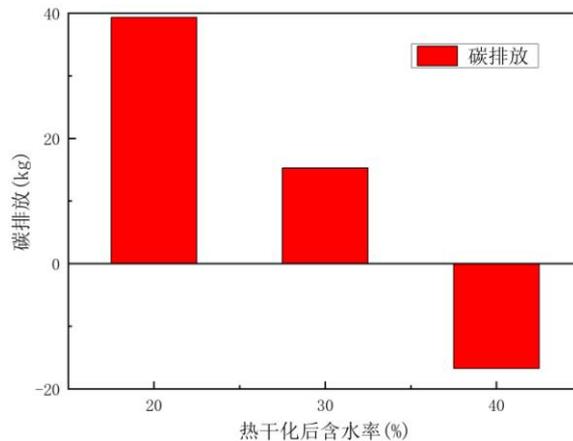


图 6 工艺条件对全过程碳足迹的影响

2.3 生物干化+热解+水泥窑协同处置技术路线碳足迹

图 7 为生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线的碳足迹核算边界。

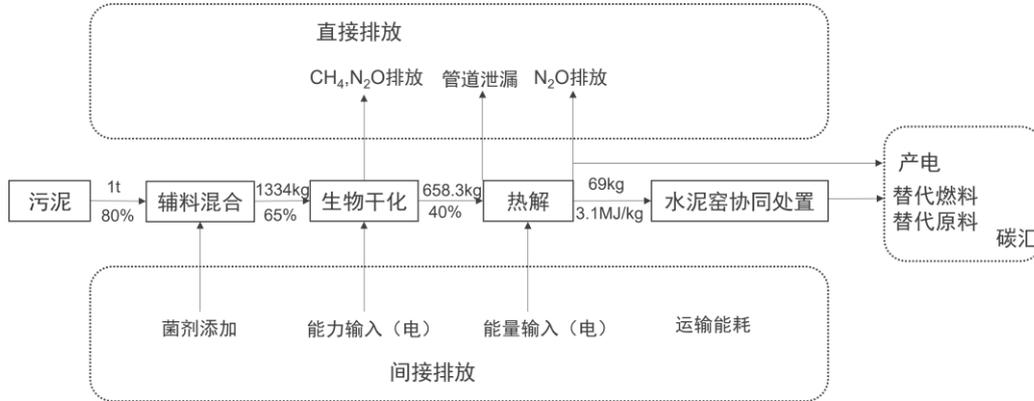


图 7 “生物干化+热解+水泥窑协同处置”技术路线碳足迹核算边界

在该技术路线全过程中，生物干化和热解气的燃烧过程中排放的 CH_4 和 N_2O 以及热解气管道的泄露会产生直接碳排放，热解气发电与生物干化产热都可以减少二氧化碳排放。为便于比较，生物干化过程中添加辅料的热值同样不纳入计算，具体计算结果如图 8 所示。

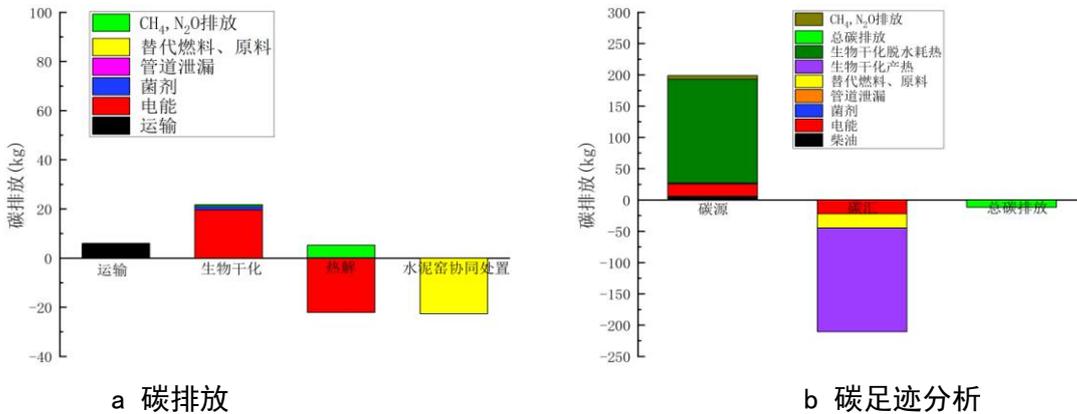


图 8 “生物干化+热解+水泥窑协同处置”技术路线不同工艺流程的 (a) 碳排放和 (b) 碳足迹分析

生物干化+热解+水泥窑协同处置技术路线全过程的碳排放为-11.75kg，低于技术路线一但高于技术路线二。其中，碳排放最高的是生物干化工艺。污泥热解产生的热解气可以用于发电，不仅可以满足热解过程中消耗的能源，而且通过余热回收等方式还可以进一步减少热解的能耗，整个工艺流程可以对外供电来产生碳汇。污泥热解气中的一氧化碳、甲烷等可燃气体在燃烧发电的过程中会产生大量的二氧化碳，但是该部分二氧化碳属于生物成因，因此不纳入国家排放总量，只计算燃烧过程中产生的 N_2O 的排放。在热解工艺中，污泥进入气化炉后首先与

高温气体接触并快速被干燥，该过程与热干化相似。随后，污泥中的有机物在贫氧条件下发生热裂解并生成 CO 、 H_2 等可燃气体，从而实现污泥的资源化利用。与技术路线三不同的是，技术路线二中热干化后的污泥直接进入水泥窑作为生产的替代原料和燃料，污泥中剩余的无机矿物和有机质可直接得到利用。而在技术路线二中，热解工艺先烘干水分，再将污泥中有机质转化为可燃性热解气，最后由热解气的燃烧提供热能。相比较而言，技术路线二对能量的转化更为直接，所以生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线的碳排放整体要低于生物干化+热解+水泥窑协同处置技术路线。值得注意的是，污泥热解是在贫氧条件下进行的，热解过程中所产生的 N_2O 含量较低。此外，污泥热解过程中温度较高，污泥中固有的有机质基本分解，其热解产物在水泥窑中煅烧所产生的 CH_4 和 N_2O 也几乎为零。相对于前两条技术路线而言，技术路线三在该方面具有一定的碳减排优势，因此其总碳排放量与技术路线二也较为接近。

3 结论

本文通过排放因子法，结合实际工厂案例的运行数据，对厌氧消化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热干化+水泥窑协同处置、生物干化+热解+水泥窑协同处置三种不同技术路线的碳足迹进行了核算。得到以下结论：

(1) 生物干化+热干化+水泥窑协同处置技术路线全过程的碳排放最低，主要因为生物干化过程中脱水能耗较低，且生物干化可直接将生物能通过微生物的有氧呼吸转化为热能，能量利用效率较高。

(2) 厌氧消化以及热解都可以产生替代燃料，先将污泥中有机质的生物能转化为化学能，再通过燃烧转化为热能，能量转化效率较低。

(3) 现阶段厌氧消化和生物干化对有机质的降解率仍然偏低，产气效率和脱水效率因此受到限制，且不利于污泥在水泥窑协同处置阶段的碳减排。

针对以上问题，通过碳足迹分析提出以下碳减排优化方案：

(1) 从“无废城市”建设角度出发，基于废弃建材的再利用以及厌氧消化技术的发展需要，可以利用废弃建材等城市固废定向开发低碳污泥调理剂，减少厌

氧消化过程中的药剂消耗。

(2) 通过外加酶, 导电型生物炭等调理剂以及优化生物干化过程控制参数等方式, 促进微生物的呼吸作用和生长繁殖, 提高生物干化对有机质的利用效率。通过菌种筛选优化提高生物干化温度, 延长高温期时间, 加快脱水速率, 实现污泥的深度脱水效果。

(3) 优化热解工艺, 通过催化重整等方式提高热解气的热值, 并通过设备优化改造提高热解气发电效率。

摘自《给水排水》2023,59(11)

参考文献:

- [1] Dhakal S. GHG emissions from urbanization and opportunities for urban carbon mitigation [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2010, 2(4): 277-283.
- [2] Tyagi V K, Lo S L. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 25(708-728).
- [3] 戴晓虎, 张辰, 章林伟, 等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021, 57(3):1-5.
- [4] 朱明璇, 李梅, 刘承芳. 污泥处理处置技术研究综述 [J]. 山东建筑大学学报, 2018, 33(6): 63-68.
- [5] 刘环. 城镇污泥处置方案分析研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [6] Han H, Long J, Li S, et al. Comparison of green-house gas emission reductions and landfill gas utilization between a landfill system and an incineration system [J]. Waste Management & Research the Journal of the International Solid Wastes & Public Cleansing Association Iswa, 2010, 28(4): 315.
- [7] 林文聪, 赵刚, 刘伟. 污水厂污泥典型处理处置工艺碳排放核算研究 [J]. 环境工程, 2017, 35(7):175-179.
- [8] 郭怡. 城市污水厂污泥处理处置过程中碳排放核算边界浅析 [J]. 净水技术, 2019, (10): 131-134.
- [9] 陈建飞. 水泥窑协同处置市政污泥技术 [J]. 绿色科技, 2021, 23(4):97-99.
- [10] 丁薇薇. 水泥窑协同处置城市污泥技术研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014.
- [11] 刘姣, 李斯婷, 修莎. 水泥窑协同处置污泥研究进展 [J]. 环境与生活, 2014, (14): 224-224.
- [12] 冯士国, 吴伟伟, 王泽彪. 水泥窑协同处置市政污泥实践 [J]. 中国水泥, 2018, (12): 86-87.
- [13] 丁冠元, 刘宇, 王亚丽, 等. 水泥窑协同处置污泥的环境负荷分析 [J]. 中国水泥, 2021(3):81-84.
- [14] Shi H S. Study on utilizing cement kiln to handle sludge from sewage treatment plant [J]. Cement, 2002, (07):8-10.
- [15] Lv D, Zhu T, Liu R, et al. Effects of co-processing sewage sludge in cement kiln on NO_x, NH₃ and PAHs emissions [J]. Chemosphere, 2016, 159:595-601.

- [16] Shi J. Process Analysis and Case Study on Co-disposal System of Sludge Drying and Cement Kiln Incineration [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26, 50-55.
- [17] 孙挺. 水泥行业碳排放核算及低碳发展路径研究 [J]. 中国水泥, 2022(3):80-83.
- [18] 盛德洋, 朱洁, 安东璇等. 基于碳减排的污水厂污泥处理处置全流程最佳技术路线分析 [J]. 净水技术, 2023, 42(1):75-82.
- [19] 李爱民, 李羽志, 宋联等. 无锡市典型污泥处理处置全过程碳排放特征研究 [J]. 给水排水, 2022, 58(11):28-34.
- [20] 次瀚林, 王先恺, 董滨. 不同污泥干化焚烧技术路线全链条碳足迹分析 [J]. 净水技术, 2021, 40(6):77-82+99.
- [21] 陈莉佳, 许太明, 卢宇飞. 市政污泥脱水-干化-焚烧不同工艺路线碳排放分析 [J]. 净水技术, 2019, 38(S1):155-159.
- [22] 杭世珺, 关春雨. 污泥厌氧消化工艺运行阶段的碳减排量分析 [J]. 给水排水, 2013, 49(4):44-50.
- [23] 马鉴云, 李智, 顾俊等. 污泥预调理方式影响下的市政污泥“深度脱水-干化-焚烧”碳排放研究 [J/OL]. 中国环境科学:1-7[2023-07-03]. DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230516.005.
- [24] 齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 等. 通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 [J]. 环境科学, 2016, 37(1): 366-376.
- [25] 庄幸, 姜克隽. 关于北京水泥厂水泥产品全能耗分析的调研 [J]. 宏观经济研究, 2008, 111(2):18-22+28.
- [26] 张悠然, 王雷, 龚琳, 等. 污泥替代水泥窑燃料过程的碳减排及质能平衡计算 [J]. 可再生能源, 2015, 33(6):952-957.
- [27] 张墨. 污泥热解工艺机理与碳排放研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [28] 纪莎莎. 污泥干化焚烧工艺碳排放研究及优化策略 [J]. 环境科技, 2019, 32(1):49-53.
- [29] Wang K, Wang Y Y, Chen T B, et al. Adding a recyclable amendment to facilitate sewage sludge biodrying and reduce costs [J]. Chemosphere, 2020, 256: 127009.

浅谈对华为 IPD 研发体系的认识

胡光

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 华为引入IPD的背景

华为公司创立于1987年。1995年，华为研发成功C&C08数字程控交换机，为华为带来了营业收入迅猛增长，这一年销售收入14亿元，1998年销售收入89亿元，人员9000多人。

1998年前后，华为业务在传统交换机、接入网、智能网、接入服务器、光网络等产品上全线开花，业务急速扩张，伴随着扩张暴露出一系列问题：毛利率逐年下降、客户需求与解决方案差距大、产品开发过程一变再变、产品开发周期长、研发资金投入分散、很多研发项目没有形成产品和销售收入等。

主观上，在1998年前后那个历史发展时期，华为必须要改变，要改变传统的研发模式，需要管理好急速膨胀的研发资源、提高效率、提高产品的先进性和质量水平。

客观上，1998年中国加入WTO日益逼近，通信市场即将全面开放，信息技术产品零关税即将到来，市场激战在所难免。

因为这样的背景，任正非一行在1997年年末走访了美国休斯公司、IBM公司、惠普公司、贝尔实验室等，寻求先进的研发管理方法。经过深入学习和分析，华为公司决定学习IBM，于1999年正式引进了IPD研发体系。

2 IPD为华为带来的价值

2.1 从偶然成功转变为可复制、可持续性的成功

华为公司在发展早期，研发上没有科学的流程和制度，项目成功与否也是主要靠项目经理和运气，靠“个人英雄主义”。另外，商业上的成功也有一些碰运气成分，有些产品受市场认可，带来很多利润，也有些产品带来很多亏损。

以上这些情况，是很多公司面临的问题，如果研发的成功与否是靠个人、项目和产品的成功与否是靠运气，那公司的发展与否就存在极大的不确定性了，变成偶然事件了。

IPD的流程体系和管理体系，为华为公司在产品开发周期、产品质量、成本、响应客户需求、产品综合竞争力上都取得了根本性改善，从依赖个人英雄主义转变为依靠管理制度来推出有竞争力的高质量产品，有力地支撑了华为的快速发展和国际化。

2.2 技术导向转变为客户需求导向

企业的一切经营活动都是围绕商业利益的，最终目标都是商业成功。在华为公司的看法中，不提倡研发人员有太重的技术情节，把技术做到最好不是最终目的。关于这个事，任正非曾经说过：“华为公司不是为了追求名誉，而要的是实在，希望大家不要老想着搞最先进的设备，我们是工程商人，做的东西要有人买”、“超前太多的技术，当然是人类瑰宝，但必须牺牲自己来完成”。

华为将产品开发作为一项投资来管理，首先通过组合管理对投资机会进行优先级排序，确定投资开发的产品，将有限的研发资源用在最需要的地方。

华为在产品开发的每个阶段，都从商业的视角而不只是从技术和研发的视角对产品开发进行财务指标、市场、技术等方面的评估，以确定开发项目是继续还是终止。目的在于确保产品投资回报的实现，这点是“正确的做事”其中一方面的保障。

2.3 研发工作从纯研发转变为跨部门团队协作开发、共同负责

在早期，华为的开发流程，开发、验证、测试等各个环节是割裂的，不断修改，不断重复过程，导致开发流程缓慢。实施IPD之前，产品开发项目组成员只来自研发部门，研发人员不关心产品的可制造性、市场等方面，由此带来了产品开发不能商业成功的风险。

实施IPD后，IPD要求采用跨部门团队来负责产品开发，按规划和项目任务书范围，将产品开发到发布过程中需要的相关功能部门的人员卷入，对产品从开发、

测试、生产、上市，一直到生命周期的全过程共同负责，团队内各个方向和专业的人员形成合力。

这样，跨部门团队保证了产品从开发的时候，就关注到了可靠性、可生产性、可销售性、可交付性、可服务性等方面的需求。华为也从对研发成果负责转变为对产品成功负责。

3 华为IPD体系关键要素

3.1 结构化流程

结构化流程，是IPD的核心内容之一。如何理解“结构化”？华为是这么解释的：是指相互关联的工作要有一个框架结构，并要有一定的组织原则来支持它。合理的结构层次很关键，没有结构化，则每个项目都自行定义，没有约束，过程不可重复，效率低下，容易引起混乱；过渡的结构化，则规范过多、过细，缺乏灵活性，容易官僚化，效率也低了。

我理解的“结构化”的含义和精髓是：一是管理和流程要划分层级，由大向小、由总到分逐步向下划分层次和扩展，把一个大目标分解成各个小目标；二是同层级流程之间应该划分好界限，明确各个流程要干的内容、要实现的目标；三是流程之间要设计好衔接关系，是前后顺序上的支撑，还是协同合作，应定义清楚结构。

华为通过IPD变革及持续优化构建了一套结构化研发流程及管理体系，使得华为研发有序高效，能制度化、持续性地推出高质量的、具备商业成功潜力的产品和解决方案。华为的IPD结构化流程是指管理研发的整个流程体系，包括市场管理流程、需求管理流程、产品开发流程（小IPD），以及相关使能流程及支撑流程（包含公共基础模块、用户体验设计、定价、上市管理、新器件选择、服务准备等）。其目的是实现以客户为中心，以客户需求为导向，把产品开发当做投资进行管理。

3.2 从跨部门团队演进到重量级团队

跨部门团队是IPD理论中的关键要素，也是解决华为曾经串行开发模式下研发效率低下的关键措施。

华为早期跟绝大多数公司一样，采用串行模式开发产品，开发、中试、制造、采购、市场、服务等各部门在产品流程的不同时间点分别开展工作，问题反馈改进流程漫长，对目标理解不一致带来沟通困难，导致产品上市整体周期长、竞争力不足。

华为引进IPD后，采用了跨部门团队负责产品开发，团队汇集研究、开发、测试、市场、服务、财经、采购、质量、风险等各领域代表，通过项目管理方法，让各领域同步开展工作，对产品从开发、测试、生产、上市端到端进行协同管理，共同对项目成功负责。并行工作从根本上解决了产品的可销售性、可制造性、零部件可采购性、可服务性等问题，保障了质量，也极大缩短了开发时间。

跨部门团队是矩阵型组织，其缺点是因成员受项目经理和部门主管双重领导，影响团队效率。为了保证研发效率，华为采用重量级团队模式进行管理。“重量级”的关键是团队负责人对组员具有主要的考评权利，项目经理向各资源部门“买人”，组成团队负责产品开发，再将成员在项目中的考评情况反馈到资源部门，牵引重量级团队形成“重量级”战斗力。项目团队“主战”，资源部门“主建”，形成良性循环。

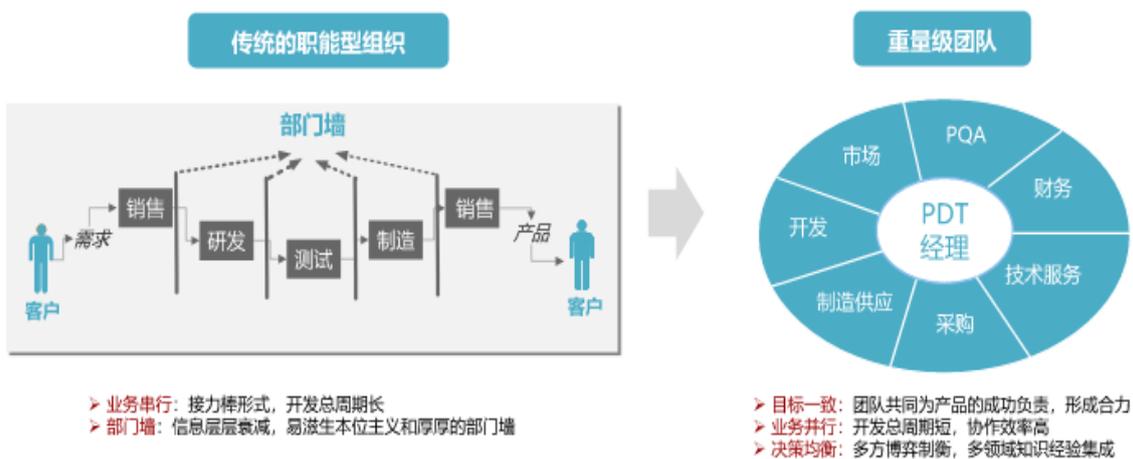


图1 传统的职能型组织与重量级团队对比

3.3 管道管理

在研发工作中，有时候研发人员会感觉同时有很多项目在开展，根本忙不过来，有时候又会感觉没有太多工作可做，同时感觉某些项目价值不大，但由不得不做。华为与其它企业一样，在前期发展阶段碰到过这种资源需求时紧时松、资

源利用效率不够的问题，华为在IPD中找到了“管道管理”这个解决方案。

管道管理是根据开发项目的资源需求情况（管道需求，主要指人力资源），尽早地对资源部门的可提供资源（管道供给）进行平衡管理，以便能够采取相应的措施，满足所有项目不同阶段的人力资源需求，它是一个持续的管理过程。

华为认为，研发的人力资源是有限的，运用管道管理，就是为了让现有的人力资源，发挥最大的潜力价值，而不是缺人就增加人。通过管道管理，统筹各个项目的进度安排，在人力资源需求上做到削峰填谷，并对人力资源作统一调配，发挥资源最大效率。华为在管道管理的实践中，总结了一些有效的平衡措施，分为需求平衡措施、供给平衡措施。其中需求平衡措施有：更改项目范围、更改进度计划、更改交付件质量要求、取消项目、启动项目等。供给平衡措施有：增加、或减少人力资源供应。通过分析华为的经验，管道管理应业务整体框架入手，通过建立全局业务需求管理、分层的资源管理，在计划/预算的执行过程中不断平衡两者矛盾，通过核算对业务、资源、人力动态匹配，达到管道管理的闭环。华为通过管道管理，使开发项目经过喇叭口的过滤后，可以快速、平稳地流过整个产品开发过程，从而缩短产品上市的时间，科学的提高了资源效率。

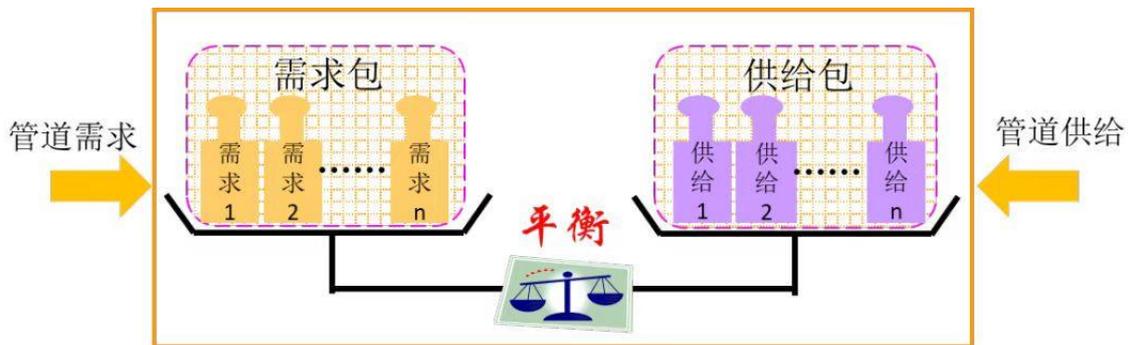


图2 管道管理示意图

3.4 业务分层、异步开发

在华为的IPD体系中，采用了业务分层、异步开发等措施和方法，加速研发效率、研发质量的提升。

业务分层是按业务类型和价值链关系划分层次分类，不同层次交付的开发将按照独立的、有竞争力的、面向客户的业务来组织、管理和考核。通过业务分层

可以把公司的业务进行分类，每个层次有统一的管理模式，每个业务层次有独立的开发流程，各业务层次相对独立运作且相互支撑，各个层次之间有交付责任、依赖关系明确并清晰。

业务分层做好了后，就可以采用“异步开发”的理念，把制约产品实现的一些技术“先行半步”开发出来，以免产品开发过程受限于某些单项技术，影响产品整体开发周期。

异步开发是用来支持华为各业务分层的 product 和技术进行独立的规划与开发的原则和方法。华为通过异步开发的研发模式，在产品和技术规划过程中识别产品开发所基于的平台和能够共享的基础模块，以便提高技术共享，减少开发浪费、缩短产品开发周期、提升产品质量。

基于业务分层和异步开发，华为也提出了“在领先的地方持续投资，在不见优势的地方进行采购”的开发理念。

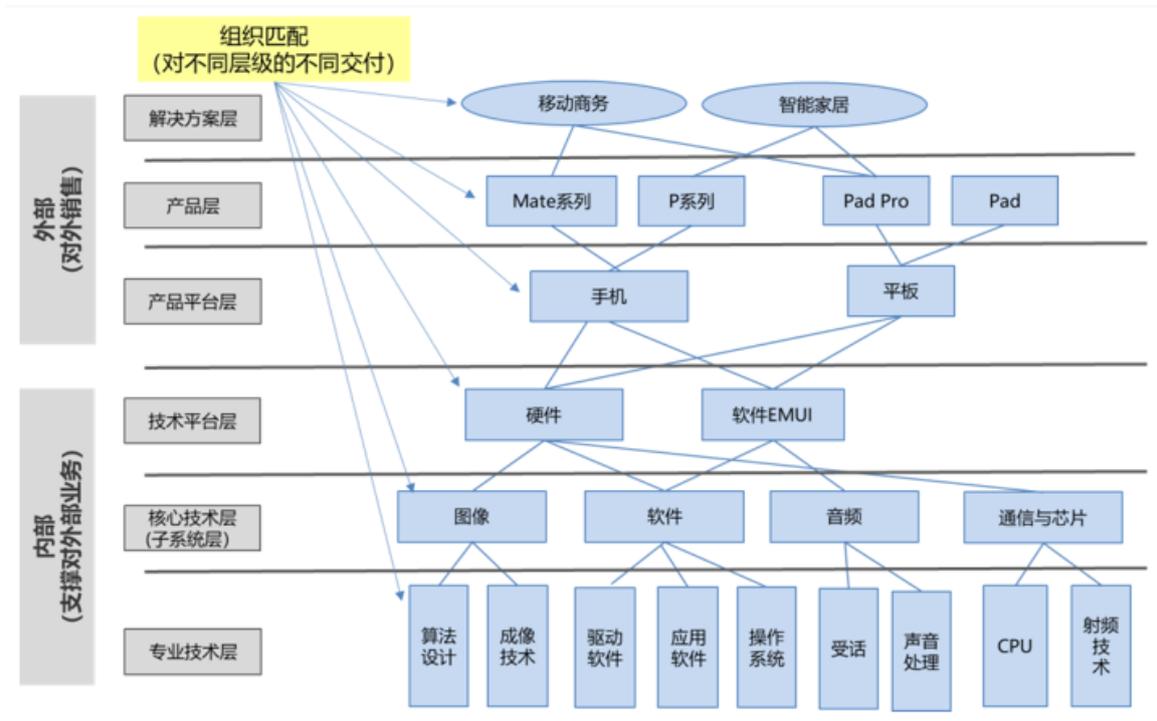


图3 业务分层示意图

3.5 需求管理

需求管理是华为IPD体系的主干流程，它和战略管理、市场管理等一起组成了华为IPD体系的第一个层次，其输出是开发出高质量的Charter（开发计划任务书）。

华为极为强调“以客户为中心”的经营理念，华为的产品开发是以客户需求为导向的，这种导向贯穿了整个产品的开发过程。在华为，需求管理是产品开发的源头，一切在研究、开发上的投入，都是以满足客户需求为基准。华为总结了“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”十六字方针来指导需求管理人员准确理解客户需求。

华为的需求管理在结构上分为需求业务团队、需求管理流程。需求业务团队又分为需求管理团队、需求分析团队。需求管理团队负责需求动态排序与决策、需求承诺管理、重要需求实现进展及风险跟踪管理、需求变更沟通；需求分析团队负责产品领域内需求的分析活动，是管理团队的支撑团队，负责对收到的原始需求进行分析，包括理解、过滤、分类、排序等，并给出最终的需求评估建议和优先级排序。需求管理流程主要由需求收集、分析、分发、实现、验证五大步骤组成，通过以上步骤，对从机会到商业变现全过程中的需求进行有效的管理。不同客户需求分别进入规划、路标、Charter，紧急需求通过规范的计划变更请求进入正在开发的产品或解决方案中，保证了客户的长期、中期、紧急需求都及时得到满足。

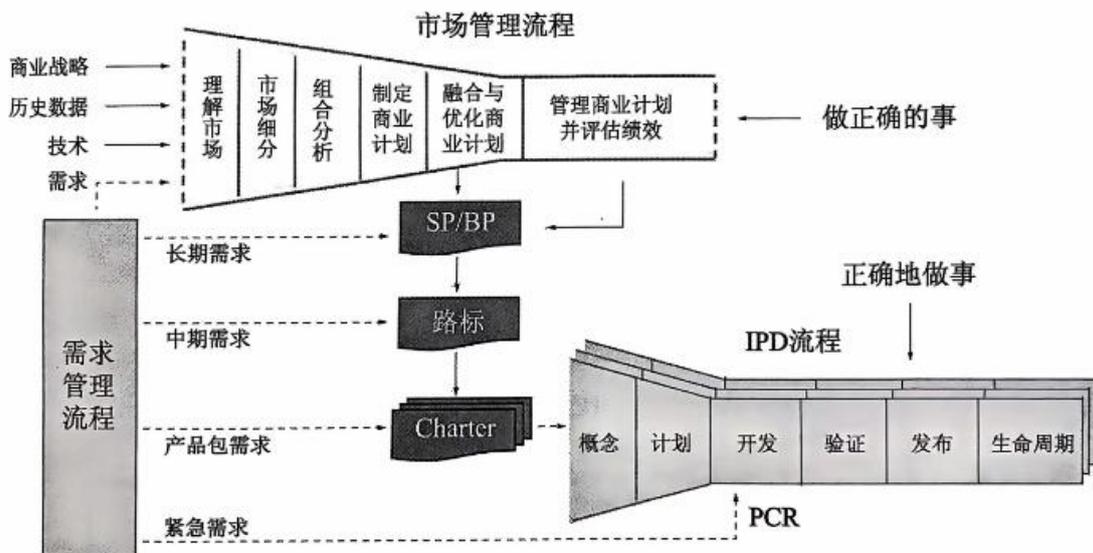


图4 华为IPD体系中需求管理流程的位置

3.6 投资组合管理

很多企业在科研立项时，往往会觉得能做的事很多，很多项目都想投入，所

导致的结果往往是总感觉研发人员数量不够、能力不够、研发费用不够。华为认为，任何公司的资源和能力都有限的，如果产品投资不聚焦，就不能够打造企业的核心竞争力。那么，如何聚焦资源呢，华为主要是通过投资组合管理来解决这个问题的。

华为在经营上提倡战略聚焦，有所为有所不为，坚持主航道，坚持不在非战略机会上消耗战略竞争力量。

华为的投资组合管理是基于市场管理流程，通过对市场发展趋势、竞争态势、客户需求进行分析，结合企业战略诉求分析，对产品进行合理组合和资源配置，形成产品投资组合沙盘，明确产品投资合理的汇报预期、投资方向与策略、投资额度。在华为的市场管理中，还要建立合理的市场细分规则，通过组合分析（包含战略、竞争、财务、差距、SWOT等综合分析）的模式，对准备投资和希望取得领先地位的细分市场进行选择 and 优先级排序，制定可盈利、可执行的商业计划，定义市场成功所需要执行的营销、开发、上市销售等活动。华为的市场管理流程，一般包括理解市场、市场细分、组合分析、制定商业计划、融合和优化商业计划、管理商业计划并评估绩效，这些活动的实施，是实现投资组合管理的关键。

3.7 衡量指标

IPD的核心是把产品开发当做投资进行管理，通过“做正确的事”和“正确的做事”，确保产品聚焦市场需求和实现商业成功。那么，如何从商业的角度对产品开发过程、产品交付质量、不同层次人员或组织的工作绩效进行衡量，在IPD的体系逻辑上就诞生了“衡量指标”。

平衡记分卡的发明人罗伯特·卡普兰说“没有度量就没有管理”。衡量指标对于IPD的有效运行至关重要。

华为IPD研发体系的衡量指标是一些列指标，而且随着其IPD的演进，其衡量指标体系也日渐丰富。华为IPD的衡量指标中有硬指标，如财务指标、产品开发周期；也有软指标，如产品开发过程中技术的成熟度；也有投资效率、新产品收入比重、被废弃的项目数、产品上市时间、产品盈利时间、共用基础模块的重用率

情况等各个方面、各个维度的指标，最终目的还是为了对过程绩效、最终绩效的表征。

在华为，衡量指标被总结出来最常见的两方面作用，一是用于投资分析和阶段评审的参考依据，确保有的放矢；另一方面更为重要，通过对业务完成情况的度量，促进业务能力的提升，以及持续改进。

华为IPD衡量指标体系支撑了华为公司战略，指标体系设计从客户、财务、内部业务、能力成长四个方面进行了考虑，设计时考虑均衡，指标的设计运用了平衡记分卡方法，提供了将战略转化为可操作内容的框架。按指标业务绩效分类，主要有财务指标、质量指标、成本指标、效率指标、时间指标、规模指标、能力指标，这些分类指标的细化指标华为根据实际业务要求进行了取舍和裁剪。

4 总结

IPD拥有成熟的理论体系，在业界也被验证了这个体系当中有很多优秀价值，华为公司更是IPD的“忠实拥趸”，并且华为还总结了很多优秀实践。但IPD理论相对于传统研发模式是复杂的，其完整的体系更适合大型研发企业，通过业务分层、流程分段、细致化的分工，让每一个环节做专业的事，达到效率的极致发挥。作为建材行业重点科研单位、装备集团，如何根据自身的业务特点运用IPD、如何在低利润率的传统行业运行“重量级”的研发体系、如何破除传统的科研院所观念，这些问题都是复杂和有难度的。本人有幸参加了装备集团科研变革提升项目，学习了华为的IPD集成研发体系，结合企业自身的特点产生了一些新的认识，希望通过项目团队的共同努力，让复杂的问题逐渐清晰化，找到能够让IPD成功实施的最佳路径。

辊压机辊面磨损在线监测技术的研究与应用

黄贺^{1,2}, 张文进^{1,2}, 高霖^{1,3}

- (1. 中建材粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051;
2. 合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051;
3. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230051)

0 引言

辊压机是一种高效节能的粉磨设备, 在水泥、矿山、冶金、化工等粉磨行业得到了广泛的推广和应用^[1]。辊压机辊面是辊压机的核心部件, 在生产过程中辊面受物料作用力不可避免的会产生磨损, 辊面的磨损不仅会影响辊压机的稳定性、做功以及产品质量, 严重的还可能导致设备故障和停机, 对企业带来经济损失。

目前, 企业普遍由人工定期开盖检查来判断辊面状态, 这种方式耗时费力, 一些磨损不均匀现象, 单靠人工检测很难分辨。另外, 如辊面圆整度、沿轴向直径等重要尺寸, 更是无法测量, 即使是在辊面堆焊修复后, 也没有相关的测量手段来评断修复质量。并且随着社会发展, 越来越多人愿意从事相关工作。

近些年来, 受相关政策影响, 行业对于企业智慧运维的要求日益提升, 迫切需要提升设备的智能化水平。

据了解, 国内外此前尚没有一种完全的辊面在线监测技术。一些企业通过离线的或间接的手段来分析辊面的磨损状态, 例如国外某公司采用了一种离线式的检测机构, 可在辊压机不生产的状态下, 对辊面进行扫描, 获取相关的磨损数据, 但整个机构需要在专门的位置固定, 预留较大的空间, 每次扫描需要人工开盖并进行扫描设备的安装和定位, 需要具备一定的技术水平人员才能够操作, 难以推广应用。另外, 部分企业尝试通过分析辊轴或机架的振动、辊缝波动或产量波动值等来间接反应辊面状况, 但由于系统干扰因数多, 很难得到准确的分析结果。

本论文受中国建材集团揭榜挂帅项目“水泥基材料数字化研发”(2021YCJS01)支持。

本文提出了一种辊压机辊面磨损在线监测技术，通过激光成像三维重构技术获得辊面的图像以及点云数据信息^{[2][3]}，分析后，得到辊面的运行状况、磨损程度等信息，判断异常情况并推送分析报告，制定修复计划，从而实现计划性停机，将磨损控制在一定范围内，避免磨损情况的加剧。

1 辊面磨损在线监测系统

辊压机辊面在工作时持续旋转，是一种大直径的回转工件，处于封闭的环境下，粉尘较多，采用一般的视觉识别以及传感器检测的手段，难以准确获取辊面的完整状态，本文提出一种基于激光扫描的非接触式的三维重构技术来实现辊面状态的监测，此方法具有高精度、高速度和高分辨率的优点，不易受辊面纹理的影响，相对稳定。

1.1 激光扫描三维重构技术

激光扫描成像技术利用激光束的特性进行测量，采用三角测距方法，原理如图 1(a)所示，激光束通过激光器产生，并经过光学系统聚焦成一束细小的光点。当激光束照射到辊面上时，光线会被辊面反射或散射。接收器会接收到反射或散射的光线，并根据接收到的光信号进行测量和分析，从而得到辊面的三维形状和点云数据。

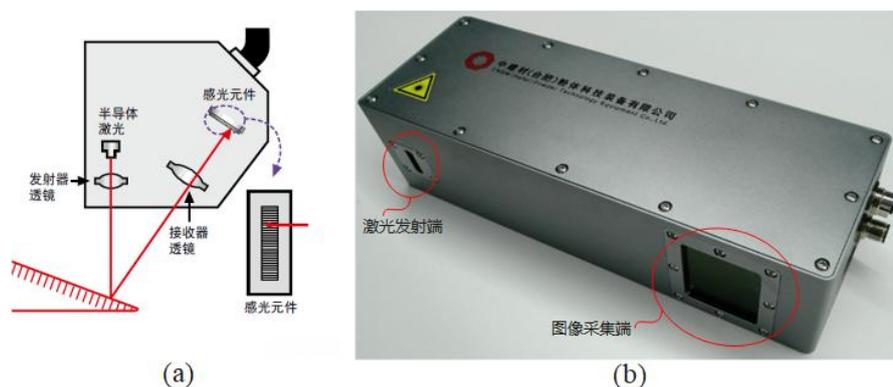


图 1 三维扫描仪

基于此原理本团队开发了一套辊面专用三维扫描仪，如图 1(b)。同时，对扫描仪进行了相关的性能测试，图 2 是针对扫描仪测距精度开展的实验测试，图 2(a) 针对绝对误差进行测试，最终结果显示扫描仪测距的绝对误差为 0.53mm，在实际辊面监测应用中能够极大的还原辊面轮廓形状以及圆周尺寸。图 2(b)针对相对误差

进行测试，相对测距精度对精确还原被测辊面纹理特征具有重要意义，经过测量，扫描仪的相对测距精度误差小于 0.3mm，满足辊面监测的需求。

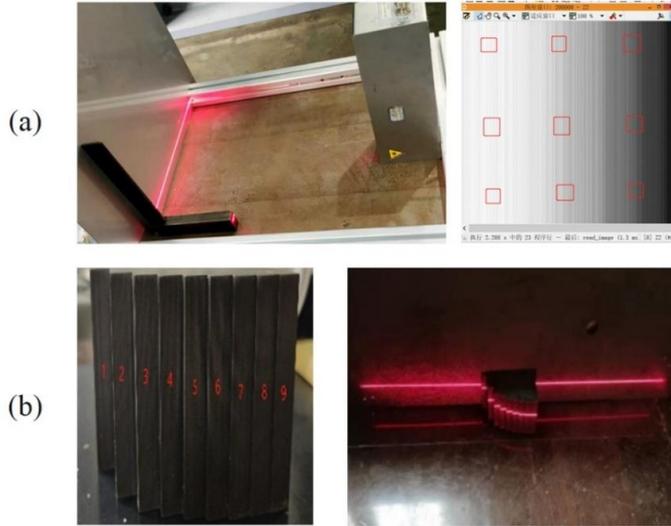


图 2 三维扫描仪精度测试

1.2 辊面磨损在线监测系统

本团队结合实际应用环境以及三维扫描仪装置，开发了一套辊压机辊面在线监测系统，具体的系统构架如图 3 所示，包含辊面专用三维扫描仪、主控系统、触发装置以及运动机构等，其中，三维扫描仪完成对辊面三维图像的拍摄以及数据传输；运动机构负责实现扫描仪的移动定位以及一系列的防尘措施；触发装置实现扫描仪的扫描成像触发启停功能；主控系统由一套 PLC 模组及上位系统组成，进行统一的协调，并将系统扫描结果通过物联网模块发送至云端，通过本系统开发的辊面健康管理系统，实现数据处理、存储和分析以及推送信息等功能。

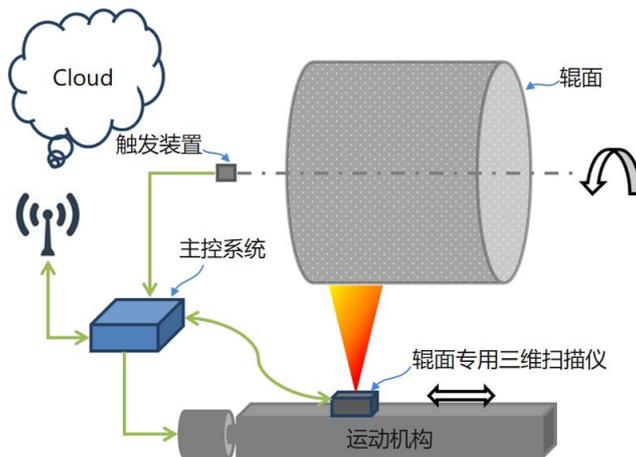


图 3 辊面在线监测系统

2 辊面磨损在线监测系统的应用

目前，本系统已在多个现场取得了应用，成果明显。图 4(a)是某辊压机堆焊辊面磨损在线监测系统应用现场安装示意，系统采用分体式拆装结构设计，拆装过程便捷，便于观察、维护。图 4(b)、4(c)为扫描头拍照过程，运动机构定位后，三维扫描仪发出激光，进行辊面扫描。接下来针对具体的案例以及不同缺陷问题进行讨论。

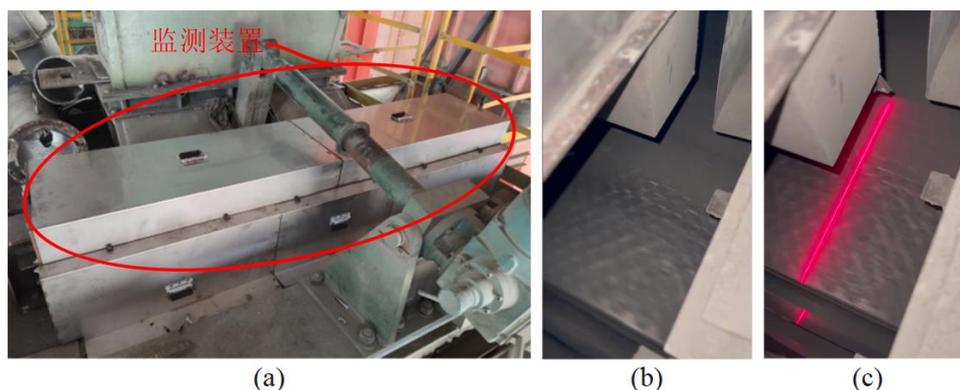


图 4 系统现场布置

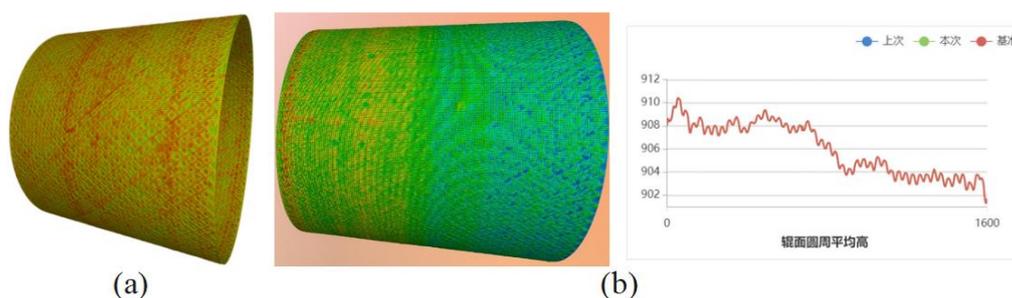


图 5 堆焊辊面三维成像结果

案例 1，图 5 为工厂 A 的堆焊辊面，5(a)是该厂新投产使用的堆焊辊面，能够清晰的看到辊面的菱形花纹及硬质点图像，图像颜色的变化对应辊面上的高点和低点，可以看到硬质点和花纹与辊面其他部位颜色差别相对明显，但整体颜色分布较为均匀，整个辊面无明显磨损现象。图 5(b)为该厂另一台堆焊修复后的辊面，厂家反应堆焊修复后系统不稳定，振动较大，应用此系统后发现，整个辊面从左向右，辊面颜色渐变，说明整体尺寸在辊子轴向有渐变，对比辊面圆周平均高图，发现尺寸从左向右减小，表明辊面呈圆锥形过渡，最大平均直径相差 14mm，现场人员通过将辊面磨削均匀后，振动现象得到明显改善。然而，这种辊面修复

时造成的误差，人工目视却很难察觉，通过此系统，可以直观的观察到的辊面修复锥化缺陷，解决了厂家一大难题。

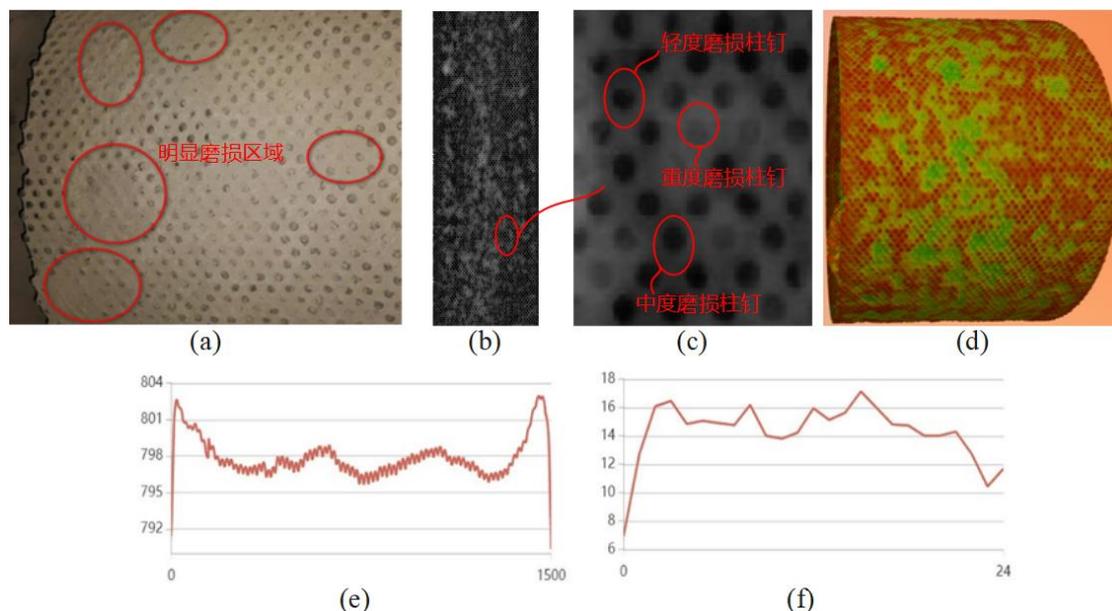


图 6 辊面不均匀磨损结果

案例 2，图 6 为工厂 B 辊压机柱钉辊面监测结果，图 6(b)为生成的辊面平面展开灰度图，通过灰度的对比可以直观的得到辊面的大致状况。图 6(c)为局部放大图，可以看到柱钉的磨损状况，轻度磨损柱钉颜色较深，中度磨损次之，而断钉或重度磨损柱钉颜色较浅。图 6(d)为渲染后的三维图像，可以看到中间区域相比其他区域颜色差异较大，结合图 6(e)圆周方向平均直径曲线，可知整个辊面从左往右，两端高中间低，但并不明显。并且从图 6(f)圆度图上可以看出，辊子的圆度值较大，说明整个辊面表面有些凹凸不平，辊周方向上不是一个平滑的圆形，这与实际观察到的 6(a)情况相符合。通过此系统能够识别辊面上的柱钉状况、辊面的凹坑缺陷等，能够及时为用户提供预警，合理维护辊面，防止更大的损失。

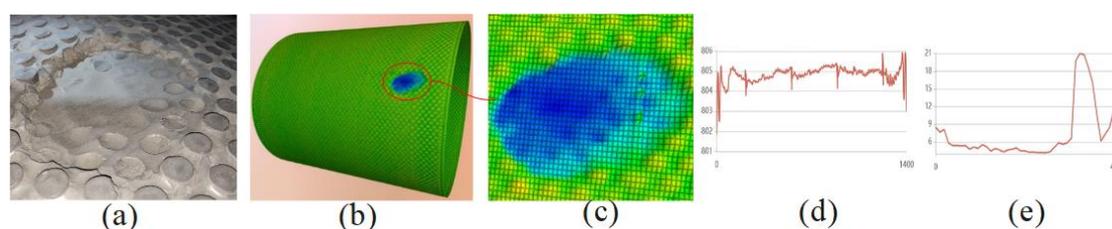


图 7 辊面局部剥落结果

案例 3，图 7 为工厂 C 辊压机柱钉辊面监测结果，从图 7(b)、7(c)可以看到辊

面除了局部剥落外，其他区域较为完好，结合图 7(d)、(e) 图的圆周平均直径以及圆度图可知，辊面其他位置磨损较为均匀，剥落的产生可能是由于金属异物的进入导致，系统在监测到这一现象后，及时的发出报警告知企业，通过对比图 7(a) 实物图，很好的验证了这一结果，避免了剥落位置继续扩大，造成辊面严重受损等问题。通过此系统能够及时识别辊面上的剥落现象，及时为用户报警，尽早发现并进行处理。

此外，本系统中的辊面健康管理系统除了上述功能外，还可以对辊面建立可长期追踪的数据档案，定期推送详细报告，自动计算磨损区域大小、维护耗材用量、工期和费用等，根据辊面磨损特点定制优化维护方案等，这里不再赘述。

3 结语

本文通过对激光扫描三维重构技术的研究，开发了一套辊压机辊面在线监测系统，本系统的研究成果目前已经通过了技术成果鉴定，研究成果具有较大的应用价值，解决了辊压机辊面无人化监测精细化管理的问题，避免了现场恶劣环境对工人的职业健康危害，杜绝了人工检查的安全风险。为企业创造了良好的生产环境，推动行业绿色数字化发展。并且，首次实现辊压机核心部件辊面的数字化映射，提升辊压机单机智能化的水平，可为辊压机整机的数字孪生提供基础数据，完善企业的智能化建设。

参考文献：

- [1] 包玮, 高霖, 丁浩. HFCG 辊压机粉磨系统及其应用[C]. 2014 第六届国内外水泥粉磨新技术交流大会论文集, 2014, 44-52.
- [2] 陈状, 胡永祥, 郝晗. 基于 3D 视觉的线结构光测量算法[J]. 现代信息科技, 2019, 3(22): 33-35.
- [3] Moons T, Van Gool L, Vergauwen M. 3D reconstruction from multiple images part 1: Principles. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2010, pp. 287-404.

基于DEM的废弃混凝土砂浆剥离性能的研究

杨凯^{1, 2}, 叶卫东^{1, 2}, 张伟丽^{1, 2}, 刘畅^{1, 2}

(1. 合肥中亚建材装备有限责任公司, 安徽 合肥 230051;

2. 水泥制造绿色低碳技术安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230051)

0 引言

随着建筑行业的高速发展^[1], 废弃混凝土大量产生, 未能得到及时处理的废弃混凝土将对环境产生破坏。废弃混凝土体积中骨料约占 80%, 它是混凝土骨架的构成物, 对混凝土犹如“骨骼”, 能提高混凝土强度, 改善变形性能, 因此存在再利用价值^[2]。将废弃混凝土骨料上面附着的浆体进行剥离开来再生是主流方式, 剥离程度越大, 再生混凝土压碎值和吸水率越低, 表观密度和堆积密度越大, 再生混凝土性能越好^[3]。不少学者对废弃混凝土再生技术有了一定的研究, 曹芙波等^[4]通过合理的配合比并加入粉煤灰与高效减水剂配制成再生混凝土, 结果表明: 粉煤灰与高效减水剂的加入提高了再生混凝土工作性能与力学性能。Garoline 等^[5]通过对大量来源不同的再生骨料进行研究, 发现了再生骨料具有较大的异质性, 其表面附着的浆体含量与吸水率和密度有很大关系。陈语阳等^[6]研究了再生细骨料残余浆体含量的定量表征方法, 并且结合再生细骨料残余浆体的含量, 探究了三种不同粒段下再生细骨料的残余浆体含量与其基本性能之间的关系。

本文基于“废弃混凝土砂粉制备实验系统”中的立式辊磨机来对废弃混凝土砂浆剥离性能进行研究, 采用离散元数值模拟的方式深入研究立式辊磨机砂-浆剥离过程及性能。

1 仿真模型构建

1.1 废弃混凝土内部结构与组分

如图 1 所示, 废弃混凝土主要组成成分为粗骨料(石), 细骨料(砂)和水泥浆,

项目来源:国家重点研发计划项目, 项目编号:2020YFC1909901, 项目名称:废弃混凝土砂粉再生利用关键技术与装备, 子课题名称:废弃混凝土砂粉高效剥离破碎技术研究。

石和砂并不是直接接触，中间由水泥浆隔开。其中，粗骨料(石)和细骨料(砂)起骨架作用；水与水泥形成水泥浆，水泥浆包裹在骨料外面。

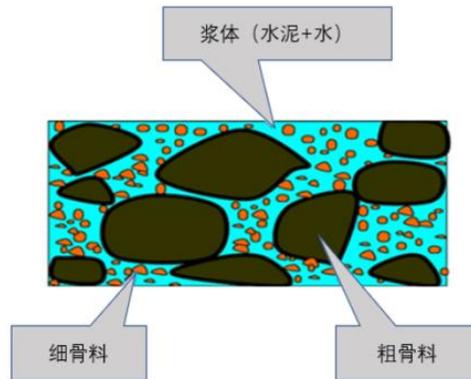


图 1 混凝土内部组成示意图

如表 1 所示为本次研究的废弃混凝土内部组分表，其中石为粗骨料，主要化学成分为 CaCO_3 。砂为细骨料，主要化学成分为 SiO_2 。水和水泥形成的水泥浆，其水化后的主要产物为:水化硅酸钙 C-S-H、氢氧化钙、水化硫铝酸钙、水化铝酸钙和水化铁酸钙等。

表 1 废弃混凝土内部组分

种类	水	水泥	砂	石
质量百分比 (%)	9.24	17.36	32.49	40.91

1.2 废弃混凝土破碎模型的建立

1.2.1 BPM 模型

采用黏结颗粒模型 Bonded Particle Model(BPM)来构建废弃混凝土砂浆颗粒模型^[7]。BPM 模型采用大小不等的球体小颗粒对物料模型进行填充，并在颗粒和颗粒之间添加粘接键(Bond 键)。

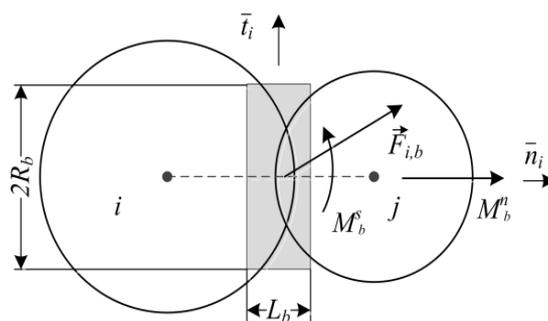


图 2 BPM 模型力学原理示意图

$$\begin{aligned}
 \Delta \vec{F}_b^n &= -k_b^n \cdot A_b \cdot v_n \cdot \Delta t \\
 \Delta \vec{F}_b^s &= -k_b^s \cdot A_b \cdot v_t \cdot \Delta t \\
 \Delta M_b^n &= -k_b^n \cdot J \cdot \omega_n \cdot \Delta t \\
 \Delta M_b^s &= -k_b^s \cdot \frac{J}{2} \cdot \omega_t \cdot \Delta t
 \end{aligned} \tag{1}$$

BPM 模型的力学原理如图 2 所示，灰色方块即为粘结键，颗粒和粘结键构成的 BPM 模型可形象的表现出砂-浆界面过渡区的力学性能，粘结键所受的力和力矩由公式(1)所得：式中： k_b^n 为法向刚度系数； k_b^s 为切向刚度系数； v_n 为法向速度； v_t 为切向速度； ω_n 为法向角速度； ω_t 为切向角速度； A_b 为键的横截面积； J 为键的极转动惯量。粘结键所受来自法向和切向的力由式(2)所得：

$$\begin{cases}
 \sigma = \frac{\vec{F}_b^{n, total}}{A_b} + \frac{2M_b^n}{J} R_b > \sigma_c \\
 \tau = \frac{\vec{F}_b^{s, total}}{A_b} + \frac{2M_b^s}{J} R_b > \tau_c
 \end{cases} \tag{2}$$

由公式(2)可知，当粘结键所受的法向应力大于法向强度($\sigma \geq \sigma_c$)或者剪切应力大于剪切强度($\tau \geq \tau_c$)时，粘结键断裂，颗粒发生破碎。

1.2.2 破碎模型的建立

依据图 1 和表 1 建立废弃混凝土颗粒破碎模型，所建立破碎模型应该准确还原粗、细骨料的正确分布形式以及连接它们的水泥浆，其中，粗骨料也会破碎为小颗粒，所以粗骨料也建立为黏结颗粒模型。随着辊磨的进行，砂浆颗粒在挤压力、摩擦力、剪切力的作用下破碎，细骨料(砂)外表面浆体被剥离，粗骨料(石)外表面的浆体也被剥离，同时粗骨料自身也会破碎成小颗粒，从而实现砂浆剥离，得到再生砂粉。

如图 3 所示，通过二次开发设置离散元软件中颗粒工厂的生成方式，最终建立废弃混凝土破碎模型。其中一万多个小颗粒代表水泥浆体，一个直径为 6mm 的大球代表粗骨料整体模型，为水泥浆体包裹的石。八个直径为 3mm 的小球代

表细骨料整体模型，为水泥浆体包裹的砂。蓝色球体为砂，直径为 2mm；绿色球体为水泥浆，直径为 0.1mm；黄色颗粒为组成石的小颗粒，命名为 particle1，直径为 0.15mm，整体黄色颗粒为石，直径为 5mm，整个废弃混凝土颗粒的直径为 12mm。；

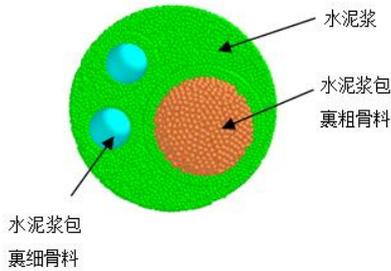


图 3 废弃混凝土破碎模型

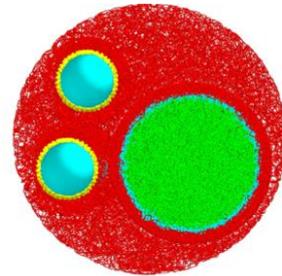


图 4 x=0 截面破碎模型 bond 键

2 参数标定试验

2.1 本征参数

废弃混凝土组成成分为粗骨料、细骨料、水泥浆的本征参数如表 2 所示。

表 2 本征参数

材料	密度/(kg/m ³)	剪切模量/Pa	泊松比
粗骨料	2700	2.09E+08	0.25
细骨料	2650	1.90E+10	0.35
水泥浆	1250	1.86E+08	0.2
钢	7850	7.00E+10	0.3

2.2 基本接触参数

2.2.1 碰撞恢复系数

采用跌落试验测量碰撞恢复系数 e ，试验时，在一定高度为 H 的物料自由下落，通过高速摄像机拍摄物料与另一种物料接触后的反弹高度 h 。本次跌落试验选择形状大小不一的粗骨料、细骨料重复 30 次， e 通过公式(3)计算，其平均值所得各物料间的碰撞恢复系数。

$$e = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (3)$$

2.2.2 静摩擦系数

(1) 颗粒间静摩擦系数的测定

通过测量堆积角 θ 来确定颗粒间的静摩擦系数,如图 2-1 所示,测定的试验方法为将颗粒从漏斗上方慢慢加入,等到物料静止的时候,物料颗粒在水平面上形成堆积体的倾斜角就是堆积角,也叫休止角,根据式(4)计算静摩擦系数 μ 。

$$\mu = \tan \theta \quad (4)$$

(2) 颗粒与钢板间静摩擦系数的测定

颗粒与钢板之间的静摩擦系数是通过滑板试验来测定,通过在滑板上放置颗粒,如图 5 所示,测定滑动之前的最大角度,颗粒与钢板之间的静摩擦系数求解公式与式(4)类似。



图 5 堆积角试验



图 6 滑板试验测试仪

本次堆积角试验、滑板试验选择形状不一的粗骨料、细骨料重复试验 10 次,经进行分析计算后的平均值所得各物料静摩擦系数。

2.2.3 动摩擦系数

在离散元软件中不断设置动摩擦系数进行落料试验,采用试验与实际相结合的方法,如图 7 所示,直至料堆的堆积角与实际落料的堆积角相符合。进行多次落料仿真模拟试验之后,最后得到各物料间的动摩擦系数。

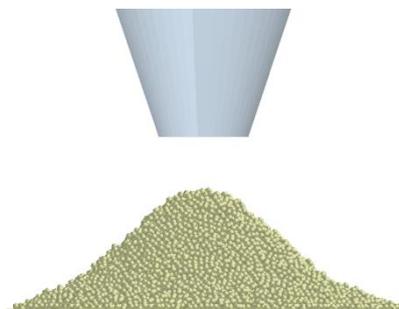


图 7 落料仿真试验

由于水泥浆体积过小,可选择与其材料相同的粗骨料碰撞恢复系数、静摩

擦系数、动摩擦系数代表其数值。最终确定基本接触参数如表 3 所示。

表 3 基本接触参数

接触对象	碰撞恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
粗骨料与粗骨料	0.45	0.48	0.18
细骨料与细骨料	0.2	0.5	0.01
粗骨料与钢	0.28	0.48	0.08
细骨料与钢	0.25	0.6	0.18
粗骨料与细骨料	0.35	0.35	0.02

2.3 粘结键参数

如图 8 所示，采用单轴压缩试验验证 BPM 参数选择的正确性，测得其应力应变曲线，使得实际试验与仿真试验曲线相接近。



图 8 单轴压缩试验

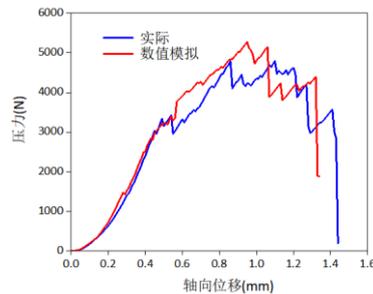


图 9 实际与数值模拟应力应变对比图

如表 4 所示，通过对粘结参数的不断调整，并使得误差在 10% 以内，最终获得较为准确的粘结键参数数值，其应力应变对比如图 9 所示。

表 4 粘结键参数表

粘结键类型	法向刚度 (N/m^3)	切向刚度 (N/m^3)	法向强度 (Pa)	切向强度 (Pa)
particle1 与 particle1	6.00E+11	3.00E+11	4.00E+07	1.00E+07
particle1 与水泥浆	2.55E+10	1.70E+10	1.60E+08	1.20E+08
细骨料与水泥浆	7.50E+10	4.50E+10	1.00E+08	5.00E+07
水泥浆和水泥浆	1.50E+10	1.20E+10	2.00E+07	9.00E+06

3 废弃混凝土砂浆剥离过程数值模拟

3.1 HRM400 立式辊磨机仿真模型以及工作过程

如图 10 所示，建立简化后的 HRM400 立式辊磨机模型，其中磨盘半径为 300mm，磨辊半径为 170mm。立式辊磨机粉磨区细节图如图 11 所示，废弃混凝土颗粒在此处被粉磨破碎，磨盘磨辊最小间隙(MS)和磨盘的曲率半径 R 构成了

粉磨区的腔型，对粉磨破碎效果有着重要的影响。

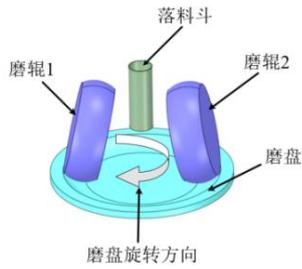


图 10 立式辊磨机简化模型

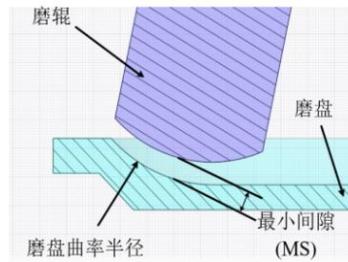


图 11 粉磨区细节图

物料通过落料斗以一定的速率落到旋转磨盘的中心，当达到所设置的颗粒替换时间时，物料被替换为废弃混凝土砂浆颗粒模型，并在各组分量间形成粘结键。同时砂浆颗粒模型随着磨盘旋转向边缘移动分散，当进入砂浆剥离轨道时候，受到自转的磨盘、磨辊的挤压、剪切和摩擦，最终被剥离破碎成小颗粒，再不断的投料，研磨破碎后形成料床，如图 12 所示。

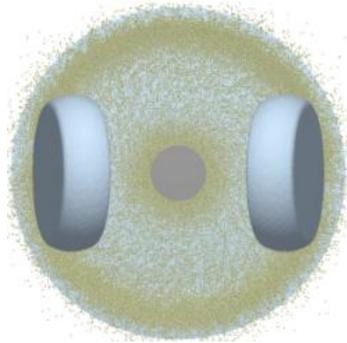


图 12 料床形成图

3.2 模拟结果与试验结果分析

如表 5 所示，磨辊 2 的受力相比较磨辊 1 要小一点，由于磨盘是顺时针旋转，使得砂浆颗粒先在磨辊 1 与磨盘间隙处发生初始破碎，此时磨辊 1 受到的压力最大，随后在磨盘的转动下，发生初始破碎的砂浆颗粒才运动到磨辊 2 与磨盘的间隙处再发生破碎，所以，磨辊 2 所受到的压力要小于磨辊 1，对比发现模拟结果与试验结果误差范围不超过 10%，属于可以接受的范围。

表 5 试验与仿真比较表

参数	模拟结果	试验结果	相对误差/%
磨辊 1 压力	9.63kN	10.4kN	7.4
磨辊 2 压力	9.56kN	10.3kN	7.2
电机功率	2.79kW	3.09kW	9.7

如图 13 所示为落料斗落入到磨盘中心的大颗粒被替换为废弃混凝土砂浆颗

粒后，在磨盘旋转产生离心力的作用下，移动到磨盘磨辊处的情况。如图 14 所示为颗粒在磨盘磨辊间隙处颗粒之间粘结键的破碎情况，图中红色粘结键为尚未破碎的粘结键，黑色粘结键代表粘结键已经发生破碎，图中明显看出大量颗粒已经发生了破碎(此处有大量黑色粘结键)。并且随着磨盘磨辊间隙减小，破碎的粘结键逐渐增多。



图 13 磨盘磨辊间隙处颗粒群

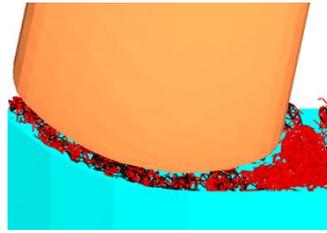


图 14 粘结键破碎情况

如图 15 所示，粗骨料大部分已经被破碎成更细小的颗粒(图中黄色部分颗粒)，大部分水泥浆颗粒已经从废弃混凝土砂浆颗粒中剥离了出去(图中绿色部分颗粒)。经过 HRM400 立式辊磨机破碎剥离后，得到再生砂粉(图中蓝色颗粒和黄色颗粒)。

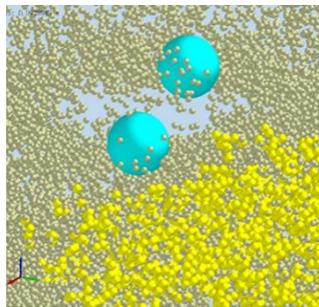


图 15 离散元数值模拟出的再生砂粉

3.3 剥离性能评价指标

(1) 砂浆剥离率

在 HRM400 立式辊磨机的数值模拟过程中，引进剥离率统计各种不同类型粘结键的断裂情况。如公式(5)所示。

$$S = \frac{N}{M} \times 100\% \quad (5)$$

式中： S 为砂浆剥离率 (%)； N 为断裂的 particle1 与水泥浆、细骨料与水泥浆、particle1 与 particle1 粘结键的数量之和； M 为 particle1 与水泥浆、细骨料与水泥

浆、particle1 与 particle1 粘结键的总数量。

(2) 电机功率

电机功率是指磨盘旋转消耗的功率，由于磨盘的扭矩图在一定范围内波动，因此通过磨盘的平均扭矩来计算出磨盘转动的平均功率。如公式(6)所示。

$$P = \frac{Tn}{9550} \quad (6)$$

式中： P 表示磨盘旋转消耗的平均功率； T 为平均负载扭矩； n 为磨盘转速

4 结构参数对砂浆剥离性能的影响

4.1 磨辊个数对砂浆剥离性能的影响

立式辊磨机磨辊个数通常设置为 1~4 个，为确定合适的磨辊个数，分别选取 1、2、3、4 个来进行单因素法研究变化规律，其余参数保持不变。如图 16 所示，一个磨辊时立式辊磨机破碎性能有限，大量颗粒没有得到完全剥离后就被甩出磨盘。随着磨辊数量的增长，颗粒受到碾压破碎的次数也逐渐增加，颗粒的剥离破碎程度增大。当磨辊数为 4 的时候，大量颗粒集中在中间，说明过多的磨辊个数会使得磨辊的排料有影响，降低其剥离率。

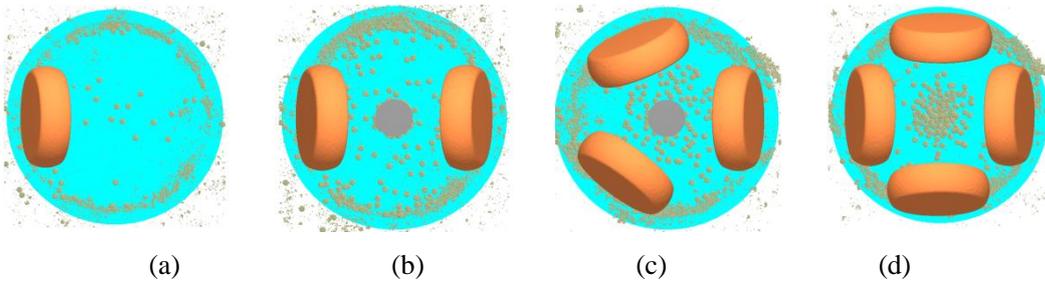


图 16 不同磨辊个数下模拟情况

如图 17 所示，增加立式辊磨机的磨辊个数，立式辊磨机的剥离率先增大后减小，当增加到 3 个磨辊后，废弃混凝土受到碾压的次数显著增加，立式辊磨机砂浆剥离率显著增大。当增加大到磨辊个数为 4 时，颗粒堆积到磨盘中央，降低了废弃混凝土的砂浆剥离率。随着磨辊数的增加，颗粒经过磨辊的次数增加，磨盘带动废弃混凝土颗粒转动所做的功增加。而在 4 个磨辊的时候，电机在颗粒剥离破碎所做的功减小，导致电机功率下降。

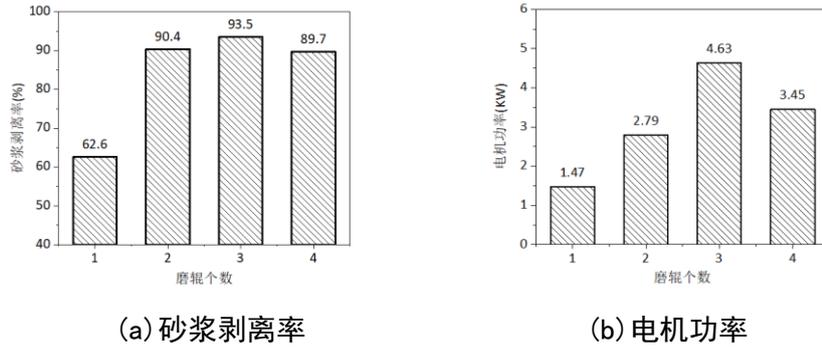


图 17 磨辊个数对砂浆剥离率和电机功率的影响

4.2 磨盘半径对砂浆剥离性能的影响

选择磨盘半径为 280mm, 300mm, 320mm, 340mm, 360mm, 其余参数保持不变。如图 18 所示, 进行单因素分析法研究变化规律。随着磨盘半径的增大, 砂浆剥离率逐渐降低, 这是因为磨盘半径的增大, 在喂料量不变的情况下, 混凝土颗粒形成的料床颗粒厚度会减小, 密实度会降低, 颗粒在料床之间所受的力减小, 砂浆剥离率降低。而立式辊磨机大部分功率用于砂浆剥离, 随着砂浆剥离率降低, 电机功率也会降低。

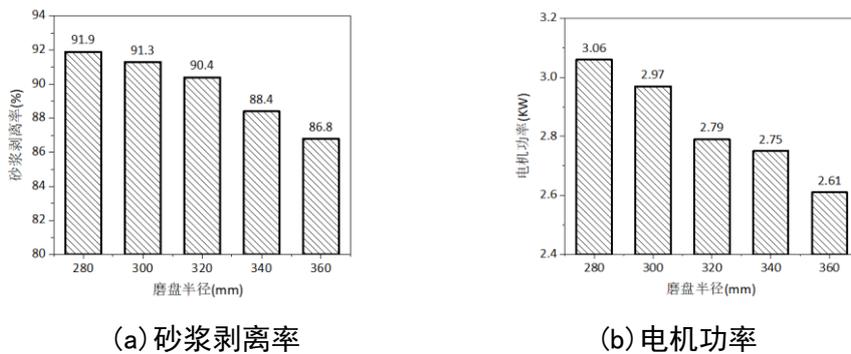


图 18 磨盘半径对砂浆剥离率和电机功率的影响

4.3 磨盘磨辊最小间隙(MS)对砂浆剥离性能的影响

选择 MS 为 3mm, 5mm, 7mm, 9mm, 11mm 进行建模仿真, 其余参数保持不变, 如图 19 所示, 增大 MS 会使得立式辊磨机的砂浆剥离率和电机功率减小。因为在立式辊磨机料床高度不变的情况下, 增大 MS 会使得立式辊磨机料床密实度减小, 颗粒在料床受力不够均匀且最大压力减小, 导致砂浆剥离率和电机功率同时减小, 但是 MS 也不能过小, 这样会使得颗粒在磨盘磨辊受力过大, 会对立式辊磨机造成严重损害。

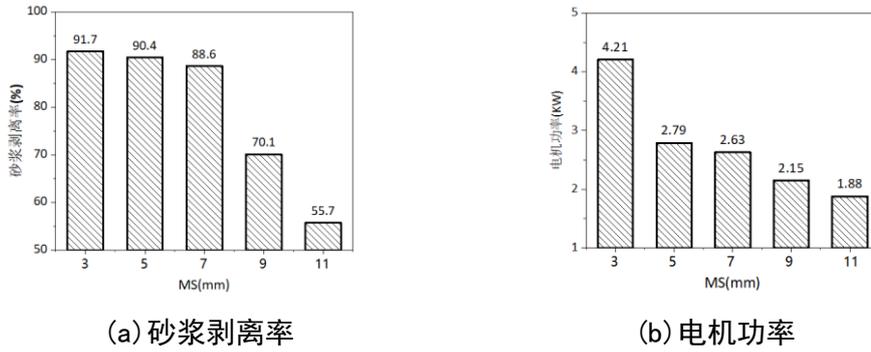


图 19 MS 对砂浆剥离率和电机功率的影响

5 结论

(1) 依据废弃混凝土内部结构和组分，建立了废弃混凝土破碎模型，并且进行了基本参数的试验测试，测得碰撞恢复系数、静摩擦系数、动摩擦系数。通过单轴压缩试验对比分析离散元仿真与实际的误差，验证了粘结键参数数值的可靠性。

(2) 建立了 HRM400 立式辊磨机仿真模型，测得两个磨辊压力和电机功率，仿真数据和试验数据误差在合理范围内，验证了数值模拟的正确性。

(3) 结构参数对砂浆剥离性能有重要影响，随着磨辊个数的增加，砂浆剥离率和电机功率均先增大再减小；增大磨盘半径，砂浆剥离率和电机功率均减小；增大磨盘磨辊间隙(MS)，砂浆剥离率和电机功率均减小。

参考文献：

- [1]程欢,黄法礼,李化建等.铁路工程废弃混凝土资源化再利用现状[J].铁道建筑,2021,61(11):1-5.
- [2]Sasanipour H, Aslani F. Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117540.
- [3]肖建庄,张航华,唐宇翔等.废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J].科学通报,2023,68(05):510-523.
- [4]曹芙蓉,邵剑涛,王晨霞等.废弃混凝土再利用技术性能研究[J].混凝土,2020(09):101-103.
- [5] A C S R , A R D T F , A M A , et al.Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study[J].Journal of Cleaner Production, 2019, 208:589-601.
- [6]陈语阳. 废弃混凝土再生细骨料残余浆体含量特性指标的研究[D].合肥工业大学,2022.
- [7]Chen Z, Wang G, Xue D. An approach to calibration of BPM bonding parameters for iron ore[J]. Powder Technology, 2021, 381: 245-254.
- [8]刘曼曼. 考虑粗骨料破碎的混凝土力学特性细观模拟[D].天津大学,2020.

限流电抗器在国外水泥生产线15MW 燃煤电站的应用探讨

邵芹芹

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

在电力系统运行中,相与相之间或相与地之间发生短路时流过的短路电流会对电力系统的正常运行造成严重的影响和后果。如何将短路电流水平限制在合理的范围内,是电气主接线设计、设备选型以及继电保护整定的重要内容之一。发电厂中通常采用的限制短路电流措施有装设限流电抗器、采用低压侧为分裂绕组的变压器、采用高阻抗的发电机/变压器等方式增大系统阻抗,从而减小短路电流。本项目选用限流电抗器的方式限制短路电流。

当电力系统发生短路故障时,利用限流电抗器的电感特性,限制系统短路电流,不需要提高原有电气设备的动、热稳定或断路器的开断能力,节约设备投资。同时利用限流电抗器的电感特性,还可以提高系统残压。

1 项目基本概况

本项目总降压站设有两台 32MVA 132kV/6.3kV 主变压器分列运行,同时为本项目两条 4250tpd 水泥熟料生产线的生料磨系统中压站的两段母线供电,再由生料磨中压站供电给厂区其他中压站。主变高压侧电压为 132 kV 外桥接线,低压侧电压为 6.3kV 单母分段接线,两燃煤电站发电机组容量均为 15MW6.3kV,发电机机端通过电缆与总降压站主变低压侧母线连接并实现并网运行,其中 1#燃煤电站发电机在主变低压侧的母联上接入系统,2#燃煤电站发电机在主变低压侧 II 段母线接入系统。发电机与总降压站主接线系统图如下图所示。

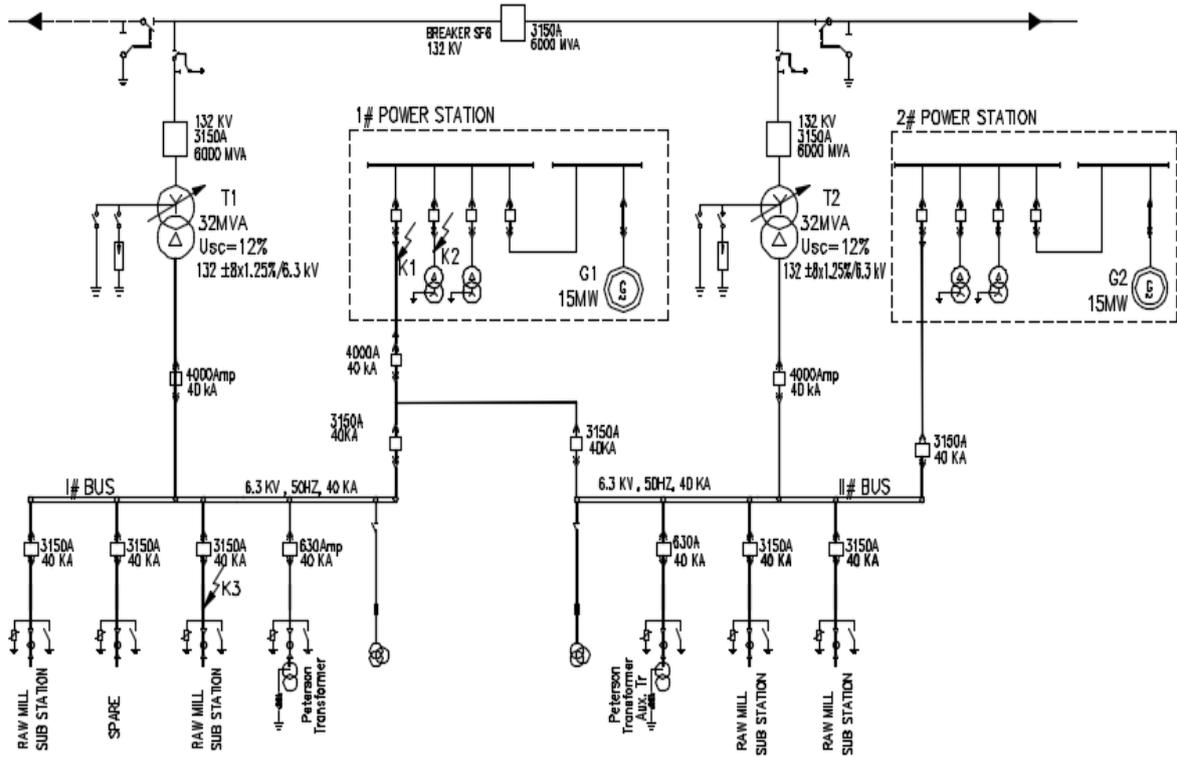


图 1 电站与总降压站主接线系统图

本项目主变 6.3kV 侧断路器开断能力为 40kA, 峰值耐受电流为 100kA。在 1# 燃煤机组 15MW 发电机接入系统前, 主变低压侧的短路电流为 23.38kA, 次暂态冲击电流为 59.63kA, 动热稳定校验均满足要求; 在 1#燃煤机组 15MW 发电机接入系统后, 主变低压侧的短路电流为 38.13kA, 次暂态冲击电流为 97.22kA, 动稳定校验基本满足要求; 但是在 2#燃煤机组 15MW 发电机接入系统后, 系统短路电流将继续增大, 并超过原有电气设备的动稳定限值。

系统最大运行方式下两台 15MW 发电机组与主变并列运行, 因此选取发电机出线 6.3kV 母线段并网线(短路点 K1)、站用变高压侧(短路点 K2)以及主变低压侧出线(短路点 K3)处进行短路计算及校验设备动稳定、热稳定, 以及确定 1#、2#燃煤电站发电机并网线处限流电抗器的参数, 将短路电流限制在原有电气设备的动稳定限值范围内, 避免 6.3kV 系统大范围的电气设备更换。

2 短路电流计算

最大运行方式下, 系统发生三相短路故障时的正序网络如图二所示:

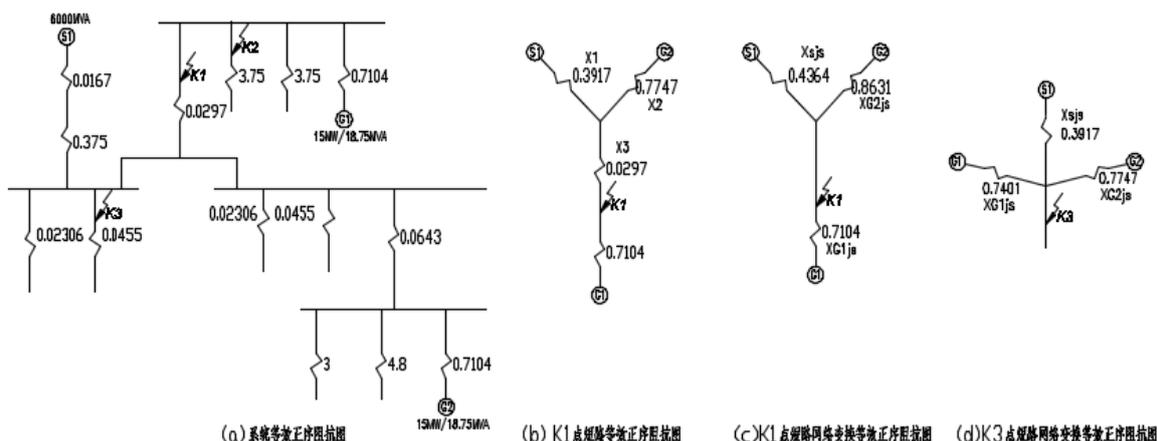


图 2 系统三相短路故障时正序网络阻抗图

(1) 各电源提供给短路点的短路电流标么值见下表：

表 1 各电源提供给短路点的短路电流标么值

电源	计算式	$I^{*''}$	$I^{*0.1}$	$I^{*0.2}$	I^{*4}
系统 S1	$1/X_{sjs}$	2.41	2.41	2.41	2.41
发电机 G1	查图	8.9	6.4	5.2	2.52
发电机 G2	查图	7.65	5.65	4.75	2.51

注：发电机提供给短路点的短路电流标么值通过《电气工程设计手册火力发电厂电气一次设计》图 4-6~10 曲线查得。

(2) 各电源供给短路电流周期分量有效值见下表：

$$\text{系统 S1 的基准电流为 } I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 9.16 \text{ kA}$$

其中： S_j —基准容量，本项目取 100MVA；

U_j —基准电压，本项目取 6.3kV；

$$\text{发电机 G1, G2 的基准电流为 } I_{jG} = \frac{P_G}{\sqrt{3} \times \cos \phi \times U_j} = \frac{15}{\sqrt{3} \times 0.8 \times 6.3} = 1.7184 \text{ kA}$$

其中： P_G —发电机额定容量，本项目为 15MW；

$\cos \phi$ —发电机额定功率因数，本项目为 0.8；

表 2 各电源提供给短路点的短路电流周期分量有效值

电源	$I^{*''}$ (kA)	$I^{0.1}$ (kA)	$I^{0.2}$ (kA)	I^4 (kA)
系统 S1	22.04	22.04	22.04	22.04
发电机 G1	15.29	11.00	8.94	4.33
发电机 G2	13.15	9.71	8.16	4.31
合计	50.48	42.75	39.14	30.69

根据《火力发电厂电气一次设计手册》表 4-13 不同短路点冲击系数的选择，系统 S1、G1 发电机相当于短路发生在发电机机端，冲击系数 Kch 取 1.9，冲击电流 $i_{ch}=2.69I''$ ；系统 S1 及 G2 发电机相当于短路发生在远离发电厂且总阻抗较小，冲击系数 Kch 取 1.8，冲击电流 $i_{ch}=2.55I''$ 。根据表 2 中的计算结果，冲击电流如下：

K1 点的短路冲击电流为 $2.55 \times (22.04+13.15) = 97.35\text{kA}$ ；

K2 点的短路冲击电流为 $2.55 \times (22.04+13.15) + 2.69 \times 15.29 = 130.87\text{kA}$

3 动稳定、热稳定校验

(1) 动稳定校验条件：

电气设备允许的极限通过电流峰值 (i_{df}) 应大于等于短路冲击电流峰值 (i_{ch})

$$i_{ch} \leq i_{df}$$

对本项目断路器和电流互感器的动稳定校验结果如下表：

表 3 真空断路器和电流互感器动稳定校验

序号	电器名称	型号及规格	峰值耐受电流 i_{df} (kA)	计算峰值电流 i_{ch} (kA)	校验结果
1	真空断路器	VD4-12/2500	100	97.35	√
2	真空断路器	VD4-12/1250	100	130.87	×
3	电流互感器	LZZBJ9-10A1 150/5	80	130.87	×
4	电流互感器	LZZBJ9-10A1 200/5	112.5	130.87	×
5	电流互感器	LZZBJ9-10A1 250/5	112.5	130.87	×
6	电流互感器	LZZBJ9-10E1 2500/5	160	97.35	√

注：① 对真空断路器分别选取短路分段能力 31.5 kA 和 40kA 两种规格进行校验；

② 真空断路器参数由真空断路器 VD4 样本查得；电流互感器参数由互感器厂家样本查得；

(2) 短路的热稳定校验：

$$Q_t < I_{th}^2 t$$

式中 I_{th} —时间 t 内设备允许通过的热稳定电流有效值，kA；

t —设备允许通过的额定短时耐受电流的时间，S；

Q_t —在计算时间 t 内，短路电流的热效应， kA^2/S ；

检验设备短路热稳定所用的计算时间 t 按下式计算：

$t = \text{主保护动作时间} + \text{断路器开断时间} (\text{断路器固有分闸时间} + \text{断路器燃弧持续时间}) = 45 + 60 + 15 = 120\text{ms}$ ，本项目计算短路电流持续时间取 150 毫秒。

表 4 真空断路器和电流互感器热稳定校验

序号	电气设备名称	型号及规格	短时耐受电流/短时耐受时间 (kA/S)	$I_{th}^2 t$ (kA^2/S)	Q_t (kA^2/S)	校验结果
1	真空断路器	VD4-12/2500	31.5/4	3969	450.67	√
2	真空断路器	VD4-12/1250	31.5/4	3969	880.96	√
3	电流互感器	LZZBJ9-10A1 150/5	31.5/1	992.25	880.96	√
4	电流互感器	LZZBJ9-10A1 200/5	45/1	2025	880.96	√
5	电流互感器	LZZBJ9-10A1 250/5	45/1	2025	880.96	√
6	电流互感器	LZZBJ9-10E1 2500/5	100/1	10000	450.67	√

(3) 校验结果

由表 3、表 4 计算结果可知，本项目断路器和电流互感器的热稳定校验均满足要求，但动稳定校验中断路器和电流互感器均有未通过校验的设备，特别是 K2 点短路时即便选择 40kA 的真空断路器也动稳定校验也不满足；因此若要断路器及电流互感器的动稳定校验均通过，需要将 K2 点的短路峰值电流限制在 80kA 以下，故 K1 点的短路峰值电流应为 $80 - 2.69 \times 15.29 = 38.86\text{kA}$ ，对应 K1 点 0 秒短路次暂态电流 $I'' = 38.86 / 2.55 = 15.24\text{kA}$ ，即被电抗器限制后所要求的短路次暂态电流。

4 限流电抗器的选择

(1) 电抗器额定参数的选择

本项目限流电抗器额定电流应按回路最大可能工作电流选择（发电机额定电流为 1718A），K1 点短路时流过的冲击电流为 97.35kA，4S 短路电流为 30.69kA，

根据《电气设备手册》选择干式空芯限流电抗器型号为 XKK-6-2000, 其额定参数的选择如下:

电抗器的额定电压 $U_{ek}=6.3\text{kV}$

电抗器的额定电流 $I_{ek}=2.0\text{kA}$

电抗率的额定频率 50HZ 动稳定电流峰值 102kA

4S 热稳定电流 40kA

(2) 电抗器电抗率的选择

选型公式如下:

$$X_K\% \geq \left(\frac{S_j}{S''} - X_{*j} \right) \frac{U_j I_{ek}}{I_j U_{ek}} \times 100\%$$

$$= \left(\frac{100}{166.3} - 0.273 \right) \frac{6.3}{9.16} \frac{2}{6.3} \times 100\% = 7.16$$

其中: I_j —基准电流, kA, 同上 $I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} = 9.16\text{kA}$;

S'' —被电抗器限制后所要求的零秒短路容量, MVA;

$$S'' = \sqrt{3}U_j I'' = 1.732 \times 6.3 \times 15.24 = 166.3\text{MVA}$$

X_{*j} —以 U_j, I_j 为基准, 从网络计算至所选电抗器前的电抗标么值;

$$X_{*j} = \frac{X_{sjs} \times X_{G2js}}{X_{sjs} + X_{G2js}} = \frac{0.4158 \times 0.7961}{0.4158 + 0.7961} = 0.273$$

根据以上计算结果, 选择电抗率为 8% 限流电抗器的 XKK-6-2000-8。

(3) 电压损失校验

正常情况下, 电抗起的电压损失不得大于母线额定电压的 5%, 电抗器的电压损失计算公式如下:

$$\Delta U\% = X_K\% \times \frac{I_g}{I_{ek}} \times \sin \phi = 8 \times \frac{1718}{2000} \times 0.6 = 4.12\% < 5\% \text{ 满足要求}$$

其中: I_g —正常通过的工作电流, A

ϕ —负荷功率因数 (一般取 $\cos \phi = 0.8$, 则 $\sin \phi = 0.6$)

5 增加限流电抗器后动稳定校验

串联电抗器后，各电源供给短路电流周期分量有效值见下表：

表 5 增加限流电抗器后各电源供给短路电流周期分量有效值

电源	I''	$I_{0.1}$	$I_{0.2}$	I_4
系统 S1	9.41	9.41	9.41	9.41
发电机 G1	15.29	11.00	8.94	4.33
发电机 G2	5.41	4.55	4.3	3.95
合计	30.12	24.96	22.64	17.69

根据以上计算结果：K1 点的短路冲击电流为 65.14kA，K2 点的短路冲击电流为 78.94kA，表 3 中各断路器及互感器的峰值耐受电流均大于各自短路点的短路冲击电流，动稳定满足要求。

6 主变低压侧动稳定校验

最大运行方式下，在 1#、2#燃煤电站发电机并网线处未增加限流电抗器前，主变低压侧 K3 处短路的次暂态短路电流为 50kA，次暂态冲击电流为 127.6kA，主变低压侧出线断路器动稳定校验不满足要求；增加电抗率分别为 8%和 10%的限流电抗器后 K3 处的次暂态短路电流及冲击电流、压降如下表所示：

表 6 不同电抗率的次暂态短路电流、冲击电流及压降

电抗率	次暂态短路电流 (kA)	次暂态冲击电流 (kA)	电压损失 (%)
8%	40.08	104.76	4.12 ($\sin \phi=0.6$)
10%	39.71	101.26	5.15 ($\sin \phi=0.6$) 3.75 ($\sin \phi=0.436$)

由表 6 可知，电抗率为 8%和 10%的情况下系统短路电流差别不大，实际运行中功率因数 $\cos \phi$ 一般大于 0.9 (对应 $\sin \phi=0.436$)，电抗率为 10%时的电压损失不超过 5%也满足要求，同时考虑限流电抗器的额定参数 (4S 热稳定电流 40kA，动稳定电流峰值 102kA)，因此最终确定选择两台限流电抗器的电抗率为 10%。

综上，通过在 1#、2#燃煤电站发电机并网线处加装限流电抗器可以将本项目的短路电流限制在其他电气设备的动、热稳定或断路器的开断能力范围内，并

使母线电压不至于过低，保障系统及设备的安全运行。

7 结语

当电力系统发生短路故障时，短路电流可能会非常大，对电力设备和系统造成严重的损害。通过在系统中加装限流电抗器，可以有效地限制短路电流的大小，从而减轻对电力设备和系统的冲击，确保电力系统的稳定运行。

由于限流电抗器能够降低短路电流的水平，因此不需要更换原有电气设备以提高动、热稳定要求或断路器的开断能力，还可以降低新建部分对电力设备和系统的设计要求。例如在真空断路器选型时，因不需要承受较大的短路电流而可以选用分段能力为 31.5kA 或 25kA 的断路器，相较分段能力为 40kA 的断路器，可以降低设备选型规格，减少设备投资。

因此，限流电抗器不仅可以降低设备选型规格、节约投资，还可以降低故障发生的概率，减少因故障而导致的停电时间和经济损失，进一步提高企业的经济效益。但是限流电抗器在限制短路电流的同时也有电能损耗以及平面布置要求，因此，在电力系统设计中，需要综合考虑项目情况，合理选择和使用限制短路电流的措施。

参考文献：

- [1] 王杰. 主变低压侧加装限流电抗器的方案研究. 冶金动力. 1006-6764 (2017) 03-0038-03
- [2] 郭和彩. 变电站10kV母线短路电流限制措施分析. 内蒙古电力技术
- [3] 《电气设备手册》. 黎文安. 中国水利水电出版社.
- [4] 《火力发电厂电气一次设计手册》. 中国电力工程顾问集团有限公司. 中国电力出版社.
- [5] 《电力工程设计手册—变电站设计》. 中国电力工程顾问集团有限公司. 中国电力出版社.
- [6] 郭萌, 查申森, 卫银忠. 220kV变电站限流电抗器配置方案研究. 电力勘测设计. 1671-9913 (2013) 01-000-06

水泥工厂设计中建筑防火间距问题的探讨

张媛媛

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 引言

在水泥工厂建筑设计过程中, 需要进行科学的防火设计工作。通过对建构筑物进行合理布局和设置防火间距, 可以防止火灾在相邻车间之间蔓延, 合理利用和节约土地, 并为人员疏散和灭火救援提供条件, 减少火灾影响。

《水泥工厂设计规范》GB50295-2016 附录 A 给出了主要车间及建(构)筑物的生产火灾危险性类别、耐火等级及防火间距要求。观察表格可知, 对于单多层的建构筑物之间的防火间距, 即使是火灾危险性较低的丁戊类厂房仓库, 也是比一般单多层民用建筑之间要求的防火间距大的, 基本都在 10 米及以上。然而有时因用地紧张, 加之工艺流程需要, 建筑间的间距无法满足附录 A 要求。如何合理设置间距, 满足总图用地和工艺生产功能的需要, 成为建筑消防设计的一个难题。

文章针对水泥工厂建筑防火设计具体工作过程中遇到的防火间距问题, 结合《建筑设计防火规范》GB50016-2014(2018 年版)(以下简称《建规》)和《建筑防火通用规范》GB55037-2022(以下简称《火通规》), 尝试从原理入手对规范的运用进行分析探讨。

2 防火间距的影响因素

影响防火间距的因素很多, 如热辐射、热对流、风向、风速、外墙材料的燃烧性能及其开口面积的大小, 室内堆放的可燃物种类及数量, 相邻建筑物的高度, 室内消防设施情况, 着火时的气温及湿度, 消防车到达的时间及扑救情况等。

《建规》在确定建筑间的防火间距时, 综合考虑了灭火救援需要、防止火势

向邻近建筑蔓延扩大、节约用地等因素以及灭火救援力量、火灾实例和灭火救援的经验教训。在确定防火间距时，主要考虑飞火、热对流和热辐射等的作用。其中，火灾的热辐射作用是主要方式。热辐射强度与灭火救援力量、火灾持续时间、可燃物的性质和数量、相对外墙开口面积的大小、建筑物的长度和高度以及气象条件等有关。对于周围存在露天可燃物堆放场所时，还应考虑飞火的影响。飞火与风力、火焰高度有关，在大风情况下，从火场飞出的“火团”可达数十米至数百米。

3 防火间距的计算方法

《建规》附录 B 给出了建筑物、储罐、堆场、变压器之间以及与道路铁路的防火间距计算方法。建筑物之间的防火间距应按相邻建筑外墙的最近水平距离计算，当外墙有凸出的可燃或者难燃构件时，应从其凸出部分外缘算起。

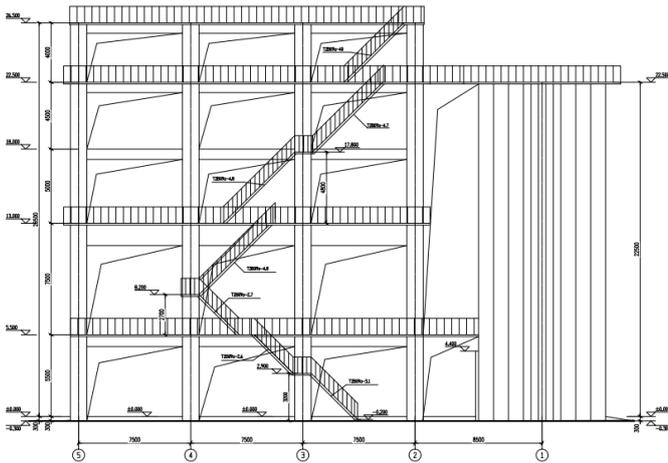


图 1 某水泥配料车间立面图

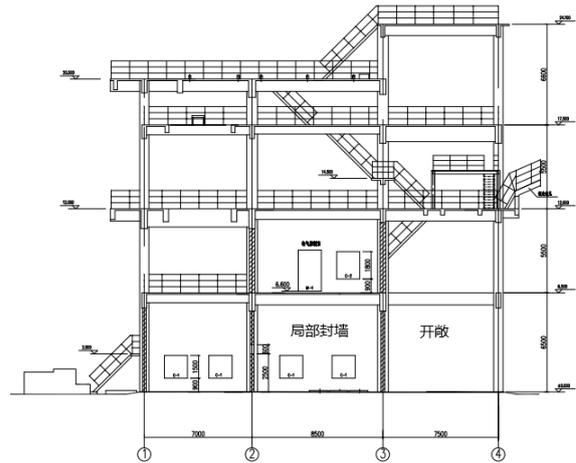


图 2 某煤粉制备车间剖面图

《水泥工厂设计规范》并未说明建构筑物之间防火间距的计算方法，且水泥工厂中很多建构筑物没有墙体（如图 1 某水泥配料车间）或只有局部墙体（如图 2 某煤粉制备车间），也有很多建筑有外挂楼梯、室外疏散楼梯、敞开式外廊、悬挑平台、雨棚等，这些情况如何计算防火间距引起了一定的争议。

笔者认为，室外疏散楼梯，是竖向安全疏散通道，视同人员疏散的安全区域，安全距离应予以保证，理应纳入防火间距计算。不封闭的全部或局部楼层，外挂楼梯、敞开式外廊、人员通达的悬挑平台属于可能有人的场所，也应纳入防火间

距计算。计算间距时，应从这些建筑构件的外缘算起。对于凸出的不燃性构件，例如雨棚，如人员无法通达，也不影响消防车道和应急救援，可不纳入防火间距计算。

4 防火间距不足时的处理措施

4.1 火灾危险性较低时防火间距可以减少

厂房根据生产中使用或产生的物质性质及其数量等因素，仓库根据储存物品的性质和储存物品中可燃物数量等因素，进行火灾危险性分类，划分为甲、乙、丙、丁、戊五类。

戊类厂房仓库的火灾危险性较小，《建规》对戊类厂房仓库之间的防火间距做了调整：单、多层戊类厂房之间及与戊类仓库的防火间距可按规范中表 3.4.1 的规定减少 2m，与民用建筑间的防火间距可将戊类厂房等同民用建筑按表 5.2.2 条的规定执行。单、多层戊类仓库之间的防火间距可按表 3.5.2 的规定减少 2m。

但戊类厂房仓库与其他生产类别的厂房或仓库的防火间距不可调整。

为丙、丁、戊类厂房服务而单独设置的生活用房应按民用建筑确定，与所属厂房的防火间距不应小于 6m。

4.2 合理设置门窗洞口

互为正向面的两个洞口，当一面发生火灾时，洞口喷出的火焰和辐射热，直接威胁对面洞口，具备较大的火灾危险性，从火灾实例可知，敞开洞口的火焰可能对前方 3m~5m 甚至更远的区域造成危害，在爆燃的情况下，具备更大的火灾风险。

《建规》表 3.4.1 注：两座丙、丁、戊类厂房相邻两面外墙均为不燃性墙体，当无外露的可燃性屋檐，每面外墙上的门、窗、洞口面积之和各不大于外墙面积的 5%，且门窗洞口不正对开设时，其防火间距可按本表的规定减少 25%。

可见，减少两座厂房相邻外墙上的门窗洞口面积，同时避免门窗洞口正对开设，可以减小防火间距。此做法是合理且有规范依据的。

4.3 保护外墙开口

对于一、二级耐火等级的两座厂房，《建规》规定，相邻较高一面外墙的门、窗等开口部位设置甲级防火门、窗或防火分隔水幕或按本规范第 6.5.3 条的规定设置防火卷帘时，甲、乙类厂房之间的防火间距不应小于 6m；丙、丁、戊类厂房之间的防火间距不应小于 4m。

4.4 成组布置

《建规》3.4.8：除高层厂房和甲类厂房外，其他类别的数座厂房占地面积之和小于本规范第 3.3.1 条规定的防火分区最大允许建筑面积（按其中较小者确定，但防火分区的最大允许建筑面积不限者，不应大于 10000 平方米）时，可成组布置。当厂房建筑高度不大于 7m 时，组内厂房之间的防火间距不应小于 4m；当厂房建筑高度大于 7m 时，组内厂房之间的防火间距不应小于 6m。

4.5 设置防火墙

防火墙是减少相邻建筑防火间距的主要手段，在一定规模和火灾危险性的相邻建筑中，允许通过设置防火墙减少防火间距（或防火间距不限）。

两座厂房相邻较高一面外墙为防火墙，或相邻两座高度相同的一、二级耐火等级建筑中相邻任一侧外墙为防火墙且屋顶的耐火极限不低于 1.00h 时，其防火间距不限，但甲类厂房之间不应小于 4m。

两座一、二级耐火等级的厂房，当相邻较低一面外墙为防火墙且较低一座厂房的屋顶无天窗，屋顶的耐火极限不低于 1.00h 时，甲、乙类厂房之间的防火间距不应小于 6m；丙、丁、戊类厂房之间的防火间距不应小于 4m。

两座仓库的相邻外墙均为防火墙时，防火间距可以减小，但丙类仓库，不应小于 6 米；丁戊类仓库，不应小于 4 米。两座仓库相邻较高一面外墙为防火墙，或相邻两座高度相同的一、二级耐火等级建筑中相邻任一侧外墙为防火墙且屋顶的耐火极限不低于 1.00h，且总占地面积不大于《建规》3.3.2 条一座仓库的最大允许占地面积规定时，其防火间距不限。

4.5.1 防火墙的设置范围

水泥工厂里的建构物因工艺生产需要，并不会如图 3(a) 中那样并排排列，

而多是错位布置的。要搞清楚在什么位置设置防火墙可以有效减少防火间距，就要清楚上文所说的“相邻外墙”是什么范围。

防火墙可视为建筑安全面，其他墙面及屋面（包括凸出外墙和屋面的可燃或难燃构件等）可视为非安全面。非安全面相对，是火灾蔓延的主要途径。防止火灾蔓延，须确保相邻建筑没有非安全面相对（包括侧向相对），或非安全面的最近边缘水平距离不小于规范许可的防火间距要求。如图3建筑平面示意图中L应满足相关规范防火间距要求。

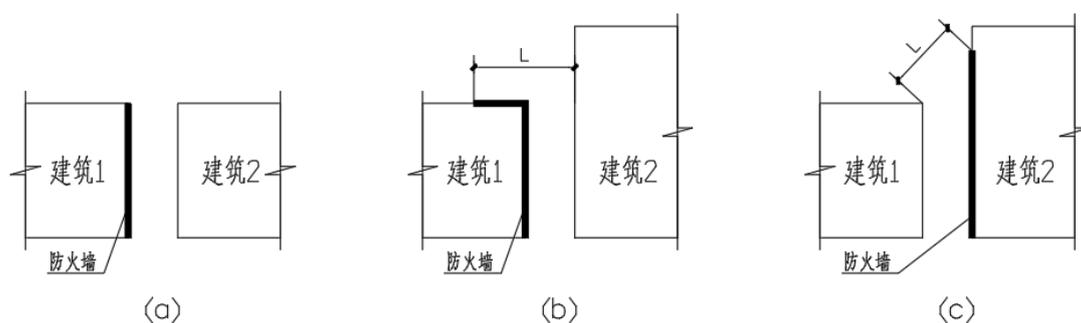


图3 建筑平面示意图

4.5.2 防火墙上的开口

《建规》6.1节与《火通规》6.1节明确了防火墙的设置要求，本文不再一一赘述，仅针对《建规》6.1.5及其条文说明引起的争议略抒薄见。

《建规》6.1.5：防火墙上不应开设门、窗、洞口，确需开设时，应设置不可开启或火灾时能自动关闭的甲级防火门、窗。条文说明：对于因防火间距不足而需设置的防火墙，不应开设门窗洞口。必须设置的开口要符合本规范有关防火间距的规定。

有些设计人员据此认为此处防火墙上不可开设门窗洞口。

笔者并不认同此观点。《建规》3.4.5条有明确提及防火间距减小时防火墙上的开口措施：丙、丁、戊类厂房与民用建筑的耐火等级均为一、二级时，丙、丁、戊类厂房与民用建筑的防火间距可适当减小，但应符合下列规定：（1）当较高一面外墙为无门、窗、洞口的防火墙，或比相邻较低一座建筑屋面高15m及以下范围内的外墙为无门、窗、洞口的防火墙时，其防火间距不限；（2）相邻较低一面外墙为

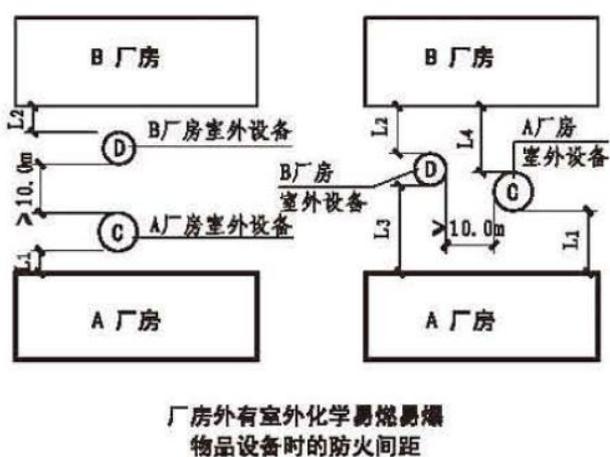
防火墙,且屋顶无天窗或洞口、屋顶的耐火极限不低于 1.00h,或相邻较高一面外墙为防火墙,且墙上开口部位采取了防火措施,其防火间距可适当减小,但不应小于 4m。

《火通规》条文说明关于此问题的描述是:防火墙上一般不应开口。除本规范明确不允许开口的防火墙外,其他防火墙上为满足建筑功能要求,必须设置的开口应采取能阻止火势和烟气蔓延的措施,如设置甲级防火窗、甲级防火门、防火卷帘、防火阀、防火分隔水幕等。

笔者建议在用《建规》表 3.4.1 注中方式使用防火墙作为减小防火间距的措施时,按照 18J811-1《建筑设计防火规范》图示 3.4.1 图示 1 的注释执行,在防火间距不限时,防火墙应无门、窗、洞口。而在其他情况下,可按《火通规》条文说明执行。

5 室外易燃物品设备的防火间距问题

笔者认为 18J811《建筑设计防火规范》3.4.6 图示 1 有所不妥。按其注释,化学易燃物品的设备与所属厂房的间距和与相邻厂房的间距是同等对待的,都要满足防火间距要求。



【注释】

- 1 L1、L2为室外设备C、D外壁分别与A、B厂房的间距,应根据厂房与设备的火灾危险性类别和设备及厂房的耐火等级按第3.4.1条有关规定确定。厂外装有化学易燃物品的室外设备,设备本身采用不燃材料制作,可按相当于一、二级耐火等级的建筑考虑。
- 2 L3、L4为室外设备C、D外壁与相邻其他厂房之间的距离,应根据相邻厂房与设备的火灾危险性类别和设备及厂房的耐火等级按第3.4.1条有关规定确定。

图 4 18J811《建筑设计防火规范》3.4.6 图示 1

笔者认为 18J811《建筑设计防火规范》3.4.6 图示 1 有所不妥。按其注释,化学易燃物品的设备与所属厂房的间距和与相邻厂房的间距是同等对待的,都要满足防火间距要求。

《建规》3.4.6条原文是：厂房外附设化学易燃物品的设备，其外壁与相邻厂房室外附设设备的外壁或相邻厂房外墙的防火间距，不应小于本规范第3.4.1条的规定。用不燃材料制作的室外设备，可按一、二级耐火等级建筑确定。

按规范条文说明，室外设备的外壁与相邻厂房室外设备的防火间距，不应小于10米；与相邻厂房外墙的防火间距，当室外设备内装有甲类物品时不小于12米，装有乙类物品时不小于10米。

化学易燃物品的室外设备与所属厂房的间距，主要按工艺要求确定，规范不作要求。

6 结束语

在水泥工厂设计工作中，建筑专业是水泥工艺和总图布置的后续专业，在总平面布置等方面受到很大限制，也给建筑防火设计工作增加了很多困难。建筑设计人员应该更加充分的理解防火间距的设置原理，灵活运用规范，合理采取措施，在保证防火安全的情况下，满足工艺流程需要，节约用地，降低工程造价。

参考文献：

- [1]倪照鹏. 建筑防火设计常见问题释疑[M]. 北京：中国计划出版社，2022
- [2]倪照鹏. 《建筑设计防火规范》GB50016-2014（2018年版）实施指南[M]. 北京：中国计划出版社，2020
- [3]杨晓光. 建筑防火间距的确定及防火间距不足时的处理措施与对策[J]. 消防技术与产品信息，2014，（9）：50-52
- [4]施增新. 浅谈水泥工厂建（构）筑物防火设计[J]. 水泥工程，2017，（6）：82-85
- [5]冯子强. 水泥工厂防火设计[J]. 科技资讯，2010，（2）：82-83
- [6]石峥嵘. 防火间距-概述[Z]. 消防资源网，2021，（12）

稳流仓仓重自抗扰控制

刘双飞

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

随着能源行业进入全面深化改革的关键期,水泥行业能源消耗大,为实现碳排放达峰,应用智能控制技术,对水泥生产过程进行优化,减少能源消耗是一个不可或缺的方式。水泥熟料粉磨涉及到辊压机、球磨机、选粉机等设备,其中的辊压机预粉磨环节是整个水泥粉磨的重要一环,稳流仓处于正常工作范围,是辊压机高效、正常运行的重要因素。

当前,针对稳流仓的研究仍集中在工艺与稳流仓结构上,如稳流仓振动原因分析以及稳流仓结构调整^{[1][4]};部分学者通过不同算法建立稳流仓工况或料位模型,如:LSSVM算法、T-S模糊建模方法、神经网络极限学习机(ELMNN)^{[5][8]};对于稳流仓仓重控制,部分学者设计了,如:BangBang控制器、模糊PID控制器、基于受控自回归积分滑动平均模型(CARIMA)的广义预测器、模糊智能控制器、GPC控制器、FLC控制器^{[9][15]}。

自抗扰控制器发扬PID控制技术的精髓并吸取现代控制理论的成就,是不依赖被控对象精确模型的、能够替代PID控制技术的新型实用数字控制技术,具有快速响应、对扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。

1 水泥联合粉磨辊压机稳流仓工艺

水泥粉磨是水泥成品生产过程中的重要环节,粉磨工序以及粉磨生产过程直接影响着生产出的水泥的质量。联合粉磨系统是应用广泛的形式之一,水泥联合粉磨工艺如图1所示。联合粉磨系统是由辊压机、磨机、选粉机等组合而成。熟料经过辊压机后由选粉机筛选,粗粉回到辊压机,细粉经磨机粉磨后再由另一个选粉机筛选出成品,粗粉回至磨机。

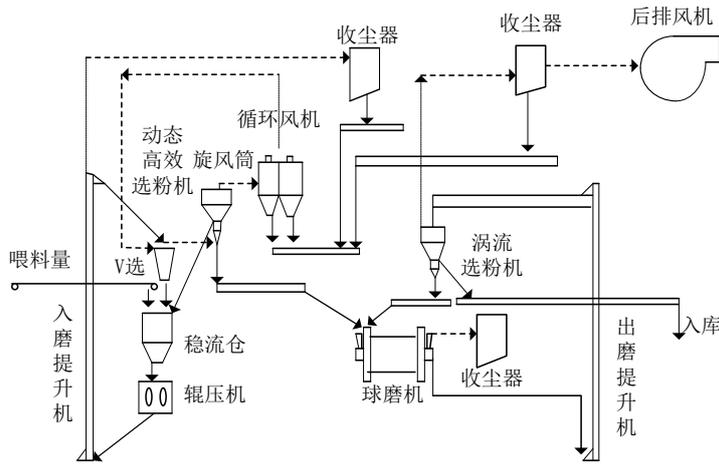


图1 水泥联合粉磨工艺

稳流仓是盛放待预粉磨物料的设备，可以对物料进行缓冲，同时使所有物料均匀混合。稳流仓仓重必须保持在一定的范围内，辊压机才可以高效运行，从而使联合粉磨系统保持稳定。因此在联合粉磨过程中，对稳流仓的控制直接影响着预粉磨过程甚至整个系统的成品物料以及整个过程能耗。喂料量是直接影响稳流仓仓重的变量，且对于稳流仓仓重影响较大，因此本文选取喂料量作为控制量，对稳流仓仓重进行控制。

2 稳流仓仓重自抗扰控制

稳流仓仓重控制系统被控对象为稳流仓仓重，控制量为喂料量，扰动量为回粉量，稳流仓仓重控制系统如图2所示。

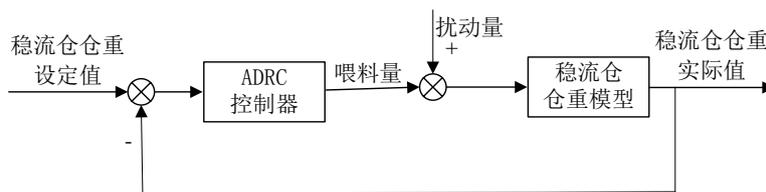


图2 稳流仓仓重控制系统

目前对于水泥粉磨过程中稳流仓仓重的控制主要存在着以下两个方面的问题：

- (1) 目前多数水泥厂稳流仓仓重控制仍采用人工经验控制；
- (2) 部分水泥厂采用PID控制，抗扰动性能较差。

2.1 稳流仓仓重ARMAX模型

ARMAX模型是根据系统输入输出历史数据建立其动态模型，通过该模型可以

反映系统过去和当前状态参数，并对未来时刻状态进行预测。稳流仓仓重的离散时间动态模型，其一般结构为：

$$A(z^{-1})y(t) = \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}u(t) + \frac{B(z^{-1})}{F(z^{-1})}\zeta(t) \quad (1)$$

$$\text{其中 } A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_nz^{-n}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_{nc}z^{-nc}$$

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1z^{-1} + d_2z^{-2} + \dots + d_{nd}z^{-nd}$$

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1z^{-1} + f_2z^{-2} + \dots + f_{nf}z^{-nf}$$

z^{-1} ——延迟因子，即， $z^{-1}y(t) = y(t-1)$ ；

$\zeta(t)$ ——系统噪声扰动；

n, m, nc, nd, nf ——滞后阶次；

当 $F(Z^{-1}) = D(Z^{-1}) = 1$ 时，上式为ARMAX模型。

利用递推最小二乘法进行仓重ARMAX辨识，得到如下模型：

$$y(k+1) = 0.0053u(k) + 1.731y(k) - 0.7817y(k-1) \quad (2)$$

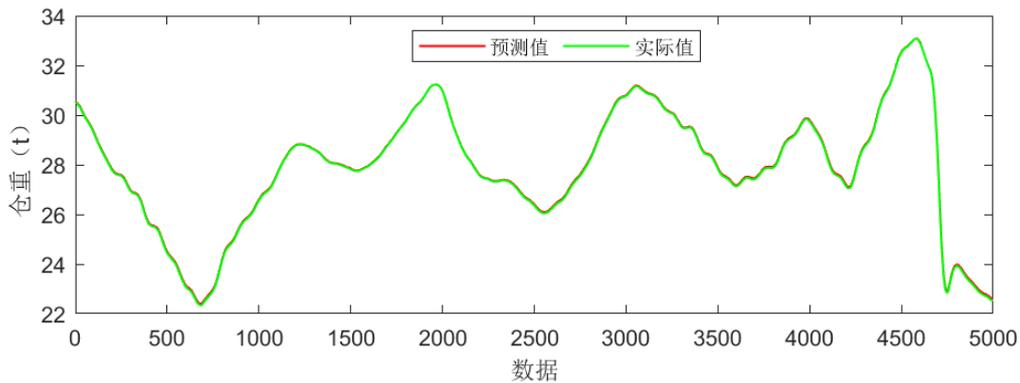


图3 仓重ARMAX模型预测值与实际值

由图3，基于ARMAX的稳流仓仓重预测值与系统实际值非常接近，预测误差较小，模型预测结果比较准确。

2.2 稳流仓仓重自抗扰控制器

自抗扰控制算法由韩京清提出，其不依赖对象模型，通过合理的参数整定可

以控制相当广泛的一类对象。自抗扰控制能够在保证系统有足够鲁棒性的前提下，有相当好的控制品质。因此可以用于稳流仓重控制。自抗扰控制器主要由跟踪微分器（TD）、状态观测器（ESO）以及误差反馈控制三部分组成，跟踪微分器主要根据设定值以及受控对象，安排过渡过程，并给出其各阶导数；状态观测器作为自抗扰控制器核心部分，用于估计过程扰动，并加以补偿；误差反馈能使稳态误差以指数形式成数量级减小，因此可以只用比例和微分环节设计控制器，避免了积分的副作用。

以二阶控制系统为例，对于给定的二阶系统：

$$\ddot{y} = bu + f \tag{3}$$

其中， u 表示输入， f 表示扰动。将其改写成状态空间形式，如下：

$$\dot{X} = AX + BU \tag{4}$$

其中， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

采用龙伯格状态观测器：

$$\dot{X} = A\hat{X} + BU + L(Y - \hat{Y}) \tag{5}$$

令 $|sI - (A - LC)| = 0$ ，可以得到， $L = \begin{bmatrix} 3\omega \\ 3\omega^2 \\ \omega^3 \end{bmatrix}$ 。

于是，可以设计其状态观测器（ESO）如下：

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} -3\omega & 1 & 0 \\ -3\omega^2 & 0 & 1 \\ -\omega^3 & 0 & 0 \end{bmatrix} \hat{X} + \begin{bmatrix} 0 & 3\omega \\ b & 3\omega^2 \\ 0 & \omega^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix} \tag{6}$$

为使 $\ddot{y} = u$ ，令 $\ddot{y} = K_p(y_d - \hat{y}) - K_d\hat{y}'$ ，进行拉氏变换，并令 $s^2 + K_d s + K_p = 0$ ，

因此，

$$\begin{cases} K_p = 2\omega_c \\ K_d = \omega_c^2 \end{cases} \tag{7}$$

其中， y_d 表示设定值。

自抗扰控制器，如图4所示。

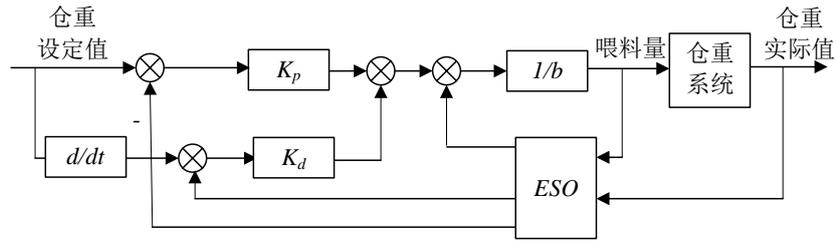


图4 自抗扰控制器

将上述自抗扰控制算法离散化，得到离散状态观测器：

$$X(k+1) = \begin{bmatrix} 3\beta - 2 & 1 & 0.5 \\ -\frac{3(1-\beta)^2(5+\beta)}{2} & 1 & 1 \\ -(1-\beta)^3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{X}(k) + \begin{bmatrix} 0.5b & 3\beta - 3 \\ b & \frac{3(1-\beta)^2(5+\beta)}{2} \\ 0 & (1-\beta)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ y(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

对于跟踪微分器，仍有

$$\begin{cases} K_p = 2\omega_c \\ K_d = \omega_c^2 \end{cases} \quad (9)$$

综上，对于通过上述公式（8）、公式（9），可以设计稳流仓仓重自抗扰控制器，自抗扰控制器涉及参数为 β 、 b 、 ω_c 。

3 实验仿真

采集某水泥厂工作记录，包括喂料量以及对应的稳流仓仓重值。设计稳流仓仓重自抗扰控制器。设定参数： $\beta = 0.8$ 、 $b = 0.0053$ 、 $\omega_c = 0.9$ ，稳流仓仓重目标值分别设定为22、28、25、30时，得到的曲线图如图5、图6：

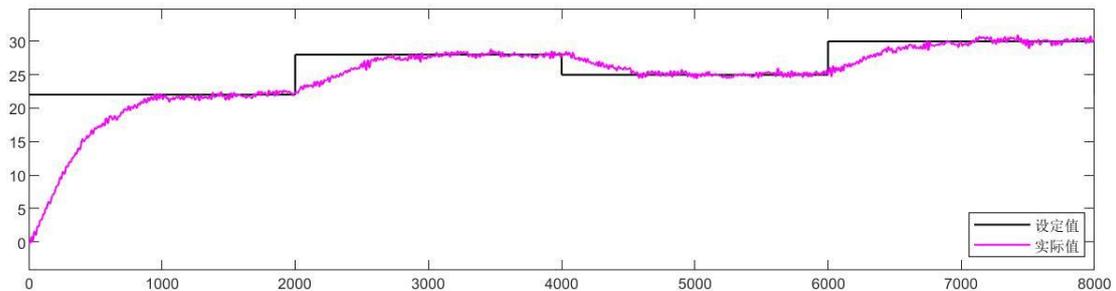


图5 稳流仓仓重设定值与实际值

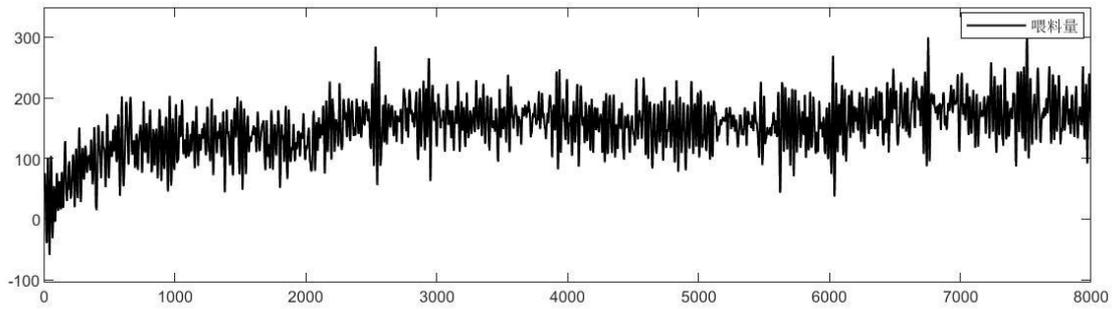


图6 喂料量曲线

从图5、图6可以看出，随着仓重目标值的改变，通过稳流仓仓重自抗扰控制器，可以使仓重很好的跟踪目标值，且其喂料量在合适的范围内。所设计的稳流仓仓重自抗扰控制器，过渡过程平稳，没有超调，且能快速跟踪设定值，对于设定值的改变，能够灵敏适应，具有良好的性能。

同样将稳流仓仓重目标值分别设定为22、28、25、30，同时增加随机扰动项，且该扰动每隔1s变动一次，通过稳流仓仓重自抗扰控制器控制，得到的曲线如图7、图8所示。

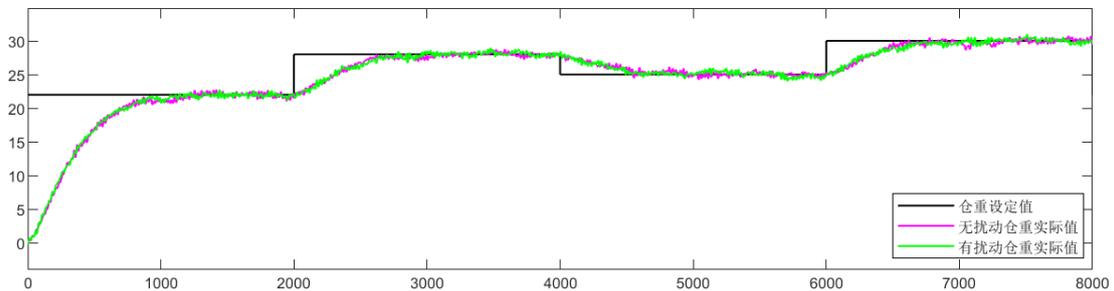


图7 无扰动与有扰动仓重实际值

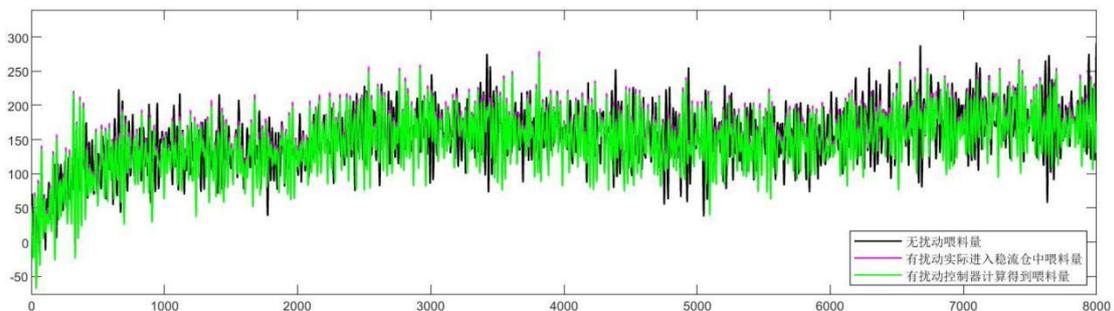


图8 无扰动与有扰动喂料量

图7所示曲线，可以看到当存在随机扰动时，稳流仓仓重自抗扰控制器仍可以使仓重跟踪设定值，且其控制效果与无扰动时接近；图8所示曲线可以看出，即使

存在扰动, 稳流仓仓重自抗扰控制器计算得到的喂料量仍在合理范围。

综合上述, 可以得到, 所设计稳流仓仓重自抗扰控制器对于扰动具有很好的抑制作用, 在扰动存在时, 仍可以使得仓重跟随目标值, 且控制过程稳定无超调, 具有良好的性能。

4 总结

本文提出了一种稳流仓仓重自抗扰控制器, 通过建立稳流仓仓重ARMAX模型, 并以此为依据设计自抗扰控制器, 经过实验仿真, 证明所设计的控制器可以很好的跟踪设定值, 且拥有良好的抗扰动性能, 为实际工程的应用提供了理论与实验依据。

参考文献:

- [1] 韦勇富,张星飞.稳流仓进料调节装置和出料稳流装置的设计与应用[J].水泥,2021,(12):75.
- [2] 程稳,刘晨浩,王尉,赵晓辉,胡明,王新武.辊压机稳流仓振动原因分析及解决方案[J].中国水泥,2021,(09):94-95.
- [3] 陈代彦.辊压机稳流仓结构的改进与探索[J].中国水泥,2019,(11):95-97.
- [4] 肖贤,曹清贤.辊压机稳流仓振动大的原因及处理措施[J].水泥,2019,(08):37-38.
- [5] 谢娅妮,袁铸钢,张强.稳流仓料位的T-S模糊建模[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2017,(03):56-61+78.
- [6] 谢娅妮,袁铸钢.水泥联合粉磨稳流仓料位的典型工况模板划分[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2017,(01):56-61.
- [7] 吴茂胜.水泥联合粉磨系统的建模与预测控制研究[D].济南大学,2016.
- [8] 吴茂胜,袁铸钢,张强,侯居东.联合粉磨稳流仓ELMNN建模及其内模控制[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2016,(01):55-60.
- [9] 冯展庆.水泥闭路粉磨过程协调控制研究[D].济南大学,2019.
- [10] 谢娅妮.基于典型工况的水泥联合粉磨预测控制[D].济南大学,2017.
- [11] 鲁光.水泥预粉磨过程控制系统研发[D].济南大学,2019.
- [12] 刘志鹏.水泥预粉磨优化控制系统的设计与研究[D].浙江大学,2012.
- [13] 龙磊.基于GPC的稳流称重仓仓重优化控制研究[J].中国水泥,2021(12).
- [14] 任志鹏.水泥闭路预粉磨系统与终粉磨系统的协调控制研究[J].四川水泥,2020(09):2-3.
- [15] 刘志鹏,颜文俊.预粉磨系统的智能建模与复合控制[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(08):1506-1511.

半干法砂石骨料生产线主要工艺设计 和设备选型

吉小兰

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

随着天然沙石资源的枯竭和各地环保政策的收紧,人工机制砂石已成为资源的主流。早期的砂石骨料行业,生产方式粗放,就地取材,随意采挖现象十分突出,严重破坏生态环境。党的十八大以来,砂石行业牢固树立和践行“绿水青山就是金山银山”理念,切实把环境保护放在优先首要位置,采取了一系列有效措施,着力推进绿色矿山建设,努力探索既有利于保障资源供给又切实保护生态环境的新路径。

各设计单位通过持续不断的努力,根据每个骨料矿山的特点,设计出产品质量合格、安全、绿色、智能的砂石生产线,促使砂石骨料行业发生革命性的变化,砂石产业整体走向全面转型升级,步入高质量发展的新轨道。

我院总包的海南省定安县龙河镇九定岭年产 300 万吨花岗岩骨料生产线(以下简称“海南定安项目”),融入“碳达峰、碳中和”设计理念,秉承“绿色化、智能化、集约化”建设理念,生产车间总平面布置紧凑,工艺流程顺畅,生产线按现代化绿色砂石骨料示范项目标准建设。

本文以海南定安项目为例,阐述半干法砂石骨料生产线主要工艺设计和设备选型。

1 岩性特征

海南定安项目原料的岩性特征,矿石为细粒黑云母正长花岗岩及弱糜棱岩化细粒黑云正长花岗岩。矿区采集 2 个样品进行矿石物理性质测试,矿区内矿石质地坚硬,抗压强度 256~257MPa,抗剪强度 21.6~21.8Mpa,矿石磨蚀性指数 AI

值为 0.596g，符合《建设用卵石、碎石》(GB/T14685-2022) 标准中规定的建筑用花岗岩材料(在水饱和状态下)，抗压强度 $\geq 80\text{Mpa}$ ，抗剪强度 $\geq 8.0\text{Mpa}$ 的要求。

2 生产规模

骨料机制砂生产线：年产精品骨料 120 万吨、精品机制砂 180 万吨，主要规格为骨料(10~31.5mm)、机制砂(0.075~4.75mm，细度模数在 2.5~3.0mm 可调)。

剥离土洗砂生产线：剥离土年处理量 100 万吨，产品规格为机制砂(0.075~4.75mm，细度模数在 2.5~3.0mm 可调)。

3 环保排放标准

有组织排放 $< 10\text{mg}/\text{m}^3$ ，无组织排放 $< 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ，作业场所空气中粉尘的职业接触限值 $< 8\text{mg}/\text{m}^3$ 。生产和生活废水零排放，噪声排放满足国家标准。

4 主要工艺和设备选型

砂石骨料生产线主要设备选型在工艺设计中起着决定性的作用，它主要取决于原料的物理性能和当地市场的需求。

结合海南定安项目原料的特性，项目确定两条生产线均为固定式生产线。骨料机制砂生产线采用三段破碎闭路循环骨料生产工艺，干法制砂+湿式洗砂的机制砂工艺；剥离层洗砂生产线采用二段破碎，干法制砂+湿式洗砂的制砂工艺；骨料立轴整形系统；废水零排放系统；骨料、机制砂成品自动装车发运系统。

4.1 破碎系统

破碎系统是砂石骨料生产线的主体部分，为确保破碎系统工艺流程设计及破碎设备的正确配置和选型，需从矿山岩石种类、水饱和抗压强度、矿石破碎功指数、磨蚀性指数、最大给料粒度、产品的品质要求，破碎设备的分类、破碎机理、破碎比、产品粒形、维修和备件费用等方面综合考虑。

4.1.1 一级破碎、除泥筛分

砂石骨料生产线的一级破碎设备，一般采用旋回式破碎机、颚式破碎机或反击式破碎机。旋回破碎机适用于破碎能力大于 1000t/h 的各种特性的岩石破碎；颚式破碎机适用于破碎能力小于 1000t/h 的各种特性的岩石破碎；反击式破碎机

适用于硬度、磨蚀性指数中等或偏低的岩石破碎。

海南定安项目原料硬度大、磨蚀性指数高，两条生产线一级破碎设计的破碎能力分别为 800t/h 和 300t/h，结合总图布置及工艺布局，选用鄂式破碎机作为一级破碎，配置棒条给料机喂料。

骨料机制砂生产线：棒条给料机处理能力 $\geq 1100\text{t/h}$ ，棒条间距 80mm；排矿口 CSS=175mm 时，鄂式破碎机处理能力 $\geq 800\text{t/h}$ ，出料粒径小于 350mm。破碎后的物料全部进入骨料机制砂粗骨料中间缓冲堆棚。

剥离土生产线：棒条给料机处理能力 $\geq 500\text{t/h}$ ，棒条间距 80mm；排矿口 CSS=125mm 时，鄂式破碎机处理能力 $\geq 300\text{t/h}$ ，出料粒径小于 250mm。破碎后的物料全部进入剥离土粗骨料中间缓冲堆棚。

两台棒条给料机的筛下物全都进入除泥筛分系统除泥，除泥筛选用 3061 双层直线筛，处理能力 460t/h，筛分效率 $\geq 90\%$ 。上层筛网粒径要求 31.5mm，下层筛网粒径要求 4.75mm， $\leq 4.75\text{mm}$ 的物料送入洗砂车间水洗，其余物料进入剥离土粗骨料中间缓冲堆棚。

4.1.2 一级破碎后设置中间缓冲堆棚

按业主招标文件要求，在一级破碎后，需设置粗骨料中间缓冲堆棚。骨料机制砂生产线和剥离土生产线中间缓冲堆棚采用一体化设计，确保外观统一，中间缓冲堆棚设计的存储量需满足后段破碎能力 10 小时的用量。

一级破碎后设置中间缓冲堆棚可调节骨料生产线整体的系统产能，如一级破碎工段检修时，下游工段不会因此而停产；但一级破碎后的物料粒径较大，粒形较差，对进出中间缓冲堆棚皮带机的胶带伤害很大，会划伤胶带或减少胶带的使用寿命。

4.1.3 二级破碎和三级破碎

砂石骨料生产线的二级和三级破碎设备，一般采用圆锥式破碎机或反击式破碎机。圆锥式破碎机主要适宜破碎硬度大、磨蚀性指数高的岩石，产品粉状料较少。反击式破碎机主要适宜破碎硬度、磨蚀性指数中等或偏低的岩石，产品粉状

物料较多。

根据项目岩石的物理特性（硬度大、磨蚀性指数高），选用粗腔型液压多缸圆锥式破碎机为二级和三级破碎设备。

（1）二级破碎

骨料机制砂生产线和剥离土洗砂生产线二级破碎分别选用 1 台多缸液压圆锥破碎机。具体参数见下表：

生产线	排矿口可调范围	排矿口 CSS 及破碎能力	最大进料粒径	出料粒径
骨料机制砂	32~55mm	50mm 时， $\geq 900\text{t/h}$	350mm	$\leq 100\text{mm}$
剥离土洗砂	20~55mm	32mm 时， $\geq 600\text{t/h}$	283mm	$\leq 70\text{mm}$

剥离土洗砂生产线仅设计两段破碎，二级破碎后物料直接进入检查筛分。

（2）三级破碎

骨料机制砂生产线的三级破碎设备，选用 1 台短头腔型 700t/h 圆锥式破碎机，进料粒径 $\leq 150\text{mm}$ ，排矿口可调范围 13~35mm，当排矿口 CSS=25mm 时，破碎能力 $\geq 700\text{t/h}$ ，出料粒径 $\leq 50\text{mm}$ 。

4.2 整形和制砂

选用立轴式冲击破碎机作为整形机和制砂机。

立轴式冲击破碎机具有运行稳定可靠，维修方便的特点。破碎方式有“石打石”和“石打铁”两种，按项目物料的硬度和磨蚀性指数，整形机和制砂机均选用“石打石”破碎方式，整形时物料粒形好，针片状含量低，制砂时成砂率高。立轴式冲击破碎机的缺点是易损件多，对于磨蚀性指数高的物料，易损件使用寿命较短，备件更换频繁，成本很高。

4.2.1 整形机

骨料机制砂生产线选用 1 台立轴式冲击破碎机作为整形机，设计通过能力 500t/h，用于 10~31.5mm 花岗岩整形。整形后的物料进入骨料成品筛筛分。

4.2.2 制砂机

骨料机制砂生产线和剥离土洗砂生产线共选用 5 台制砂机，均采用干法制砂，

设计能力和数量具体如下：

生产线	通过能力	数量	破碎腔型	给料粒度	成品砂量
骨料机制砂	500t/h	3 台	石打石	0~10mm	≥160t/h
剥离土洗砂	500t/h	2 台	石打石	0~31.5mm	≥135t/h

制砂机的出料进入机制砂成品筛筛分。

4.3 振动筛分

骨料生产线振动筛分的目的是粒度分级，筛分效率越高越好，影响筛分效率的因素非常多，具体为：物料特性、布料效果、有效筛分面积、筛网开孔率、筛孔形状、物料厚度、物料松散度、筛网透筛时间、筛分时间、振幅、筛面角度等。

振动筛分机品类较多，有圆振筛、直线筛、环保筛、复频筛、香蕉筛、概率筛和高频筛等。在设计选型时，要从以下几个方面考虑：

首先，确定振动筛分机的类型。考虑振幅和振动频率的相互关系。一般干性物料需选用低频高幅型筛分机，振幅越大，对物料的加速度越大，物料分层效果越好，筛分效率越高。相反，对于干性细物料，需选用高频低幅型筛分机。

其次，确定振动筛分机筛网的种类。在筛分面积一定的情况下，开孔率越高，筛分效率越高。不同材质的筛网开孔率不同，不同粒径的物料，筛孔开孔形状不同，故需参考物料的特性和粒径、项目成本控制等因素，确定筛网的材质。

最后，确定振动筛分机的筛分面积和通过能力。上游输送设备与筛分机之间的布料溜子要设计合理，确保物料能够平铺到整个筛面上，增加有效筛分面积，从而提高筛分机使用效率和筛分效率，再考虑物料的粒径和粘性等因素，最终确定筛分机的筛分面积和通过能力。

海南定安骨料项目原材料磨蚀性较大，结合项目需求，检查筛分和成品筛分振动筛筛网均采用阻燃橡胶材质。除泥筛因物料含泥量较大，磨蚀性相对较小，振动筛筛网采用聚氨酯材质。为方便更换，单片筛网大小设计合理，且筛网与筛网的间隔距离符合设备运行安全和检修空间要求。具体选型如下：

4.3.1 骨料机制砂生产线

筛分	规格型号	筛分能力	筛分粒径要求	筛分效率
检查筛分	双层香蕉筛 4385	≥1550t/h	上 31.5/下 10mm	≥90%
骨料成品筛分	三层香蕉筛 3673	≥1000t/h	上 20/中 10/下 3mm	上、中≥90% 下≥85%
机制砂成品筛分	双层香蕉筛 3673	≥500t/h	上 4.75/下 3mm	≥85%

检查筛分后，>31.5mm 的物料重新回到三级破碎机被二次破碎，形成闭路循环系统；10~31.5mm 的成品骨料进入整形机整形；10mm 以下的物料进入制砂机制砂。

整形后的物料进入骨料成品筛分机筛分，10~20mm、20~31.5mm 的成品骨料分别进入骨料成品库；新生成的 3~10mm 的物料回到制砂机制砂；3mm 以下的物料进入洗砂车间。

制砂机出来的物料进入机制砂成品筛分机筛分，>4.75mm 的物料重新回到制砂机制砂，形成闭路循环系统；4.75mm 以下的物料进入洗砂车间。

4.3.2 剥离土洗砂生产线

筛分	规格型号	筛分能力	筛分粒径要求	筛分效率
检查筛分	单层香蕉筛 3061	≥560t/h	25mm	≥90%
机制砂成品筛分	双层香蕉筛 3673	≥500t/h	上 4.75/下 3mm	≥85%

检查筛分后，>25mm 的物料重新回到二级破碎机被二次破碎，形成闭路循环系统；25mm 以下的物料进入制砂机制砂。

制砂机出料进入机制砂成品筛分机筛分，>4.75mm 的物料重新回到制砂机制砂，形成闭路循环系统；4.75mm 以下的物料进入洗砂车间。

4.4 水洗砂、废水泥料处理及零排放系统

水洗砂选用的是洗砂细砂回收一体机。小于 4.75mm 的物料经洗砂机水砂分离，分离后的污水进入旋流器组再次分离，分离后的机制砂产品经直线脱水筛脱水后送到机制砂成品库。

分离后的污水进入浓缩池浓缩，在浓缩过程中加药处理。浓缩后的液体，上层清水流入清水池，通过清水泵循环使用于生产线。压滤机前设置一个 400m³ 的深锥缓存罐，缓存罐的设置可以满足浓缩机后的渣浆泵连续工作和压滤机按次间歇

式工作的要求。下层泥浆通过深锥缓存罐，经渣浆泵送至压滤机车间压滤。压滤后的泥饼废料存于泥饼堆棚，用于矿山开采后的复垦。

生活废水经过化粪池预处理后和其他废水汇入厂区污水处理站处理，处理后达到中水回用标准，用于生产线用水。

生产线达到废水和泥料零排放。

4.5 防尘、收尘和噪声控制

骨料生产线对于防尘和收尘措施，一般采用以防为主，防治结合的方针。

在各工艺环节，尽量减少扬尘点，使用密闭性能好的输送和给料设备，在设计设备连接料管时，优化料管的形状和角度，尽量降低落差。

采用全封闭式厂房，中间料缓存堆棚和成品储存库顶部皮带机的下料点配置喷雾降尘系统；2台鄂式破碎机破碎斗配置喷雾降尘系统；其他所有粉尘排放点均配置袋式收尘器，减少粉尘对周围环境的影响，保证粉尘有组织排放浓度小于 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ ，无组织排放 $<0.5\text{mg}/\text{m}^3$ 。

将噪声源设备布置于封闭的厂房内，厂房四周侧墙设置隔音装置。除尘风机出口均设置消声器和减震装置。对于产生强噪声、振动的破碎车间及筛分车间周围，选择绿篱、常绿灌木和枝叶茂密的常绿乔木，并使其组成防护林带，以遮挡噪声传播。

4.6 骨料、机制砂成品自动装车发运系统

选用全自动无人值守装车控制系统，具备装车车辆不移动、上部装卸料机构移动、无人值守的功能。装车系统正常运行期间无需专人操作，系统通过司机自助式自动装车管理，中控只需对系统异常时进行协调处理。

汽车自动装车系统具有检测车厢大小轮廓、车厢侧翼高度、车厢前挡板、尾厢板高度、车厢拉筋及相对散装机位置的功能，装车完毕后，皮带机上无留存料。成品骨料装车机库底卸料口、皮带机卸料口、散装头的下料管两侧、清扫器等扬尘点设置收尘系统，确保无扬尘。

目前，海南定安项目运行正常，各项指标均已达到设计要求。

5 结束语

一条好的砂石骨料生产工艺流程设计必须充分考虑到物料特性，工艺的合理性、可靠性、先行性、经济性及相互的匹配性。为保证项目早日达产达标并交付业主，工艺设计部门需根据生产线的处理规模、岩石的岩性、成品骨料的要求，设计出最适合项目的工艺流程以及最佳的设备配置。

建筑施工中桩基施工关键技术及管理分析

李朋菲

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

随着城市化进程的加快, 建筑施工的规模和复杂性不断增加, 其中桩基施工作为建筑工程的重要组成部分, 其技术和管理的优劣直接关系到工程质量和安全。在德清南方的 260 万吨绿色智能化水泥粉磨生产线项目中, 岩土工程勘察显示该地区的地质条件复杂, 地处典型的江南水乡, 地表水系发达, 场地地貌单元属浙北杭嘉湖平原, 地势平坦, 局部略有起伏。场地的岩土层主要由第四系地层组成, 包括杂填土、粉质粘土、中砂以及圆砾等, 其中粉质粘土和中砂为主要的持力层, 对桩基施工技术提出了更高的要求。本研究针对桩基施工中的关键技术及管理进行深入分析, 旨在提出更加科学合理的施工方法, 以适应复杂地质条件下的施工需求。通过对后注浆钻孔灌注桩、静压管桩、水泥搅拌桩等技术的研究, 以及对施工阶段关键技术及管理的探讨, 本研究有助于提高桩基施工的质量和效率, 确保工程安全, 同时对促进建筑行业的技术进步和管理创新具有重要意义。

1 桩基施工关键技术

1.1 后注浆钻孔灌注桩

后注浆钻孔灌注桩技术通过传统钻孔灌注桩的基础上增加后期注浆步骤, 显著提升了桩身与周边土壤的粘结力, 从而增强了桩的承载能力。该技术涉及精确钻孔、清理孔内杂质、准确下放钢筋笼、泵送灌注混凝土以及后期注浆等关键步骤, 确保了桩基施工的质量和效率。此外, 通过对桩身质量的严格检测, 包括静载试验和声波透射测试, 保障了施工的可靠性和安全性。这一技术在德清南方的水泥粉磨生产线项目中的应用, 有效地适应了复杂地质条件, 为工程提供了坚

实的基础支撑。

1.2 静压管桩

静压管桩技术以其在施工过程中几乎无噪音和振动的特点，成为城市建设中控制环境影响的理想选择。该技术涉及从材料选择、精确定位、静压设备安装、管桩下压、质量监控、桩顶处理到桩基检测的一系列严格措施，确保了桩基的精确安装和高承载力。在德清南方的水泥粉磨生产线项目中，静压管桩技术的应用不仅适应了特殊的地质和环境条件，同时与灌注桩相结合，降低了项目投资，还为项目的成功实施提供了坚实的基础保障。这一技术的采用体现了建筑行业对于环境友好施工方法的不断追求和技术创新。

1.3 水泥搅拌桩

水泥搅拌桩技术通过混合土壤和水泥浆来改善地基承载力，适用于软土地基的加固。具体措施包括使用专用搅拌设备将水泥浆注入土中，同时搅拌以形成均匀的水泥土混合体。搅拌过程需控制水泥浆的比例和深度，确保混合体的强度和均匀性。完成后，水泥土会逐渐硬化，形成具有一定强度和刚度的桩体，从而提高地基的整体稳定性。这种方法施工快速，对环境影响小，相比其他类型桩基综合成本更低，整体加固效果更好，在堆棚所处区域为淤泥、淤泥质土且含水量较高的粘性土地质的应用，效果明显。

1.4 高压旋喷桩

高压旋喷桩技术通过高压旋转喷射，切割破坏土体结构将水泥浆注入土体中，形成桩体以增强地基承载力。具体措施包括使用高压旋喷设备，按设计深度和直径旋进土层，同时喷射水泥浆，通过旋转和喷射作用混合土壤和水泥浆。这种方法能够在不开挖的情况下加固地基，适用于地基加固、坡面稳定等工程。高压旋喷桩的应用可以提供一种快速有效的地基处理方案，确保了施工的进度和质量，相比水泥搅拌桩，施工占地少，施工中振动和噪音少，对周围建筑物的影响较小，能够形成有效的固结体，成本较水泥搅拌桩略高。这一技术的采用主要体现在对工程效率和环境保护的双重考虑。

1.5 水中施工的钢套管桩

水中施工的钢套管桩是一种适用于水下基础建设的技術，它能够在水中提供稳定的支撑结构。具体措施包括选择适当规格的钢套管，利用起重设备将其垂直吊装至指定位置，然后通过打桩机将钢套管打入水底土层。在打桩过程中，需要实时监控桩的垂直度和深度，确保桩基的准确性和稳固性。完成后，钢套管内部通常会填充混凝土以增加结构的稳定性。这种方法适用于桥梁、码头等水上或水下结构的建设，对厂区所在运河的正常通行未造成影响，能有效适应水流、潮汐等自然条件的影响。

2 德清南方项目中桩基的选择

在桩基选择上，根据地质条件和工程需求，主要选择预制桩和灌注桩两种类型，针对堆棚堆料区域采用水泥搅拌桩与高压旋喷桩相结合。预制桩具有施工速度快、质量可靠的优点，适用于对工期要求较高的项目，但其施工过程中可能会产生挤土效应，对周围环境和建筑造成不利影响。灌注桩则具有适应性强、对周边环境影响小的特点，但其施工速度相对较慢，成本相对较高，同时对工期也具有挑战，且对泥浆控制要求较高，以防孔壁不稳定。水泥搅拌桩与高压旋喷桩相结合具有加固面积大和成本优势。

2.1 持力层及桩型选择

在选择持力层及桩型时，关键在于评估地质条件和预期的承载需求。需要进行详细的地质勘察，以确定最适合的持力层；选择桩型时，要考虑到地质结构、承载力要求以及施工技术的可行性。例如，在德清南方的项目中，选择深层的坚硬土层作为持力层，设计选型为端承-摩擦桩，并根据地质条件选择钻孔灌注桩、静压管桩或其他类型的桩。这一过程需要综合考虑成本、施工效率和环境影响，以确保桩基础的稳定性和经济性。总之，持力层的选择和桩型的确定是确保桩基施工成功的关键步骤。

2.2 成桩可行性分析

成桩可行性分析是确保桩基施工成功的重要环节。具体措施包括对预定桩位

的地质条件进行全面评估，分析土层结构、地下水位和其他相关因素。此外，还需考虑施工设备的适用性、材料供应情况以及施工环境对周边建筑和交通的影响。在德清南方的项目中，通过综合分析这些因素，可以确定最佳的桩基施工方案，确保施工的技术可行性和经济效益，同时最小化对环境的影响。这一过程对于预防施工风险、提高工程质量具有至关重要的作用。总结来说，成桩可行性分析通过综合考量多方面因素，为桩基施工提供了科学的决策依据。

2.3 桩基在设计、施工过程中注意事宜

进行详细的地质勘察，获取准确的地质数据，包括土层的类型、厚度、物理力学性质以及地下水位等。以德清项目为例，场地主要由杂填土、粉质粘土和中砂层组成，因此设计时需考虑这些土层的特性，如中砂层作为主要持力层。根据地质报告和建筑物负荷要求，选择适合的桩型，如灌注桩，以适应场地的软弱土层和中砂持力层。德清项目中，考虑到场地的承载力需求和地质条件，选择了灌注桩和预制桩作为主要桩型。按照国家标准和地方规范进行桩基的计算和设计，确保单桩承载力满足设计要求。例如，在德清项目中，根据地下水位和土层情况，设计了合适的桩长和桩径，以确保桩基的稳定性和承载能力。严格控制泥浆比重和沉渣厚度，采用适当的清孔方法，确保孔壁稳定。在德清项目施工中，通过实时监测泥浆性能和及时调整，有效防止了孔壁坍塌和沉渣积累。对施工过程中的关键环节进行监控，如桩的垂直度、桩长、桩径等，并进行承载力测试。德清项目中，通过采用先进的检测设备和方法，如超声波检测和静载荷试验，确保了桩基的质量和安全性。

2.4 单桩容许承载力估算

首先，收集地质勘察报告中的土层数据，包括土层的密度、厚度、压缩性、剪切强度等。在德清项目中，通过钻孔取得的样本分析，得知场地主要土层为杂填土、粉质粘土和中砂层，这些数据为承载力估算提供了基础。根据国家和地方的建筑规范，如《建筑地基基础设计规范》(GB 50007-2011)，使用经验公式进行单桩承载力的初步估算。例如，德清项目采用了国标中的相关公式，结合场地根

据地下水位、土层的湿度和密度变化等因素，对承载力进行调整。在德清项目中，由于地下水位较高，对桩基的承载力计算考虑了地下水的影响，以确保估算结果的准确性。

综合考虑，该项目主要采用了灌注桩和预制桩作为主要的桩基类型，以适应场地的软弱土层和确保施工质量。实际施工中，通过优化施工方案、严格控制泥浆比重和沉渣厚度等措施，确保了桩基的承载力和稳定性，静压预制桩的施工减少了对周边环境的影响。

在后期检测方面，通过对桩基的静载荷试验和地质验桩，验证了桩基的设计和施工质量，确保了建筑物的安全稳定。此外，施工过程中采取了监测措施，对周边建（构）筑物、道路及管线的沉降和位移进行实时监控，及时发现并处理可能出现的问题。

总结来说，对于河湖较多的地区，桩基施工应充分考虑地质条件的复杂性和水文地质的影响。建议在设计阶段进行详细的地质勘察，选择合适的桩基类型，并在施工过程中严格控制质量，采取有效的环境保护措施。同时，加强施工监测和后期检测，确保桩基施工的质量和安全性，以达到节约工期、节省投资、优化施工作业面、提高质量控制水平的目的。

3 施工阶段的关键技术与管理

3.1 施工前准备

在施工前准备阶段，关键措施包括技术审查、场地准备、物资调配、以及劳动力组织。技术团队需审查设计图纸和相关资料，确保无误差和矛盾，并熟悉结构特点及土层、地质、水文条件。施工场地要进行“三通一平”（路通、电通、水通、平整场地），建立测量控制网点，并搭建必要的临时设施。物资方面，要计划建筑材料需求量，落实货源，并对机械设备进行维修试车。组织施工队伍，进行技术和安全培训，确保施工人员明确施工任务和安全要求。这些细致的准备工作是确保施工顺利进行和质量达标的基础。

3.2 施工工艺控制

在施工工艺控制中，确保质量和安全是核心。必须制定严格的施工工艺规范，明确每个工序的操作步骤和质量标准。例如，在混凝土浇筑工序中，规范应详细说明混凝土的配比、搅拌时间、运输和浇筑方法等。施工过程中的每一步都需要严格监督和检查。以钢筋绑扎为例，监督人员应检查钢筋的尺寸、数量、位置和绑扎质量、保护层垫块，确保其符合设计要求。施工工艺的持续改进也是提高效率和质量的关键。例如，采用预制构件可以减少现场作业量，提高施工速度和质量。同时，更新老旧设备，如使用自动化程度更高的塔吊，可以提高工作效率和安全性。通过这些措施，不仅可以提升施工效率和质量，还能降低成本，增强工程项目的市场竞争力。例如，通过优化混凝土浇筑工艺，可以减少材料浪费和工时，从而降低成本。同时，通过提高施工质量，可以减少后期维修和维护的成本，为业主带来长期的经济效益。

3.3 施工现场管理

施工现场管理是工程成功的关键，它涉及从组织结构建立到资源优化配置的多个方面。以大型建筑项目为例，项目经理部首先要明确各个团队的职责和权力，确保每个成员都了解自己的任务。接着，通过工程项目分解，建立起一个清晰的管理体系，这包括绘制工作流程图和编制施工组织设计，以便于监控每个环节的进展。目标控制是另一个重要方面，它包括成本、进度、质量和安全等多个维度的控制。例如，通过实施严格的成本控制措施，项目经理可以确保工程不会超出预算。同时，进度控制确保项目按时完成，而质量控制则保证工程符合标准和规范。资源配置的优化也至关重要，合理分配劳动力、材料、设备和资金可以大大提高施工效率。例如，通过精确计算材料需求和合理安排工人班次，可以避免资源浪费和工期延误。合同管理和信息管理也是现场管理的重要组成部分。项目经理需要确保所有合同条款得到履行，并且在必要时采取索赔措施。而信息管理则通过电子计算机辅助，保证信息的准确传递和及时更新。最后，组织协调能力对于解决项目管理中的冲突和障碍至关重要。项目经理必须具备良好的沟通技巧，以确保团队之间的顺畅合作。通过上述措施，施工现场管理可以确保项目的有序

进行，提高施工效率和效益，最终实现项目目标。这不仅需要严格的管理制度和流程，还需要项目经理和团队成员的专业能力和协作精神。

4 结论

在本次分析中，深入探讨了桩基施工的关键技术和管理策略，特别是在河湖较多、地质复杂的地区，采用多种桩型相结合的方式，既达到了预期的效果，同时又降低了投资。桩基从设计阶段的规范遵循、地质勘察、桩型选择，到施工前的准备工作，如技术审查、场地准备、物资调配和劳动力组织，每一步都至关重要。施工过程中，工艺控制和现场管理的严格执行，确保了施工质量和安全，同时提高了施工效率和经济效益。通过对单桩容许承载力的精确估算，不仅保证了结构的安全性，还优化了资源的使用。此外，施工工艺的持续改进和现场管理的有效实施，为项目的顺利完成提供了坚实保障。总之，桩基施工是一个系统工程，需要多方面的细致规划和严格管理。通过本次分析，可以得出结论，只有通过全面的技术和管理措施，才能确保桩基施工的成功，为建筑工程的稳定性和耐久性提供坚实基础。这些措施不仅对当前项目有着直接的积极影响，也为未来类似工程提供了宝贵的参考和指导。

参考文献：

- [1] 谷少刚. 高层建筑盾构切削钢筋混凝土桩基施工技术与效果分析[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(11):161-163.
- [2] 严良辉. 建筑工程中桩基施工技术应用研究[J]. 房地产世界, 2023, (19):151-153.
- [3] 李晓亮. 钻孔灌注桩桩基施工技术在建筑工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18):54-56.
- [4] 李思杨. 公路桥梁桩基施工问题及承载力测试探讨[J]. 中华建设, 2023, (08):69-71.
- [5] 闫宝空. 建筑桩基施工技术分析[J]. 石材, 2023, (07):48-50.
- [6] 杨建伟. 建筑工程桩基施工中的桩端后注浆技术研究[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(04):33-35.

基于Solidworks的分气箱放样在袋式除尘器加工中的应用

光辉

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 Solidworks 的应用

SolidWorks 是一种广泛使用的三维机械设计软件, 具有强大的功能、易于使用和技术创新的特点。通过三维建模转化为二维图形, 再通过 CAM 软件将二维图形转化成 NC 编程数据直接加工零件, 为袋式除尘器配件加工提供便利。

2 分气箱加工中存在的问题

本公司生产的分气箱, 一般每只分气箱上要焊接 10-12 只的脉冲阀法兰, 要在管体上切割相贯线孔 (如图 1), 加工厂早期都是人工在筒体上划线切割, 切割工作量大且孔精度低, 上下孔定位不准导致浪废材料和延误交货期。后期我们在 CAD 中放样获得平面展开图再转化成 NC 程序, 在铆接脉冲阀法兰短接时要不停的修补才能符合图纸尺寸要求, 费工费时。针对这种现象, 通过 SolidWorks 三维建模转化为二维图形, 比 cad 中放样效率高、定位准, 箱体相贯线开孔无需打磨, 降低后期加工量, 同时保证质量要求。特别是双排脉冲阀的分气箱达到事半功倍的效果。(如图 2)

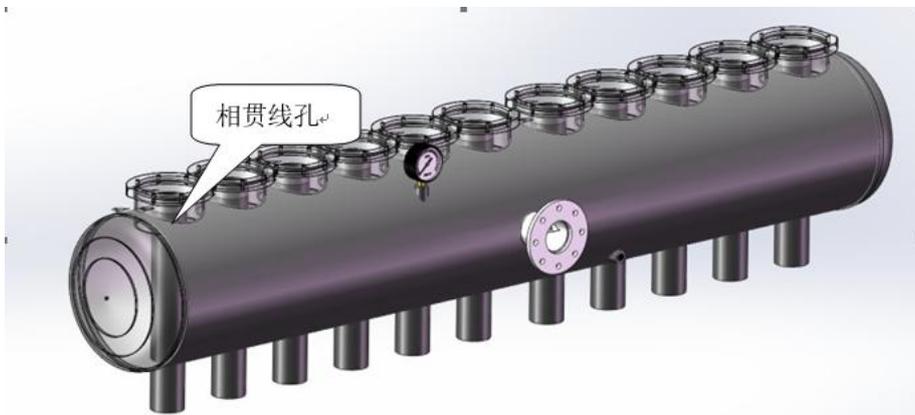


图 1 分气箱

(如图 6) 孔大小为脉冲阀法兰短接开孔尺寸。

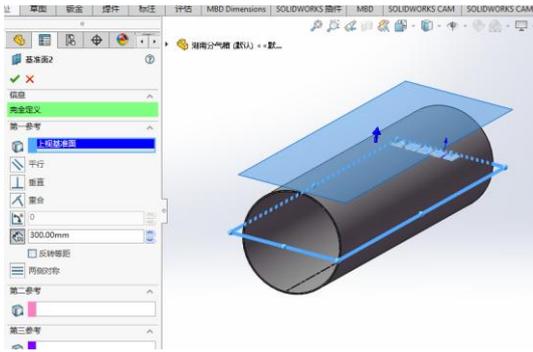


图 4

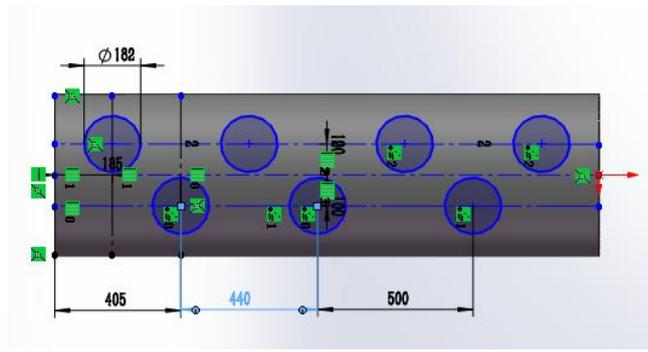


图 5

在【特征】选项中选择【拉伸切除】按钮，给定深度 300mm,投影到筒体得到相贯线切割孔。(如图 7)

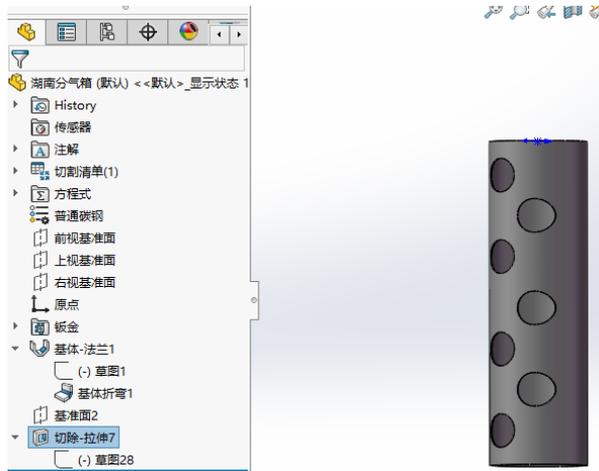


图 6

同理，在新建的【基准面 2】中绘制草图，(如图 8) 在【特征】选项中选择【拉伸切除】按钮，给定深度 600mm,投影到筒体得到喷吹管相贯线切割孔。(如图 9) 这样就得到一个分气箱开孔的三维模型。

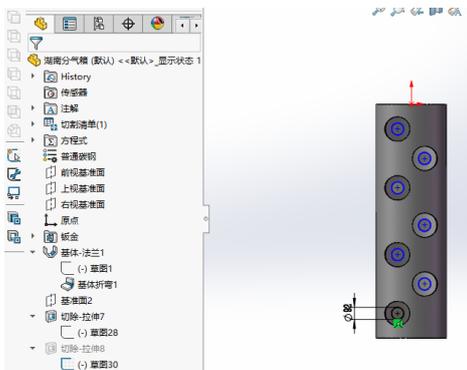


图 7



图 8

下面把分气箱的三维模型转化为二维图，在【钣金】工具栏中选择【展开】按钮，得到展开图。（如图 10）

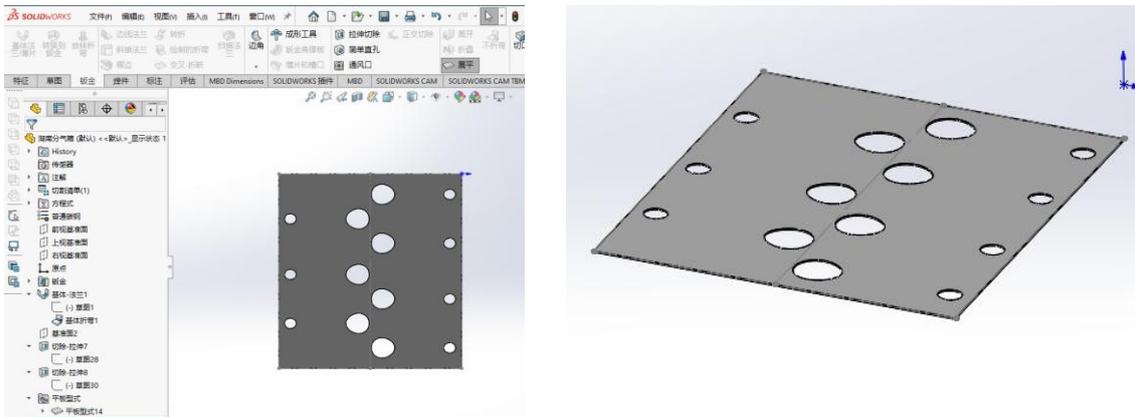


图 9

将平面展开图通过【另存为】工具栏中选择保存类型为【Dwg】输出。（如图 11）

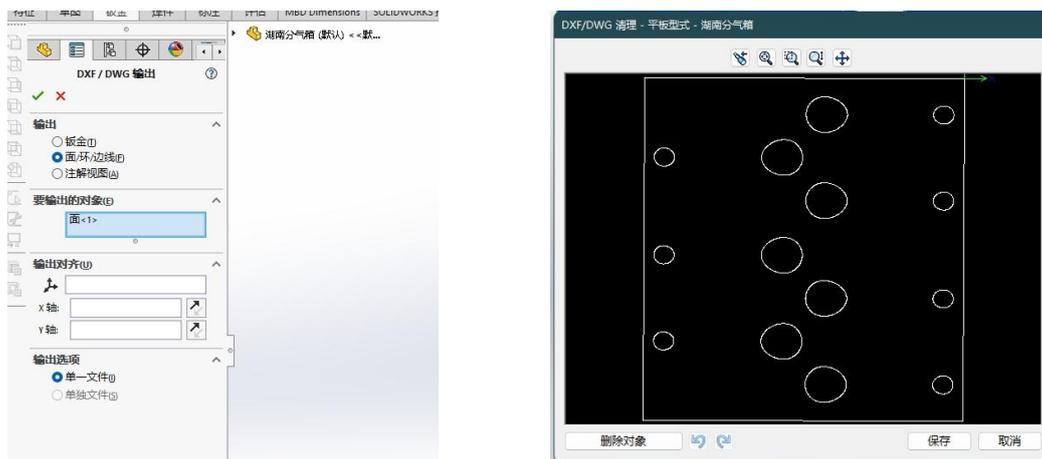


图 10

最后将获得二维图直接用 CAM 软件转化为 NC 程序，就能加工生产分气箱体。（如图 12）

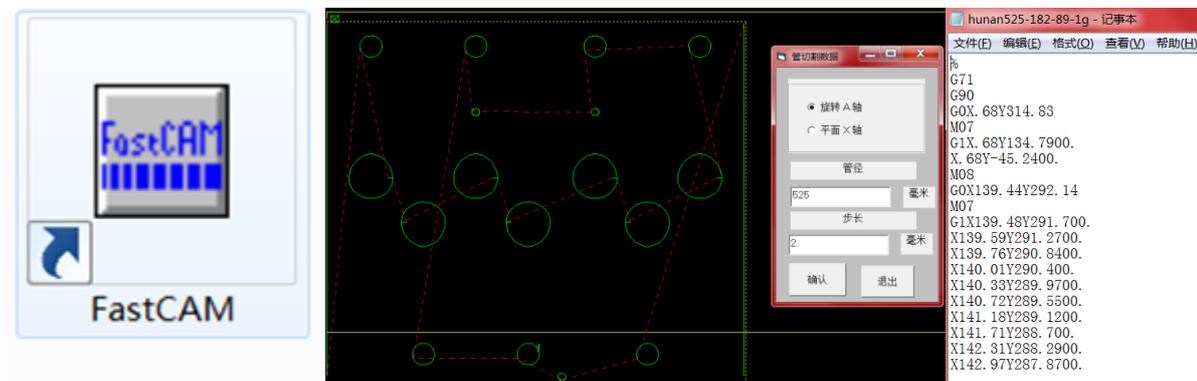


图 11

数控切管机上料加工如图 13 示：



图 12

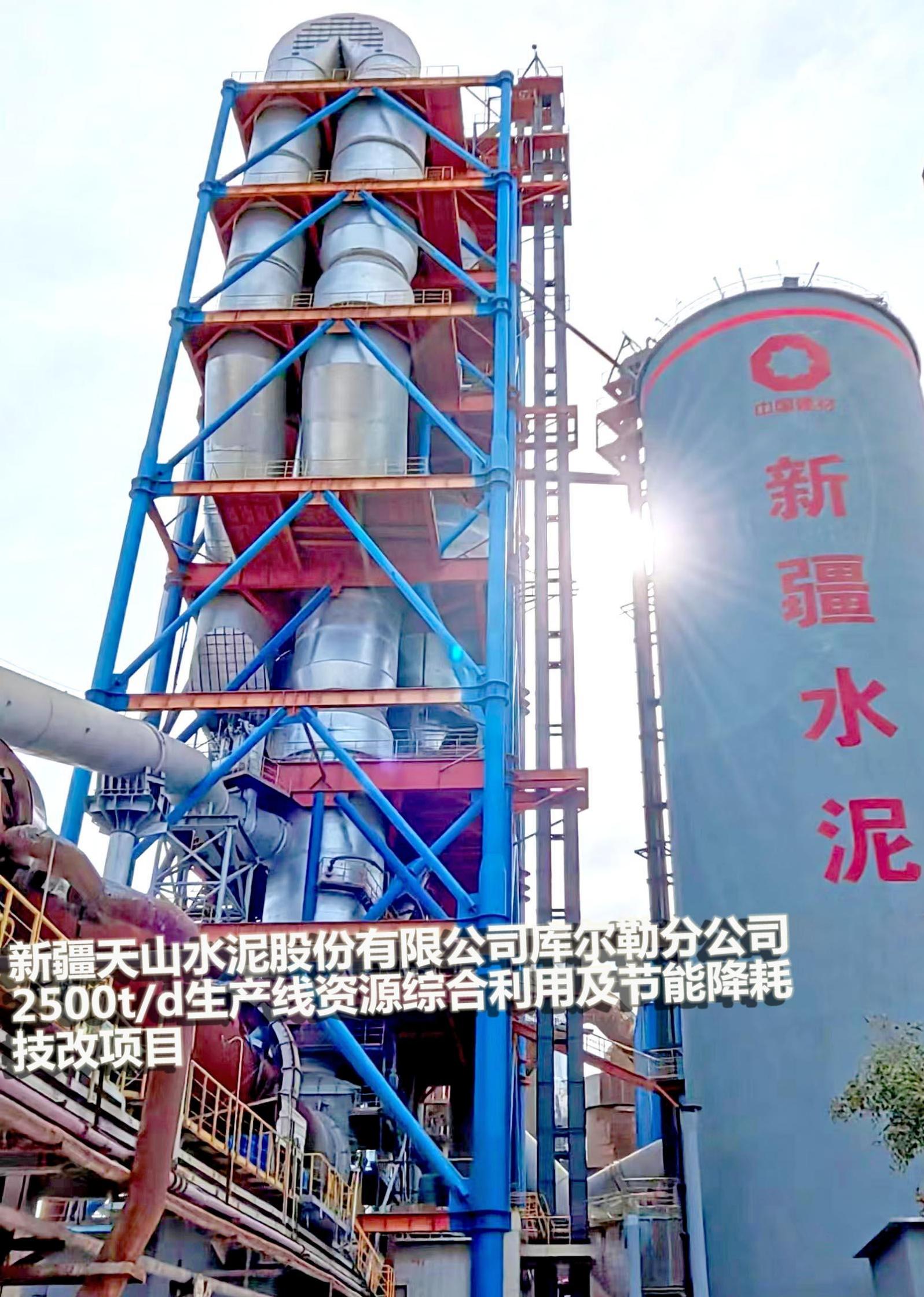
分气箱铆焊组装后的效果如图 14 示：



图 13

4 结语

目前，以上方法我们不止在分气箱的制造过程中应用，在冷却器加工上也多次采用 SolidWorks 绘制天圆地方的展开图，获得了显著的效益。此方法最大的特点就是通过参数化建立的三维模型，只要在 SolidWorks 的环境下修改钣金参数，便可以得到任意的三维模型及钣金展开图。保证了下料的准确性，大大提供了工作效率、提高产品质量。



新疆水泥

新疆天山水泥股份有限公司库尔勒分公司
2500t/d生产线资源综合利用及节能降耗
技改项目