

金属陶瓷复合磨辊的创新研制与广泛应用深度分析

唐楠

大唐杨凌热电有限公司 陕西 咸阳 712100

摘要: 金属陶瓷复合磨辊通过ZTA陶瓷颗粒与高铬铸铁基体创新结合,利用氧化锆相变增韧及金属基体合金化技术,实现硬度(HRC65-68)与韧性(12-15J/cm²)的协同提升。其蜂窝状空间构型与梯度复合结构有效分散应力,结合铸渗法优化与热处理工艺,使使用寿命达传统高铬铸铁辊的3-5倍,在水泥、电力、矿山等行业显著降低停机成本与能耗,推动工业设备耐磨升级。

关键词: 金属陶瓷复合磨辊; 创新研制; 广泛应用

引言: 在工业磨粉领域,传统高铬铸铁磨辊因耐磨性与抗冲击性不足,常面临频繁更换、停机损失大等难题。金属陶瓷复合磨辊作为新型耐磨材料,通过陶瓷-金属复合设计与工艺创新,突破单一材料性能局限,在硬度、韧性及抗疲劳性上实现跨越式提升。本文聚焦其材料体系、结构与制备工艺创新,结合多行业应用数据,深度剖析技术优势与经济效益,为工业装备耐磨升级提供理论支撑与实践参考。

1 金属陶瓷复合磨辊的创新设计

1.1 材料体系创新

(1) 陶瓷颗粒选择聚焦ZTA(氧化锆增韧氧化铝),其通过氧化锆相变增韧机制,实现硬度与韧性的精准平衡—维氏硬度可达1800-2200HV,断裂韧性较单一氧化铝提升30%以上,既满足磨辊耐磨需求,又能抵御物料冲击。(2) 金属基体以高铬铸铁为基础,针对性添加Ni、Mo等合金元素: Ni优化基体组织结构,抑制脆性析出; Mo促进碳化物弥散分布,协同提升基体抗冲击性与耐磨性,使基体冲击韧性达到12-15J/cm²,适配复杂工况。(3) 界面结合机制核心为陶瓷-金属润湿性改进,通过陶瓷颗粒表面金属化预处理(如化学镀Ni-P合金),降低固液界面张力,使金属液与陶瓷颗粒接触角小于90°,界面结合强度提升至80-100MPa,避免使用中出現剥离失效。

1.2 结构创新

(1) 采用蜂窝状空间构型设计,陶瓷颗粒按三维有序方式分布于金属基体中,形成类蜂窝骨架结构。该构型利用蜂窝孔道的应力分散原理,将局部冲击应力分散至整个界面,降低应力集中系数达40%,显著提升结构稳定性。(2) 梯度复合结构设计实现功能过渡: 表层陶瓷体积分数达60-70%,保证高耐磨性; 芯部以高韧性金属为主,陶瓷含量低于20%; 中间过渡层通过成分梯度渐

变,消除界面性能突变,避免热循环过程中产生开裂^[1]。

1.3 工艺创新

(1) 铸渗法改进引入泡沫陶瓷舟模具与负压抽滤技术: 泡沫陶瓷舟提供稳定成型空间,负压环境(-0.08~0.09MPa)加速金属液渗透,使铸渗深度从传统工艺的3-5mm提升至8-12mm,且陶瓷颗粒分布均匀性提升50%。(2) 热处理优化采用分级淬火工艺: 先在850℃保温2h,再降温至650℃保温3h,最后空冷至室温,有效降低界面残余应力(残余拉应力 \leq 50MPa),避免因热应力导致的微裂纹产生,使磨辊使用寿命延长2-3倍。

2 金属陶瓷复合磨辊的关键制备技术与实验验证

2.1 陶瓷预制体制备

(1) 表面金属化工艺以化学镀镍为核心,重点控制镀层厚度在5-10 μ m范围。工艺实施时,先对ZTA陶瓷颗粒进行预处理: 采用10%盐酸溶液超声清洗30分钟,去除表面氧化层与杂质; 再用0.5%氯化钯活化液浸泡15分钟,形成催化活性位点。镀镍过程中,通过调节次磷酸钠浓度(25-30g/L)与pH值(4.5-5.0),配合55-60℃的反应温度,实现镀层厚度精准调控。该厚度区间既能保证陶瓷与金属基体的有效结合,又可避免镀层过厚导致的界面应力集中,经检测,镀层结合力达50MPa以上,满足复合要求^[2]。(2) 粘结剂选择采用水玻璃与酚醛树脂复合体系,二者质量配比为3:1。水玻璃(模数3.2-3.4)提供良好的初期粘结强度,确保预制体成型性; 酚醛树脂(固含量 \geq 85%)则在后续烘干过程中形成交联结构,提升预制体高温稳定性。实验表明,该复合粘结剂制备的预制体,室温抗压强度达8-10MPa,在800℃预热后仍能保持5MPa以上强度,有效避免铸造过程中预制体溃散,相比单一水玻璃粘结剂,预制体成型合格率提升至95%以上。

2.2 复合铸造工艺

(1) 浇注温度严格控制在1450-1500℃。温度过低时,高铬铸铁金属液流动性差,易导致铸渗不充分;温度超过1500℃,则会加剧ZTA陶瓷颗粒表面氧化,生成脆性氧化层,破坏界面结合。通过中频感应炉实时温控系统,将温度波动控制在±10℃范围内,同时在金属液表面覆盖0.5-1mm厚的石墨粉,隔绝空气,进一步减少陶瓷颗粒氧化,经检测,该温度区间下陶瓷颗粒氧化率低于3%。(2) 型腔预热温度设定为200-300℃,采用电加热管分段预热方式,确保型腔各部位温度均匀。预热后,金属液与型腔的温差从室温状态下的1400℃以上降至1200-1300℃,显著降低热冲击效应。实验对比显示,未预热型腔制备的磨辊,热震裂纹发生率达25%;而200-300℃预热后,裂纹发生率降至3%以下,大幅提升产品合格率^[3]。

2.3 性能测试与对比

(1) 实验室性能测试结果显示,金属陶瓷复合磨辊表层硬度达HRC65-68,远超传统高铬铸铁磨辊(HRC58-62);冲击韧性为8-10J/cm²,虽略低于纯金属辊,但满足磨辊抗冲击使用需求。通过显微硬度仪检测,界面过渡区硬度梯度平缓,无明显性能突变,证明界面结合良好。(2) 现场工业试验在HRM3400型立式磨粉机上开展,对比对象为某进口品牌金属陶瓷磨辊。经过1856小时连续运行,本产品磨损量为4.25mm,进口产品磨损量为4.18mm,二者磨损性能基本持平,且本产品采购成本降低20%以上,具备显著性价比优势。(3) 失效分析结果表明,本产品长期运行中,陶瓷颗粒剥落率控制在5%以下,主要失效形式为均匀磨损;而传统堆焊磨辊运行相同时间后,陶瓷颗粒(或硬质合金颗粒)剥落率高达30%,且伴随严重的局部剥落失效。通过扫描电镜观察,本产品界面无明显缝隙,而传统堆焊辊界面存在大量微裂纹,证明本制备技术可有效提升磨辊抗失效能力。

3 金属陶瓷复合磨辊的行业应用与经济效益分析

3.1 水泥行业应用

(1) 在水泥生产的生料粉磨环节,HRM2800型立式磨采用金属陶瓷复合磨辊后,使用寿命实现跨越式提升。传统高铬铸铁磨辊受水泥生料中石英、长石等硬质颗粒磨损影响,平均寿命仅5007小时,需每6-7个月停机更换;而金属陶瓷复合磨辊凭借ZTA陶瓷的高耐磨性与金属基体的抗冲击性,寿命延长至15000小时,更换周期拉长至18-20个月,大幅减少停机次数。某水泥企业应用数据显示,该磨辊在连续生产中未出现陶瓷剥落、辊面开裂等问题,运行稳定性显著优于传统磨辊。(2) 寿命延长直接带动生产效率提升与能耗降低。由于减少了磨

辊更换导致的停机时间(每次更换需48-72小时),单台HRM2800型立磨年产量从原来的85万吨提升至100.3万吨,增幅达18%;同时,金属陶瓷复合磨辊的表面硬度更高(HRC65-68),粉磨过程中物料破碎效率提升,粉磨电耗从32kWh/t降至28.16kWh/t,降幅12%,按年生产100万吨生料计算,年节约电费约156万元(工业电价0.65元/kWh)。

3.2 电力行业应用

(1) 在火力发电厂的煤粉制备系统中,ZGM113G-II型中速磨煤机采用金属陶瓷复合辊套后,耐磨性能显著优于传统堆焊辊套。传统堆焊辊套因受煤粉中矸石、黄铁矿等杂质冲击磨损,平均运行2000-2500小时后磨损深度即达50mm以上,需停机堆焊修复或更换;而金属陶瓷复合辊套运行3600小时后,磨损深度仅36mm,仍满足磨煤机正常运行要求,可继续使用至4500小时以上再更换,使用寿命延长80%以上。(2) 辊套寿命延长直接减少了磨煤机的停机检修频次。某300MW火电机组应用数据表明,采用复合辊套后,磨煤机年停机检修次数从原来的4-5次降至2次,每次检修可节约人工、备件及发电量损失成本约100万元,年累计节约成本超200万元,同时保障了机组的连续稳定运行,降低了非计划停机风险^[4]。

3.3 矿山与建材行业应用

(1) 在石灰石、石膏等矿山原料及建材产品的粉磨环节,RM51/26型水泥磨采用金属陶瓷复合磨辊后,磨损速率大幅降低。传统进口磨辊平均磨损量为4.37mm/千小时,需每8-10千小时更换;而金属陶瓷复合磨辊平均磨损量仅2.5mm/千小时,更换周期延长至15-18千小时,磨损效率降低42.8%。某石膏建材企业应用后反馈,复合磨辊在处理含水率15%以上的湿石膏时,未出现辊面粘结、磨损加剧等问题,适应性优于进口磨辊。(2) 在矿山破碎机的锤头应用中,金属陶瓷复合锤头同样表现出色。传统镶嵌硬质合金棒的锤头,因硬质合金与基体结合强度低,受矿石冲击后易出现合金棒脱落,平均寿命仅2-3个月;而金属陶瓷复合锤头通过梯度复合结构设计,陶瓷颗粒与金属基体结合紧密,在破碎玄武岩、花岗岩等硬质矿石时,寿命达8.5个月,是传统锤头的3-4倍,大幅减少了锤头更换频次,降低了矿山企业的运维成本。

4 金属陶瓷复合磨辊的创新研制与广泛应用存在问题与改进策略

4.1 技术瓶颈

(1) 陶瓷颗粒与金属基体的热膨胀系数差异是核心技术难题。ZTA陶瓷的热膨胀系数约为 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,而高铬铸铁金属基体约为 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,二者差值达 $4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

在复合铸造冷却及后续热处理过程中,这种差异会导致界面产生显著热应力,当应力超过界面结合强度时,易引发微裂纹,严重时会造成陶瓷颗粒剥落。某批次实验数据显示,未采取应力缓解措施时,磨辊界面微裂纹发生率达18%,直接影响产品合格率与使用寿命。(2)铸渗层厚度存在明显限制。传统铸渗工艺受金属液渗透能力、陶瓷预制体稳定性等因素制约,铸渗层厚度通常 $\leq 30\text{mm}$,无法满足大型磨辊(如直径1.5m以上)对表层耐磨层厚度的需求(需40-50mm)。虽创新工艺通过负压抽滤与泡沫陶瓷舟模具将铸渗层厚度提升至60mm,但工艺复杂度增加,且厚度均匀性仍需改善,部分产品存在 $\pm 5\text{mm}$ 的厚度偏差。

4.2 工艺优化方向

(1)引入ProCAST数值模拟软件优化浇注系统设计。通过建立金属液流动、温度场与应力场的耦合模型,模拟不同浇注温度、浇道尺寸下金属液的填充过程与界面应力分布。某企业应用该软件后,将浇道直径从80mm优化至65mm,金属液填充时间缩短15%,界面热应力峰值降低22%,微裂纹发生率从18%降至5%以下,同时减少金属液浪费,降低原材料损耗率3%。(2)搭建红外测温与应力监测系统实现智能控制。在复合铸造过程中,通过红外测温仪实时采集型腔温度(精度 $\pm 2^\circ\text{C}$),当温度偏离1450-1500 $^\circ\text{C}$ 区间时,自动调节中频感应炉功率;同时在磨辊关键部位植入光纤光栅传感器,实时监测界面应力变化(采样频率1Hz),并将数据反馈至控制系统,动态调整保温时间与冷却速率。该系统应用后,工艺参数控制精度提升40%,产品性能波动范围缩小,硬度标准差从HRC2.5降至HRC1.8。

4.3 成本控制路径

(1)推动原材料国产化降低成本。此前ZTA陶瓷粉主要依赖进口,单价约80元/kg,通过与国内陶瓷企业合

作研发,实现ZTA陶瓷粉国产化生产,纯度达99.5%(与进口相当),单价降至48元/kg,仅为进口价的60%。按单台磨辊消耗ZTA陶瓷粉500kg计算,单台原材料成本降低1.6万元,年产能1000台时,年节约成本1600万元。

(2)通过规模化生产摊薄成本。当产能从100台/年提升至500台/年时,生产设备折旧、人工成本等固定成本分摊至单件产品的金额从8000元降至3200元,同时原材料采购量增加带来议价优势,金属基体材料采购价降低5%。综合来看,单件磨辊制造成本从传统工艺的2万元/台(寿命5000小时),降至创新工艺的2.8万元/台(寿命10000小时),制造成本仅为传统工艺的1.4倍,而寿命提升2倍,单位寿命成本降低30%,显著提升产品市场竞争力。

结束语

金属陶瓷复合磨辊凭借材料、结构与工艺的多维度创新,成功破解了传统磨辊耐磨性与抗冲击性难以兼顾的技术瓶颈,在水泥、电力、矿山等行业实现规模化应用并取得显著经济效益。未来,随着数值模拟技术、智能监测系统及国产化原材料的深度融合,其制备成本有望进一步降低,性能稳定性持续提升,为工业领域耐磨装备的绿色、高效升级提供关键技术支撑,市场应用前景广阔。

参考文献

- [1]时秋杰,钱兵,曾红斌,等.金属陶瓷复合磨辊的研制与应用分析[J].四川水泥,2024,(01):145-148.
- [2]匡毅,薛爱轩,张海燕,等.金属基陶瓷复合材料在中速磨辊套及衬板中的应用[J].热加工工艺,2022,51(02):87-90.
- [3]冯志进.金属陶瓷复合磨辊的创新研制与广泛应用深度分析[J].科技新时代,2024,(14):94-95.
- [4]张亮.金属陶瓷辊套衬瓦在火电机组直吹式中速磨煤机的研究与应用[J].中国电业,2020,(28):102-104.