

双模块轧机辊环材质优化对线材成材率与生产效率的影响

陈佳喜

江阴兴澄特种钢铁有限公司, 江苏 无锡 214400

[摘要] 特殊钢线材 5.5mm 规格生产线的双模块轧机 PL10F 工位, 原有普通硬质合金辊环使用寿命短、磨损速度快, 轧制过程中频繁出现粘钢现象, 直接导致线材成品产生各类表面质量缺陷。同时, 辊环快速磨损、粘钢故障会迫使设备频繁停机换辊、处理故障, 造成大量非计划热停机问题。针对以上生产难题, 开展辊环材质专项优化试验, 将 PL10F 工位原有普通硬质合金辊环, 全面升级替换为 TR08 超细晶硬质合金辊环。现场工业试验结果表明, TR08 超细晶硬质合金辊环晶粒尺寸稳定控制在 1~3 μm , 相较于传统辊环, 晶粒细化程度提升 70%; 辊环硬度可达 HRA90~92, 核心的高温耐磨性能提升 60% 以上。本次改造有效减少了辊环更换频次, 大幅降低设备非计划热停机次数, 在保障线材产品质量稳定的同时, 同步实现线材成材率和生产线生产效率的双重提升。

[关键词] 双模块轧机; 辊环; 超细晶硬质合金; 线材; 成材率; 生产效率

DOI: 10.33142/ucp.v3i3.20379

中图分类号: TG333.6+2

文献标识码: A

The Influence of Optimizing the Material of the Double Module Rolling Mill Roll Ring on the Wire Yield and Production Efficiency

CHEN Jiayi

Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu, 214400, China

Abstract: The double module rolling mill PL10F station of the special steel wire 5.5mm specification production line has a short service life and fast wear rate of the original ordinary hard alloy roller ring. During the rolling process, the phenomenon of steel sticking frequently occurs, which directly leads to various surface quality defects in the finished wire products. At the same time, rapid wear of roller rings and steel sticking failures will force equipment to frequently shut down for roller replacement and troubleshooting, resulting in a large number of unplanned thermal shutdown problems. In response to the above production difficulties, a special optimization test for roller ring material was carried out, and the original ordinary hard alloy roller ring at PL10F station was fully upgraded and replaced with TR08 ultra-fine grain hard alloy roller ring. The on-site industrial test results show that the grain size of TR08 ultra-fine grain hard alloy roller ring is stably controlled at 1-3 μm , which is 70% more refined than traditional roller rings; The hardness of the roller ring can reach HRA90-92, and the high-temperature wear resistance of the core is improved by more than 60%. This renovation effectively reduced the frequency of roller ring replacement and significantly reduced the number of unplanned thermal shutdowns of equipment. While ensuring stable quality of wire products, it simultaneously achieved a dual improvement in wire yield and production line efficiency.

Keywords: dual module rolling mill; roller ring; ultrafine grained hard alloy; wire rod; yield rate; production efficiency

引言

双模块轧机是高速线材精轧机组的核心关键设备, 主要用于特殊钢、优质碳素钢线材的规模化量产生产^[1]。辊环是轧机中直接完成钢材塑性变形的核心部件, 同时也是损耗最快的易损件。特殊钢的合金成分含量高, 在高温环境下变形难度大、抗力更强^[2]。实际精轧生产过程中, 轧制温度长期维持在 900~1100 $^{\circ}\text{C}$, 同时辊环还要持续承受

钢材摩擦、挤压、交变冲击等多重载荷的叠加作用, 工况条件极为恶劣, 因此对辊环的整体综合性能有着极高的要求。以往使用的是 PL10F 常规硬质合金辊环, 这种传统辊环材料存在明显短板, 内部晶粒尺寸偏大、材料致密性较差, 在高温轧制工况下性能会快速衰减。投入生产使用时, 轧槽磨损速度快, 容易出现粘钢问题, 进而导致线材成品出现压痕、划痕等质量缺陷。同时辊环使用寿命短,

需要频繁停机更换配件,不仅严重限制了生产线产能释放,还大幅增加了设备运维和配件更换成本^[3]。文章紧扣生产线实际生产痛点,开展 TR08 超细晶硬质合金辊环的优化改进研究,量化分析产品提质、生产增效、降本的实际效果。

1 原工况存在问题及失效机理分析

1.1 PL10F 辊环应用现状

5.5mm 规格线材双模块轧机原先配套使用 PL10F 普通硬质合金辊环。这款粗晶硬质合金生产工艺成熟、造价低,却无法满特殊钢高速精轧苛刻的生产条件。PL10F 合金晶粒偏粗大,平均晶粒尺寸达到 10~15 μm ,常温硬度 HRA85~86,一旦处于高温轧制环境,硬度和耐磨性会明显下滑。现场实际生产过程中暴露出四大突出问题:一是轧槽磨损速度快,辊环服役周期短,孔型形状精度很快就达不到生产要求,需要频繁停机换辊;二是粘钢问题叠加不均匀磨损,会在线材表面形成压痕、划痕,还容易出现尺寸超标等永久性表面瑕疵;三是材料基体孔隙偏多,轧制高温状态下很容易出现粘钢现象,依靠常规冷却润滑手段很难有效解决;四是反复换辊、清理粘钢渣带来大量非计划热停机,有效轧制时长被不断挤占,不仅产能受到制约,还降低生产线综合成材率^[4]。

1.2 PL10F 辊环失效机理

从微观结构和摩擦磨损机制来看,PL10F 辊环发生失效,本质是材料内部微观缺陷和外部轧制宏观工况相互叠加、共同作用造成的。这款辊环材料中的 WC 硬质颗粒晶粒偏粗大,晶粒之间分界面积极少,颗粒与基体结合得不牢固,抵抗磨粒磨损、粘着磨损的性能差。在高速轧制产生的剪切摩擦作用下,硬质颗粒很容易从基体上脱落,直接造成轧槽快速磨损。加上辊环采用常压烧结工艺生产,材料致密程度不够,内部存在不少孔洞、晶界缺陷,降低辊环整体强度,高温轧制时,钢料还极易附着在这些缺陷位置,产生粘钢现象。轧制过程持续承受反复变化的热应力与机械载荷,应力会在孔洞、晶界缺陷位置高度聚集,产生微小裂纹并不断延伸扩大,进一步加剧硬质颗粒脱落与轧槽磨损。而表面形成的粘钢层又会打乱接触面受力分布,带来不均匀磨损,最终形成持续恶化的失效循环。单纯调整冷却条件、轧制速度这类工艺参数,只能稍微延缓辊环损坏速度,不能彻底解决材料存在的短板^[5]。为了能够彻底根治失效问题,需要升级辊环原材料体系,优化内部微观组织结构。

2 TR08 超细晶硬质合金辊环优化方案

2.1 TR08 超细晶辊环材料配方优化

TR08 超细晶硬质合金以超细 WC 粉末作为硬质基体,

调整优化钴粘结相配比,搭配碳化铬、碳化钒晶粒抑制剂搭建高性能复合材料体系。和常规 PL10F 硬质合金相比,这套材料体系可以有效阻止 WC 晶粒出现局部过度长大,确保晶粒尺寸更细小、分布更均匀,改善粘结相排布状态,缓解原料成分扎堆、分布不均的偏析现象。原料 WC 粉末粒径严格控制在 0.4~0.8 μm ,更容易烧制成致密无明显孔隙的合金;均匀分散的粘结相,可以同时兼顾高硬度、耐磨能力与抗冲击韧性,解决超细晶合金普遍容易脆断的短板。晶粒抑制剂牢牢锁定晶界位置,避免高温环境下晶粒变粗,保证辊环内部组织结构长期稳定。TR08 做到硬度、韧性与高温性能三者兼顾,能够适配特殊钢高线生产里高温、高速、持续重载的轧制使用场景^[6]。

2.2 精细化粉末冶金制备工艺优化

TR08 超细晶硬质合金辊环,摒弃了传统 PL10F 常压高温烧结的老旧生产路线,升级采用精细化湿磨喷雾干燥+低温低压液相烧结+二次保压致密化改良粉末冶金工艺,提升辊环的硬度、致密性和使用寿命。

在原料预处理阶段,对超细粉体做均质化精细处理。所有粉料均经过长时间高能湿磨,促使各类粉体充分分散均匀,从根源消除粉体团聚结块现象。浆料再经由离心喷雾干燥制备成混料,所得粉体流动性优良、组分分布均一,能够有效避免原料成分波动、制品成型开裂与表面缺陷等问题,稳定保障坯体品质,为后续实现高品质烧结筑牢工艺基础。

烧结环节采用 1380~1420 $^{\circ}\text{C}$ 低温真空液相烧结工艺,在高真空环境下,依托体系共晶组分形成液相,在低于传统液相烧结温度区间完成致密化。区别于传统高温烧结,低温环境搭配精准的温度控制系统,能有效抑制 WC 晶粒过快、过大生长,把合金平均晶粒尺寸稳定控制在 1~3 μm 区间。相比传统 PL10F 工艺,晶粒细化效果提升 70%,确保辊环基体组织更细腻、结构更均匀,耐磨性能大幅提升。

为改善烧结坯体内部孔隙缺陷、提升材料整体致密度与力学性能均匀性,在烧结完成后增设二次等静压保压致密化工序,待试样完成常规烧结工艺并随炉冷却至室温后,首先对烧结坯体进行表面清理、去除氧化皮与残留杂质,并完成外观及微观初检,剔除存在开裂、明显变形的不合格试样,保证后续加压试验的有效性。随后将合格烧结坯体置于等静压设备中,借助二次加压处理充分压实合金内部组织结构,有效消除制备过程中形成的微小气孔、细微裂纹等内部缺陷,提升坯体致密度,优化材料内部均匀性,减少内部孔隙与应力缺陷,改善合金力学性能,提升成品整体质量与使用可靠性,将产品孔隙率控制在 0.5% 以下,

让辊环整体致密性更高,不易出现断裂、磨损、掉块等问题。

最后,对辊环轧槽做镜面精加工处理。最终产品表面粗糙度 $Ra \leq 0.2\mu m$, 尺寸精度精准控制在 $\pm 0.005mm$ 范围内。超高的表面精度和尺寸精度,能有效降低轧制作业中的摩擦阻力,避免钢材粘连在辊环表面,同时长期稳定轧槽孔型尺寸精度,保障轧制产品的品质稳定性。

2.3 TR08 与 PL10F 辊环核心性能对标分析

通过微观结构调控与制备工艺优化,TR08 超细晶硬质合金辊环的综合力学性能和实际使用表现得到大幅提升,相比 PL10F 普通硬质合金辊环优势显著。该材料常温硬度稳定在 HRA90~92,比 PL10F 提高 6%以上;高温环境下硬度下降幅度更小,高温耐磨性能提升 60%以上,可以长期保证轧槽尺寸精准,有效延长辊环使用寿命。辊环基体组织致密,内部孔隙极少;超细晶粒结构能够减轻钢材轧制时粘连在辊环表面的问题,从根源解决粘钢故障。材料强度与韧性实现同步改善,抗弯强度、冲击韧性显著增强,能够承受轧制过程持续交变冲击和冷热交替产生的热应力,减少崩边、碎裂等突发性损坏。均匀细化的晶粒可以分散工作时产生的热应力,抑制高温下的晶粒,具备优秀的热稳定性能,整个使用周期内性能波动小,持续稳定保障钢材轧制品质。

2.4 现场标准化实施方案

本次升级按照小批量试运、数据验证、全线推广、制度配套的思路分步推进,第一阶段先开展小批量对比试验。5.5mm 线材轧制所有工艺参数保持不变,只更换辊环材质,轮换使用 PL10F 和 TR08 两种辊环进行生产。连续跟踪 15 个生产班次,收集辊环磨损快慢、使用寿命、线材缺陷发生率等核心数据,检验 TR08 辊环实际使用效果,同时提前排查运行过程中可能出现的各类问题。试验各项指标达到预期后,进入第二阶段,对精轧机架辊环进行全线更换,停用原有 PL10F 粗晶辊环。第三阶段根据 TR08 超细晶辊环本身的材料特点,调整完善运维管理要求,优化日常巡检、辊环修磨以及换辊作业标准。整个实施过程中,统一工艺、设备、操作等所有外部条件,保证各项指标出现的变化只来自辊环材质改动,保障试验数据真实、具备对比参考意义,得出的结论能够直接用到实际生产当中。

3 工业应用效果分析

3.1 线材表面质量与成材率变化

TR08 超细晶硬质合金辊环稳定投入使用之后,辊槽磨损速度明显变慢,孔型尺寸精度能长期保持稳定,辊环高温粘钢的问题基本彻底解决。从根源上避免因为辊环问

题,造成线材出现压痕、表面毛糙、划痕、尺寸超标等各类表面质量缺陷。根据数据测算,项目落地后每年能减少存在缺陷的报废线材 302.4t,提高经济效益。除此之外,线材一次检验合格率明显提高,产品质量波动变小、稳定性大幅增强,线材综合成材率持续上涨,彻底改善了原先使用传统材质辊环时成材率偏低的痛点。

3.2 产线连续生产效率提升

原 PL10F 辊环工况下,因辊环磨损快、粘钢频发,班组需每日多次停机开展换辊、粘钢清理、孔型校正等作业,大量非计划热停机严重打断生产连续性,有效轧制时长不足,设备产能难以充分释放。全面投用 TR08 超细晶辊环后,辊环服役周期大幅延长,更换频次由日均多次更换降至每日 1 次,单次换辊作业耗时 20min,全年累计减少非计划热停机时长 1471min,折合有效生产时长增加 24.52h。该分厂 5.5mm 规格线材月均小时产能 64.4t,有效轧制时长的增加直接转化为产能提升,每年可新增合格轧制产量 1579.088t,按照吨钢效益 600 元测算,增产创造经济效益 94.75 万元。同时,换辊、清理作业频次大幅下降,操作工劳动强度显著降低,产线生产节奏更加稳定,设备有效作业率显著提升。

3.3 辊环使用成本与综合能耗优化

TR08 超细晶硬质合金辊环生产工序繁琐,对原料品质要求严苛,所以单套采购价格会比传统 PL10F 辊环更高,但凭借超长服役寿命、极低失效概率,单位吨钢对应的辊环消耗成本显著下降。一方面,意外停机检修的情况明显变少,避免炉子反复启停、升降温造成煤气、电力白白浪费,节约能源开支。另一方面,不用频繁更换辊环,既能减少采购备件投入的资金,也不用囤积大量备件,缓解库存压力。同时,线材报废量锐减,原材料利用率显著提升,综合生产损耗大幅降低。整体测算来看,改用该辊环之后,产线的辊环维护费用、产品质量损耗、能源消耗开支同步减少,综合生产成本能够下降 10%以上,兼顾产品品质、生产效率与成本管控,达成三方同步优化。

4 经济效益综合核算

本次辊环材质优化项目的经济效益主要来源于质量减损与产能增产两大维度,具体核算如下:

(1) 缺陷报废减量效益:全年减少不合格线材报废 302.4t,吨钢差价 3500 元,经济效益为 $302.4 \times 3500 = 105.84$ 万元/年;

(2) 停机减量增产效益:全年新增有效轧制时长 24.52h,小时产能 64.4t,新增产量 1579.088t,吨钢效益 600 元,经济效益为 $1579.088 \times 600 \approx 94.74$ 万元/年;

项目年度累计直接经济效益=105.84 万+94.74 万=200.58 万元,提质增效成果显著,投资回报率高。

5 结论

针对特殊钢高线双模块轧机恶劣的轧制工况,升级为TR08 超细晶硬质合金辊环。通过优化合金配方、采用精细化粉末冶金生产工艺并精准把控晶粒尺寸,把合金内部晶粒做细、提升材料致密程度,解决传统辊环在高温环境下耐磨性差、容易粘钢、整体强度不足等痛点,减少线材表面各类瑕疵,提升成材率。现场工业应用数据表明,该改造项目实现产品提质、产能增效、能耗下降,满足绿色生产要求,新辊环使用寿命更长、轧制过程运行更平稳,能够降低因换辊、清理设备造成的非计划停机,能够为同类型高线产线设备升级提供可行的实施方案。后续还可继续推进表面涂层、轧槽形状以及轧制工况参数的优化试验,进一步挖掘设备潜力。

[参考文献]

[1]石卓然,颜振现.线材精轧机轧辊锥套故障分析与改进

[J].山西冶金,2025,48(2):240-242.

[2]巴迅.轨梁轧机用高碳高速钢离心复合辊环的生产与应用[C].北京:中国铸造协会,铸造工程杂志社,聚焦新质生产力加快铸造行业高质量发展--第二十届中国铸造协会年会论文集,2024:196-199.

[3]陈廷军,周苑.KOCKS 轧机高速钢辊环开裂原因分析[J].金属制品,2022,48(1):41-44.

[4]韦勇宝,韦超,金梁,等.高速棒材成品辊环崩裂浅析[J].冶金管理,2021(15):122-123.

[5]朱玉龙,朱志磊,刘永锋,等.万能型钢轧机高铬合金辊环的研制与应用[J].山西冶金,2020,43(4):37-38.

[6]甘宅平.热轧型钢轧辊材质的研究与发展方向[J].冶金设备,2017(2):31-45.

作者简介:陈佳喜(1994—),男,汉族,江苏省无锡市/江阴市人,工程师,本科,毕业于东北大学冶金工程,研究方向为特殊钢线材生产轧制,现从事特殊钢线材轧制生产。