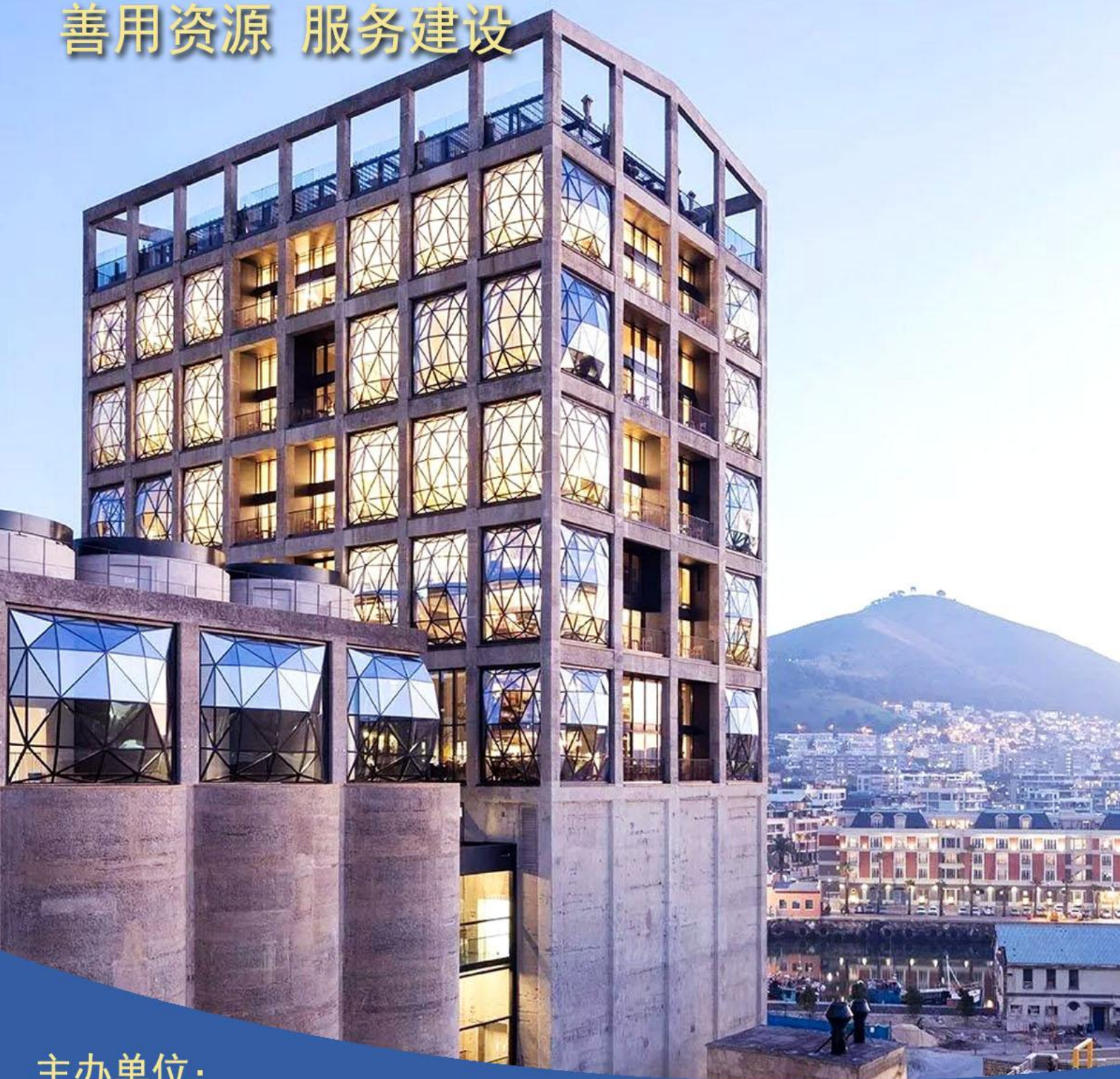


水泥科技

1
2020

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)

2020年第1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: 周云峰

主任: 包 玮

副主任: 朱大来、丁奇生

主 编: 陆树标

委 员: (按姓氏笔划排序)

王仕群 王学敏 毛志伟 邓小林

朱文兵 许 涛 邱文斗 何宏涛

张平洪 张自力 陆树标 武青山

林红星 周 啸 郑 青 侯贵斌

施德祥 姚 强 熊焰来

本期编辑: 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

卧式行星球磨机最佳衬板形式的数值模拟	朱飞/ 1
电镀污泥烧制陶粒首次工业应用	周宏建/ 7
Modbus RTU在水泥脱硝工程中的应用	蒋叶峰/ 13
水泥工业窑尾烟气脱白技术的分析	王梦瑜/ 17
建筑石料开采与加工生产系统的除尘设计	张翔 武青山/ 24
Φ 3.2×13m球磨机系统节能技术改造实例分析	葛晓/ 32
水泥行业无组织排放粉尘治理现状研究	李联康/ 37
大型石灰石破碎机锤头材质选择与失效分析	谢志勇 许涛 熊晖/ 44
玻璃高细粉磨技术的研究	吴雨波 吴志明 杨春保/ 53
重钙立式磨粉磨工艺及操作浅析	崔啸宇/ 59

卧式行星球磨机最佳衬板形式的数值模拟

朱飞

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

离散元法 (discrete/distinct element method, DEM)是计算散体介质系统的力学行为的数值方法, 其原理源于较早的分子动力学 (molecular dynamics), 主要思想是把整个介质看作由一系列离散的独立运动的粒子单元所组成, 具有一定的几何形状、排列方式和物理、化学特征: 其运动受经典运动方程控制, 整个介质的变形和演化由各单元的运动和相互位置来描述。离散元法最先由 Cundall 提出, 王泳嘉最早引入我国, 以后离散元法的研究及应用的论文相继出现。

卧式行星式球磨机简称卧式行星磨, 是一种新型的粉磨设备, 离散元在行星磨的应用最早由 Cundall 和 Strack 在 1979 年利用 DEM 模拟技术模拟无机材料的粉磨效率, 日本东北大学的 Kano、Saito 和 Mio 等人对立式行星磨进行了 DEM 模拟研究。但迄今为止, 对卧式行星磨的离散元模拟研究还没有涉及, 本文拟用离散元法对卧式行星磨的粉磨介质的比冲击能进行模拟研究。

1 磨内钢球比冲击能的模拟

DEM 模拟技术是计算机模拟钢球运动产生固体粒子运动行为的最流行最可靠的方法。可以计算出一个球与另一个球或磨壁碰撞的速度和相互作用力, 准确地重现粉磨过程的钢球运动行为。笔者曾通过这个方法模拟了粉磨介质的三维运动, 而模拟磨内钢球的比冲击能 E_w 还是一种尝试。日本东北大学的研究证明, 比冲击能和粉磨率成正比, 钢球的比冲击能 E_w 可以由两个相互碰撞的磨球或者一个球与磨筒内壁的相对冲击速度 v_i 来计算, 见公式 1。

$$E_w = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2M} m v_i^2 \quad (1)$$

式中, E_w —钢球的比冲击能 E_w , J/s.g; m —一个钢球的质量, g;

n —在 1s 时间内，一个球撞击另外一个球或磨壁的次數；

M —磨内装载的钢球总质量，g。

1.1 计算模型及参数选择

本文以颗粒流模型PFC3D 软件作为数值分析平台，利用fish语言编写程序进行二次开发和数值试验方案设计。模型中的筒体为一圆柱体，有效直径为89mm，深度为78mm。磨筒内沿周向均匀分布固定了一定数量的衬板，衬板宽度7mm，衬板厚度和数量可调，衬板为长方形平板形状。钢球密度 7.85g/cm^3 ，磨桶内装85个 $\Phi 12\text{mm}$ 钢球作级配，钢球装载量合计600g，在筒内呈自然分布。

卧式行星磨一般有 3~4 个相同直径的磨筒围绕主轴对称分布，故仅需对其中一个磨筒进行模拟研究计算。磨筒公转速设定为 300r/min，公转半径为 140mm，自转与公转反向旋转，转速可调。旋转方式见图 1。有关模型计算的具体参数见表 1。

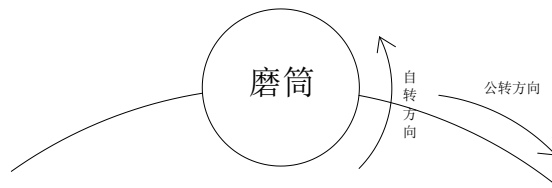


图 2-1 行星磨磨筒自转/公转旋转示意

表 1 行星磨离散元模型计算参数

法向刚度	切向刚度	摩擦系数		法向阻尼	切向阻尼	钢球密度
		球-筒	球-球			
4.0e5N/m	4.0e5N/m	0.3	0.15	0.3	0.3	7.85 g/cm ³

1.2 计算结果及分析

模拟计算中分别在有无衬板以及不同衬板厚度的情况下，改变自转/公转的转速比 r ，来探讨磨内钢球的比冲击能。

1.2.1 衬板厚度对钢球的比冲击能的影响规律

在无衬板时，钢球比冲击能 E_w 随着转速比改变而变化的规律见图 2。可以看出，随着转速比的增加，钢球的比冲击能是先增加后减小，在转速比 r 为 4（自转转速 1200rpm）时， E_w 值最大，为 0.127J/s.g；在转速比较小时，磨筒内钢球主要

呈泻落状态，碰撞比较弱， E_w 值比较小，随着转速比的增加，钢球逐渐由泻落状态向抛落状态转变，同时钢球的比冲击能也在增加，越来越有利于粉磨，在转速比为 4 时 E_w 达到最大值，此时钢球的抛落状态最佳，最适宜粉磨，转速比进一步增加，钢球向离心状态转变，碰撞突然变弱以至于几乎很少有碰撞的发生，所以冲击能快速下降。

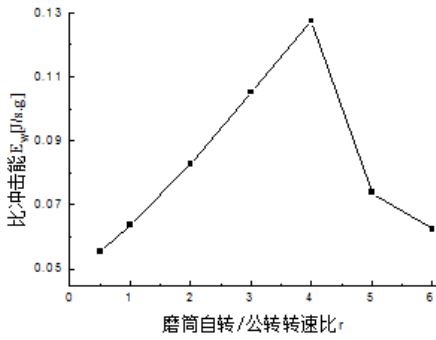


图 2 无衬板对 E_w 的影响

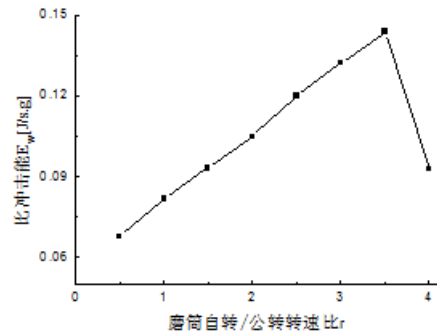


图 3 衬板厚度 1mm 时对 E_w 的影响

加装 1mm 衬板后，钢球的比冲击能 E_w 随转速比 r 变化的规律见图 3，可见随着转速比的增加，钢球的比冲击能也是先增加后减小，在转速比为 3.5（自转转速 1050rpm）时，达到最大值为 0.134J/s.g。与无衬板相比，比冲击能达到最大值时的自转转速略微变小， E_w 值仅略有增加，表明衬板厚度为 1mm 时，对钢球的运动影响不明显。

分别将衬板厚度改为 3mm、5mm 和 7mm 时，钢球的比冲击能 E_w 随着转速比变化的规律见图 4。可见衬板厚度为 3mm、转速比在 1.5（自转转速 450rpm）时，比冲击能 E_w 值达到最大，为 0.146J/s.g，而 5mm 和 7mm 的衬板，在转速比为 1（自转转速 300rpm）时，比冲击能 E_w 达到最大，分别为 0.125 J/s.g、0.118J/s.g。

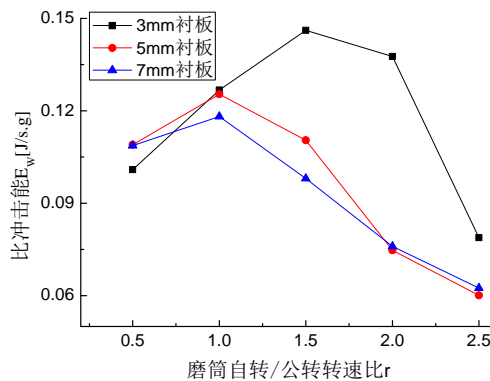


图 4 不同衬板厚度对 E_w 的影响

由图 2~图 4 可以看出, 钢球在无衬板条件下, 比冲击能最大 (即钢球碰撞最剧烈) 时的转速比 r 为 4, 此时的自转转速为 1200rpm, 这是因为钢球无衬板的提升作用而只是沿在磨壁滑动, 不易被带起抛落, 从而不易形成剧烈碰撞, 这种状态的研磨能力非常有限; 加装 1mm 厚度衬板后, 比冲击能的最大值对应的转速比 r 减小不明显, E_w 值也只增加了 0.007J/s.g, 表明衬板太薄, 不能显著起到阻止钢球滑动的作用; 而采用 3mm 衬板后, 转速比 r 为 1.5 即自转转速为 450rpm 时, 钢球的比冲击能就达到最大, 比无衬板的 E_w 增值大 0.019J/s.g, 可以有效阻止钢球与磨筒的相对滑动, 使得钢球形成抛落状态, 加剧球与球或者球与筒壁的碰撞; 当衬板厚度增大到 5mm 和 7mm 后, 虽然比冲击能的最大值对应的转速比 r 减小到 1, 但是比冲击能 E_w 也大幅度减小, 因为钢球来不及抛落就被衬板带过而形成离心状态。因此, 通过以上模拟, 可以认为: 卧式行星磨的衬板以 3mm 厚度比较合适, 此时的比冲击能较大, 钢球的抛落状态最佳, 故而最适宜粉磨。以衬板厚度 3mm、衬板数量和形状相同的同等条件下, 转速比 r 分别为 0.5、1.5 和 2.5 时的钢球不同运动状态见图 5。

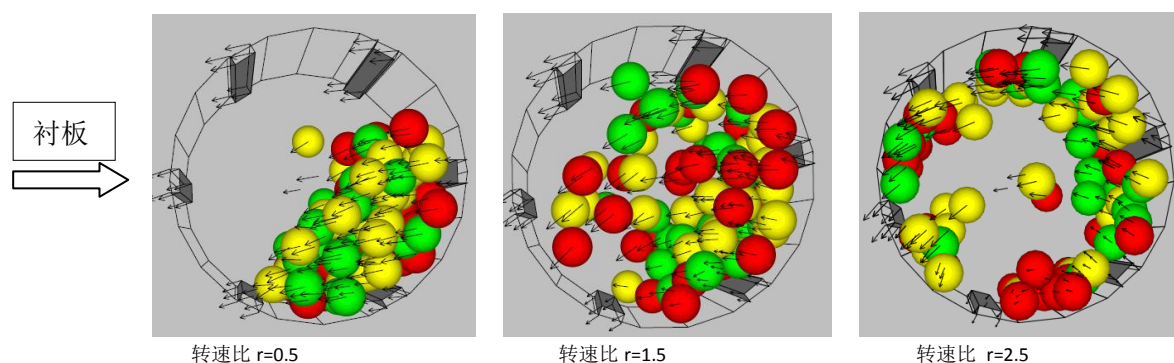


图 5 衬板 3mm 时不同转速比 r 的钢球运动状态

图 5 中, $r=0.5$ 时钢球呈现泻落状态, $r=1.5$ 时钢球呈现抛落状态, $r=2.5$ 时钢球呈现离心状态。显然, 行星磨的粉磨效率以 3mm 厚度衬板、转速比 $r=1.5$ 为最佳。

1.2.2 衬板数量对钢球比冲击能的影响

采用不同数量衬板对钢球比冲击能 E_w 的影响规律见图 6。从图 6 可以看出, 衬板数量大于 6、8、10 块时, 最大 E_w 值对应的转速比 r 为 1.5 (自转转速 450r/min),

EW 值分别为 0.146、0.144 和 0.135J/s.g；衬板数量为 2 块和 4 块时，最大 EW 值对应的转速比 r 为 2.0（自转转速 600r/min），EW 值分别为 0.140 和 0.149J/s.g。

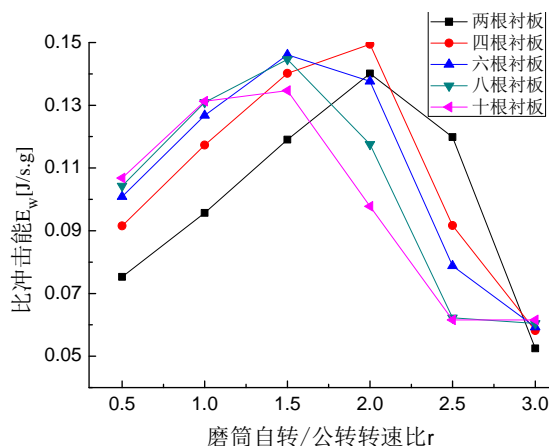


图 6 不同衬板数对 E_w 值的影响

通过图 6 曲线，可以明显看出钢球比冲击能 E_w 随着衬板数量而变化的趋势。衬板数量太少或太多， E_w 明显要小，所以可以确定衬板数量=4~8 为最佳。

当衬板数=4 时，最大 E_w 值（0.149J/s.g）对应的转速比 r 为 2.0，此时的自转转速为 600r/min；当衬板数=6 时，最大 E_w 值（0.146J/s.g）对应的转速比 r 为 1.5，此时的自转转速为 450r/min；衬板数=8 时，最大 E_w 值（0.144J/s.g）对应的转速比 r 为 1.5，自转转速也为 450r/min。衬板数 4 和 6 相比，虽然前者最大 E_w 值略大于后者，但是前者达到最大 E_w 值的自转转速是 600r/min，而后者只有 450 r/min，故衬板数 6 要优于衬板数 4；以衬板数 6 和 8 相比，前者比后者的 E_w 值大，而自转转速均为 450r/min，故前者相对合适，钢球可以发挥较大的比冲击能。

2 实验验证

根据计算机上述模拟，得出行星磨衬板厚度以 3mm 的钢球的抛落状态最佳，比冲击能也最大，为了验证模拟的准确性，实验验证在 $\Phi 89 \times 78\text{mm}$ 行星磨的条件下进行，分布采用厚度 0（无衬板）和 3mm、5mm、7mm 衬板进行粉磨效率的对比。

对比实验粉磨原料为水泥熟料，密度 3.128g/cm³，先经振动筛筛分 10min，以粒度 4~5mm 颗粒入磨，每只磨筒入磨量 150g，粉磨时间 5min，公转转速 300r/min，转速比 1.5。粉磨后卸出磨机进行筛析，按 $< 80\mu\text{m}$ 的通过量来定义成

品粉体产率。实验结果见图 7。

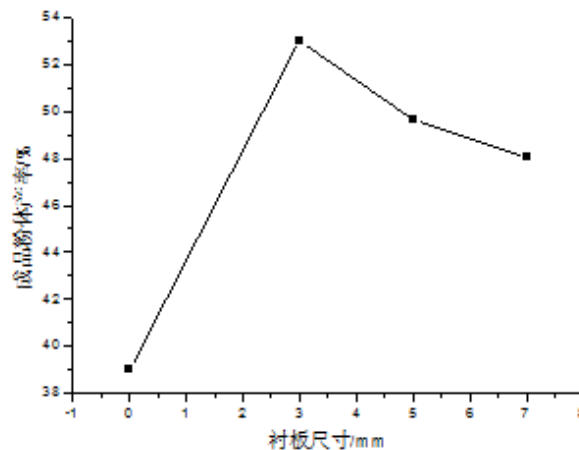


图 7 不同衬板对磨机产率的影响

从图 7 可以看出，无衬板的成品产率为 39%，3mm、5mm、7mm 衬板的成品产率分别为 52.98%、49.64%和 48.06%。说明 3mm 衬板是卧式行星磨粉磨的最佳条件，与计算机数值模拟结果相一致。

3 结论

(1) 卧式行星磨加装衬板，可以避免磨内钢球与磨筒之间的相对滑动，在较低转速比下就能取得较大的比冲击能，使得磨内钢球形成良好的抛落状，从而提高粉磨效率；

(2) 衬板厚度太小，对钢球与磨筒的相对滑动难以改观，衬板厚度以 3mm 为宜，可以在较低转速比下促进钢球的剧烈运动，得到较大比冲击能。随着衬板厚度的增加，钢球的比冲击能变小，易出现离心现象；

(3) 衬板数量太少时，磨机需要较高的转速比才能使钢球比冲击能达到最大，衬板数=6 时，可以在较低转速比下得到最大的比冲击能。衬板数量继续增加，则比冲击能值会逐渐减小。

(4) 通过实际粉磨实验验证，证明上述模拟结论与成品产率相吻合，表明离散元法应用到生产粉磨过程具有可靠性和实用价值。

利用电镀污泥烧制陶粒首次规模化工业应用

周宏建

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

电镀污泥在《国家危险废物名录》中废物类别为 HW17, 主要来源于工业电镀过程产生的废水, 再经浓缩、压滤等物理方法处理, 出厂时含水率约在 50-70%。不同的电镀工厂, 其电镀污泥中所含重金属种类及含量会有所不同, 但主要包括铜、锌、镍等重金属化合物, 灰分含量也较高。

未经物化处理的污泥, 其状态不稳定, 在外界风化、雨淋等作用下, 重金属离子很容易迁徙后污染土壤及地下水, 给环境造成严重危害。

传统处置方法主要包括固化技术、填海、堆放、生物法、回收重金属、铁氧体法、烧砖和农用等。国内外近年来广泛采用物理固化技术, 主要使用水泥固化方法, 该方法满足无害化处置电镀污泥的目的, 但未达到资源化利用的要求, 因此不利于建立循环型经济。最近几年, 随着国家环保政策愈加完善, 危废处置倡导“无害化、减量化、资源化”, 如何使电镀污泥化废为宝, 成为摆在广大科研人员面前的一个难题。

严捍东采用电镀污泥与海滩淤泥, 再按不同配比, 在满足原料塑性造粒、高温烧成陶粒外观质量合格要求下, 烧出的陶粒分别用蒸馏水和饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液浸取, 浸取方法按 GB5086.2-1997《固体废物浸出毒性浸出方法-水平振荡法》进行。浸取液中重金属含量检验方法: GB/T15555.2-1995《固体废物铜、锌、铅、镉的测定-原子吸收分光光度法》, GB/T15555.4-1995《固体废物六价铬的测定-二苯碳酰二肼分光光度法》, GB/T15555.10-1995《固体废物镍的测定-丁二酮肟分光光度法》。结论得出: (1)在海滩淤泥中掺加 30%电镀污泥, 可以满足陶粒塑性造粒的工艺要求; (2)掺加 30%电镀污泥经 1200℃高温烧成的陶粒, 电镀污泥中的铜和锌被

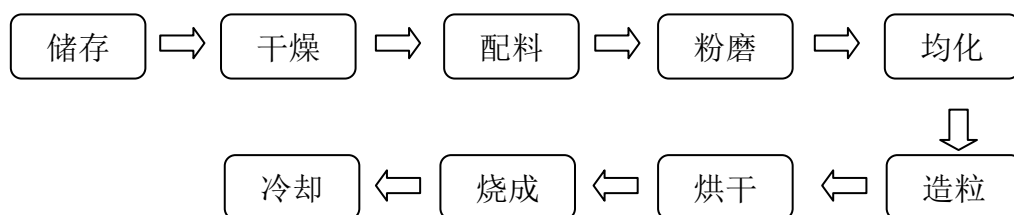
完全固化，重金属铬和镍的固化率与浸出液的种类有关，重金属高温固化率按铜（锌）、镍、铬的顺序降低；(3)掺加 30%电镀污泥经 1200℃烧成陶粒在水或饱和 Ca(OH)₂溶液中的总铜、总锌、总镍和总铬浸出浓度低于 GB5085.3-1996 对危险废物的界定值，经对比，各种重金属浸出浓度同时也低于 GB5085.3-2007 对危险废物的界定值，因此在海滩淤泥中掺加 30%电镀污泥生产陶粒应不会在生产和使用过程中产生二次污染。^[1]

张静文等^[2]通过正交试验，以陶粒的吸水率为考核指标，最终得到电镀污泥制备陶粒的最佳配合比和烧成条件。最佳试验配方为：电镀污泥含量 35%，粉煤灰含量 35%，生活污水含量 10%，广西白泥含量 20%；最佳烧成条件为：预热温度 500℃，预热时间 15min，焙烧温度 1175℃，焙烧时间 30min。

由以上试验数据可以得出：利用电镀污泥生产陶粒，是一种无害化和资源化处理电镀污泥的经济有效途径。陶粒作为一种轻质骨料，其应用范围也越来越广，因此若能将电镀污泥制造成建材陶粒，将会有广阔的市场前景，但目前大规模工业应用案例尚未见书面报导。宁波某环保科技有限公司，在实验室研究基础上，通过在其他已有陶粒窑进行试烧工业试验，烧制出的陶粒经检测，各种重金属浸出浓度可满足 GB5085.3-2007 对危险废物的规定。在此基础上，于 2016 年委托合肥院设计了一套 60000m³/a 电镀污泥烧制陶粒生产线，于 2018 年 5 月成功投产，该项目同时取得了宁波市环保局颁发的《危险废物经营许可证》。本文着重介绍该项目工艺方案及项目生产过程中所取得的经验。

1 生产工艺

结合电镀污泥特点，制定了如下主要生产工艺环节：



电镀污泥入厂时水份含量高，约 50-70%，在工艺转运、配料等环节都有影响，

且会增加烧成热耗。因此在储存环节设计了电石渣干燥过程，储存同时，将电石渣干燥到约 20-30%水份。再经过配料计量后，进行原料粉磨。配好的原料，再进入均化设施，使原料充分混合均匀。原料经造粒机造粒后，进入烧成回转窑系统，回转窑分 2 段，前段为干燥段，后段为烧成、冷却段，2 段窑通过密封装置连接，转速相对独立。可以根据烧成状态，分别调整 2 段窑的转速。陶粒烧成后，设计进入冷却机进行熟料冷却，并回收热空气作为回转窑燃烧二次风使用。

1.1 原料配料

该项目拟采用的电镀污泥与严捍东^[1]试验中采用的电镀污泥化学成分接近，河道污泥及建筑污泥化学成分与其实验中海滩淤泥成分接近。为了最大限度的利用废弃物，该项目设计时预留了 5 组分配料空间，具体见表 1-1。

表 1-1

序号	原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量
1	电镀污泥	0.44	3.82	18.70	15.00	5.64	18.11			27.87
2	水厂污泥	31.37	10.49	3.49	2.99	2.07		0.48	1.21	47.92
3	河道污泥	57.86	16.33	6.34	1.24	2.43	0.41			3.57
4	建筑污泥	65.84	15.04	5.67	3.0	2.65		0.54	1.52	5.72
5	粉煤灰	45.97	43.44	2.29	3.92	2.25		0.53	1.18	2.41

电镀污泥主要重金属含量检测结果如下：

表 1-2

原料	Ni	Cr	Zn	Cu
电镀污泥	3.5	5.5	9.0	2.5

1.2 原料干燥

由于电镀污泥进厂水份在 50-70%，若直接烧制陶粒，生产过程中容易造成设备堵塞，同时热耗也会增加。因此在原料储存环节特意设计了玻璃顶阳光房，厂房四周设计了采暖暖气片，堆棚严格密封，呈微负压状态，设有活性罐等异味气体处理装置。具体工艺流程见图 1-1。

电镀污泥经干燥后，通过自动抓斗，进入板喂机+皮带秤进行配料计量。建筑污泥等原料，经过选石机选石后，通过自动抓斗，经板喂机+皮带秤配料计量后，与电镀污泥一同进入机械均化机，再进入缓存池。

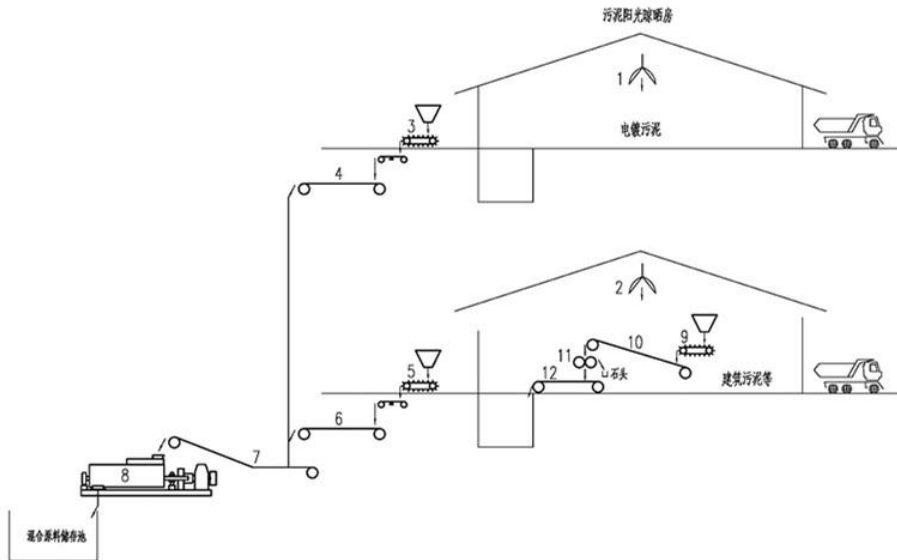


图 1-1

1.3 原料制备

陶粒成品球粒径一般在 5-25mm 之间，为了保证气和料的换热效率，原料细度宜控制在 0.5mm 以下。具体工艺流程见图 1-2。

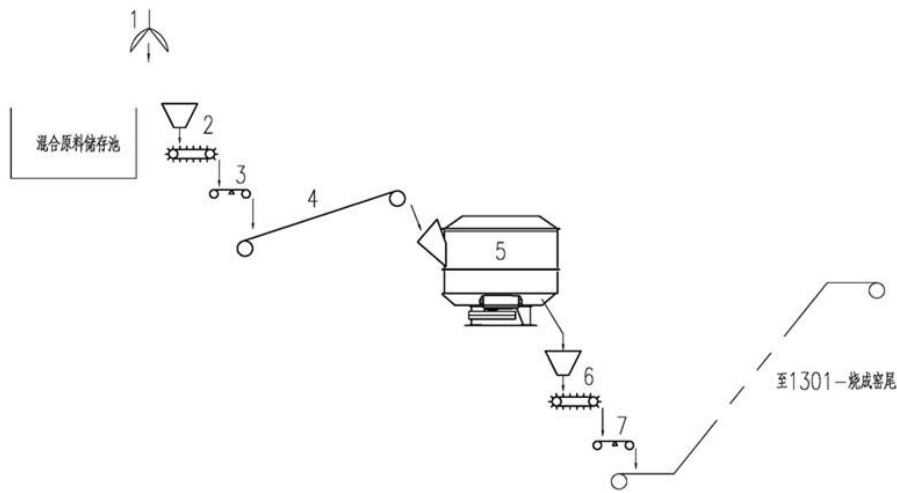


图 1-2

自动抓斗，将配比及均化后的原料，从缓存池取出，再经过板喂机+皮带秤联合计量后，进入轮碾机粉磨。由于轮碾机工作方式为间歇式粉磨，因此在轮碾机后设有缓存仓，再经过板喂机+皮带秤联合计量后，经大倾角皮带机送入烧成窑尾车间。

1.4 烧成窑尾

烧成窑尾具体工艺流程如下：

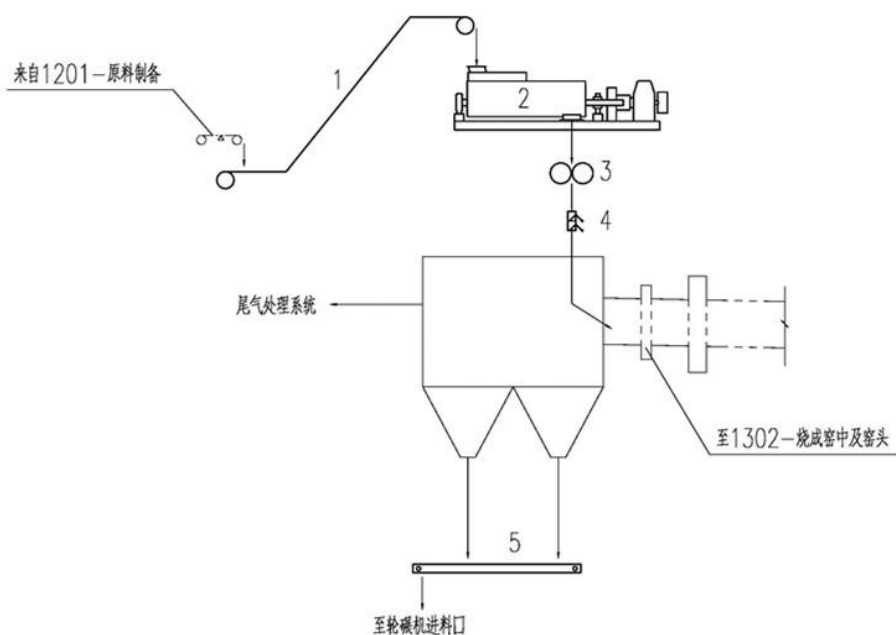


图 1-3

来自原料粉磨车间的生料，经大倾角皮带，送入机械均化机，通过挤压式造粒机，再经过双层重锤锁风阀，进入烧成窑中及窑头车间。

1.5 烧成窑中及窑头

烧成窑中及窑头具体工艺流程如下：

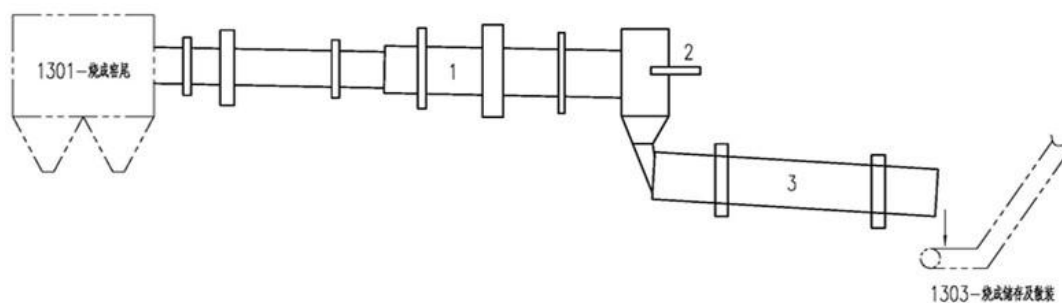


图 1-4

烧成窑中车间，选用了 1 台双段式套筒回转窑，前段窑主要用于生料烘干，后段窑用于陶粒烧成、冷却。烘干窑转速时间满足烘干时间 15min 以上要求，速度可调；烧成段窑转速满足烧成时间 30min 以上要求，根据陶粒烧成情况速度可调。熟料冷却设计了一台单筒冷却机。

2 实际运行情况

该项目于 2018 年 5 月顺利投产，一次性点火成功。陶粒产量能稳定在 200m³/d，

达到设计目标值，烧制的陶粒经检测满足 GB5085.3-2007 标准要求。

3 结束语

(1) 利用电镀污泥烧制陶粒在实验室已被证明可行，烧制出来的陶粒在蒸馏水和饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中的总铜、总锌、总镍和总铬浸出浓度低于 GB5085.3-2007 的限值，因此该项目的投产为电镀污泥综合利用增加了一条经济可行的方案；

(2) 该项目在实施过程中，大量应用新技术、新装备，如 DCS 控制系统、窑尾尾气处理 SCR 脱硝、催化剂脱除二噁英、脱硫系统等，改变了以往陶粒窑排放浓度超标、产量小、管理混乱、自动化程度低等印象，为今后陶粒窑的发展树立了标杆；

(3) 根据该生产线实际运行经验，今后还有可以改进之处，如原料预均化、窑头、窑尾余热利用等；

(4) 目前缺乏相关国家标准、规范等对电镀污泥烧制陶粒技术进行引导，各地环保局对此类项目持观望态度，期待今后相关的国家政策与行业法规、标准等出台，对电镀污泥烧制陶粒技术进行政策及理论指导。

参考文献：

- [1] 严捍东. 电镀污泥与海滩淤泥复合烧制陶粒重金属固化效果的试验分析 [J]. 化工进展, 2005, 24 (4) :383~386.
- [2] 张静文, 徐淑红, 陈玲, 姜佩华. 正交试验设计在电镀污泥烧制陶粒中的应用 [J]. 环保科技, 2009 (1): 29~32.

Modbus RTU 在水泥脱硝工程中的应用

蒋叶峰

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 前言

在水泥行业 DCS 系统方案中,信号接入 DCS 系统主要采用点对点和通讯的方式,通讯方式大都以 DP 和工业以太网的方式为主,相比起来采用 MODBUS 通讯在水泥行业 DCS 系统中应用的还不是很多, 本文通过介绍某水泥厂脱硝 PLC 系统中脱硝 PLC 与某数据采集模块 UT5508 间的数据传输来介绍 MODBUS 通讯协议在水泥行业实际项目中的应用。

2 方案确定

本文所列举的水泥厂的脱硝 PLC 柜布置在氨罐房内, 系统主要的 I/O 点都集中在氨罐房内, 因此该部分信号均通过点对点的方式接入脱硝系统 PLC。但脱硝系统还需要采集窑尾烟囱出口的氮氧化物、烟囱氨逃逸量以及烟囱氧含量的信号用于控制实时喷氨量, 另外还需接入当地环保部门后期要求接入脱硝系统的粉尘、烟气压力、烟气温度、烟气流量和二氧化硫等环保检测信号, 以上信号均需要从窑尾在线检测柜中取得。

而本项目环保监测柜距离脱硝 PLC 柜的距离很远, 接近 200 多米, 如果继续采用点对点的方式接入脱硝 PLC 柜, 则需要敷设两根 10 芯的屏蔽电缆从窑尾在线监测控制柜引至脱硝 PLC 柜。

另外脱硝 PLC 柜还需要单独预留 8 个 AI 通道给以上信号。但西门子 200 系列的 CPU 最多能够扩展 7 个模块, 对于采集这 8 个 AI 信号就意味着至少要新增两个 AI 模块给以上 8 个 AI 信号, 而本项目其他信号已经使用 6 个模块, 已经无法再扩展两个模块。

针对以上情况, 笔者所在单位经过调研和反复论证, 决定在窑尾在线监测柜

内增加一只某公司的八通道的数据采集模块，通过 MODBUS RTU 通讯协议实现与脱硝 PLC 的 CPU224 进行通讯，从而节省电缆材料和施工放线工作以及 PLC 内的 I/O 模块，最终完美的解决现场遇到的问题。

3 模块硬件接线及设置

脱硝系统 PLC 柜内配置的 CPU224 配有一个串口，可用于和该公司的数据采集模块进行 MODBUS 通讯，该数据采集模块配置有 8 个模拟量输入通道，脱硝系统所需的八路环保监测模拟量信号正好由窑尾在线监测柜输出段子引接至 UT5508 通道输入端。模块的 DATA+和 DATA-通过一根 2 芯的控制的电缆和 CPU224 连接即完成了线路上的连接，UT5508 模块的硬件电路图如图一：

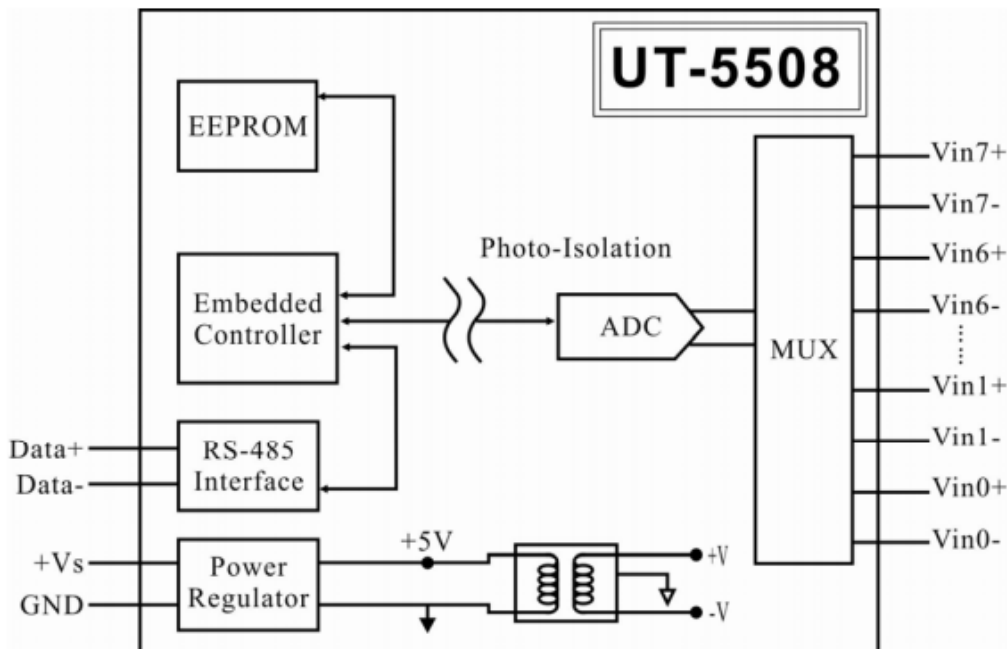


图 1 模块硬件电路图

该数据采集模块可以通过 DCON 协议的一系列指令进行远程控制，模块和上位机是使用 ASCII 码数据形式通过 RS-485 串行总线进行通讯。波特率和传输速率是由软件设置的，并且该模块支持 Modbus RTU 协议。通讯口设置如下：波特率设置为 9600bps,数据格式为 1 位起始位、8 位数据位、1 位停止位、无校验。具体设置界面见图 2。

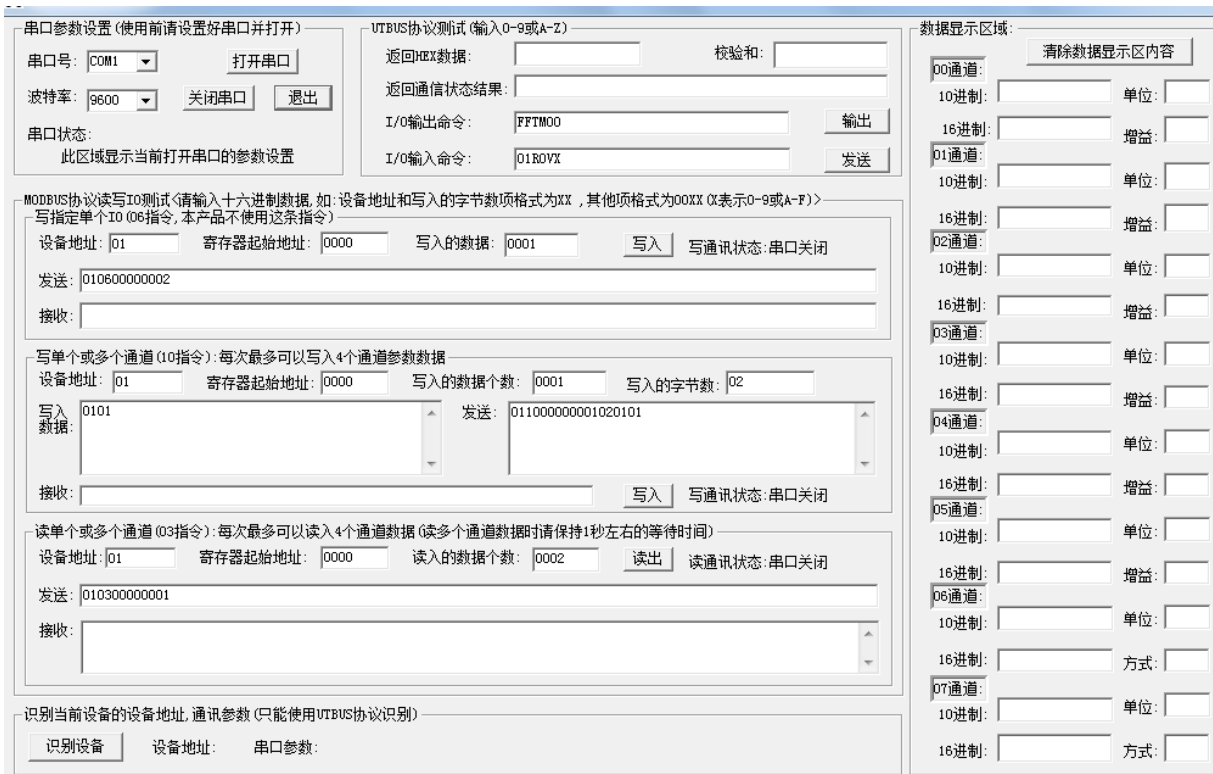


图 2 模块参数设置图

4 软件编程

需要在 S7-200 编程软件中进行编程来实现与采集模块的 MODBUS 通讯。

在 STEP7-Micro/WIN 中由 MBUS_CTRL 和 MBUS_MSG 可以实现该功能。首先需要在程序段中插入 MBUS_CTRL 指令，以完成通讯初始化。在本项目中，S7-224XP CN 作为通讯主站，现场数据采集模块作为通讯从站，通讯主站通讯速率同样设置为 9600bps，无校验，从站允许应答时间为 1000ms。

程序中调用 MBUS_MSG 指令来读取从站的数据，定义从站的地址为 1。读取寄存器起始地址为 40001 的 8 个通道的数值，根据数据格式写入 &VB2000，例如 2000 位 32 位浮点数，则保存在 VB2000、VB2001、VB2002、VB2003 中，依次类推，读取完成后 M4.2 置位，复位读取从站保持寄存器 M4.1 和 M4.5。读取到的寄存器数据范围为 0~65535，再通过量程转换模块得到实际的过程值，部分程序段见图 3。

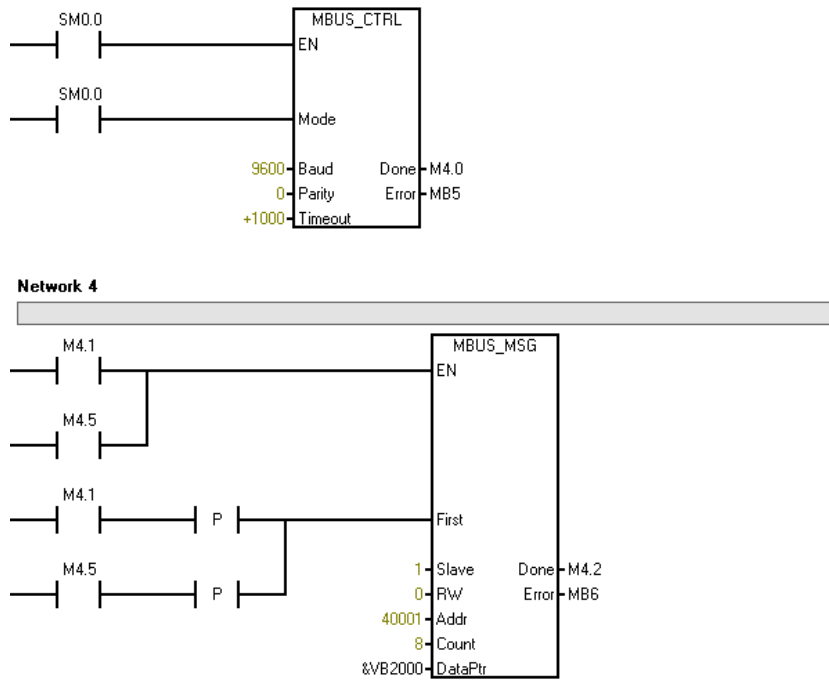


图 3 部分程序段示意图

此外水泥厂 SNCR 脱硝系统实际运行中，由于氨水从氨罐喷入分解炉后与炉内 NOX 反应，直到窑尾在线监测装置中的 NOX 数值得到更新一般至少需要 5~10 分钟的时间，喷氨流量自动调节系统属于大滞后系统，传统的 PID 控制调节方法已无法解决自动喷氨的问题。因此需要单独配置一套智能喷氨系统，目前有很多公司开发了相关的程序，基本原理就是加入智能化控制模块，采用模糊控制和神经网络，使系统具备自学习的能力，能自动对前期喷氨的历史数据进行分析，总结出喷氨量调整与 NOX 滞后反应的关系，从而实现对 NOX 的变化趋势进行预判，提前调整氨水的喷入量，从而解决 NOX 波动范围大，无法实现自动调节氨水的流量的问题。

5 结论

MODBUS-RTU 协议在本次水泥脱硝项目应用中，通讯可靠并且稳定，没有发生通讯中断和数据异常的情况，并且能够节省硬件成本，减少了敷线的强度，降低了检修难度，同时避免了采用第三方模块兼容性的问题，有效的保证了脱硝自控系统的可靠运行，是一种非常好的数据传输方式。通过这次改造，本人也对 MODBUS 通信协议在实际工程中的应用有了更深刻的体会。

水泥工业窑尾烟气脱白技术的分析

王梦瑜

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

根据中华人民共和国国家标准 GB4915-2013《水泥工业大气污染物排放标准》，自 2015 年 7 月 1 日起，国内新建水泥窑生产线执行二氧化硫排放限值 $200\text{mg}/\text{m}^3$ ，重点地区企业执行二氧化硫排放限值 $100\text{mg}/\text{m}^3$ ，现国内二氧化硫超标较多的水泥生产线主要采用烟气湿法脱硫系统，但由于湿法脱硫系统出口处烟气中含有大量水蒸气，当温度较高的烟气与温度较低的冷空气接触后，烟气降温将导致烟气中的水蒸气冷凝析出，在烟气中形成小液滴，而小液滴对光线的折射、散射作用，使烟囱出口的烟羽呈现灰白色，产生视觉污染。小液滴中除了凝结水以外，还有许多硫酸盐、灰尘等杂质，对环境造成一定污染。

1 烟气脱白技术方案的比选

烟气脱白技术是一个综合治理的工程，具体治理方案可以从以下几方面着手：

(1) 降低烟囱相对湿度；(2) 降低烟囱绝对湿度；(3) 增加有效烟囱高度；(4) 烟囱的合理设计。

烟气冷凝技术是以降低烟囱绝对湿度为机理，降低烟气温度后，烟气中的饱和蒸汽量减少。但由于降温后的烟气还是饱和湿烟气，当烟气进入大气环境后继续降温，会有小液滴析出。因此，烟气冷凝技术从理论上不能完全避免白色烟羽的形成。同时由于在冷凝过程中，水蒸气相变为水需要释放大量的相变潜热，对冷凝设备要求较高。

烟气再热技术是以降低烟囱相对湿度为机理，提高烟气温度即增加了湿烟气的不饱和度，烟气在与大气环境接触后降温即不会凝结成小液滴。烟气再热技术只涉及到烟气的升温，而不牵涉到相变，所以整个过程所需要的热量比烟气冷凝

技术释放的潜热要少的多，对设备要求较低。从理论上来说，烟气再热技术是可以完全避免白烟的产生，但要完全避免，对设备的投资也会相对较大。

在前两种技术不能完全避免白烟的产生时，可以通过调整烟囱的有效高度来抑制白烟的聚集。由于有效烟囱高度直接影响烟气的湍流扩散，确定有效烟囱高度，对污染浓度和烟囱高度计算都有重要意义。如烟囱位于低洼地区时，直排烟囱的烟气不易扩散，易造成严重的白色烟羽聚集。

如果烟囱流通通道中形成大量蒸汽和一些液体携带（没有伴热系统的烟囱比装有再热系统的烟囱发生上述情况的几率更大），烟气内的液相仅通过重力作用与气相分离，如果液相内液滴颗粒不够大，在下落过程中，很可能再次被烟气抬升。因此要考虑烟囱的集液装置来收集烟道和烟囱表面所有沉积的液体和冷凝液。

比较烟气冷凝技术和烟气再热技术工艺，从经济上和技术上来看，烟气再热技术比较适合水泥厂现有条件。下文以某厂 4000 t/d 及 2000 t/d 水泥熟料生产线烟气脱硫项目为例说明烟气再热技术。本文将不阐述有关烟囱的相关内容。

2 “白色烟羽”处理机理

从图 1 可以看出，当烟气温度从 A 点降低至 C 点时，曲线 ADFC 和直线 AC 之间的区域为白烟产生区域，如果将烟气温度从 A 点加温至 B 点，烟气温度再从 B 点降低至 C 点，则不会产生白烟区域。

主要有两个因素影响是否白烟产生，一是烟气温度，二是烟气压力。吸收塔内烟气压力和外界环境压力差别不大，不影响白烟的产生；当湿烟气排出烟囱与外界空气混合时，随着烟气温度的下降，烟气中水蒸气的饱和度降低，从而产生大量小液滴，并形成白烟。

从图 1 可看出，减少“白色烟羽”的处理机理是增加烟气温度，提高脱硫塔出口湿烟气的不饱和度，使得在降温的过程中，湿烟气始终处于不饱和状态，即可不产生白烟。

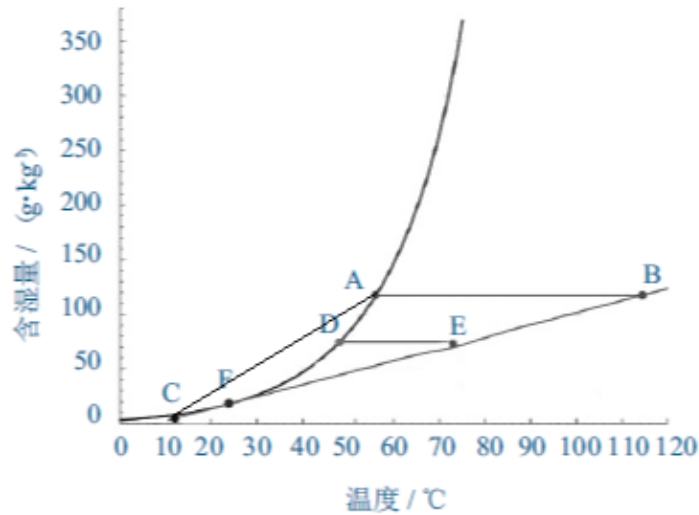


图1 烟气饱和含湿量和温度的关系

2.1 项目背景

某厂 4000t/d 及 2000t/d 水泥熟料生产线烟气脱硫项目烟气总量为 800000Nm³/h，两条生产线共用一台脱硫塔，经脱硫改造后，脱硫塔出口烟气温度为 50℃，经过直排烟囱排烟后出现“白色烟羽”并伴随石膏雨。现拟定上一套 MGGH 系统，减轻甚至消除“白色烟羽”和石膏雨的现象。

2.2 项目设计

脱硫塔出口烟气温度为 50℃，根据烟囱出口处烟气温度的经验算法：

$$T_s = T_b - \frac{H}{10} = 50 - \frac{100 - 30}{10} = 43^\circ\text{C}$$

其中： T_s —烟气温度； T_b —吸收塔出口温度；H—烟囱高度。

在本项目中，吸收塔为烟塔合一结构，吸收塔出口高度为 30 米，烟囱出口高度为 100 米。从图 2 可以看出，夏季，烟囱出口外界温度约 20℃，烟气从 C 点(43℃)先加热到 D 点（约 60℃），再降温至 A 点（20℃），烟气温度依次经过 CDBA 时，不会产生“白色烟羽”。

从图 2 可以看出，夏季，烟囱出口外界温度约 20℃，烟气从 C 点（43℃）先加热到 D 点（约 60℃），再降温至 A 点（20℃），烟气温度依次经过 CDBA 时，不会产生“白色烟羽”。

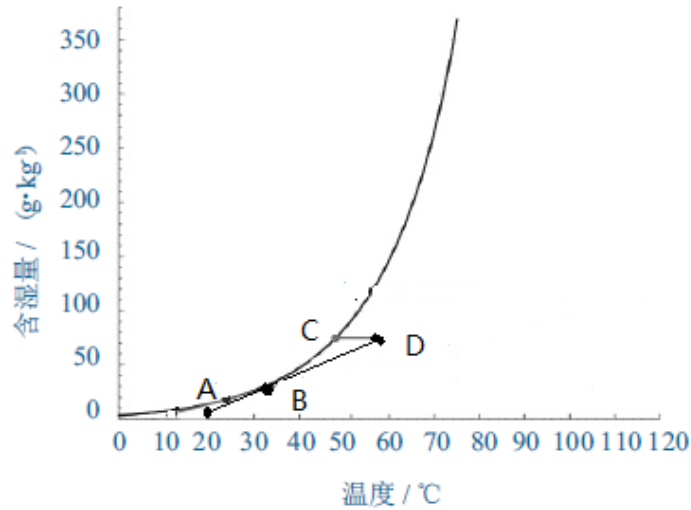


图2 改造后夏季烟气饱和含湿量和温度的关系

烟气加热时换热量的计算公式如下：

$$Q_1 = c_1 m_1 \Delta t_1 = c_1 \cdot \rho_1 V \cdot \Delta t_1$$

其中： Q_1 —烟气从 43℃加热到 60℃时，每小时需吸收的热能，KJ/h；

c_1 —烟气在 100℃以下的比热容，查表可得 $c=1.3811\text{KJ}/\text{m}^3\cdot\text{℃}$ ；

ρ_1 —50℃下的烟气密度，查表可得 $\rho_1=1.097\text{kg}/\text{m}^3$ ；

V —标况烟气体积，在本项目中 $V=800000\text{Nm}^3/\text{h}$ ；

Δt_1 —烟气温度升高 17℃。

计算可得 $Q=2.06\cdot 10^7$ KJ/h。

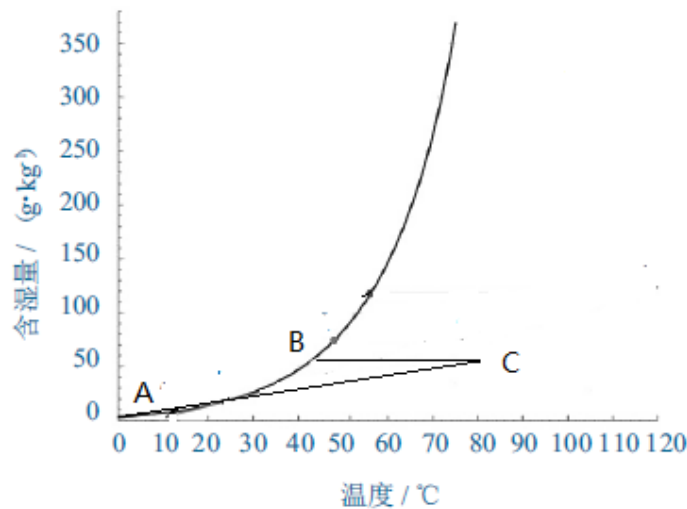


图3 改造后冬季烟气饱和含湿量和温度的关系

从图 3 可以看出，冬季，烟囱出口外界温度约 0℃，烟气从 B 点（43℃）先加热到 C 点（约 80℃），再降温至 A 点（0℃），烟气温度依次经过 BCA 时，不会产生“白色烟羽”。

烟气加热时换热量的计算公式如下：

$$Q_2 = c_1 m_1 \Delta t_2 = c_1 \cdot \rho_1 V \cdot \Delta t_2$$

其中： Q_2 —烟气从 43℃加热到 80℃时，每小时需吸收的热能，KJ/h；

Δt_1 —烟气温度升高 37℃。

计算可得 $Q=4.48 \times 10^7$ KJ/h。

本项目采用 MGGH（烟气换热器），换热器中的换热介质热媒水在脱硫塔前原烟道上的降温换热器中被加热后，送至脱硫塔后净烟道或烟囱上的升温换热器加热净烟气。采用热媒水循环泵输送热媒水，考虑热媒水在升温时会产生膨胀，在循环管路上设置一个膨胀罐。MGGH 结构形式见图 4：

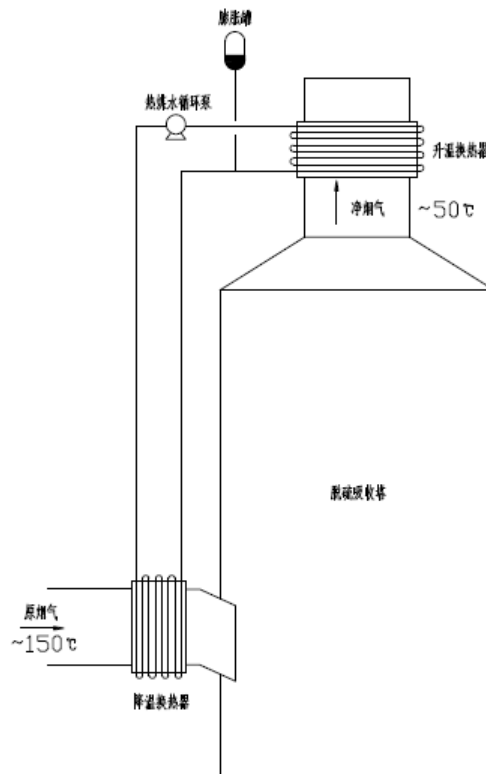


图 4 MGGH 系统示意图

MGGH 与传统 GGH 不同点在于，MGGH 采用热媒水传热，烟气降温侧与烟气升温侧完全分开，不存在烟气泄露而产生的相互影响，原烟气中的 SO_2 和飞灰不会因设备密封问题而泄露到净烟气中。MGGH 不采用其他热源对烟气进行加热，因此有很好的经济性。可以通过循环热媒水的流量来调节热量，来控制在不同外界温度下所需要的烟气温度，同时保持烟道温度高于酸露点温度以防止 SO_2 的腐蚀。

同样，根据 $Q = cm \Delta t$ ，可计算出降温换热器处烟气降温后温度，同时由于热量损失，考虑 1.1 倍的系数。

夏季，原烟气经过降温换热器，温度从 150°C 降至 130°C ；

冬季，原烟气经过降温换热器，温度从 150°C 降至 110°C 。

烟气酸露点的计算公式如下：

$$t_{aid} = 20 \lg V_{\text{SO}_3} + \alpha - 80$$

其中： V_{SO_3} —烟气中 SO_3 的体积分数，%；

α —水分常数，当烟气中水分体积含量分别为 5%、10%、15% 时，分别取 184、194、201。

经核算，水泥窑尾烟气中 SO_3 含量很低，原烟气酸露点小于 100°C ，故在原烟气降温过程中不会达到酸露点。

在设计 MGGH 时，要考虑如下几个方面：

(1) 考虑到烟气中有一定的粉尘含量，在 MGGH 换热管的迎风面需安装防磨装置；

(2) 为了提高换热率，MGGH 换热管采用翅片结构。

(3) 为避免 MGGH 内部产生积灰，故需要安装清灰辅助手段，本项目中采用声波吹灰器；

(4) 高温区段换热管可选择中厚壁、20 号钢材，低温区段的换热管可选择 ND 钢等优质的抗腐蚀材料，以提升抗腐蚀性能。

采用 MGGH 技术在脱白的同时，还具有如下作用：

(1) 减轻尾部烟道和烟囱的腐蚀。净烟气温度被加热到高于水露点以后，减轻了烟囱内部水分的结露附着，防止形成稀硫酸。

(2) 烟气温度升高可以提高烟气的抬升高度，降低污染物落地浓度。

(3) 进入脱硫塔内的原烟气温度降低，减少了脱硫塔内水分的蒸发，减少脱硫耗水量。

5 结语

水泥厂湿法脱硫后产生的脱白问题，可以通过烟气再热技术解决。在湿法脱硫后安装 MGGH（烟气换热器），可以有效控制白色烟羽及石膏雨的产生。相对于 GGH，MGGH 没有漏风、腐蚀、堵塞的情况。同时 MGGH 采用热媒水在原烟气和净烟气之间传热，不需要额外提供热源，经济效益明显，是未来水泥窑系统脱硫改造的必然发展方向。

参考文献：

- [1] 邓增幅. MGGH 复合技术应用于湿烟羽治理[J]. 煤炭与化工, 2018, 41(11):153-156.
- [2] 张超然, 杨树卿. MGGH 换热+吸收液喷淋冷凝复合技术应用于湿烟羽治理的研究[J]. 能源化工, 2018, 39(6):23-26.
- [3] 刘尚前. MGGH 技术在 600MW 机组中应用的技术、经济性分析[J]. 电子测试, 2015(24):78-80.
- [4] 李跃军. 燃煤电厂烟气脱白可行性分析[J]. 纯碱工业, 2019, 247(01):29-31.
- [5] 王亚峰, 马果骏. 美国电力研究院 (EPRI) 湿烟囱设计导则[J]. 上海电力, 2006, 19(5): 469-473.
- [6] 李跃军. 燃煤电厂烟气脱白可行性分析[J]. 纯碱工业, 2019(1): 28-30.
- [7] 李鹏飞, 佟会玲. 烟气酸露点计算方法比较和分析[J]. 锅炉技术, 2009(11): 5-8.

建筑石料开采与加工生产系统的除尘设计

张翔 武青山

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 概述

巢湖市宏光矿业有限公司于 2011 年投资建设了安徽省巢湖市马尾巴熔剂、水泥用石灰岩矿, 矿山建设开采建筑用石灰岩矿石 300 万吨/年, 该矿山为一新建的大型矿山。同时, 巢湖市宏光矿业有限公司在矿山北部也已建成一条年产 300 万吨矿石加工生产线。矿山生产的建筑石料主要服务于安徽省合肥市各类基础建设, 矿山及矿石加工出的产品为: 石料粒径为 5~20mm, 20~40mm, 40~80mm 三种建筑石料以及粒度小于 5mm 的粉料。

该矿山及加工线的建成, 大大缓解了安徽省省会合肥市建筑石料供应的紧张局面, 平抑了合肥市场建筑石料价格居高不下的局面。与此同时, 由于矿山开采和矿石加工所产生的大量粉尘无序排放, 给周边的农业、厂矿、居民等造成严重污染, 矿山及加工企业与周边关系紧张。况且该矿山开采和矿石加工距我国大型淡水湖巢湖仅三公里, 对该湖造成一定污染, 矿山开采和矿石加工线的粉尘治理迫在眉睫。

2014 年, 巢湖市宏光矿业有限公司委托合肥水泥研究设计院对矿山的粉尘进行综合治理研究和设计工作。我院在分析矿山生产线有可能产生粉尘的地点和加工系统的扬尘范围进行细致分析, 提出一整套治理方案, 并结合生产厂区的气象、风向、雨水等内在的自然地理情况, 对矿山开采及加工系统进行了分块段、分条件、不同方法采用不同的治理措施, 取得了良好的效果。

2 矿山开采与加工主要生产系统扬尘分析

2.1 矿山开采粉尘污染源

矿山主要扬尘点有: 凿岩(钻孔)中产生的粉尘、爆破产生的粉尘和烟气、

矿石（废土石）采装卸车过程中产生的扬尘、汽车运行时公路上的扬尘、加工破碎产生的粉尘等，均属于无组织排放源。

（1）凿岩钻孔产生的粉尘

采用凿岩机钻孔时产生的粉尘与产尘量和岩石性质、钻孔大小、钻孔方式及钻进速度有关系。工程采用干式凿岩，粉尘产生量约为 0.21kg/台 h。采矿工作正常使用 2 台潜孔钻机，工作 8h/d，每年工作 300 天，其总的粉尘产生量约为 1.008t/a。

（2）爆破产生的粉尘

采场采用中深孔爆破，爆破产尘量的大小和装药量、矿岩性质等因素有关。类比同类矿山，爆破产尘量约 10g/m³ 矿岩，年采剥总量 366.6×10⁴t，则爆破年产生粉尘约 13.73t/a。爆破后粒径大的粉尘在近距离内短时间内沉降，粒径 <10μm 的飘尘不易沉降。采场选用中深孔爆破虽可有效降低粉尘产生量。但小范围的粉尘飞扬还是对周边环境有较大影响。

（3）矿岩铲装中产生的粉尘

矿石由采区运至破碎站，在铲装过程中产生的部分扬尘。由于本项目矿石比重大、块度大、含湿量高，产生的扬尘量很少。

2.2 矿石加工运输系统粉尘污染源

（1）破碎筛分过程中产生的粉尘

根据现有矿山生产资料，并参照工业排污系数统计手册，矿区破碎筛分工序产生的粉尘排污系数约为 0.02%，矿山年产 300×10⁴t，则粉尘产生量为 600t/a，矿石加工系统的主要生产排尘系统排尘量大，也是粉尘对周边环境影响最大的矿山生产系统。

（2）矿石堆场扬尘

矿石堆场为无组织的排放源，矿石采用运矿车运至矿石破碎卸料口，卸车过程中产生少量的扬尘，另外在矿石用铲车装入汽车、成品石料倒运、石料准备运输出厂时也产生一定量的扬尘，扬尘的产生量与矿石的块度、含湿量和装运量有关。由于本项目矿石比重大、块度变化大、含尘量高，且石料外运量大，矿石堆

场产生的扬尘对生产有较大影响。

(3) 矿区道路扬尘

矿区的主要运输工具是汽车，加之场内道路多为石子路，因此汽车在运输过程不可避免地要产生扬尘，特别是当气候条件不利时，扬尘现象就更严重。对巢湖码头、城市交通等有较多的扬尘，特别是对运输道路两边的居民，生产生活设施造成大量的污染。类比同类行业、公路建设行业，矿石运输过程道路扬尘无组织排放浓度可达到 $60\text{mg}/\text{m}^3 \sim 40\text{mg}/\text{m}^3$ 。

矿区通过道路洒水抑尘来降低道路扬尘排放，洒水抑尘效率为 80%，则起尘量为 $1.52 \sim 6.10\text{g}/\text{a}$ 。

3 矿石开采和石料加工系统的除尘设计与除尘设备选型

3.1 矿山石料生产系统无组织排放的除尘设计

在石料生产系统中属于无组织排放源有：矿山生产凿岩（钻孔）中产生的粉尘、爆破产生的粉尘、矿石（废土石）采装卸车过程中产生的扬尘、破碎机卸矿口产生的扬尘、汽车运行时矿区道路扬尘、矿石堆场扬尘等。

(1) 矿山钻孔爆破产生的粉尘治理

矿山钻孔设备采用自带干式除尘装置，为了防止钻孔过程中的粉尘排放，设计中选用的全液压潜孔钻机带有干式除尘器，湿式凿岩，可有效地控制粉尘排放浓度。

为防止爆破产生大量粉尘，矿山推广使用水封爆破技术，即在每个炮孔填塞部分，不用原始的沙石而是用水袋封堵，使用盛满水的专用塑料袋代替或部分代替用沙土做成的炮泥，即水泡泥封堵爆破眼口，爆破时水泡泥中的水分被雾化，可使尘粒湿润、结团而减少粉尘产生量。矿山爆破时，形成一道天然水幕，有效防止爆破粉尘飞扬，使得爆破产生的粉尘得到有效的治理。

爆破使用水泡泥封堵炮眼，不仅可以取得与粘土炮泥同样的作用，还能降低爆炸产物的温度和浓度，有效地预防粉尘飞扬，使用水泡泥除尘效果十分明显，除尘率一般为 63%-80%。水封爆破剖面图详见图 1。

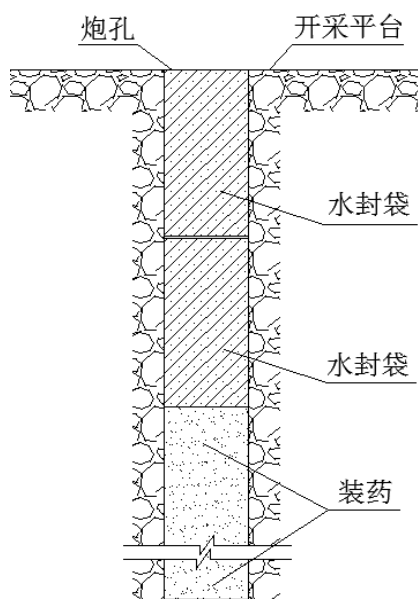


图1 水封爆破剖面图

(2) 破碎机卸矿口、矿区道路、矿石堆场扬尘治理

在破碎机的卸料口建立高压喷雾降尘系统，使得由采矿场矿车运至破碎机卸料口时，卸料口建立高压喷雾降尘系统开始启动，有效防止矿车卸料时的粉尘飞扬，起到降尘效果。对于采场和矿区道路上的扬尘，设计中选用一台洒水车，定时在采场和公路上喷雾洒水，以控制扬尘，避免对周围环境的影响。矿山主要运输道路和矿石加工区道路应当实施混凝土硬化，裸露场地应当采取覆盖或者绿化措施。强化矿区运输车辆管理，设立车辆进出口轮胎冲洗点，运输车辆采取密闭运输，严格控制车辆超载超限泼洒行为。

矿石堆场扬尘治理主要是在堆场铲车装卸场所，建立多套高效高压喷雾降尘系统，建筑石料装运时，配合粉尘监测系统，当粉尘浓度大于 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 时，高效高压喷雾降尘系统开始启动，使得矿石堆场铲车装卸场所粉尘浓度立刻降至 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，保证铲装工人在符合标准环境下生产，同时保证周边环境的清洁。

(3) 建立外运石料车的水幕除尘系统

石料加工厂的成品外运时，在公司外运道路及成品外运的计量设备附近，设计两套车辆水幕装置，使得进出公司的成品石料车辆，必须经过水幕除尘后方可进入外部运输道路，该公司选用车辆水幕除尘系统启用后，大大改善附近道路和

厂矿环境，获得附近厂矿和当地居民一致好评。

3.2 石料加工生产系统有组织排放的除尘设计

石料加工行业是污染较重的行业，粉尘排放量位居第二。石料加工系统是一个扬尘较为严重的地方，破碎机及振动筛各产尘点扬起的粉尘四处飞扬，工人无法靠近，呼吸困难。且粉尘一旦吸入体内，溶解于呼吸道的分泌液中，势必会影响到工人的身体健康。随着国家对岗位及大气环境质量标准的提高、以及环保排放指标的日益严格，石料加工系统加设除尘设施必须重新设计更新，给工人打造一个良好的工作环境，我院技术人员经现场实地考察，针对巢湖市宏光矿业有限公司年产 300 万吨石料加工生产线所选择的破碎筛分及皮带运输设备的实际情况，设计了一套完整的粉尘治理方案。

3.2.1 破碎筛分运输除尘设计

矿石加工破碎筛分系统由破碎站、筛分站及皮带长廊构成。破碎筛分运输系统由颚式破碎机、圆锥破碎机、圆型振动筛以及多条胶带运输机等组成。除尘系统采用防尘与除尘相结合的措施，即密闭抽尘净化排放方案。依据生产工艺产尘的特点以及石灰岩粉尘性质的特点，再结合当地现场的气候条件、生产条件等，采用干式除尘法，收集下来的粉尘通过加湿机处理后进行回收利用。矿山生产系统粉尘治理系统图见图 2。

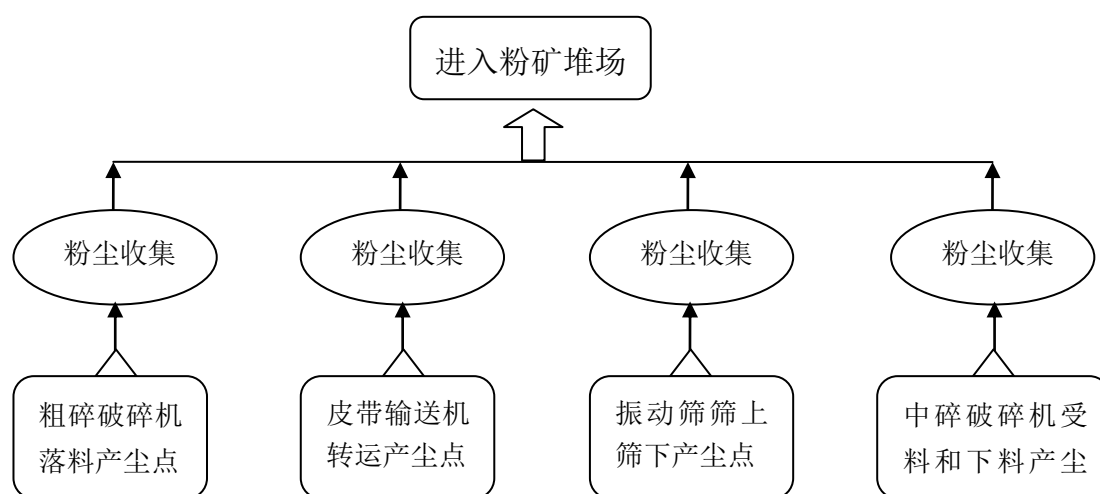


图 2 矿山生产系统粉尘治理系统图

(1) 除尘设计原则

矿石破碎加工、储存采用全封闭作业设施，配备收尘装置或者符合粉尘防治技术标准的其他降尘抑尘装置。

除尘设计考虑在保证环境效益及不影响生产工艺前提下，兼顾除尘设备动力消耗，运行管理与维修等因素，力求综合效益达到较优。

在落料冲击气流强烈的地点（产尘点）一粗碎颚式破碎机落料产尘点、胶带机转运点、振动筛筛上筛下、中碎圆锥破碎机受料和下料。除尘方式采用产尘点密闭抽风除尘方式，抽出的含尘空气经收尘器除尘后排放，除尘效率 $>90\%$ ，无组织粉尘年产生量为 $<60t$ ，粉尘排放可得到很好的控制。同时对堆场采用辅助的喷雾降尘方法。

(2) 除尘系统划分

根据工艺布置情况，本次除尘系统形式为机械抽风、相对集中式除尘系统。根据工艺特点，尽量选择相对集中的除尘点为一个除尘系统。

在此基础上将除尘系统划分为3个独立系统：

- a. 粗碎除尘系统：包括颚式破碎机受料和下料；
- b. 筛分除尘系统：包括1#胶带机转载（3#卸料胶带）和圆振筛面、圆振筛上受料胶带、圆振筛下受料胶带；
- c. 中破细碎破碎除尘系统：包括圆锥破碎机受料和下料、2#卸料胶带、3#受料胶带。

(3) 除尘系统设计

各除尘系统风量估算如下：

- a. 粗碎除尘系统：振动给料机及颚式破碎机受料和下料口，风量 $5000m^3/h$ ；
- b. 筛分除尘系统：3#胶带机卸料点，风量 $4500m^3/h$ ，圆振筛面风量 $10000m^3/h$ ，筛上胶带机受料点风量 $4500m^3/h$ ，筛下胶带机受料点风量 $4000m^3/h$ ，系统合计风量 $23000 m^3/h$ ；
- c. 中碎除尘系统：圆锥破碎机受料和下料口，风量 $4500 m^3/h$ ，2#胶带卸料

点风量 4500 m³/h, 3#胶带受料点风量 4500 m³/h, 系统合计风量 13500 m³/h。

(4) 除尘管道设计

a. 排尘管道设计的原则是在保证各吸风点的风量符合设计要求且不妨碍生产操作前提下, 使管路最短;

b. 为防止管内积灰和便于清扫, 风管应尽可能垂直或倾斜敷设(倾角 $\geq 45^\circ$), 特殊情况下必须水平敷设, 水平管应有足够的气流速度(16~20m/s), 以防管内沉积粉尘;

c. 一个除尘系统的吸风点过多, 并联支管阻力不易平衡, 因此多采用集合管。

按照上述原则, 风管风速选择为: 水平管段 16~18m/s; 倾斜管斜管段和垂直管段 12~15m/s。

3.2.2 主要除尘设备的选型要求

矿石破碎加工、储存应当采用全封闭作业设施, 配备收尘装置或者符合粉尘防治技术标准的其他降尘抑尘装置。考虑物料的生产工艺情况, 在工艺过程中适当位置加环境保护装置, 最大限度控制矿山生产及矿石加工系统的粉尘标准, 选择先进可靠的粉尘捕捉和处理设备, 使生产系统粉尘排放达到国家要求的排放标准, 还大自然一片绿荫。

4 矿山除尘及生产监控系统的建立

为更好解决矿山在开采加工等在生产过程中存在粉尘、扬尘等生态环境污染和安全生产问题。巢湖市宏光矿业有限公司在矿山生产企业建立视频监控系统、生产区出入口管理系统、扬尘监控系统, 加强矿山扬尘和安全生产管理。设计要求矿山采石和加工作业现场安装扬尘监控设备, 实时采集扬尘数据, 实时监控生产系统环境保护。

本系统是将粉尘在线监测技术、喷雾降尘技术、数字控制技术有机结合, 降尘装置可根据监测数据, 智能化的实施喷雾降尘, 同时监测数据可作为矿山信息化建设的重要基础数据。矿山除尘设计着力于矿石加工生产线粉尘监测技术的研究, 硬件选型和接口匹配, 在线粉尘测量和监控的技术, 给出了一套初步可行的设计

方案，具有稳定精确，具有自主知识产权的粉尘在线自动监测系统。通过自由接口通讯协议与 PC 上位机通讯，组成粉尘监控系统，实现粉尘的在线自动监测和控制。

5 矿山的粉尘与加工后的的粉矿再利用

巢湖市宏光矿业有限公司年产建筑石料用石灰岩 300 万吨，每年生产出小于 5mm 的粉矿约 60 万吨，而收尘后集中的灰尘约 10 万吨，这么多的粉矿及粉尘，不仅堆放场地是个问题，也给周边环境造成较大污染，解决这些粉矿及粉尘的去向，也是厂方急需解决的问题。我们通过对周边的市场进行分析，建议厂方在石料加工线附近投资建设年产 2 亿块以石粉为主要原料的免烧砖生产线，初步估算，年消耗加工后的粉矿约 52 万吨。巢湖市宏光矿业有限公司 2015 年底建成一条年产 2 亿块免烧砖生产线，基本将矿山产生的粉矿和粉尘用完，同时每年给矿山增加了收入 3000 万元。既做到粉矿不暂用土地，又不给周边环境造成危害，同时又给矿山带来了收入，可谓一举三得。

6 结语

随着巢湖市宏光矿业有限公司年产 300 万吨石料加工生产线一套完整的粉尘治理工程的建成与投产，同时在石料加工线附近投资建设年产 2 亿块以石粉为主要原料的免烧砖生产线也相继投产，巢湖市宏光矿业有限公司和周边厂矿及居民的环境也和谐了，对巢湖水面的污染也减到最小，公司也不要疲于奔命协调各种地方关系和应付罚单，公司在环保方面的投资一年就可收回，现在企业的社会效益和经济效益达到目前最好水平。

Φ3.2×13m 球磨机系统节能技术改造实例分析

葛 晓

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 摘要

改造公司为中国建材集团南方水泥有限公司核心子公司之一, 技改前公司主要生产 P.042.5 和 P.C32.5R 水泥, 年水泥粉磨能力达 120 万吨。水泥磨系统采用传统开路生产, 粉磨 PC32.5 水泥电耗 36.8kWh/t, P042.5 水泥电耗则高达 40kWh/t, 能耗较大。本次技改主要对二线其中一台 Φ 3.2×13m 球磨机进行加辊技术升级改造, 达到节能降耗的目的。

2 技改工艺主机配置选择

2.1 公司原材料情况

混合材水分较大, 特别是脱硫石膏、矿渣含水量高达 15%, 正常生产原材料综合水分 1.78%, 最高时高达 2.0%, 且熟料温度较高, 最高时高达~100℃。具体物料配比见表 1。

物料配比表 表 1

熟物料组成	熟熟料	石灰石	脱硫石膏	矿渣	石煤渣
配比 (%)	76	7	5	5	7
含水量 (%)		1	15	15	3

2.2 工艺主机配置选择

国产辊压机经过近三十年的发展, 装备与工艺技术十分成熟, 由于南方水泥对本次技改投资总额有限制(不超过 1000 万), 辊压机只能选择南方内部闲置的 HFCG160-140 辊压机, 根据该公司原材料情况, 合理的选择辊压机系统的主机配置。由于 HFCG160-140 辊压机装机功率 2×1120kW, Φ 3.2×13m 球磨机装机功率 1600 kW, 辊压机与球磨机的装机功率比是 1.4, 属于高配, 可以充分利用多破少磨的原理, 物料通过挤压分级提供给球磨机的入磨比表面积即可达 220 m²/kg 以

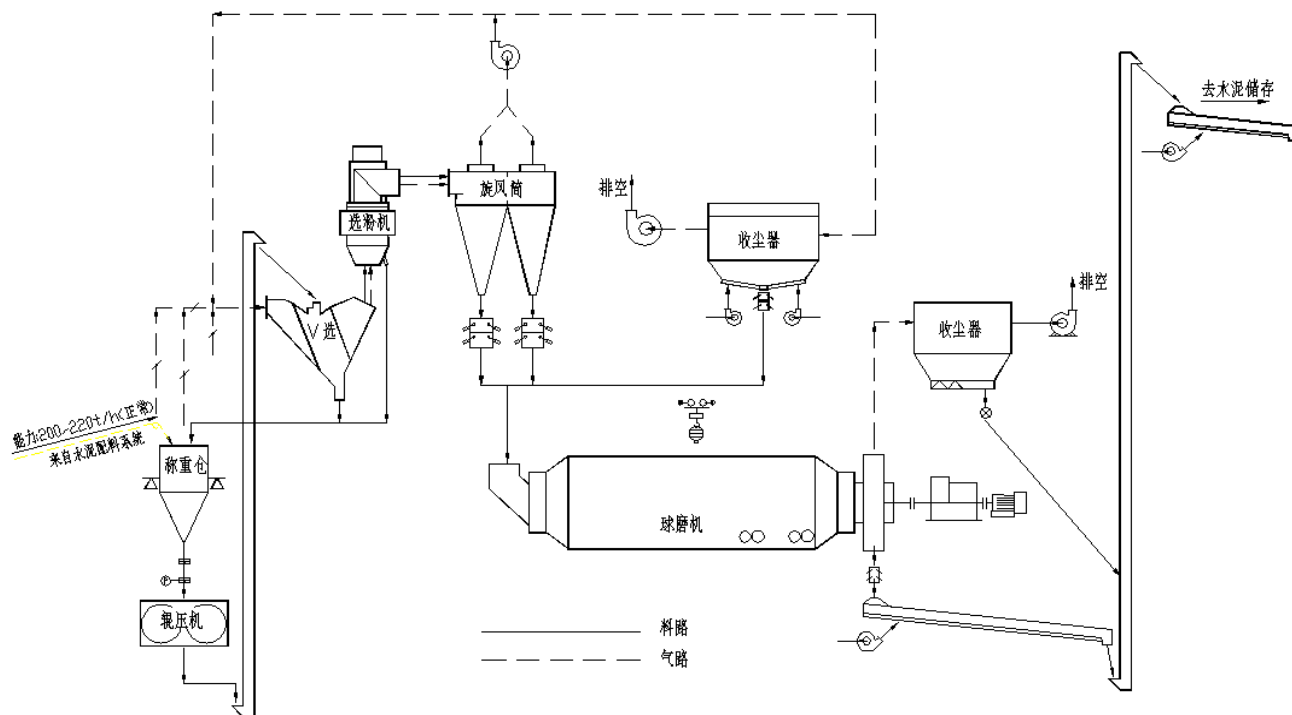
上，从而充分发挥挤压与粉磨各自的最大优势，并最终反映于产量的大幅增长。

(1) 当原材料综合水分 $\leq 1.5\%$ ，熟料温度 $< 60^{\circ}\text{C}$ 时可采用常规配置，常规主机配置表见表 2。常规配置工艺流程图见图 1。

表 2 常规主机配置表

参数	主机设备及运行参数	数量	装机功率(kW)	生产能力(t/h)
主机配置	HFCG160-140 辊压机, 入机粒度 $\leq 80\text{mm}$	1	1120 \times 2	930~1050t/h
	HFV3500 V 型分级机, 风量: ~ 21 万 m^3/h	1	/	1000 t/h
	HES3500 下进风式选粉机, 风量: ~ 27 万 m^3/h	1	132	160~180 t/h
	NSE1000 提升机 提升量: 1000t/h	1	110 \times 2	最大提升量: 1000t/h
	$\Phi 3.8 \times 13\text{m}$ 球磨机	1	1600	$\geq 130\text{t/h}$
	辊压机与球磨机装机功率比			1.4
设计指标	水泥品种			P.O42.5 水泥
	产品比表面积 (m^2/kg)			350 \pm 10
	系统产量 (t/h)			$\geq 130\text{t/h}$
	系统单产电耗 (kWh/t)			≤ 29

说明：系统指标视物料的易磨性而定。



(2) 技改公司原材料综合水分较高，且熟料温度高时采用了特殊的主机配置形式，配置表见表 3，工艺流程图见图 2。

表 3 技改公司主机配置表

参数	主机设备及运行参数	数量	装机功率(kW)	生产能力(t/h)
主机配置	HFCG160-140 辊压机，入机粒度≤80mm	1	1120×2	930~1050t/h
	HFVD3500 组合式动态选粉机，风量：~21 万 m ³ /h	1	/	1000 t/h
	FGM128-2×11（大布袋收尘器）	1		160~180 t/h
	Φ3.2×13m 球磨机（磨内改造）	1	1600	≥130t/h
	辊压机与球磨机装机功率比			1.4
运行指标	水泥品种			P.O42.5 水泥
	产品比表面积（m ² /kg）			350±10
	系统产量（t/h）			~146t/h
	系统单产电耗（kWh/t）			≤28.5

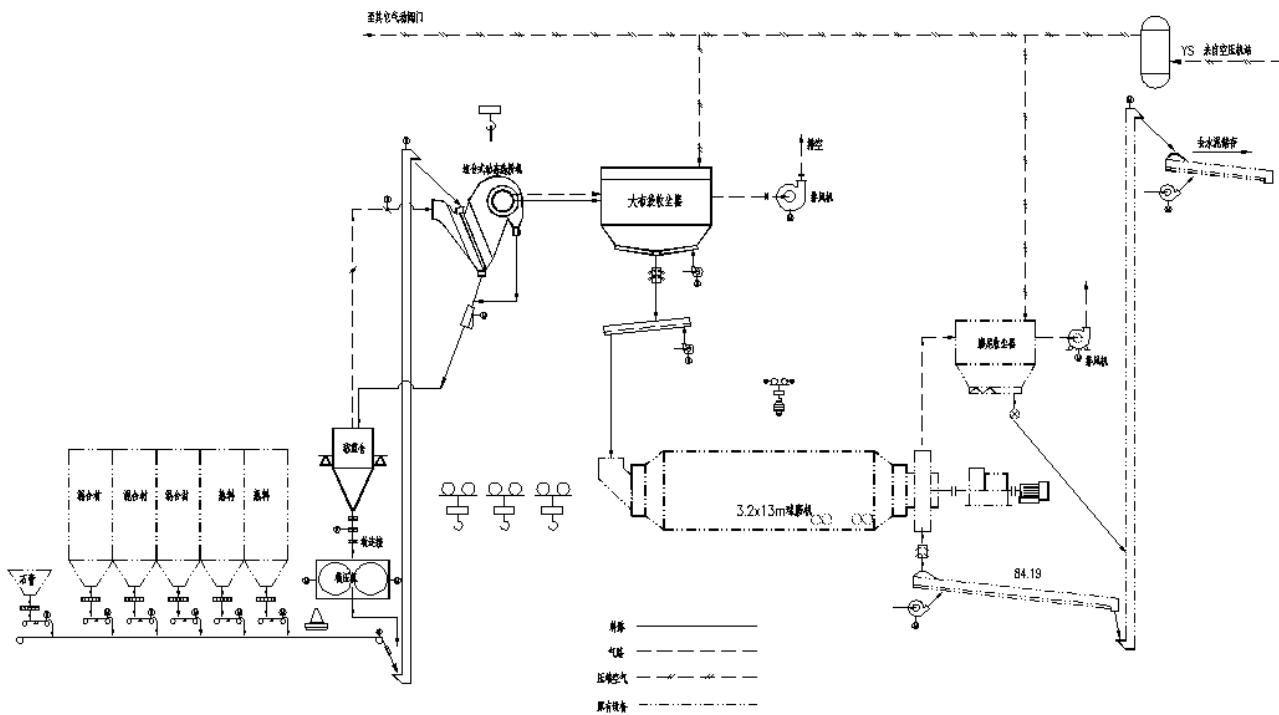


图 2 技改公司工艺流程图

工艺流程简述：技改公司原材料综合水分高、熟料温度高，故配好的混合原料（熟料、石膏、石灰石、矿渣、石煤渣）通过皮带机输送至辊压机系统料饼提

升机，新鲜物料汇同辊压机挤压后的物料送入新增的 HFVD3500 组合式动态选粉机。物料经过 HFVD 型组合式动态选粉机烘干、分选，粗粉返回辊压机稳流称重仓，细粉（半成品）被风带入大布袋收尘器内，经收尘器收集后的细粉通过空气输送斜槽送至原有球磨机，出磨水泥即为成品再由原有空气输送斜槽、提升机等送入原有水泥库内。辊压机系统含尘气体经大布袋收尘器收尘后排空。磨内通风由单独收尘系统完成，收下的粉尘也做为成品送入水泥储存库内。

3 本技改项目的特点

(1) 利用南方水泥集团内部闲置的 HFCG160-140 辊压机、NSE1000 提升机等设备，使闲置的资产循环利用，减少设备投资，节省开支，增加效益，符合资源节约型社会发展观。

(2) 采用我院专利设备 HFVD3500 组合式动态选粉机，它是由 V 型静态选粉机与卧式转笼式动态选粉机组合而成，它兼有 V 型静态选粉机和第三代动态选粉机的优点，可以灵活的控制入磨粒度。

(3) 系统辊压机与球磨机装机功率比高达 1.4，可以有效控制入磨机物料细度（在 R80um）17%~20%，比表 $200\sim 240\text{m}^2/\text{kg}$ 。入磨物料很细，可以减少物料在球磨机内的停留时间，降低研磨体的平均球径，降低研磨体消耗，降低粉磨电耗和生产噪音。且系统选粉用风来自大气中的自然风，有效的降低了入磨物料的温度，改善了磨机的粉磨状况和出磨水泥温度。同时，采用组合式动态选粉机占地面积小，建筑高度低，工艺布置简单，系统阻力小，结构简单，系统总装机功率低。

(4) 系统采用先进的集散型智能控制系统(DCS)。检测点的设置以满足工艺生产可靠运行为前提，一般的工艺参数仅设置显示，重要参数设报警和记录，在生产的关键环节设置自动控制回路。主要设备如辊压机采用电动进料装置和自动纠偏装置，有效解决了因设备偏辊造成的系统停机现象。设备、电机等也均采用国内最高效节能设备，同时系统排风机电机采用变频调速。

4 本技改项目达到的效果

(1) 技改后指标有大幅度提升

技改系统投产两年多，产量稳定在 145t/h 以上，电耗 28kWh/t 以下，较技改前粉磨工序电耗下降 12kWh/t，每年可节电约 1200×10⁴ kWh。技改前后指标对比详见表 4。

表 4 技改前后指标对比表

PO42.5 水泥	台时产量	粉磨工序电耗	产品比表面积
技改前	40t/h	40 kWh/t	350m ² /kg
技改后	146t/h	28 kWh/t	353m ² /kg

(2) 技改投资省、社会效益高

整个技改投资费用 967.89 万，技改后系统每年处理大量工业废渣（矿渣、石煤渣），减少了对环境的污染，实现了废弃物的充分利用和资源的再利用，符合科学发展观，建设资源节约型、环境友好型社会的总体要求，具有很高的社会效益。

水泥行业无组织排放粉尘治理现状研究

李联康

(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

纵观整个水泥行业,乃至拓展到建材、冶金、化工、煤炭等领域,其生产过程中粉尘的无组织排放问题都是亟待解决的问题,随着我国环保要求的日益提高,国家也陆续出台了相应的法律、法规及标准。

《中华人民共和国大气污染防治法》(2015年8月29日修订,中华人民共和国主席令第三十一号)中第四十八条规定:钢铁、建材、有色金属、石油、化工、制药、矿产开采等企业,应当加强精细化管理,采取集中收集处理等措施,严格控制粉尘和气态污染物的排放。工业生产企业应当采取密闭、围挡、遮盖、清扫、洒水等措施,减少内部物料的堆存、传输、装卸等环节产生的粉尘和气态污染物的排放。第七十条规定:装卸物料应当采取密闭或者喷淋等方式防治扬尘污染。第七十二条规定:贮存煤炭、煤矸石、煤渣、煤灰、水泥、石灰、石膏、砂土等易产生扬尘的物料应当密闭;不能密闭的,应当设置不低于堆放物高度的严密围挡,并采取有效覆盖措施防治扬尘污染。

《水泥企业大气污染物排放标准》(GB4915-2013)中对水泥企业无组织排放提出了要求:水泥工业企业的物料处理、输送、装卸、储存过程中应当封闭,对块石、粘湿物料、浆料以及车船装卸料过程也可采取其他有效抑尘措施,控制颗粒物无组织排放。并且要求所有水泥企业(不论新建还是现有),其颗粒物排放浓度限值为 $0.5\text{mg}/\text{m}^3$,相比2004版的该标准,排放浓度更严格,标准的适用范围也更宽广。

2017年我国熟料总产能约19亿吨,按照水泥企业无组织排放工业粉尘产污系数 $0.1\text{kg}/\text{t}$ 熟料估算,则我国水泥企业全年生产过程中产生的无组织排放工业粉尘

约 19 万吨左右，如果没有有效的治理措施，这些粉尘扩散到空气后将会对环境造成巨大的污染。

1 水泥行业粉尘无组织排放产生环节

水泥工业粉尘无组织排放是指水泥生产过程（从原料进厂至水泥出厂即厂区范围内）中产生的粉尘未经排气筒或未通过收尘设施处理的无规则排放。水泥企业粉尘无组织排放大多产生于原料运输，物料转运，物料下料口，水泥出厂等环节，若对上述过程未采取有效的降尘措施和手段，则散逸的粉尘直接排入大气，对环境会造成巨大的污染，对工人的身体造成巨大的伤害。

水泥厂内无组织排放粉尘的种类有原料粉尘、生料粉尘、燃料粉尘、熟料粉尘和水泥粉尘等。

（1）原料粉尘主要来自钙质原料（石灰石）、硅铝质原料（砂岩、黏土、粉煤灰等）和铁质原料（铁粉、硫酸渣等）进厂、破碎和预均化环节，此类粉尘无组织排放占水泥企业无组织排放的 50% 左右。

（2）生料粉尘主要指原料配料、粉磨、均化、输送过程中产生的无组织排放，该种粉尘无组织排放随着水泥工业的技术进步越来越小。

（3）燃料粉尘主要指煤进厂、储存、倒运、破碎、粉磨、输送等过程中产生的无组织排放，尤其装卸、储存和倒运过程产生的煤粉尘排放居多。

（4）熟料粉尘无组织排放主要来自熟料输送、卸料、散装、二次倒运过程，尤其以二次倒运产生的扬尘居多。

（5）水泥粉尘无组织排放主要来自于水泥包装、散装和运输环节，尤其以装运环节居多。

2 水泥行业粉尘无组织排放的危害

2.1 对人体健康的危害

水泥行业粉尘无组织排放有效排放高度较低，大气污染物水平和垂直的扩散空间较小，没有经过充分扩散稀释就进入地面呼吸带，更易对人体呼吸系统健康造成危害，是造成职业性尘肺病的罪魁祸首。

2.2 对大气环境的污染

水泥行业粉尘无组织排放会在排放点附近形成超标污染区。在大气环流作用下影响范围可至 500-1000 公里的地区，日积月累造成大气环境严重污染，雾霾频发，据统计，北方城市的 PM2.5 来源中，约 1/3 的贡献来自于无组织排放粉尘。

2.3 对工业生产的影响

水泥行业粉尘无组织排放，其接触到的生产设备会产生不同程度的浸蚀和腐蚀，降低使用寿命，影响产品品质。

3 水泥行业粉尘无组织排放治理难点

3.1 政策方面缺乏标准

我国近年来陆续出台了一些涉及到无组织排放要求的政策、法规、标准等，但是总的来说，与有组织排放相比，国内无组织排放的粉尘治理在一定程度上被忽视了。大部分政策法规的描述只是陈述性，并且没有具体、有效的技术要求，可以预想，将来如果没有强制性、约束性的技术规范予以配合，无组织粉尘治理的难度依然会相当大。

3.2 技术方面缺乏创新

水泥厂内有组织排放的特点是粉尘汇集到单一排放口集中排放。针对这一类型的污染治理，已经有很成熟的除尘技术和日趋严格的排放标准，可以得到很好的控制。而无组织排放多为敞开式环境，粉尘散逸空间大，基本不可能按照有组织排放粉尘治理那样采用集中收集处理的方式。目前在我国，无组织排放的粉尘治理仍然是一个技术难题，国内在技术上仍较偏重有组织排放的治理，以袋式、静电除尘两大流派之间的竞争为主，无组织排放涉及很少，现在最常用的方法无非就是场地密闭+水雾喷淋的方式，但是这种方式并没有根本性的技术革新，密闭空间内的人员工作环境、设备运行状况恶劣依然是不可避免的问题。

3.3 监控方面缺乏手段

现在很多水泥企业加装无组织排放粉尘的除尘、抑尘设备并不是因为环保要求，而是卫生系统针对职业病防范的强制性控制。很多水泥企业的无组织粉尘排

放监控因为可操作性较差，所以相应的除尘设施基本就成了摆设。因为没有在线监测，一些企业为了蒙混过关躲避处罚，不开机运转或在实测时加注过量的水降尘，即使设置了在线监测，在实际监控过程中仍然存在一定的修改参数的操作空间。未来的时间内，监管手段需要进一步开发，监管力度也需要进一步加大，必要的法律、法规必须及时出台，才能杜绝某些水泥企业的侥幸心理，把无组织排放的粉尘治理真正落到实处。

4 水泥行业粉尘无组织排放治理措施

4.1 生产工艺优化设计

生产工艺是水泥厂的根本，从工艺设计优化的角度出发，就可以从根本上对粉尘的无组织排放进行把控，虽然不可能杜绝粉尘无组织排放的产生，但是却是最简单有效的降低粉尘无组织排放的措施。

具体涉及到的工艺环节包括：选择合适的堆取料方式，尽量较少大落差卸料方式；降低转运点的上下游设备的高差；适当降低皮带机等输送设备的运行速度；适当加长皮带机受料段的导料槽长度；适当加大散装机等产尘环节的收尘器风量等。

4.2 产尘环节封闭处理

水泥厂中部分工段由于其特殊的工作环境和工作制度，无法进行有效的粉尘收集工作，对于这种粉尘不易收集的产尘工段，首先我们要考虑的是阻止其粉尘的弥漫及散逸，需对其进行密封封闭处理，将这些产生的粉尘限制在密闭的空间内，不至于对整个厂区乃至厂区外部环境造成危害。

比较典型的需要封闭的产尘环节有原燃料的汽车卸料区域，原燃料的堆料、储存及取料区域等。但是这些区域封闭后其内部人员操作环境和设备运行环境恶化，还需要和其他的收尘、抑尘措施相结合，才能达到比较好的粉尘治理效果。

4.3 收尘器收集处理（干式捕尘）

作为水泥企业最成熟的粉尘治理措施，使用收尘器收集粉尘在有组织排放粉尘治理环节起到了巨大的作用，同样的在无组织排放粉尘治理部分环节，尤其在

一些原料及成品的倒运、卸料环节仍然是可以借鉴利用的。

最典型例子就是粉磨站熟料卸车环节的收尘处理，将原来敞开式的卸料坑周围加上彩钢板维护形成一个密闭的空间，再从受料坑上部使用大风量收尘器进行抽吸，能够有效的处理熟料卸车环节产生的大量粉尘。

4.4 水雾喷淋处理

在部分粉尘不易收集且粉尘量巨大的区域，或者在一些容易产生粉尘的输送设备上，可考虑对物料进行水雾喷淋处理，他的优点是设备操作维护简便，抑尘效果较好，但是缺点也很明显，由于其雾化喷水粒径较大，所需用水量也较大，可能会导致电耗增加，对于高温区域，水分蒸发后又会产生扬尘，对于寒冷区域，则根本无法使用。

在原燃料堆棚内、破碎机卸料斗上、厂区道路上进行水雾喷淋是现在水泥厂最常用也是最简单的粉尘无组织排放的处理措施，但是需要注意的是，最简单的方式并不意味着性价比最高，80年代美国矿山委托西部研究所所完成的《汽车运输道路粉尘与控制》研究报告中，对美国路条矿山现有的30多种道路抑尘剂的费用和性能进行了比较，得出的结论称：已经证实，道路洒水是成本效益最差的途径之一。我们有理由相信，水泥厂中粉尘无组织排放的水雾喷淋处理措施应该也不是最理想的处理方式。

4.5 云雾（干雾）抑尘处理

云雾抑尘技术是通过高压离子雾化和超声波雾化，可产生 $1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 的超细干雾；超细干雾颗粒细密，充分增加与粉尘颗粒的接触面积，水雾颗粒与粉尘颗粒碰撞并凝聚，形成团聚物，团聚物不断变大变重，直至最后自然沉降，达到消除粉尘的目的；所产生的干雾颗粒，30%~40%粒径在 $2.5\mu\text{m}$ 以下，对大气细微颗粒污染的防治效果明显。

由于云雾抑尘喷水量低，雾化粒径小，近年来已经逐渐取代了原来老式的水雾喷淋，它的适用性更加宽，可以实现对汽车卸料斗、熟料散装部位的粉尘压制，而不用担心喷水量对产品质量产生影响。

对于水泥厂常用原料堆棚来说，考虑大概每 2~4 m² 设置一个雾化喷头，每个雾化喷头的喷水量大概在 0.25L/h，每平米堆棚的设备造价大约为 50 元。

4.6 生物纳膜抑尘处理

生物纳膜是层间距达到纳米级的双电离层膜，能最大限度增加水分子的延展性，并具有强电荷吸附性；将生物纳膜喷附在物料表面，能吸引和团聚小颗粒粉尘，使其聚合成大颗粒状尘粒，自重增加而沉降；该技术的除尘率最高可达 99% 以上，平均运行成本为 0.2~0.5 元/吨。

生物药剂是生物纳膜抑尘技术的核心，纯生物药剂将成千上万的超微颗粒进行包裹，团聚作用，达到增加重量后降落的目的，自此有效抑制了灰尘产生和散发，并且在一定时间内该制剂就自行分解，一般约 3 小时内降解 70%，48 小时后降解 95% 以上。无毒性与可降解性，完全不会影响到场地作业工人的身体健康及后续产品的质量。

生物纳膜抑尘技术可以说是当今最先进的无组织排放粉尘治理手段，他是唯一入选科技部、环境部共同发布的《大气污染防治先进技术汇编》的无组织排放源控制技术。它将生物药剂喷附在矿石表面，最大限度的抑制矿石在生产加工过程中产生粉尘。此类除尘技术作用于粉尘散发前除尘，相较于生产后除尘的其他除尘技术，具有更大的优势与更高的使用价值。这种从末端治理转向源头追溯的理念个人觉得是粉尘治理技术的一个革命性的突破。

但是由于生物纳膜抑尘技术一次性设备投资高，后期运行成本高，现在仍然没有得到普及，但是随着环保要求的日益提高，以及生物纳膜抑尘技术的不断改进，未来的生物纳膜抑尘技术应该是大有可期的。

5 结语

近年来，我国大气污染防治已经进入全面推进和综合整治的新阶段，对先进、适用的大气污染防治技术提出了更加迫切的需求。

水泥厂的无组织排放粉尘治理技术也取得了较大的进步，但是总的来说，由于行业固有理念的限制，现阶段的无组织排放粉尘治理方式仍然较为粗犷。“十三

五”期间，国家将对烟粉尘进行总量控制，同时排污费收费体系也在不断完善，重点污染行业监测和治理标准将更为细化，监管更为严格。驱动型的顶层政策趋严有望倒逼行业发展，先进的粉尘治理技术将会快速的得到普及，更多的先进技术将会得到开发利用。

水泥厂无组织排放粉尘治理技术多样，综合解决方案将成主流。以新型技术如生物纳膜、干雾技术等为核心的综合治理方式，可获得较高的竞争力，有效提高抑尘效率，节约成本，满足日益严格的治理标准。与传统的除尘方式相比，以新型技术为核心的综合治理方式节电可达 75%，节水可达 95%，抑尘率达到 98% 以上。因此，水泥厂无组织排放粉尘治理改造工程在未来的一段时间内还是具有很大的市场规模与效益的。

大型石灰石破碎机锤头材质选择与失效分析

谢志勇 许涛 熊晖 刘永驰 孙桂祥 陈忠华
(合肥水泥研究设计院有限公司, 安徽 合肥 230051)

1 序言

随着新型干法水泥大型装备技术的快速发展,国内 5000t/d、10000t/d 大型干法水泥生产线日益增多。石灰石作为水泥生产的主要原材料,为确保其充足供应,大多水泥生产厂家采用大型单段转子锤式破碎机(台产 400-1200t/h,应用于一破或粗破)进行破碎,外形结构如图 1 所示。破碎后的石灰石入球磨机研磨,粉磨至一定细度后出磨,出磨后的石灰石粉与其它较质辅料一起进入旋窑,经高温煅烧后变成水泥熟料,熟料经高温冷却破碎后入库贮存,贮存的熟料经辊压机碾压后入球磨机研磨,粉磨至一定细度后出磨,出磨后的细粉直接作为水泥成品包装销售。

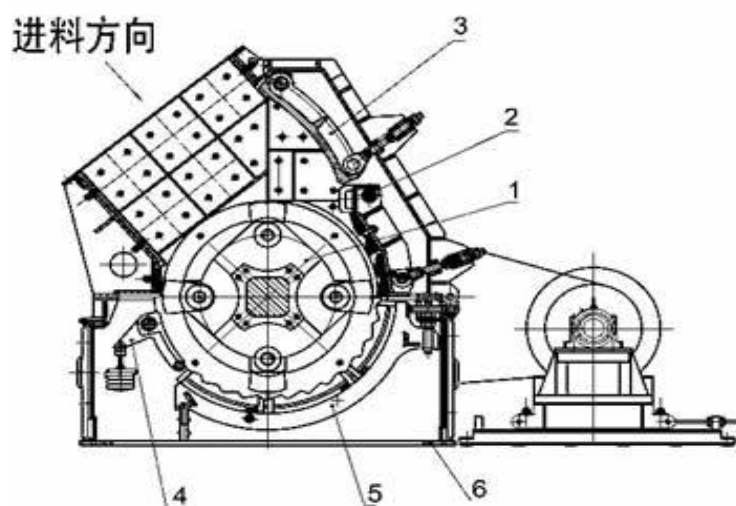


图 1 大型单段锤式破碎机结构图

1. 转子 2. 破碎板 3. 反击板 4. 保险门 5. 出料篦板 6. 壳体

水泥厂用石灰石大多为露天爆破开采,原始块度尺寸很大(500-1500mm),由铲车或装载机倒入料仓,经板链机输送至破碎机进料口,石灰石落至带有减震装置的给料辊上,两个同向回转的给料辊将石灰石送入高速旋转的转子上,锤头以

较高的线速度（30-50m/s）打击石灰石，同时击碎或抛起料块，被抛起的料块撞击到反击衬板上或自相碰撞而再次破碎，然后被锤头带入破碎板和出料篦板工作区继续受到打击和挤压破碎，直至小于篦缝尺寸（篦缝 25-75mm）时从机腔下部排出，物料破碎比高达 1:20-1:60，由此可见大型石灰石破碎机的工况条件十分恶劣。

作为大型石灰石破碎机关键易磨件的锤头，在工作运转过程中，需要承受大块物料的强烈冲击，要求具有良好的冲击韧性和较高的硬度。由于各水泥生产厂家石灰石品质、转速、进料粒度、物料综合水分等方面的差异较大，同样材质锤头的使用寿命差异很大，短则几天就磨损完，长则几年运转良好。由此可见，在成本最低和效率最高的情况下，选择适合自己破碎机工况条件材质的锤头就显得十分关键。

大型石灰石破碎机锤头重量约 80~150kg，外形如图 2 所示。目前常用的锤头材质主要有高锰钢、超高锰钢、双金属液热复合三大类，通过特殊的生产工艺而衍生的材质多达十余种。如有高锰钢(Mn13)、合金高锰钢（Mn13CrMo）、高锰钢工作表面堆焊耐磨层、高锰钢镶铸高铬合金铸铁、高锰钢镶铸钢结硬质合金、超高锰钢(Mn18CrMo)、超高锰钢工作表面堆焊耐磨层、超高锰钢镶铸高铬合金铸铁、超高锰钢镶铸钢结硬质合金、双金属液热复合。现将各种材质锤头及适应工况条件详述如下，仅供参考。

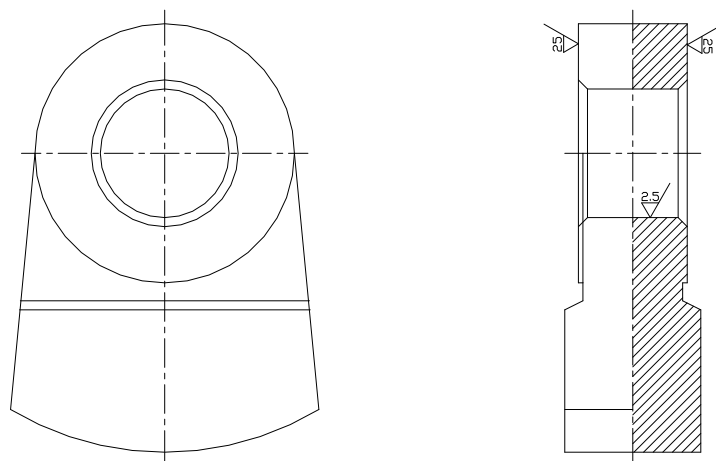


图 2 大型石灰石破碎机锤头结构图

2 高锰钢类锤头及适应工况条件

2.1 高锰钢

高锰钢是传统的耐磨材料，距今已有一百多年的历史。高锰钢铸态组织为奥氏体和部分碳化物。碳化物数量多时会在晶界上以网状出现，严重割裂基体组织，降低了基体组织的韧性；但经过水韧处理后，基体组织完全奥氏体化，塑性和韧性大大提高，化学成分及性能见表1。在较大的冲击或接触应力的作用下，高锰钢表层奥氏体组织发生相变硬化和加工硬化，原始硬度由HB180~200迅速上升到HB450~500，耐磨性得到极大的提高。

外载荷越大，高锰钢表层加工硬化程度越高；但从表面向内的变形程度逐渐减少，加工硬化程度逐渐降低；因此加工硬化层的下面仍是奥氏体组织，它与硬化层牢固地结合在一起，具有良好的抗磨料犁削磨损性能和较好的抗冲击疲劳性能。当表层硬化层逐渐被磨耗的同时，在强烈外载荷的作用下，硬化层不断向内发展，始终维持稳定的硬化层，具有较好的抗磨性能。

表1 高锰钢化学成分及性能

名称 序号	化学成分 (%)				热处理	机械性能		金相组织
	C	Mn	Si	P		冲击韧性 (J/cm ²)	硬度 (HB)	
1	C	Mn	Si	P	水韧处理	≥80	150~200	奥氏体
2	0.75~1.45	10~14	0.3~0.6	≤0.07				

2.2 合金化高锰钢

为了进一步提高高锰钢的耐磨性能，在保留足够韧性的前提下，对高锰钢进行合金化处理，研制了改性合金高锰钢。如单独或复合加入Cr、Mo、V等，改善高锰钢的屈服强度、奥氏体加工硬化能力、晶粒细化度、弥散强化程度等，进一步提高高锰钢的使用寿命^[1, 2]。

Cr是强扩散元素，影响碳的扩散过程，提高奥氏体的稳定性、屈服强度和淬透性。Cr是较强的碳化物形成元素(与Mn比较)，能形成比 $(Fe \cdot Mn)_3C$ 更稳定的 $(Fe \cdot Cr)_3C$ 型合金渗碳体。当Cr含量超过2.5%时，基体组织韧性急剧下降^[3]。高温

时，Mo固溶奥氏体，冷却凝固后部分固溶于体中，部分分布在碳化物中，改善奥氏体沿树枝晶发展的倾向，抑制过冷奥氏体分解，提高奥氏体的稳定性。

合金化高锰钢经过沉淀强化热处理，晶粒细化，奥氏体晶界基本无碳化物出现。虽然基体上有部分碳化物，但呈细小颗粒状均匀弥散分布，是奥氏体基体的强化相，大大提高了合金高锰钢的耐磨性^[4]。

2.3 高锰钢工作表面堆焊耐磨层

随着表面堆焊技术的发展，研制了高锰钢工作表面堆焊耐磨层锤头。堆焊时，在高温脆性区，晶界周围易产生低熔点共晶体，如Fe+FeS(熔点985℃)、FeS+FeO(熔点940℃)及Fe+Fe₃P(熔点1050℃)等。由于高锰钢的线膨胀系数大(约为低碳钢的1.3倍)，导热系数低(约为低碳钢的1/5)^[5]，焊接时易产生较大的热应力和组织应力，易发生过热现象；降低了焊接接头和焊缝的韧性，同时易产生热裂纹^[6]。

奥氏体基体组织受热至300℃以上时，碳化物会沿晶界析出，破坏了奥氏体组织的完整性，晶界碳化物的聚集会使高锰钢脆化。为避免高锰钢基体性能恶化，基本上采用“冷焊”工艺，即采用各种方法使高锰钢基体在焊接过程中保持在较低温度，减少基体在300℃以上的停留时间。针对高锰钢锤头堆焊后不进行水韧处理的工况，为降低焊接时产生的热应力和组织应力，采用堆焊层组织结构逐渐过渡(母材+中间过渡层+耐磨层)的复合堆焊技术方案^[7]，确保焊接接头和焊缝具有足够的韧性。堆焊后耐磨层金属(耐磨层厚约5~10mm)的硬度为HRC55~60，使用寿命大大提高。

2.4 高锰钢镶铸高铬合金铸铁、镶铸钢结硬质合金

高锰钢韧性高，抗强烈冲击能力高。高铬合金铸铁合金含量高，经过适当的热处理后，其组织为： M_7C_3 型碳化物+马氏体+弥散分布的二次碳化物+残余奥氏体，宏观硬度达HRC60以上，抗磨损能力强。钢结硬质合金是以难熔金属碳化物(主要是TiC、WC)作硬质相，以碳钢为粘结相，用粉末冶金法制取的复合材料。其组织特点是，微细的硬质相晶粒均匀弥散地分布于碳钢基体中，具有较高的抗磨损性能。为充分发挥高锰钢优良的抗冲击性能和高铬合金铸铁(或钢结硬质合金)较

强的抗磨损性能，采用镶铸生产工艺（镶铸铸造工艺如图3所示），将两种材料有机地结合在一起，经水韧处理后，获得具有较高综合性能和抗磨损性能的复合新材料^[8]。

具体镶铸生产工艺过程为：在型腔某部位预先放入具有良好耐磨性的预制块（高铬合金铸铁或钢结硬质合金），然后向型腔内浇注具有良好韧性的母液（高锰钢），通过母液强烈的热作用，使镶块与母液接触的界面上在一定的时间内处于熔化或溶解状态并发生元素的相互扩散及冶金反应，冷凝后，镶块与母材牢固的熔焊为一体。

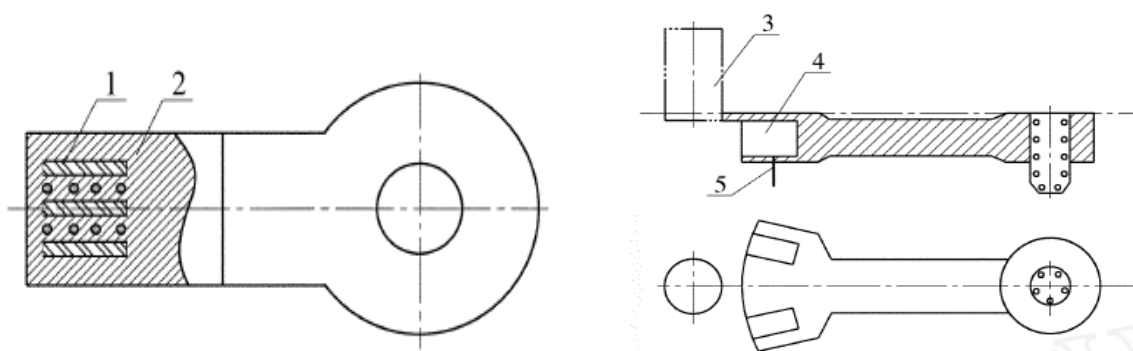


图3 镶铸铸造工艺

1. 高铬合金铸铁预制块 2. 高锰钢 3. 浇口 4. 硬质合金预制块 5. 铁钉

综上所述，高锰钢、合金高锰钢、高锰钢工作表面堆焊耐磨层锤头适合石灰石品质较高（石灰石中硅含量 $\leq 2\%$ ，抗压强度 $\leq 120\text{Mpa}$ ）、锤头线速度较高（ $35\text{--}40\text{m/s}$ ）、进料粒度较大（ $800\sim 1000\text{mm}$ ）、物料综合水分高（ $\geq 2\%$ ）的工况条件。高锰钢镶铸高铬合金铸铁、镶铸钢结硬质合金锤头适合石灰石品质较差（石灰石中硅含量 $\geq 2\%$ ，抗压强度 $\geq 120\text{Mpa}$ ）、转速较低（ $30\text{--}35\text{m/s}$ ）、进料粒度较小（ $500\sim 800\text{mm}$ ）、物料综合水分较低（ $\leq 2\%$ ）的工况条件。

3 超高锰钢类锤头及适应工况条件

3.1 超高锰钢类锤头

超高锰钢是近年来在普通高锰钢（Mn13）标准成分的基础上通过提高碳、锰的含量发展而来的。它是在锰含量(质量分数)增加到 $14\sim 18\%$ 的同时，加入 $1\sim 3\%$ 的Cr和适量的Ti、V、Mo等合金强化元素，化学成分及性能见表2。超高锰钢的形

变强化能力(加工硬化率)比普通高锰钢要好,相同形变量下,超高锰钢比普通高锰钢有更高的形变硬度。如变形20%时在,普通高锰钢形变硬度约为360HB,而超高锰钢形变硬度可达到400HB。在抵抗强冲击、大压力作用下的磨料磨损或凿削磨损方面,超高锰钢的使用寿命是普通高锰钢1.5~2倍。

超高锰钢具有显著的加工硬化特点。铸态的超高锰钢经过水韧处理后形成单一的奥氏体组织,硬度仅为170~220 HB,但是经过形变后出现显著加工硬化现象,其显微组织出现许多滑移带,甚至出现晶粒扭曲、滑移带弯曲或滑移台阶,形变层的硬度可以达到500~800HB,硬化层的深度可以达到10~20 mm。这个深度及曲线的形状与所承受的冲击载荷、化学成分以及机械性能等因素有关。硬化层的高硬度和良好韧性,使其具有了优良的抗磨性能。

为了进一步提高超高锰钢的耐磨性能,在保留足够韧性的前提下,相继研制了超高锰钢工作表面堆焊耐磨层、超高锰钢镶铸高铬合金铸铁、超高锰钢镶铸钢结硬质合金锤头,其生产工艺和制作流程与相应高锰钢材质锤头类似,不再累述。

3.2 适应工况条件

综上所述,超高锰钢、超高锰钢工作表面堆焊耐磨层锤头适合石灰石品质较高(石灰石中硅含量 $\leq 2\%$,抗压强度 $\leq 120\text{Mpa}$)、锤头线速度很高(40-50m/s)、进料粒度很大(1000~1500mm)、物料综合水分较高($\geq 2\%$)的工况条件。超高锰钢镶铸高铬合金铸铁、镶铸钢结硬质合金锤头适合石灰石品质较差(石灰石中硅含量 $\geq 2\%$,抗压强度 $\geq 120\text{Mpa}$)、转速较高(35-40m/s)、进料粒度较大(800~1000mm)、物料综合水分较低($\leq 2\%$)的工况条件。

表 2 超高锰钢化学成分及性能

名称 序号	化 学 成 分 (%)						热 处 理	机 械 性 能		金相组织
								冲击韧性 (J/cm ²)	硬 度 (HB)	
1	C	Mn	Cr	Si	Mo	P	水韧 处理	≥ 100	170~220	奥氏体
2	1.0~1.5	14~18	1.0~3.0	0.3~0.6	0.1~0.5	≤ 0.07				

4 双金属液热复合锤头及适应工况条件

4.1 双金属液热复合锤头

为解决单一材料韧性和硬度的矛盾，提高锤头的抗磨性能，研制了新型抗磨材料—双金属液热复合锤头，化学成分及性能见表3。采用双金属液热复合铸造生产工艺，成功地将具有高硬度的高铬合金铸铁（锤头工作部位）与具有良好韧性、可加工性的铸钢（锤头柄部）有机地结合在一起，具有单一金属材料难以达成的优良耐磨性和抗冲击的整体综合性能。

表3 双金属液复合化学成分及性能

名称 序号	化学成分(%)							热处 理	机械性能		金相组织
	C	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	S、P		冲击 韧性 (J/cm ²)	硬度 (HRC)	
1	C	Cr	Mo	Ni	Si	Mn	S、P	正火 + 雾淬	6~10	58~64	马氏体+碳化物 +残余奥氏体
2(头部)	2.4~3.0	16~24	0~1.0	0~1.0	0.3~0.6	0.3~0.6	≤0.05				
3(柄部)	0.3~0.35	0.5~1.0	/	/	0.4~1.0	0.4~1.0	≤0.05		40~50	15~20	铁素体+珠光体

利用双金属液热复合铸造工艺生产的高铬合金铸铁/ZG35双金属破碎机锤头成功应用于强冲击工况条件，并取得较好的使用效果，其铸造工艺如图3所示。双金属液热复合铸造工艺生产过程关键控制为：在不使其混合的情况下，使两种金属熔为一体；同时要形成尽可能大的熔合面积，增加两种材料的粘结程度。为此，采取了如下措施：结合面取在最大截面A处，底部设置U形冷铁，以保证ZG35由下而上的凝固顺序；设溢流口B，确保结合面的位置不变；为防止在浇注高铬合金铸铁时，ZG35被冲混，高铬合金铸铁浇口设在C、D处，以求水头平稳^[9]。

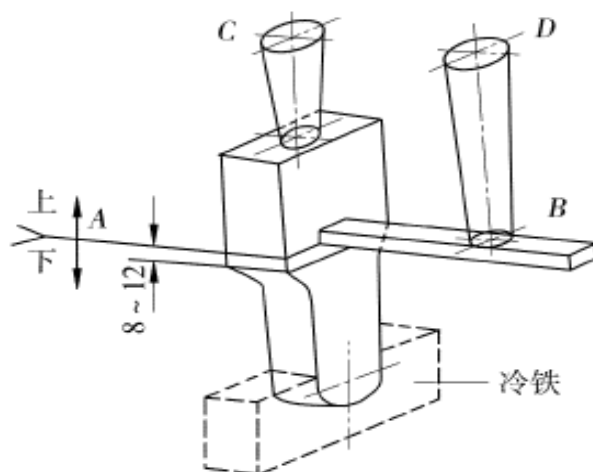


图4 双金属液热复合铸造工艺

双金属液复合铸造工艺的成败关键在于两种金属的界面熔合优劣和熔合强度的高低，界面熔合状态分为冶金熔合和机械熔合两大类。因为冶金熔合强度远远高于机械结合强度，一般都追求冶金熔合状态，但很多情况都是冶金熔合与机械熔合共存。界面熔合状态可以用冶金熔合率来表征，即发生冶金熔合的界面面积占总界面面积的百分数。只要冶金熔合率大于一个临界值，就可以认为熔合良好。熔合状态的判断带有很多主观性和专业性，如何简易直观地定量表征界面熔合状态还需要进行深入细致的研究^[10]。

4.2 适应工况条件

综上所述，双金属液复合锤头适合适合石灰石品质较差（石灰石中硅含量 $\geq 2\%$ ，抗压强度 $\geq 120\text{Mpa}$ ）、锤头线速度较低（30–35m/s）、进料粒度较小（500~800mm）、物料综合水分较低（ $\leq 2\%$ ）的工况条件。

5 锤头失效分析与整改措施

5.1 化学成分

主要元素（C、Cr、Si、Mn）匹配不合理或有害元素（S、P）含量超标时，锤头的机械性能大大降低，轻则磨损严重，重则锤头断裂。实际生产制造过程中，应严格控制原材料有害成分，优化匹配主要元素化学成分，以获得优良的综合性能。

5.2 生产工艺

铸造工艺控制不当时，锤头表面或内部存在夹渣、缩孔、裂纹、等铸造缺陷，降低了锤头的机械性能，严重时造成锤头断裂。采取平做立浇（或者倾斜浇注）、合理使用外冷铁和发热冒口、严格控制浇铸温度和浇注速度等措施，形成良好的凝固顺序和补缩条件，获得致密的内部组织。

热处理工艺制订不当时，锤头基体组织中析出大量的网状碳化物，严重割裂基体组织，大大降低基体抗冲击性能，严重时造成锤头断裂。应根据锤头的材质特性，合理选择淬火温度、保温时间和淬火介质，严格控制升温速度和冷却速度，在保证锤头具有足够冲击韧性的前提下，均匀弥散析出一定数量的具有较高硬度

的碳化物，作为基体的强化相，大大提高锤头的耐磨性。

5.3 使用工况

石灰石品质、锤头线速度、进料粒度、物料综合水分等使用工况条件变化较大时，锤头材质未及时调整，轻则磨损严重，重则锤头断裂。生产运转过程中，应根据转子石灰石品质、转速、进料粒度、物料综合水分等使用工况条件的变化程度，及时调整锤头的材质，延长锤头的使用寿命。

6 结语

(1) 石灰石破碎机锤头在工作运转过程中，需要承受大块物料的强烈冲击，要求具有良好的冲击韧性和较高的硬度。

(2) 由于石灰石品质、转速、进料粒度、物料综合水分等方面的差异，同样材质锤头的使用寿命差异很大，因此选择合适材质的锤头十分关键。

(3) 石灰石破碎机锤头材质主要有高锰钢、超高锰钢、双金属液热复合三大类，通过特殊的生产工艺而衍生的材质多达十余种。

(4) 石灰石破碎机锤头的失效主要由化学成分、生产工艺和使用工况三方面原因引起。

参考文献：

- [1] 何力,金志浩,合金化奥氏体锰钢的研究[J],机械工程材料,2000(2), 22-24
- [2] 闫华等,合金化高锰钢ZGMn13CrMo的组织与性能研究,热加工工艺,2006(2),11-13
- [3] 张增志,耐磨高锰钢[M],北京:冶金工业出版社,2002
- [4] 谢敬佩,李卫等,耐磨铸钢及熔炼[M],北京:机械工业出版社,2003.20-103
- [5] 崔昆,钢铁材料及有色金属材料[M],北京:机械工业出版社,1981
- [6] 周振丰,张文钺,焊接冶金及金属焊接性[M],北京:机械工业出版社,1994,457-458
- [7] 郭长庆,程军,高锰钢焊接复合锤头的研制[J],铸造技术,2007,28(3),341-343
- [8] 陈和兴,赵四勇等,高锰钢镶铸硬质合金锤头的研制,铸造技术,2000(4),13-14
- [9] 冯朝跃,双金属锤头的生产及应用[J],铸造,2000(9),561-562
- [10]李鹏志,邢书明,破碎机锤头双金属复合铸造工艺的研究进展,金属矿山,2008(5),96-99

玻璃高细粉磨技术的研究

吴雨波 吴志明 杨春保

(中建材(合肥)粉体科技装备有限公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

泡沫玻璃作为一种新型的建筑材料,具有很好的隔热保温、吸音、阻燃、抗冻、良好的化学稳定性等性能,与一般材料相比,具有密度小、质量轻、机械性能高、可承受负载较大、适应性和耐久性好等特点,广泛应用于钢铁、炼油、化工、建筑等行业。泡沫玻璃是由碎玻璃、发泡剂、改性添加剂和发泡促进剂等原材料,通过混合磨细,再经过高温熔化、发泡、退火而制成的一种内部充满无数气泡的多孔玻璃材料。生产泡沫玻璃的主要原料是碎玻璃,如何将碎玻璃粉碎到工艺所要求的细度和改善玻璃粉的颗粒级配,是生产高性能泡沫玻璃的基础。

1 泡沫玻璃对原料的粉碎要求

实现泡沫玻璃气泡大小均匀、尺寸合理、气泡率高,能有效提高泡沫玻璃的技术性能,这就要求粉磨好的玻璃粉细度细,粒度分布尽可能均齐,既要求玻璃粉中粗颗粒少又尽量减少过粉磨微粉的含量。要实现上述要求,玻璃粉的粉碎过程应采用磨机与选粉机组合的闭路粉磨系统,但由于玻璃是与发泡剂、添加剂、促进剂等物料按严格的配比一同进入磨机进行混合粉磨,而作为发泡剂的碳素既超细又很轻,用旋转气流作为分级原理的选粉设备,势必导致各物料离析而无法正常发泡。针对泡沫玻璃对原料粉的具体要求,我们对原料的粉碎过程进行了研究,通过采用磨内筛分技术,解决了物料离析的问题,改善了原料粉的颗粒分布,为生产更高性能的泡沫玻璃创造了条件。

2 玻璃的粉磨性能

玻璃是一种易碎难磨的高硬度物料,其细磨性能很差。利用规格为 $\phi 500 \times 500\text{mm}$ 标准试验磨对玻璃、标准砂分别进行粉磨性能测试,并以通用的标准砂为

参照基准，评判玻璃的相对易磨性。试验数据见表 1、表 2。

表 1 玻璃细度与粉磨时间的关系

粉磨时间 (min)	40	60	80	100	120	140	160	180
细度 (R0.045) %	43.2	25.5	16.9	13.3	10.2	7.7	5.6	4.1

表 2 标准砂细度与粉磨时间的关系

粉磨时间 (min)	30	40	50	60	70	80
细度 (R0.045) %	42.9	27.3	17.0	9.8	5.4	3.1

从表一、表二的试验数据对比说明，玻璃的细磨性能比标准砂还要差的多。玻璃从 43%（45 微米筛余，下同）的细度粉磨到 4%需消耗约 140 分钟，而标准砂从 43%粉磨到 3%只消耗约 50 分钟。正是因为玻璃的细磨性能很差，采用开路粉磨玻璃粉时，很难将其细磨到生产泡沫玻璃所要求的细度。

3 玻璃高细粉磨技术的研究

由于玻璃细磨性能差，用常规磨机与研磨体级配很难将玻璃粉磨细，颗粒分布也难以满足生产泡沫玻璃的工艺要求。玻璃高细粉磨技术就是应用物料粉碎的原理，对玻璃磨的工艺参数、磨内核心部件进行研究设计。经过对玻璃高细粉磨技术的研究，通过反复试验与生产实践，取得了良好效果。

3.1 采用具有筛分功能的隔仓板

泡沫玻璃生产中要求玻璃粉中粗颗粒少，又尽量减少过粉磨的微粉含量，通过在玻璃磨中设计一种具有筛分功能的隔仓板，把选粉机的功能实现在隔仓板中。筛分隔仓板安装在玻璃磨的一、二仓之间，经过一仓破碎的粗、细物料，用隔仓板内部的筛分装置进行粗细分离，粗料返回一仓利用大陶瓷球继续粉碎，而细料及时进入二仓由较大的陶瓷段进行粗磨，通过筛分隔仓板对物料的有效筛分，使进入二仓的物料不含粗颗粒，这不仅大幅度降低了玻璃粉成品中粗颗粒的含量，也使二仓可以采用粗磨效率更高的陶瓷段对物料进行粗磨，该隔仓板还设计有料位调节装置，可调节隔仓板的过料能力以实现控制物料在一仓的停留时间。

3.2 设计合理的衬板结构

常规的玻璃磨通常采用陶瓷平衬板作为磨机筒体的内衬，作为粉碎物料用的磨机，筒体圆周衬板的一个重要功能是要将磨内研磨体提升到一个合理的高度，通过抛落（泻落）运动实现对物料的破碎（研磨）。平衬板难以将研磨体提升到所要求的合适高度，也就不能有效发挥磨机的粉磨效率。针对玻璃磨的结构特点与陶瓷衬板的固定形式，根据每个仓的具体工作性质设计波形大小不同的波纹衬板，使各仓研磨体获得各自不同的提升高度与运动强度，以提高粉磨效率之目的。

3.3 摸索合理的研磨体级配。

对于一台确定的磨机，各仓采用合理的研磨体级配是提高磨机粉磨效率的最重要因素。就玻璃磨而言，选择合理的级配与磨机规格尺寸、转速、物料的易磨性、物料的粉磨细度区间有关。现在许多玻璃磨不能将物料粉磨到生产工艺所要求的细度，主要原因就与玻璃本身难以磨细和采用的研磨体级配不合理有关。研磨体规格的选择，既要考虑单个研磨体的重量能有效粉碎物料，又要考虑单位重量研磨体的总表面积。在物料的细磨阶段，研磨体的表面积代表着对物料的研磨能力。根据玻璃磨各仓的粉磨细度区间，分别设计了三种不同级配，先在实验室对玻璃进行不同研磨体级配对粉磨效率影响的模拟对比试验，总结试验数据后再进行生产磨试验，为玻璃磨各仓选择合理的研磨体级配提供经验，实现了将玻璃有效磨细并进一步提高了玻璃磨的粉磨效率。

3.4 设计具有可调节出料能力的出料结构。

玻璃磨的三仓有效长度占总有效长度的一半左右，是玻璃粉能否磨细的最关键一个仓，这与磨机的出料结构设计有关。合理的出料结构其出料能力必须与磨机的产量相适应，出料能力太强会使物料在三仓停留时间缩短导致物料难以磨细，出料能力太弱又会使三仓料位过高（料球比过大）而导致粉磨效率下降的同时，影响物料中较粗颗粒的优先选择性粉碎，影响玻璃粉颗粒级配的合理性。通过设计具有可调节出料能力的出料结构，可以根据碎玻璃原料的易磨性、粒度、水分的变化，调整三仓的粉磨工况，稳定产品的产量与质量。

4 高细玻璃磨的结构与工作原理

通过对玻璃高细粉磨技术的研究与实践。将研究成果应用于玻璃磨上，就成了高细玻璃磨。

高细玻璃磨的外部结构与普通玻璃磨区别不大，主要区别是优化了影响粉磨效率的磨内隔仓板、衬板、出料结构等核心部件设计，改进了磨内各仓工艺参数、研磨体级配。磨体部分结构示意图见图 1。

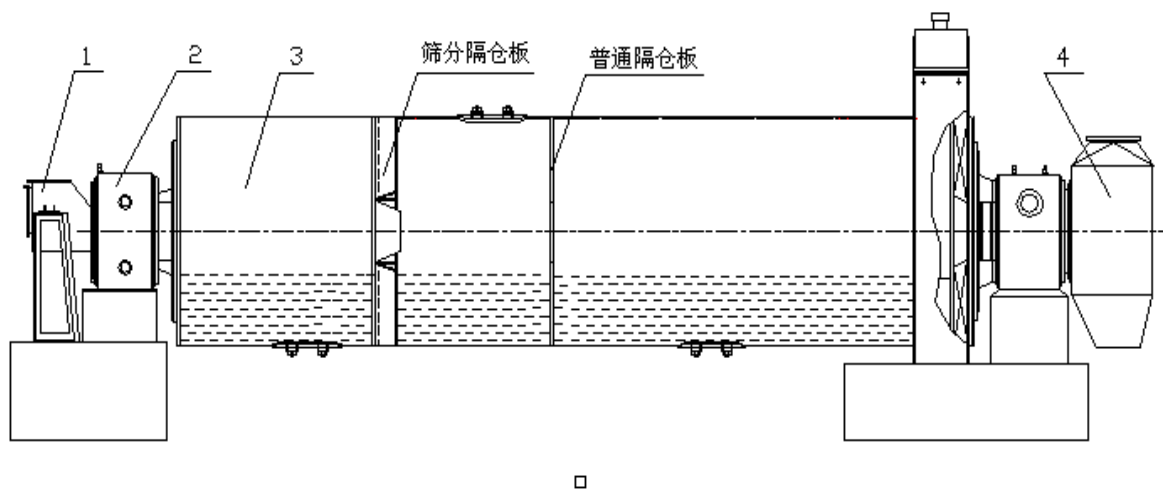


图 1 高细玻璃磨结构示意图

高细玻璃磨主要由进料装置（序号 1）、主轴承（序号 2）、回转部（序号 3）、出料装置（序号 4）组成。回转部由电机、减速机等带动按一定的转速进行旋转。物料通过进料装置喂入磨机的第一仓，物料在该仓内用较大的陶瓷球对入磨碎玻璃进行破碎。在一仓与二仓之间安装具有料位调节功能的筛分隔仓板，在隔仓板内部可以对物料进行粗细筛分，粗料返回一仓利用大球继续粉碎，而细料及时进入二仓由较大的陶瓷段进行粗磨。隔仓板内还设计有料位调节装置，可调节隔仓板的过料能力以控制物料在一仓的流速与停留时间。物料在二仓粗磨后，使玻璃粉进一步得到磨细。在二仓与三仓之间再安装一道隔仓板，使进一步磨细的物料在第三仓采用研磨效率更高的小陶瓷段进行细磨。为了保证出磨物料达到所要求的细度，磨机筒体尾部采用了具有可调节出料能力的出料结构，该结构可以根据原料的具体情况与工况变化，调整物料在三仓合适的停留时间与球料比，以进一步提高三仓的研磨效率。

5 玻璃高细粉磨技术的应用

玻璃高细粉磨技术首次应用于浙江嘉兴的 $\phi 2.4 \times 10\text{m}$ 玻璃磨上。经对原磨机磨内工艺参数及核心零部件的改造，取得了明显的增产、节能、细磨效果。改造情况如下。

5.1 概况

$\phi 2.4 \times 10\text{m}$ 玻璃磨，装机功率 450kW，磨内分三个粉磨仓，总装陶瓷球与陶瓷段约 30 吨。改造前，由于各仓长度分配不合理，作为细磨的三仓长度严重偏短，加之研磨体级配不合理，更减弱了磨机的细磨能力，导致玻璃粉难以磨细。该磨机正常生产时，玻璃粉 45 微米的筛余量为 12%左右，且由于成品中粗颗粒含量多，严重影响泡沫玻璃的产品质量。

5.2 改造前、后的技术指标

改造前后对该磨机的运行指标进行了测定，测定数据见表 3。在改造后的运行指标测定时，让磨机保持改造前的细度，测定产量、主机电耗、细度等数据见表 4。

表 3 改造前后磨机运行指标对比表

	改造前	改造后
平均产量(t/h)	2.87	2.93
主机电耗 kWh/t	125.4	124.9
细度 ($R_{0.045}$) %	11.7	4.9

表 4 改造后运行指标表

	改造前	改造后	增产、节电幅度
产量(t/h)	2.87	4.25	增产 1.38 t/h; 48.1%
主机电耗 (kWh/t)	125.4	86.6	节电 38.8kWh/t; 30.9%
细度 ($R_{0.045}$) %	11.7	11.9	

5.3 改造结果分析

从改造前后测定的数据分析可知， $\phi 2.4 \times 10\text{m}$ 玻璃磨通过高细粉磨技术的改造，在保持相近的玻璃粉细度的条件下，磨机产量提高了 48.1%，吨产品主机电耗下降了 30.9%。磨机的粉磨效率得到了大幅度的提高。对于产品附加值比较高的泡沫玻璃生产企业，最大的效益来自于玻璃粉能粉磨到生产工艺所要求的细

度和较合理的颗粒级配，而使泡沫玻璃产品质量得到了很大的跃升。不仅占领了高端产品市场，更是提高了产品价格，取得了很好的经济效益。

6 结论

总结国内现有泡沫玻璃生产线中玻璃粉的制备现状，要使泡沫玻璃的性能指标得到进一步提高，首先需要提高玻璃粉的质量。由于玻璃是一种细磨性能很差的高硬度物料，要进一步提高玻璃磨的粉磨效率，需要对现有的玻璃磨的磨内工艺参数、直接影响粉磨效率的磨内核心零部件、研磨体级配等进行改进与优化。通过本技术的研究与应用，不但可以将玻璃粉粉磨的更细，还能改善产品的粒度分布，减少了玻璃粉中粗颗粒与过粉磨的微粉的含量。通过对玻璃粉的检测比较，其质量达到了全球泡沫玻璃龙头企业美国康宁公司的质量控制要求。实践应用也证明：用这样的玻璃粉可以生产出气泡大小均匀、气泡尺寸合理、气泡率更高、性能更好的泡沫玻璃产品。

重钙立式磨粉磨工艺及操作浅析

崔啸宇

(合肥中亚建材装备有限责任公司, 安徽 合肥 230051)

0 引言

重质碳酸钙, 简称重钙, 是以天然方解石、大理石、白云石或白垩为原料, 经机械设备粉磨和分级后达到一定细度的粉状产品。生产方法主要为干法和湿法。重钙作为廉价的无机填料之用, 其广泛应用于造纸、塑料、橡胶、涂料等行业。

目前, 重钙加工企业多采用立式磨、球磨机和雷蒙磨等装备, 雷蒙磨适宜 400 目以下粉体的加工, 球磨机较适宜 800~1250 目超细粉体的生产。立式磨适宜 200~1500 目非金属矿粉体的规模化加工, 特别是其规模化和节能效应显著, 又能在很大程度上实现产品的精细化生产, 同时其操作简单, 维护方便, 工艺布置简单, 占地面积小, 土建投资低, 噪音小, 环保性好等优势。立式磨装备及其技术已成为当下重钙等非矿粉体加工技术的新进展之一^[1-3]。

立式磨最初被广泛用于电力、冶金、水泥行业粉磨煤、石灰石等原料, 而这些成品的细度、粒度分布要求较重钙粉低得多。因此, 用于粉磨重钙等非矿的 HRM 立式磨, 无论从设备结构、技术参数、研磨体、分级装置等, 都做了系统化的研究和创新设计, 并且对设备调试人员的技术水平也提出了更高要求。本文结合 HRM 高细立式磨重钙粉磨项目的应用经验, 探讨了立式磨重钙粉磨工艺及影响立磨稳定运行与操作的因素, 以期供生产、工程技术人员借鉴参考之用。

1 重钙立式磨粉磨工艺

1.1 工艺流程

HRM 立式磨重钙粉磨工艺流程如图 1 所示。

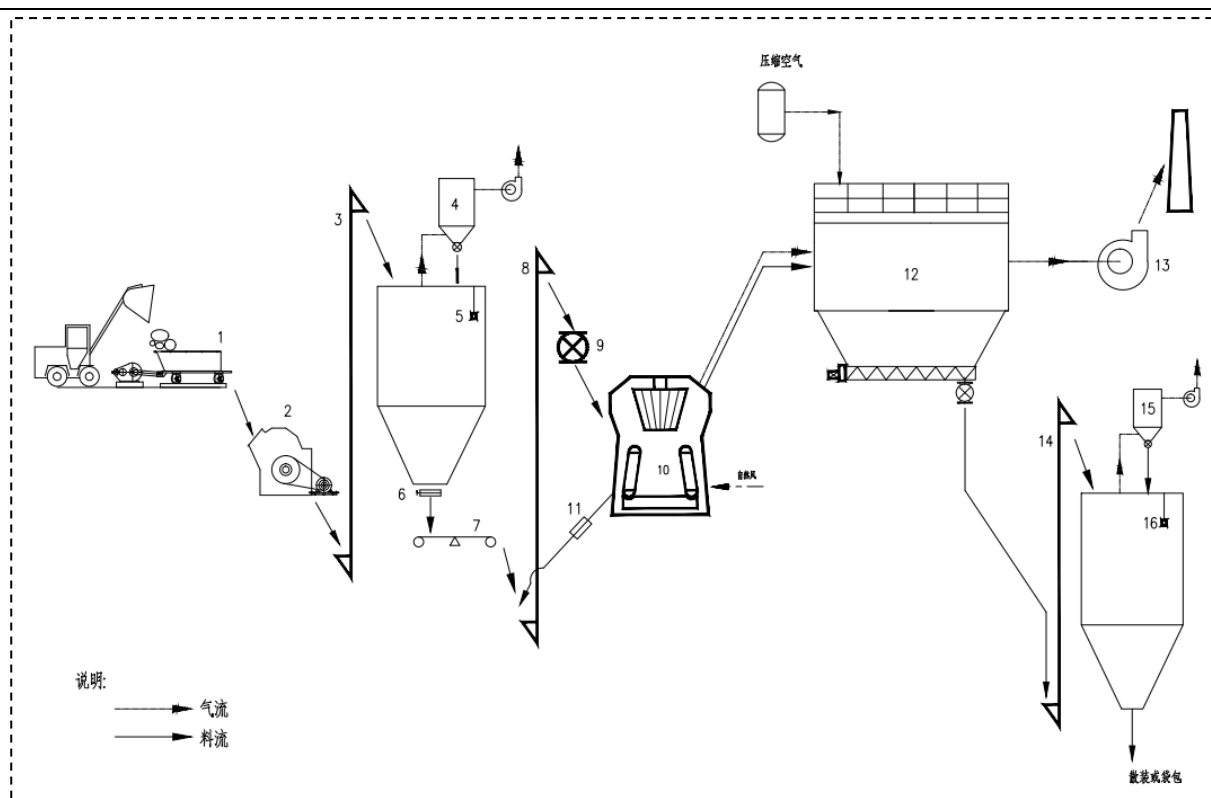


图 1-HRM 立式磨重钙粉磨工艺流程图

（设备序号：1-板式喂料机；2-鄂破/锤破；3-斗式提升机；4-单机布袋除尘器；5-料位计；6-手动棒阀；7-电子皮带秤；8-斗式提升机；9-回转锁风喂料机；10-超细立式磨；11-自动管道除铁器；12-气箱脉冲布袋收尘器；13-主排风机；14-斗式提升机；15-单机布袋除尘器；16-料位计）

1.2 工艺说明

原矿由铲车喂入振动板式喂料机，经破碎机破碎后由斗式提升机送入原料仓待用。来自原料仓的物料，由电子皮带秤称重后经斗式提升机、回转锁风喂料机送入旋转的立磨磨盘中心，在离心力作用下，物料向磨盘边缘移动，进入粉磨辊道。磨辊在液压装置和传动臂的作用下，向辊道内物料施加压力，物料受到破碎、剪切、挤压和粉磨作用。同时，气流从磨盘边缘的风环处高速均匀向上喷出，外溢物料被高速气流吹起，大颗粒落入磨盘，细颗粒经顶部选粉机进行分选，合格细粉随同气流出磨，由高效气箱脉冲袋式收尘器收集为成品，经斗式提升机（或气力输送）送入成品仓，仓下设置散装或包装机（小袋/吨袋）进行包装出厂；不合格的粗粉在选粉机转子叶片作用下重新落至磨盘，与新喂入的物料一起重新粉磨。磨机回料经喂料提升机再次喂入立磨粉磨，如此循环，完成粉磨、分级作业全过程。

2 影响立磨操作与运行的因素

2.1 物料特性

入磨物料的特性主要指物料的成分、硬度、粒度、水分和易磨性等。入磨物料的硬度通常由莫氏硬度（范围从 1 到 10，数字越大，物料越硬）来表征，方解石硬度一般在 3.0 左右，因原矿中夹杂物的种类、含量不同而有所区别。通常而言，物料硬度高，易磨性差，研磨体磨耗高，因此物料硬度直接关系到产品产量和磨机研磨体的使用寿命。

物料的粒度可根据成品细度来进行合理控制，原则上是“多破少磨”。立式磨对于原料的粒度有一定的范围要求，粒度过大或过小都会导致磨盘上料层不稳定，影响磨机的正常运行。若进料粒度过大，使得一次研磨效率降低，增加物料的循环次数，增加磨机的粉磨功耗，还会因缺少细颗粒物料的缓冲，导致磨机振动加大。操作中遇到此问题宜进行适当的减料、减压，稳住磨机料层。若进料粒度过细，其粉状料必然增多，由于细颗粒附着力差，加上物料内部空气较多，造成料床流态化趋势明显，使立磨不能有效地啮入大量的颗粒群，造成料层不稳，导致磨机振动。

在非矿粉体行业，产品细度相对较高（常用的重钙粉 $D_{97}=325\sim 1250$ 目（ $10\sim 45\mu\text{m}$ ），97%通过，简要对比参见表 1 所示）。非矿用立磨规格较水泥行业要小很多，对于入料粒度的控制建议宜小一些（至少 30mm 以下，其中 10mm~30mm 含量应该控制在合理的范围内），这样更有利于发挥立磨的超细研磨特性，做到产能最大化。基于调试经验，入磨物料的最大粒度不宜超过磨辊直径的 3%（很多文献资料上是小于磨辊直径 5%，这针对水泥行业而言具有普遍性），可适当再控制小些。

表 1-不同行业物料的细度要求对比

产品类型	水泥生料	冶金煤粉	水泥熟料	矿渣微粉	电厂脱硫石灰石粉
细度要求 (一般)	80 μm 80%~90%通过	200 目 80%通过	80 μm >95%通过	比表 $\geq 420\text{m}^2/\text{kg}$ 45 μm , 97%通过	45 μm 90%通过
折算(目)	$D_{85}=175$	$D_{80}=200$	$D_{95}=175$	$D_{97}=325$	$D_{90}=325$

入磨物料含水量的控制对立磨的稳定运行至关重要。通常，重钙微粉生产线未设计热风系统（原料含水量一般小于 3%），热能主要由磨机内的物料碾磨、摩擦及空气流通产生。磨机在碾磨过程中，料床上有大量没有被气流及时带走的成品和不合格细粉，若原料含水量过大，新入磨物料会粘结料床上的细粉，造成磨盘上形成料饼，在持续喂料的情况下，会造成磨盘料层不断增厚，致使磨辊无法对物料有效碾压和粉磨，磨机由于负荷过大产生振动或振停。

入磨物料的易磨性直接关系磨机产量、电耗和研磨体（辊套、衬板）的使用寿命。物料易磨性好，易于破碎和粉磨，易于生产超细粉；反之，易磨性差的物料需要多次研磨和较大的粉磨压力，增加粉磨功耗，加速了辊套和衬板的磨损，降低其使用寿命。原料易磨性一般通过易磨性指数（邦德功指数）来反映，方解石原料易磨性指数通常在 9~11kWh/t，数值越小，物料越易粉磨。

与此同时，立磨的喂料要求稳定、连续，调节时力求渐增或渐减。若喂料量出现大的波动将会打破磨内物料的动态平衡，引起料层波动，使磨盘物料研磨不均匀受力，易导致磨机振动。立磨研磨重钙粉时的料层厚度一般在 20~40mm 为宜（和磨机规格有关）。通常，料层厚度为磨辊直径的 $2\% \pm 20\text{mm}$ ？（水泥生料行业摸索出的经验规律），对于非矿行业可以控制小一些。

2.2 磨机压差

磨机压差是反映磨机内部物料循环负载情况的重要参数之一。磨机压差空载时主要由两部分组成，一是立磨风环处局部通风阻力，另一部分是选粉机选粉时产生的阻力，这两个阻力之和构成了磨机压差，通常由出磨负压与入磨负压相减可得（磨机差压见图 2 所示）。正常工况下，磨内压差在一个范围内处于趋稳变动状态，这标志着进入立磨的原料量和出磨成品量达到了一个动态平衡，一旦这个平衡破坏，磨内循环负荷发生变化，压差就会突增或突减，若得不到及时有效控制，将影响磨机的稳定运行。

影响磨机压差的因素很多，如物料易磨性、喂料量、系统风量、研磨压力、选粉机转速等。凡是影响磨机平稳运行的因素，几乎都可以在压差上反应出来。

非矿立式磨正常磨机差压范围在 4000~6000Pa，因粉磨物料及成品要求不同而存在差异。

(1) 在其它工艺参数不变的情况下，压差增高表明入磨原料量大于出磨成品量，磨内循环负荷增加，此时主机电流变大，排渣量增大，从磨机限位装置间隙可以看出料层增厚。为保证产品细度合格，一般不对选粉机转速做调整（或者在不影响细度情况下可适当降低转速）。而通常做法是作减料、短暂性断料处理，待磨机压差恢复平稳，再稳定增加喂料至合理值；或者在磨机主电机负载允许范围内不作减、断料处理，适当提高辊压，增加粉磨能力，避免磨机出现“饱磨”情形，因负载过大产生振动。

(2) 在其它工艺参数不变的情况下，压差减小表明入磨原料量小于出磨成品量，磨内循环负荷降低，此时主机电流减小，排渣量减少，从磨机限位装置间隙可以看出料床在逐渐减薄。此时可以采取加料、减压等措施，避免磨机出现“空磨”情形，因料层太薄而产生振动。

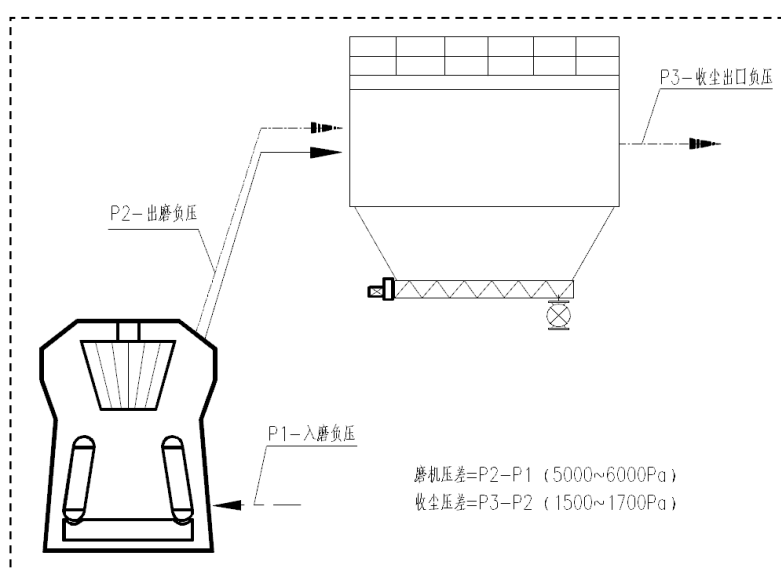


图 2-磨机压差和收尘压差示意图

根据调试经验来看，在同等工况下，产品细度越细，则磨机压差也越高，反之为低。不仅如此，也可通过收尘器差压反映粉磨系统的运行状态，收尘器差压正常范围在 1000~2000Pa。

2.3 系统通风量

立磨系统最大通风量一般根据磨机产能进行理论计算，再考虑系统漏风、产量

增加等因素适当富余 10~20%，即可得出立磨系统最大通风量这也是风机选型基础。

HRM 立式磨粉磨系统在负压下操作，属于风扫磨的一种。其物料输送、烘干、分级均需大量的风，合适的磨内通风量是磨机稳定运行的必要条件。磨机运行时的通风量则直接影响产品的产量及细度。通风量过大，磨内风速增加，烘干及输送物料的能力增强，磨机内、外循环量减少，料床上粗颗粒增多，料层较稳，磨机产量提高，但风量过大则可能导致产品细度不合格（跑粗）或产品中细粉含量降低（循环次数少，粉磨时间短），品质下降；通风量过小，磨内风速降低，烘干及带料能力减弱，磨机内、外循环量增大，料层上细颗粒增多，料层不够稳定，磨机粉磨功耗增大，产品细度较细，但磨机产量降低，同时磨机也会因料层不稳而引起振动。

立磨系统通风量主要通过风机风门的开度或风机电机变频调速来调节，立式磨本体、喂料机、收尘器和通风管道连接处的漏风对磨内通风影响很大，常常是造成产量下降和运行不稳的因素。

根据现场调试经验，生产 400 目（ $D_{97}=38\mu\text{m}$ ）以下重钙微粉时，立磨排渣一般为少量颗粒及粉料，此时只要保证喂料、风量的合理、平稳渐增[?]，立磨运行较稳定；生产 600 目（ $D_{97}=23\mu\text{m}$ ）以上微粉时，物料需要在立磨内进行循环多次的研磨和分级，同时要降低风量，因此立磨排渣口会产生较多细粉，宜控制好合理的喂料量和风量，在排渣量较稳定时可适当微增风量，提升带料能力，待排渣量减少时可微增喂料量，以保证磨机运行在内外循环的动态平衡下。

2.4 磨辊压力

立磨的研磨力来自磨辊的自重和液压站的加压压力，其中液压拉紧装置是提供研磨力的主要来源。磨辊的工作压力需根据喂料量、料层厚度、产品细度等因素进行合理给定，压力过小达不到有效粉磨，出粉率低，产量低，产品中细粉含量偏少；压力过大则可能导致料层不稳，主电机过载，还可能对减速机造成损害。

根据项目调试经验，立磨生产 $D_{97}=600$ 目重钙微粉，磨辊工作压力在 12~15MPa

为宜，部分项目调试数据见表 2 所示。

表 2-HRM 立磨粉磨不同原料的磨辊压力

原料来源	易磨性指数 (kWh/t)	研磨压力 (MPa)
		D ₉₇ =600 目 (23±1μm)
安徽泾县	9.32	13-15
安徽青阳	9.29	12-14
河南确山	~10	13-14
湖北大冶	~9.0	11-12

注：HRM 立式磨粉磨 D₉₇=600 目 (23±1μm) 重钙微粉研磨压力一般在 12-14MPa 左右，HRM1300X 和 HRM1700X 产量分别为 6~7t/h、12~14t/h，单机电耗在 32~34 kWh/t，系统电耗在 51-55kWh/t (依工艺而定)。以上数据根据原料易磨性不同而有所差异。

2.5 分级机转速

HRM 高细立式磨是集物料研磨、输送、分级功能于一体的粉磨设备，其顶部自带动-静态高效分级机，可以灵活地调节产品细度及颗粒级配分布，调整范围大，适应性好。

分级机的技术参数主要包括：转子直径、转子高度、转子叶片角度、转子叶片数量、导风叶片（静叶片）角度及转子转速。转子直径和高度依据磨机型号不同而专门设计（合适的径高比）。通常，导风叶片角度根据工况定期在停磨时调整，转子叶片角度及数量在设备选型时决定（根据产品特性、细度要求定），生产环节调节转子转速即可。成品细度主要取决于转子转速和系统通风量大小。在系统通风量一定的情况下，转子转速高，出磨物料细度高；反之，生产粗粉时，需降低转子速度。

在生产调试期间，针对不同系列的产品摸索出选粉机转速经验值后，后期生产在经验值上做适当微调即可，立磨的操作便捷和生产灵活性显而易见。在实际生产中，由于选粉机顶部的间隙易造成产品细度跑粗问题，针对此情况，HRM 高细立式磨在选粉机的顶部密封上采用独有的气体密封方式（专利），能够有效地阻止粗颗粒通过。

2.6 其他因素

2.6.1 挡料环高度

磨盘边缘挡料环的高度直接影响磨内料层的稳定及粉磨效率。挡料环的高度过高，不利于磨床上的物料外溢，导致料床增厚，一部分合格的成品在料床上也不能被气流及时带走，造成过粉磨，同时磨辊阻力变大，电耗增加；挡料环的高度过低，则粉料外溢速度加快，导致料床过薄，造成磨辊不能加压或引起磨机振动。

根据调试经验，粉磨重钙等非矿粉体时，为保证研磨的有效性，入磨物料需要在磨床上有一定的停留时间，挡料圈的高度一般设置在 20~50mm 为宜（和磨机规格有关）。

2.6.2 风环间隙（面积）

在实际生产中，常发现磨机回料量比较大，但是立式磨运行稳定，此时可以适当缩小风环间隙（在挡料环或上风环外缘补焊圆钢），提高风环处风速，增加带料能力，可起到不增加风量的情况下减少排料量，具有一定的提产稳产作用。

2.6.3 磨辊与磨盘的磨损

根据项目情况来看，当磨机运行很长时间（重钙行业一般 3~5 年）后，磨机产能会有一定程度的下降。主要原因是由于磨辊和磨盘磨损造成的，导致辊盘研磨区域的研磨结构、研磨压力都发生了变化，辊盘粗磨（第一阶段，由于离心力作用，落入磨盘中心的物料被啮入磨辊下缘，完成进一步的破碎和粗磨）、压实（第二阶段，被粗磨的物料因离心力作用继续向磨盘外缘移动，逐渐被压实）、细磨区域（第三阶段，此区域辊盘间隙最小，被压实的料层在高压下完成细磨，外溢被风环处气流带至选粉机分选成为合格产品）的间隙增大（参见图 3 所示），新入物料得不到有效压碎和粗磨，进入压实和细磨区域后，磨辊的高压力并不能完全传递至料层，达不到高效粉磨，因此很难产生足够多的细粉，同时因各个区域的磨损程度不一，致使料层不稳，磨机运行受到限制。

辊盘磨损问题对于细度要求高的成品来说，产能骤降更易体现。此时，宜对辊套进行调面处理或进行堆焊修复（堆焊辊套适用），如无调面可能，需更换新的辊

套和磨盘衬板（产能降低 10%以上就应该考虑）。HRM 立磨辊盘接触面、挡料环及风环示意如图 2 所示。

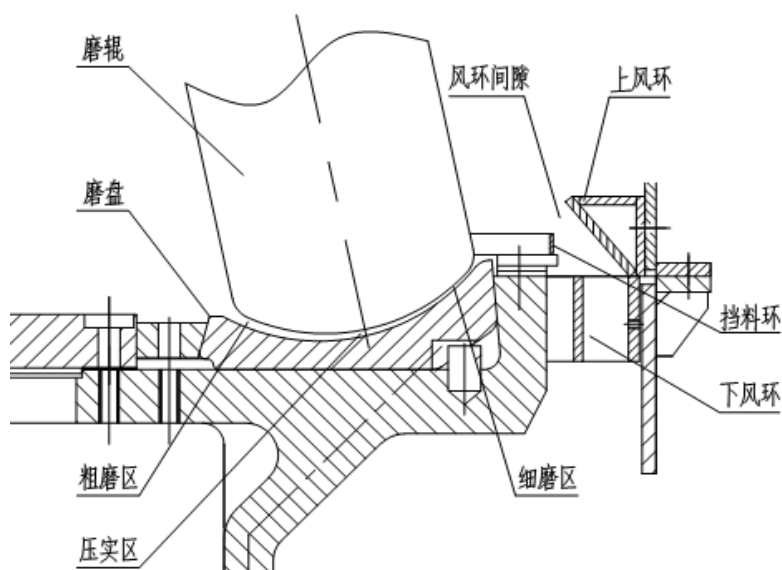


图 3 HRM 立磨辊盘接触面、挡料环及风环示意图

3 结语

立式磨作为大型粉磨设备，自 20 世纪 20 年代研制以来其应用的广泛性、经济性和稳定性已经得到大量工程实践的证明。立式磨操作人员的丰富经验与细心，熟练协调好各个工艺参数，是立磨稳定运行的关键。立式磨用于非金属矿粉体行业，展现了其规模生产和精细加工的双重特性，逐渐顺应了非矿粉体领域的未来发展趋势（规模和节能效应），其优良的性能带动了粉体加工装备的技术升级，有利于提升非矿粉体的经济附加值水平[3-4]。另一方面，如何在非矿粉体行业实现立磨大型化的工作仍需进一步展开。

参考文献

- [1] 郑水林.非金属矿粉体加工技术现状与发展[J].中国非金属矿工业导刊,2007.62(4):3-6.
- [2] 秦广超,迟源等.立式磨在非金属矿粉体规模化精细化生产中的应用进展[J].中国非金属矿工业导刊,2011, 87 (1): 31-34.
- [3] 袁凤宇,张志宇等.粉磨叶蜡石立式磨的开发和应用[J].中国非金属矿工业导刊,2008 年第 5 期: 43-46.
- [4] 秦广超,崔啸宇等.“十二五”期间重质碳酸钙产业发展分析[J].中国非金属矿工业导刊,2012.6:1-4.

热烈祝贺“巴基斯坦ATTOCK水泥有限公司
4000TPD水泥生产线EP总承包工程”荣获2019
年度中国建材工程建设协会优秀工程总承包和
优秀工程设计一等奖！

获奖证书

合肥水泥研究设计院有限公司：

贵单位完成的“巴基斯坦ATTOCK水泥有限公司4000
TPD水泥生产线EP总承包工程”荣获2019年度中国建材工
程建设协会优秀工程总承包 一等奖。

中国建材工程建设协会
二〇一九年十二月十八日

获奖证书

合肥水泥研究设计院有限公司：

贵单位完成的“巴基斯坦ATTOCK水泥有限公司4000
TPD水泥生产线EP总承包工程”荣获2019年度中国建材工
程建设协会优秀工程设计 一等奖。

中国建材工程建设协会
二〇一九年十二月十八日