

球磨机衬板磨损机理及延长使用寿命的优化策略研究

邵毕成

中国十五冶金建设集团有限公司 湖北武汉 430075

摘要: 本文基于摩擦学与材料力学理论, 简要剖析了磨粒磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损及黏着磨损的复合作用机理, 揭示了硬度匹配、物料性质与工况负荷对磨损速率的非线性影响。在此基础上, 提出了一套涵盖材质复合化、结构波形化及热处理精准化的系统优化策略。研究表明, 采用高铬合金/橡胶复合衬板、优化波形几何参数及实施双介质淬火工艺, 可显著提升衬板抗冲击疲劳性能, 使使用寿命延长至传统高锰钢的两倍以上, 希望为矿山企业实现“降本增效”提供坚实的理论支撑与工程实践指导。

关键词: 球磨机衬板; 磨损机理; 复合材质; 波形结构; 热处理工艺

引言

球磨机是冶金、选矿、建材、化工、发电和陶瓷等工业部门制备多种粉体材料的主要设备, 在筒体内部一般都安装有多种表面形状衬板。衬板作为球磨机主要易损件之一, 它的性能及使用寿命是广大用户十分关注的技术经济指标。但球磨机工作时, 衬板因经常与磨料及球体碰撞、摩擦而易发生磨损。磨损不但影响衬板寿命, 而且可能造成磨机能耗升高、产品质量降低。所以, 对球磨机衬板磨损机理进行深入研究, 采取有效优化策略, 延长衬板使用寿命具有实际意义。

一、球磨机衬板磨损机理分析

(一) 磨损类型与主导因素

1. 磨粒磨损

这种磨损形式最为直观, 也最为常见。矿石和钢球组成无数微观切削刃, 犁削和微观切削衬板的表面。当物料硬度(例如里氏硬度为 $f=8\sim 14$, 铅锌矿)远超衬板基体硬度时, 切削作用加剧, 形成深浅不一的沟槽。特别是干磨或者闭路磨矿时分级效率高, 粗颗粒物料被直接镶嵌于衬板表面而造成严重凿削式磨损。

2. 疲劳磨损

球磨机每次转动一周, 衬板就受到钢球冲击载荷作用。该周期性交变应力诱发衬板表层下某一深度出现微裂纹, 裂纹随循环次数的增加而扩展和相互连通, 最后造成金属剥落或者整体破裂。这也是衬板在高应力冲击运行条件下发生破坏的主要原因。

3. 腐蚀磨损

湿式磨矿条件下的矿浆既作为研磨介质又作为电解液使用。衬板表面电化学腐蚀产生一层松散的氧化膜, 很

容易受到钢球的撞击而脱落, 露出新鲜金属表面不断受到侵蚀, 造成“腐蚀-机械剥落”等恶性循环。酸或碱矿浆的温度会加快这一进程, 使衬板的表面产生麻点和凹坑。

4. 黏着磨损

高负荷运转时, 钢球和衬板接触部位的压力极高, 接触部位的瞬时温升可达几百度, 造成局部金属熔化而冷焊。后续相对运动会使材料由一表面被撕裂到另一表面而产生黏着磨损。若衬板与钢球硬度比失调(如接近1:1), 黏着倾向将呈指数级上升。

(二) 典型工况下的磨损特征

1. 干磨工况

干磨工况下矿浆介质的缺失致使钢球与衬板呈刚性碰撞, 巨大的冲击动能瞬间转化为热能引发接触面瞬时高温, 极易诱发黏着磨损与塑性流变。矿石颗粒直接嵌入金属表面形成微观切削刃, 凿削式磨粒磨损成为主导, 伴随高分贝噪声与粉尘逸散, 作业环境极度恶化。衬板边缘因循环应力集中产生卷边或起鼓, 表面剥落的坑体又成为新的磨粒源, 加剧三体磨损效应, 摩擦系数攀升导致能耗激增, 设备振动加剧螺栓松动, 非计划停机频率呈指数增长, 维护成本占比可达磨矿总成本15%以上。

2. 湿磨工况

湿磨环境下矿浆具有润滑剂和腐蚀剂的双重作用, 液固两相流使衬板表面产生了一层动态缓冲层, 虽然可以吸收一部分冲击动能, 但由于电化学作用而诱导了严重的腐蚀磨损。矿浆pH值的波动使表面氧化膜变得松散易碎, 钢球碾轧过程中很容易脱落, 露出新鲜基体而造成“氧化-剥落-再氧化”过程恶性循环。硬质矿粒在液体中悬浮发生微观切削, 并与氯离子或硫化物侵蚀协同作用, 促使点蚀坑向深层剥落快速延伸, 在磨痕表面往

往被红棕色锈蚀产物包裹，不但加剧了磨粒磨损，而且由于矿浆黏度的改变诱发流体动力冲刷，使波纹衬板在波峰上产生了特有的波浪状磨痕，并将能耗转变为热量和化学能，使失效机制表现出机械和化学耦合的特点。

3. 高负荷工况

在高负荷运转时，钢球和物料的大量动能被转化成激烈的冲击应力作用，衬板表面受到高达设计阈值的挤压载荷作用，由于滑动摩擦的增强，波峰部位出现了严重的“犁沟”现象。钢球的提升高度受到限制，这导致其抛落路径出现混乱，衬板的背面经常需要承受高达数百兆帕的交替应力，从而可能引发深层的脆性破裂或螺栓的剪切失效。物料流速增加形成高速冲刷流带走摩擦热，但也加剧表面材料疲劳剥落、局部温升，甚至诱发瞬间回火软化。这一极端应力状态使衬板金属基体产生位错塞积和微裂纹的快速扩展与贯通，这不仅导致磨耗猛增，而且还由于衬板的破裂与脱落而诱发磨机的强烈振动，强迫非计划停机检修，严重限制了产能释放和设备作业率的提高。

（三）材质对磨损行为的影响

1. 高锰钢

传统主流材料，具备优异的加工硬化能力。但在冲击能量不足（小尺寸磨机或低硬度矿石）时，表面硬度无法提升至HB450以上，耐磨性大打折扣，且易发生塑性变形导致螺栓断裂。

2. 中合金钢

通过添加Cr、Mo、Ti等元素，在保证韧性的同时提升了基体硬度（HRC40-50）。其抗变形能力优于高锰钢，适用于中高冲击工况，但切割成本较高。

3. 橡胶衬板

利用高分子弹性体吸收冲击能量，从根本上消除了金属间的黏着磨损，且重量轻、噪声低。但其耐热性差，在磨机温度超过50℃时易老化，且抗大块矿石冲击能力有限。

4. 陶瓷复合衬板

表面镶嵌氧化铝或碳化硅陶瓷片，提供极高的耐磨性，但脆性极大，必须与高韧性金属背板结合使用，否则在钢球冲击下易发生碎裂崩块。

二、延长衬板使用寿命的优化策略

（一）材质优化与复合设计

1. 双金属复合衬板

双金属复合衬板采用液液复合工艺将高铬铸铁工作面和低碳钢背衬冶金复合在一起，工作面具有高硬度HRC58-62以抵抗磨粒切削作用，背衬具有高韧性以吸收冲击能量。该“外硬内韧”的组织完全解决了单一材

料的硬度和韧性之间的冲突，避免了材料的整体断裂破坏，抗疲劳剥落能力得到显著提高。复合层界面以波浪状咬合的方式有效地分散了热应力和剪切力的作用，即使在高冲击的工况下也能够保持组织的完整性，其使用寿命达到了常规高锰钢的2倍多，既具有优良的耐磨性和结构安全性，又具有突出的综合经济效益。

2. 陶瓷颗粒增强衬板

陶瓷颗粒增强衬板是将碳化钨或者钛的碳化物颗粒熔渗到高锰钢基体上，采用原位反应的方法产生高硬度的增强相，硬质质点像骨架一样嵌入金属基体中，显著妨碍了磨粒的微观切削，显著增强了抗磨粒磨损能力。颗粒的出现细化了晶粒并阻碍了位错运动，使得材料同时具有高耐磨性和较好的韧性，完全避免了陶瓷衬板脆性断裂的危险。强冶金结合保证了高冲击时颗粒不会脱落，且表面有致密的保护层，具有优越的抗疲劳剥落性能，比传统材料的寿命有明显的提高，综合考虑极高的耐磨效能和结构可靠性，特别是在大冲击工况下。

3. 功能梯度衬板

功能梯度衬板为创新型衬板，其组成与性能在厚度方向上呈现连续梯度。它的设计是根据材料的实际使用需求来规划内部组成与结构的梯度分布，使得衬板的不同位置具有适应各种工况下的特性。衬板的表面层用高硬度和高耐磨性的材料抗磨粒磨损；内层选择高韧性材料以吸收冲击能量和阻止裂纹扩展。例如球磨机的高冲击区域可以依靠外层的硬度保护和内层的缓冲来减少损坏的风险；腐蚀环境下，可以通过成分梯度调整来提高耐腐蚀能力。功能梯度衬板的诞生为解决在复杂工况下衬板磨损问题提供了一种有效的解决方案，这不仅能显著延长衬板的使用寿命，还能提高其使用效率。

（二）结构创新与参数优化

1. 波形衬板

波形衬板广泛应用于球磨机及其他设备上。这种材料的种类繁多，例如球磨机的波形衬板由锰钢制成，而波形板还包括Q235薄钢板。波形衬板是利用冲压工艺成形梯级连续波纹结构的钢板，利用其截面几何变形使单层钢板表现出多层叠加的作用，波纹间距及高度经过力学计算后，可以将材料惯性矩增加到常规平钢板3-5倍。球磨机使用时，它的波形设计可以增大衬板同钢球及物料之间的摩擦力，使钢球的上升高度及抛落速度增大，磨矿效果得到加强，同时也可以使冲击载荷分散，局部磨损降低。河钢供应链每年的集采项目中，对于球磨机波形衬板的供应商都有着严格的要求，从生产资质到绩效都不例外。

2. 阶梯衬板

阶梯衬板应用于磨煤机及其他设备上具有明显的优越性,该产品是由高耐磨和高强度的材料,例如高铬铸铁和耐磨钢制造而成,经过特殊的工艺处理后,能够在煤炭研磨过程中抵抗磨损,从而保持其长期的使用寿命。它的结构设计充分考虑了煤炭颗粒的尺寸、硬度以及磨煤机的工作特性,合理阶梯设计可以减小煤炭颗粒与衬板之间的直接撞击,减小磨损速度,同时也增大衬板表面积、提高煤炭颗粒和衬板接触效率、增强研磨能力等。相对于普通衬板,一些长效阶梯衬板加大了延伸面,可延长材料和研磨体研磨大头端的时间,并长期保持大头端的作业高度,使得衬板与研磨体动能转换率维持在较高水平,缩短了衬板更换时间,降低了工人的劳动强度。

3. 磁性衬板

磁性衬板作为一种新型耐磨部件被用于球磨机及其他磨矿设备中,它包括永磁体、导磁板和防护结构,可利用磁力对钢球碎屑进行吸附,磁性矿物等物质能够形成20—30mm的保护层,这有助于减少与物料的直接接触和磨损。该技术自20世纪90年代开始被广泛应用,最初是用橡胶来包裹永磁体,随后发展出了金属外壳和磁系优化等多种设计方案。在当前阶段,材料主要分为橡胶和金属磁性衬板两大类,这些衬板特别适用于铁矿、铜矿和黄金选矿等多个应用场景,具备三层动态保护结构和降噪功能。与传统锰钢衬板相比,磁性衬板寿命长、重量轻、厚度薄,能减轻球磨机负荷、降低电耗、增大容积,还具有省球、噪声小、作业率高、安装方便等优势,被称为“永不磨损衬板”。

(三) 工艺改进与质量控制

1. 双介质淬火工艺

双介质淬火工艺是机械工程中常用的热处理工艺,将奥氏体化加热后的工件先浸入高冷却能力介质(如水、盐水等)快速冷却至约300℃,再迅速转移至低冷却能力介质(如油、空气等)完成马氏体转变。这一工艺流程采用分阶段的冷却速度控制,旨在同时抑制非马氏体的相变和减少组织应力,从而降低工件的变形和淬裂的风险。水淬-油冷技术是一个标准的应用场景,其操作的复杂性主要体现在对介质转移时间和过程的精确控制上。这适用于形态复杂或尺寸较大的碳钢和合金钢制品,例如拉伸模具、细长部件等。

2. 激光熔覆技术

激光熔覆是一种先进的制造技术,该技术是通过在基体表面加入熔覆材料,并利用高能激光束使其与基体表面的一层薄层同时熔化和快速凝固,从而形成与基体冶金结合的涂层。它不是单纯的物理附着,而是在分子层面上的融合、原子的完全扩散以及相互作用而形成的

牢固结合层的过程。该技术具有突出的优点,可精准控制且热影响区很小,适用于精密部件的制造;具有广泛的材料兼容性,可以熔覆金属、陶瓷等。这种材料在能源、汽车、航空航天等多个领域都有广泛的应用,能够增强基材表面的耐磨和抗腐蚀特性。

3. 热处理工艺优化

热处理工艺优化的目的是改善材料性能,降低成本,符合环保的需要。它的核心目的是优化材料的机械特性和加工能力,同时降低能源使用和有害排放。为了实现材料的最优性能,可以通过精细地控制加热与冷却的速率、温度和时间来达成优化目标。计算机模拟技术具有预测热处理过程中相变、组织演变和性能变化的能力。通过运用有限元分析和分子动力学模拟等多种方法,可以优化工艺参数,减少实验次数,提高预测的准确性,并降低相关风险。在具体的操作过程中,我们需要根据各种材料的特性进行调整,例如碳钢和合金钢之间的相变机制、冷却速度的差异,以及材料的微观结构特点等。与此同时,信息技术的发展,自动化与信息化设备的使用,可以提高生产的效率与精确性,满足大规模生产的需要^[1]。

结论

综上,球磨机衬板磨损乃为力学、材料及化学多场耦合之复杂产物,只有进行系统治理才能突破寿命瓶颈,且单一指标之改善难有成效。硬度匹配服从0.8~0.9的黄金比例可以避免脆性断裂的发生,材质复合采用双金属界面冶金组合考虑硬韧性的均衡,功能梯度材料预示着技术高地的形成,结构优化借由波形设计转换冲击能作为磨矿功,而工艺控制则赖热处理及激光熔覆来活化潜力。将来有限元和AI的深度融合会推动衬板朝着智能定制方向进化,对磨损和振动信号的实时监控可以达到预测性的维护,化被动替换为主动优化,这种技术投入,其实是矿山核心竞争力建设的基石。

参考文献

- [1] 马道明, 李同清, 尹自信, 等. 基于 Archard 磨损模型的二元颗粒球磨机衬板磨损分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2024, (10): 105-114.
- [2] 董德, 赵广辉, 刘鹏涛, 等. 球磨机NM500衬板摩擦磨损机理研究[J]. 重型机械, 2023, (02): 78-83.
- [3] 郑志斌, 李惠, 龙骏, 等. 球磨机衬板压条失效损伤分析[J]. 铸造, 2017, 66(08): 871-875.
- [4] 倪旭, 彭玉兴, 朱真才, 等. 铁矿石球磨机衬板干湿摩擦磨损机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2017, (02): 52-59.