

生料立磨新型耐磨材料应用与粉磨工艺优化研究

朱伟强

浙江同力重型机械制造有限公司 浙江嘉兴 314000

【摘要】生料立磨是水泥生产时十分关键的设备，平常主要用来磨碎石灰石、黏土这些原材料。但在实际生产中耐磨性能欠佳，容易磨损还会出现裂纹，严重的会直接断裂，设备需要经常维修，水泥生产进度、产量和效率都受影响；另外以前磨原料的工艺也有缺陷，存在耗电量且磨出来的成品颗粒大小不均匀。现在水泥行业要求节能环保，所以，这篇文章一方面来论述研发新的耐磨材料，另一方面优化粉磨工艺，目标就是让生料立磨运行得更稳定，减少设备维修，同时降低能耗和生产成本。

【关键词】生料立磨；耐磨材料应用；粉磨工艺；优化研究

Study on application of new wear-resistant materials and optimization of grinding process in raw material vertical mill

Zhu Weiqiang

Zhejiang Tongli Heavy Machinery Manufacturing Co., LTD.Zhejiang Jiaxing 314000

【Abstract】The raw material vertical mill is a crucial piece of equipment in cement production, primarily used to grind raw materials such as limestone and clay. However, in actual production, it has poor wear resistance, prone to damage and cracking, and in severe cases, can break directly. This requires frequent maintenance, affecting the progress, output, and efficiency of cement production. Additionally, the previous grinding process had flaws, leading to high energy consumption and uneven particle sizes in the final product. Nowadays, the cement industry demands energy conservation and environmental protection. Therefore, this article discusses the development of new wear-resistant materials on one hand, and optimizes the grinding process on the other, aiming to make the raw material vertical mill operate more stably, reduce equipment maintenance, and simultaneously lower energy consumption and production costs.

【Key words】raw material vertical mill; wear-resistant material application; grinding process; optimization study

立磨在水泥等行业中应用十分广泛，然而因其内部因物料冲击、挤压、摩擦及含气流冲刷等复杂恶劣工况易发生磨损，导致产量降低、能耗增加、维护频繁等问题，本文将针对立磨不同部位磨损机理，合理选用立磨耐磨材料并通过优化粉磨工艺参数、设备结构创新与流场优化、智能化控制系统集成，提升立磨抗磨损能力与粉磨效率，实现降低维护成本、节约能耗、提高整机寿命和可靠性的目标，为水泥行业绿色化发展提供技术支撑。

一、生料立磨工艺流程

生料立磨是水泥生产里很关键的一道工序，它的工作流程直接影响着水泥的质量和产量。首先生料立磨用的原料主要有石灰石、粘土、铁矿石这些，其中石灰石和粘土是水泥的“主料”，这些基础原料刚运来的时候都是大块的，需要先通过破碎机“加工”成粉末状，把大块原料砸成粉状；接着，这些粉末状的原料会被送进立磨机，立磨机里面由磨盘

和磨辊构成，由于磨盘高速旋转，会带着原料一起转，磨辊就像几个大滚轮一样，在磨盘上和原料互相摩擦、碰撞把原料磨得越来越细，同时还能让不同原料充分混合在一起；在磨的过程中，立磨机里面还有热风在循环，这些热风能把原料里的水分“吹”干，这样就能控制好原料的含水量，免得太湿影响后面的生产，等原料在立磨机里磨完、混好之后，就变成了一种混合料，也就是“生料”。这时候的生料里，石灰石、粘土等各种成分都已经变成细小均匀的颗粒了，这些生料会通过输送带或者管道，被送到水泥磨机里继续研磨，最终变成我们常见的成品水泥。

二、生料立磨新型耐磨材料应用

（一）常用耐磨材料的简介

耐磨材料行业近些年发展得很快，现在已经有非常多不同类型的产品。简单来说，这些材料主要分成三大类：金属类、非金属类，还有复合结构的，现在工程上常用的耐磨材料有

料层自保护结构、铸石、合金钢板、复合堆焊钢板以及陶瓷材料，但每种材料都有自己的强项和短板。比如陶瓷虽然耐磨，但怕撞击；合金钢板耐撞，但可能不如陶瓷耐磨；铸石耐腐蚀，但太重不好搬运，所以实际用的时要根据具体场景选材料，这样才能物尽其用。

（二）立磨用耐磨材料的合理选用

立磨的每个部件由于其工作环境不同，磨损问题也不一样，需要对症下药选材料。

1.分离器壳体：分离器壳体里面的高速粉尘流速可达每秒20-30米，粉尘浓度大于每立方米500克，磨损十分严重。同时由于壳体结构不规则，传统陶瓷片在90度高温情况下贴上去容易掉，接缝处还会漏粉尘进去磨坏壳体。所以改用“耐磨陶瓷涂料”，没有接缝，曲面、拐角都能覆盖，出现磨损直接在机器里补涂，寿命比陶瓷片长3-5年。

2.分离器转子：转子叶片在实际工作时一边转一边被粉尘和物料冲击，还要承受离心力，所以扇叶可以用耐磨钢板（比如NM400），由于整块钢板都很硬还能焊接，材料利用率能达到50%以上；针对小钢管（直径 $\leq 200\text{mm}$ ）可以用渗碳处理，表面变“硬壳”；空心主轴如果会转，就喷一层耐磨金属或套陶瓷套管，防止振动把涂层震掉。

3.导向风环：在气流经过导向风环叶片时，会承受突然变向的压力经受冲蚀-振动复合磨损。在磨普通原料（比如生料、煤粉）时，可以用HB500耐磨钢板，能用6个月左右；磨高硬度原料（比如矿渣、水泥），导风板迎风口磨损最严重，就在迎风面焊一层堆焊复合钢板，寿命能延长到8-10个月。

4.灰斗及喂料槽：里面物料慢慢滑动磨损，像沙子在漏斗里摩擦内壁。可以利用焊扁钢挡料圈，让物料堆成“保护层”，挡料圈高度和间距按物料堆积角度设计为30-40度且厚度不超过100毫米；漏斗外壁再刷一层耐磨涂料，双重保护。喂料槽在空间大的地方可以装阶梯式挡料板，让物料自己缓冲冲击；空间小或物料粘湿则用表面光滑的焊层钢板，不容易堵料。

5.磨辊及磨盘：磨辊和磨盘都是核心部件，磨辊压着原料研磨，压力需承受200-300MPa，所以又要耐磨又不能碎，以前的高铬铸铁一焊就裂，现在改用夹心结构——中间是韧性好的低碳钢，表面焊一层超硬合金，磨损后可以补焊；磨盘衬板由于其形状规则，可以直接用整体铸造的硬镍合金，安装时要摆正贴合面齐平，不然受力不均会开裂。磨普通生料每6000-8000小时需要补焊一次；磨矿渣这种硬料，每2000-3000小时（约83-125天）补焊，建议产量下降10%时就补，省材料又省电。

6.风室风环：在工作时上面要承受高速气流每秒30-50米冲蚀，下面有粗颗粒磨损，普通钢板单面焊一层硬料不够，两面都会磨坏，所以可以用双层钢板对焊，或者普通钢板两面都焊硬层（每层 $\geq 4\text{mm}$ 厚），让两面都够硬（硬度 $\geq \text{HRC}58$ ）。

7.磨机壳体：外侧被粉尘喷砂磨损，内侧被物料飞溅磨损。在磨普通原料时，用锰钢衬板用硬度HB200-25的螺栓固定，提高更换的便携度；磨高硬度原料时升级为焊层钢板衬板，寿命可以延长2-3倍。

8.喷水管：水管穿过风环时，背风面因为气流乱流磨损特别严重，传统防护只护正面，可以给水管全周焊一层耐磨套管给水管穿360°保护，磨损速度减少60%以上。

三、生料立磨粉磨工艺优化研究

生料立磨粉磨工艺的优化需围绕“提升粉磨效率、降低能耗、稳定产品质量”核心目标，针对传统工艺中研磨能量利用率低（仅30%-40%）、参数耦合性强、工况波动敏感等问题，通过多物理场协同调控、设备结构创新及智能化控制技术的深度融合，构建高效稳定的粉磨系统。

（一）粉磨工艺参数的多目标优化

生料立磨的关键工艺参数包括研磨压力、料层厚度、风速与风温、选粉机转速等，各参数间存在强耦合关系，需通过正交试验或响应面法（RSM）建立数学模型，实现产量、电耗、成品细度的多目标优化。

1.研磨压力动态调控：研磨压力决定磨原料的效率，传统工艺中固定压力模式易导致“欠磨”或“过磨”。遇到好磨的原料能耗较低，产量较小；但遇到硬原料就会导致设备振动大，磨辊磨损快。在低压力模式（8-12MPa）下，原料好磨（比如石灰石，硬度低），靠磨辊和磨盘之间的弹性挤碎原料，能耗低（电耗 ≤ 16 度/吨），但产量有限（最多每小时350吨），磨出来的细度不稳定（粗细波动大）；在高压力模式（14-18MPa）下，可以加大压力让原料挤变形碎得更快，产量能提到每小时450吨以上，但设备振动幅度 $\geq 1.2\text{mm}$ ，磨辊磨损快20%-30%因此可以安装“振动传感器”，实时监测设备振动情况，当振动幅度超过0.8mm自动降低压力1-2MPa，避免硬磨把设备震坏，稳定在0.5-0.7mm，压力能根据原料硬度自动调整（ $\pm 3\text{MPa}$ 范围内变化）；综合电耗降低5.6%。

2.料层厚度智能匹配：理想料层厚度为50-80mm，其稳定性直接影响粉磨效率与能耗，当料层过薄（ $< 40\text{mm}$ ）时，物料冲击磨损占比增加，磨辊/磨盘磨损速率提升至

0.15mm/100h,且成品中粗颗粒含量升高(>2mm颗粒占比 $\geq 5\%$),当料层过厚(>90mm)时,底层物料受挤压时间延长,导致“包球”现象(料层密度 $\geq 1.8t/m^3$),主机电流骤升(超载15%),粉磨效率下降12%~15%。可以采用激光三角测量法监测料层厚度(精度 $\pm 2mm$),联动液压张紧系统调节磨辊升降(响应时间 $\leq 3s$)。同时,基于离散元法(DEM)仿真建立“料层厚度-辊盘间隙”映射模型,当原料水分从1.5%升至3.0%时,自动将辊盘间隙从8mm扩大至12mm,避免湿料黏结导致的料层不均。某生产线应用后,料层厚度波动控制在 $\pm 5mm$,磨机产量波动率从 $\pm 8\%$ 降至 $\pm 3\%$ 。

3.风-粉平衡优化控制:风速与风温直接影响物料烘干效率与成品细度,在选粉机风速时通常控制在20~30m/s,风速每增加1m/s,成品中 $<45\mu m$ 颗粒占比提升3%~5%,但系统阻力增加500~800Pa,风机电耗上升2%~3%。对于综合水分 $<2\%$ 的原料,可采用“低风速稳流”模式(22~25m/s),减少细粉过度循环;高水分原料($\geq 3.5\%$)则需提高风速至28~30m/s,增强携水能力,还可利用窑尾废气余热(温度220~280 $^{\circ}C$)作为热源,当原料水分 $>3\%$ 时,将入磨风温提升至180~200 $^{\circ}C$,烘干热耗占比可从25%降至18%。同时,在风管设置温度补偿传感器(精度 $\pm 1^{\circ}C$),当废气温度波动超过 $\pm 10^{\circ}C$ 时,自动调节冷风阀开度,确保入磨风温稳定在 $\pm 5^{\circ}C$ 以内。

(二) 设备结构创新与流场优化

1.磨辊-磨盘匹配性设计,传统平面磨盘存在“边缘效应”,导致磨辊边缘磨损速率比中心高2~3倍。可以采用双曲面磨辊+阶梯式磨盘组合,磨辊母线曲率半径从300mm增至500mm,磨盘表面设置3级阶梯(高度分别为40mm、60mm、80mm),使物料在研磨区经历“预压碎-主挤压-细粉剥离”三段式破碎,平均破碎能耗降低9%;磨辊衬板可以采用变厚度设计,边缘厚度从50mm增至80mm,同时在易磨损区域嵌入陶瓷柱(直径10mm,间距50mm),形成“硬质点支撑”结构,抗磨粒磨损能力提升40%。某生料立磨应

用后,磨辊平均磨损速率从0.12mm/100h降至0.07mm/100h,使用寿命延长1.7倍。

2.除了磨辊-磨盘结构,进风装置对于生料立磨的性能提升也至关重要。进风装置节能设计,风环叶片采用机翼型截面替代传统平板型,叶片安装角从45 $^{\circ}$ 优化为38 $^{\circ}$,使气流通过风环时的压降降低12%,同时减少涡流区面积(占比从25%降至10%),均匀性指数(变异系数)从0.28降至0.15;风室底部设置倾斜导料板(倾角15 $^{\circ}$),引导粗颗粒物料沿切线方向落入刮板腔,避免直接冲击风环叶片,可使风环磨损速率降低25%。

(三) 智能化控制系统集成

1.基于机器学习的工艺预测模型:让机器实时监测50多个数据,比如振动大小、电流高低、进出风口压力、原料成分等参数,学会提前预判问题,如果检测到石灰石中钙含量(CaO)波动超过 $\pm 2\%$,系统提前2小时自动调整研磨压力(增减1.5MPa)和选粉机转速(快慢50转/分钟),确保最终水泥的钙含量合格率 $\geq 98\%$ (减少不合格品),如系统发现磨辊轴承温度1小时内上升 $\geq 5^{\circ}C$,或者振动频率显示轴承可能磨损(比如风扇轴异响),提前72小时(3天)报警,准确率92%,避免突然停机。

2.自适应粉磨专家系统,开发多目标优化专家知识库,集成200+组工艺参数组合,高产模式下自动设置参数降研磨压力加大到16MPa,料层厚度70mm,选粉机转速900转/分钟,每小时产量480吨,但电耗17.5度/吨;低耗模式下压力降到12MPa,料层厚度60mm,转速750转/分钟,电耗降到15.2度/吨,产量保持每小时380吨。

本文围绕生料立磨在水泥生产中面临的耐磨性能不足、能耗高及工艺稳定性差等问题展开研究。通过分析各部件磨损机理,针对性选用耐磨陶瓷涂料、复合堆焊钢板等新型材料,实现分区精准防护;同时优化研磨压力动态调控、料层厚度智能匹配等粉磨工艺,并集成智能化控制系统。实践证明,该研究有效提升了立磨运行稳定性,降低了能耗与维护成本,为水泥行业绿色高效发展提供了技术路径。

参考文献

- [1]赵俊,金文赵,钟根,等.MLS3626生料立磨增效降耗技改[J].水泥工程,2023(6).
 - [2]张言,冯继凯,朱攀勇,等.LM56.4生料立磨系统提产降耗的措施[J].新世纪水泥导报,2024,30(6).
 - [3]张璐衡,杨小强,徐生双,等.TRMR53.4生料立磨提产降耗改造实践[J].中国水泥,2023(5).
- 作者简介:朱伟强,出生年月:1976.02,男,籍贯,浙江桐乡,学历:大专。