

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.014

轧辊失效形式及修复方法的研究进展

张俊鹏, 武纪宇, 薛曙冰, 李雪

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051)

摘要: 轧辊是钢材轧制过程中主要的消耗部件, 其制备工艺复杂、价格昂贵、失效率高。通过对几种在实际生产过程中常见的失效形式以及轧辊的修复技术进行分析研究, 对延长轧辊寿命、提高钢材轧制生产效率、提高产品质量和产量, 以及减少资源和能源浪费等具有重大意义, 可为轧辊的二次利用提供参考。

关键词: 轧辊; 失效形式; 修复方法; 研究进展

中图分类号: TG333.17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)02-0071-04

Research Progress on Failure Forms and Repair Methods of Roll

ZHANG Junpeng, WU Jiyu, XUE Shubing, LI Xue

(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Roll is the main consumption part in the process of steel rolling, and its preparation process, however, is complex, expensive and high failure rate. To address the problems, this paper analyzes and studies several common failure forms in actual production process and roller repair technology, which is significant for prolonging the life of rolls, improving the efficiency of steel rolling, enhancing the product quality and output and reducing the waste of resources and energy, and can provide good references for secondary utilization of rolls.

Keywords: roll; failure mode; repair method; research progress

0 引言

钢在热轧过程中要承受多种应力, 如接触应力、剪切应力、轧制应力以及冷却不良导致的热应力等。高温环境时的摩擦力和冷却时的温差造成的热疲劳力使得工作条件变得极其恶劣。目前, 热轧所用的轧辊一般使用的是复合轧辊, 轧辊内部使用的是球墨铸铁等强度较高的材料, 外部用高速钢包裹。这种轧辊表面粗糙度好, 有很高的耐磨性^[1]、强度、硬度以及韧性, 抗热性能和稳定性好, 同时有很好的淬透性、红硬性以及抗粗糙性。通过近几十年的发展, 高速钢轧辊已经成为实际生产中最为重要的轧辊材质。在轧制生产过程中, 由于轧制工艺条件的不同, 导致轧辊在连续生产过程中失效的形式不同。因此针对不同的失效形式需要采用不同的表面修复方法。本文主要介绍了轧辊在轧制生产中产生的几种失效形式以及表面的修复技术, 通过对轧辊进行修复以减少资源和能源的浪费。

1 轧辊的失效形式

1.1 轧辊剥落

精轧时, 钢坯温度迅速下降, 其变形抗力变强, 需要轧辊施加更大的压力, 这容易造成应力集中导致轧辊持续疲劳从而发生剥落。有研究表明^[2], 接触疲劳导致的剥落是高速钢轧辊失效的主要原因。西南交通大学的杨川等^[3]发现, 在生产轧辊的离心铸造过程中, 合金元素偏析有时会在轧辊表面产生一些白色区域, 由于热裂纹的作用会在这些白色区域内产生剥落。这些剥落主要表现为轧辊的辊颈肩部脱落、马鞍状疲劳剥落、轧辊表面和内部的金属结合层疲劳脱落、挤压导致的断裂剥落和条带状疲劳剥落等。当轧机的两轧辊相互接触时, 会在轧辊间产生压应力以及相对应的交变剪应力。在生产过程中随着周期性的循环加热和冷却会造成轧辊的温度场发生变化, 导致应力分布不均匀, 进而形成具有周期性质的热应力。最终导致热裂纹的产生并产生软点, 随着裂纹的不断扩张, 在轧辊表面产生海滩纹和扇形纹的

基金项目: 大学生创新创业训练计划基金资助项目

第一作者简介: 张俊鹏(2000—), 男, 辽宁葫芦岛人, 学士, 研究方向为材料成型及控制工程, 2737437269@qq.com。

特征性裂纹使得轧辊的强度变低,从而引起轧辊剥落,导致轧辊失效。^[4]

1.2 轧辊断裂

轧辊断裂是轧辊报废的主要形式。它主要发生在轧辊的辊身、辊颈、辊头等部位。由于轧辊的材质不同,生产条件不同,因此断裂的位置也各不相同。有多种因素可以造成轧辊断裂,可能是一瞬间造成的,或是裂纹过多导致疲劳断裂,也可能是辊身与辊颈和辊头的直径搭配不当或者辊身与辊颈之间过渡圆弧太小产生应力尖峰导致轧辊断裂。但其中主要是由于应力过载导致轧辊断裂^[5]。张海臣等^[6]提出,在实际生产中造成轧辊断裂共有4种应力:第1种是残余应力,主要是轧辊在轧制后仍留在体内的自相平衡的内应力;第2种是轧制应力;第3种是热应力,是由于冷却效果不好而引起的;第4种是组织应力,是轧制过程中由于轧辊的内部发生马氏体相变而产生的。

在实际生产过程中,轧辊断裂还有着内部和外部两种因素之分。

内因:在轧制过程中,轧辊内存在大量的残余奥氏体引起马氏体相变,从而生成大的组织应力超过材料本身的抗拉强度;同时轧辊芯部组织中会产生因为铸造缺陷而生成的未能融合的孔洞,导致力学性能降低,使得轧制后残余应力过大导致裂纹延伸而产生断裂。因此,轧辊发生断裂的主要原因是轧辊芯部组织发生相变和铸造缺陷导致力学性能降低所导致。

外因:对于外部因素有两个方面可以造成轧辊断裂,一是简单的机械过载,在生产过程中,转矩超出辊颈的设计载荷,应力过高导致轧辊突然断裂,且断面是平齐的;二是疲劳裂纹导致,由于超负荷的工作或者轧制力以及各应力叠加产生疲劳源头和受力面积内裂纹的富集。在这种情况下,外部应力引起机械性持续疲劳从而导致断裂。在实际生产过程中,孙向阳等^[7]发现,在轧辊上线初期,进行超高速轧制就会导致轧辊表面的温度迅速升高,产生相对较大的轧制热应力,会直接使轧辊外层和中间层结合部位的金属硬度降低。在轧制力的影响下,将会在薄弱的部位形成初始裂纹,造成断辊。因此,轧辊发生断裂主要是由轧制热应力过大和冷却效果不良而引起的。

1.3 磨损

轧辊磨损是最重要的损耗和失效形式。轧辊与轧件之间相互接触时,会产生摩擦力而导致轧

辊磨损。在轧制过程中,因为轧辊和工件相对运动会发生材料的迁移和黏着,使得轧辊材料的软化和接触区之间的黏结力变差,当应力值大于此区域中材料的抗拉强度极限时,会在轧辊表面发生剪切裂纹导致轧辊失效^[8]。轧辊的磨损也是轧辊表面形成的氧化膜与摩擦损失之间的动态平衡过程。在热轧过程中,高速钢轧辊的表面与热轧钢材在接触时会瞬间产生分布均匀的氧化膜。由于氧化膜的存在,降低了轧辊与钢材之间的摩擦冲突,减少产生的热裂纹向轧辊的辊体扩张,进而缓解了轧辊在轧制带钢时的冲击。随着轧制的不断进行,摩擦造成裂纹会不断地增加,使得轧辊的表面变得更加粗糙,导致轧辊表面变得不平整。氧化膜分布不均匀或当氧化膜的厚度过厚时,它的力学性能将会降低,并且在机械应力和热应力的作用下,使得轧辊表面的氧化膜磨损迅速增加甚至大片脱落。因此防止氧化膜的脱落对延长轧辊的寿命有着重要意义。王畅等^[9]在2019年提出了通过控制热轧过程中带钢的表面温度来防止或者减少轧辊形成瘤状的氧化膜,避免在热轧过程中,轧辊会因为温度过高发生膨胀导致温度不能均匀地分布在轧辊上,使得氧化膜脱落,从而达到防止氧化膜剥落的目的。

1.4 热疲劳

轧辊在反复的冷却和加热生产中,产生的具有周期性的热应力是造成高速钢轧辊热疲劳的主要原因。热疲劳裂纹在轧制过程中会产生未熔化的块状共晶碳化物^[10],这种未熔化的共晶碳化物在沿着碳化物或者碳化物和基体之间的界面延伸时,会在很大程度上降低轧辊的抗冷和抗热疲劳性,从而导致轧辊的使用性能降低,最终产生热疲劳。

2 轧辊表面修复技术

为了延长轧辊寿命,提高产品产量,避免轧辊报废,轧辊的修复和再次利用有着非常重要的作用,这里介绍了近年来的轧辊表面修复技术。

2.1 堆焊技术

堆焊实际上是指使用具有一定合金性能的材料在电极热源的作用下,使轧辊的表面熔覆一层具有特殊使用性能的合金层的方法。传统的埋弧堆焊热输入较大,容易造成元素的烧损,而且稀释率相对较高,往往需要多层堆焊才能满足其性能要求^[11]。到目前为止,埋弧焊均采用自动焊接的

方法,这种方法生产效率高,生产质量好,更加容易满足轧辊修复后对性能的要求。使用埋弧焊修复轧辊时,首先要对轧辊进行粗加工,其次利用超声波进行探伤并确定位置,在焊接时要先进行预热,焊接完成后对修补位置进行焊后的热处理,热处理后对轧辊进行精加工,再进行超声波探伤,检查合格后装机使用。在修补轧辊时要注意,预热、堆焊以及焊后的热处理是其中最为关键的步骤,不可出现任何差错,否则轧辊要重新修复或者报废。在近几年的实际生产中,埋弧焊已经有了巨大的进步。2018年,牛犇等^[12]在Cr5钢板上使用新型的药芯焊丝进行堆焊修复,这种新型焊丝在焊接完成后焊缝的表面没有焊渣。在堆焊完成后的耐磨实验中,修复完成后的位置磨损面相对光滑,没有出现金属粘黏、撕裂等现象,表现出了极为优秀的耐磨性^[13]。甚至在焊接后的堆焊层也没有出现裂纹、飞溅、咬边等不利缺陷,焊道表面也相对平整美观。2018年,石秋红等^[14]提出了使用不锈钢焊丝H2Cr13搭配低锰高硅型的焊剂HJ260对650轧机轧辊进行埋弧焊修复,这种修复方法满足了轧辊孔型表面堆焊层金属对高温耐磨性、抗裂性、硬度的要求,并且因为堆焊材料较高的硬度和耐磨性使得对轧辊的使用寿命扩大了近一倍。这极大的节约了金属材料,降低了维护成本。

对于埋弧焊修复轧辊来说,新型焊剂的使用以及新方法的出现使得轧辊的寿命、强度等大大提高,而且修复方法更加趋于自动化、快速化和安全化,为轧辊的自动化修复提供了宝贵的经验。

2.2 激光熔覆技术

激光技术包括激光焊接、激光切割、激光熔覆等快速成型的技术。在轧辊的修复方面,激光熔覆技术是近几年应用范围最广,也是最有前景的表面修复技术^[15]。它的实质就是利用激光产生的巨大能量加热事先选定好的熔覆材料,使其在轧辊表面形成具有良好合金性质的熔覆层。激光熔覆具有结合强度高、组织致密度高、稀释率低等多个优点^[16],能够使轧辊得到更好的使用,避免经济损失。在正常情况下,激光熔覆材料一般是粉末状^[17],它通过预置粉末或者同步送粉的方式作用在轧辊的表面,并且通过激光熔覆加工搭载平台来保证修复的顺利进行。近几年来,激光熔覆技术越来越多地被应用于实践中。2019年,上海交通大学的任嘉^[18]使用304不锈钢、Ni25镍基

合金、F321不锈钢、Stellite6钴基合金等多种材料作为激光的涂层材料来对球墨铸铁轧辊进行修复,对不同的方案进行了实验研究对比。建立计算机仿真模型,利用多种理论得出,不同的激光熔覆材料,不同的激光热源,甚至不同的激光效率都对轧辊有着不同的影响。由此得出,相对于其他材料,使用Ni25镍基合金修复后,轧辊的熔覆层更加平整,致密度也高。由于Ni25镍基合金的硬度与球墨铸铁基体相差不大,而且其基体的热影响区过渡带相对较宽,可以在一定程度上缓解因硬度升高而造成的裂纹缺陷,是一种比较理想的激光熔覆材料。2020年,新疆大学的韩晨阳等^[19]使用YLS-2000光纤激光器对不锈钢轧辊进行修复。使用熔覆材料为Ni60自熔性合金粉末,在进行大量单道熔覆实验后,得到修复后轧辊的最高硬度为7814.80HV0.2,比基材硬度提升约450.00HV0.2,它的平均硬度为617.65HV0.2。在经历耐磨实验后,它的熔覆层微观形貌良好,失重率仅为0.0165%,这大大地促进了激光熔覆技术对修复轧辊的进程。通过对上述几个研究进行分析发现,激光熔覆技术在轧辊轧制方面有着得天独厚的条件。修复后轧辊结合强度更高、组织更加致密等。相较于其他修复技术,激光熔覆修复技术更能适应轧辊材质,修复的质量更好。但激光修复相较于其他方法来说,它的成本较高,目前更适合应用在微小位置的修复。但随着激光器的进一步研究和发展,激光技术将更多地应用在轧辊修复方面。

3 结语

为了提高生产效率,延长轧辊寿命,减少资源的浪费,研究轧辊的失效形式以及失效的原因有着非常重要的意义。本文论述轧辊在轧制生产中常见的几种失效形式以及轧辊表面的修复技术。就目前的发展来看,激光熔覆技术在轧辊修复方面应用的范围最为广阔,也是最有前景的技术。相信在未来会有更多更好的技术来修复轧辊,使其更安全、可靠,使用寿命也 longer。

参考文献:

- [1] DONG Q, ZHANG J S, LIU H H. The effects of high-speed steel roll and lubrication on work roll wear and fatigue during electrical steel strip hot rolling [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2020, 20(2):432-437.
- [2] 曹燕,张军田,殷福星,等. 高速钢轧辊的组织性能及

- 失效机制[J]. 材料热处理学报,2012,33(7):50-54.
- [3] 杨川,高国庆,崔国栋. 高速轧钢机用轧辊早期失效原因分析[J]. 金属热处理,2011,36(3):106-108.
- [4] TAIRA S, FUJINO M, OHTANI R. Collaborative study on thermal fatigue properties of high temperature alloys in Japan[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 1979, 1(4):495-508.
- [5] 范亮,王江,王文斌,等. 波形护栏板冷弯成型机组传动轴断裂失效分析及对策研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):77-80.
- [6] 张海臣,高军芳,黄丽颖. 高铬铸钢轧辊断辊原因分析及防止方法[J]. 热加工工艺,2010,39(15):183-184.
- [7] 孙向阳,黄明,仇光宏,等. 热轧板带高铬复合铸铁轧辊辊身断裂失效原因分析[J]. 中国铸造装备与技术,2021,56(6):63-65.
- [8] OHKOMORI Y, KITAGAWA I, SHINOZUKA K, et al. Cause and prevention of spalling of backup rolls for hot strip mill[J]. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1988, 28(1):68-74.
- [9] 王畅,王林,于洋,等. 高速钢轧辊氧化膜形成研究[J]. 上海金属,2019,41(6):13-18.
- [10] 徐长征,孙大乐,吴琼,等. 轧辊用高速钢的热疲劳行为研究[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京:冶金工业出版社,2011:4849-4854.
- [11] 何实,李家宇,赵昆. 我国堆焊技术发展历程回顾与展望[J]. 金属加工(热加工),2009(22):24-27.
- [12] 牛彝,郭春富,孙伟强,等. Cr5 冷轧辊堆焊修复技术研究[J]. 焊接技术,2018,47(4):127-130.
- [13] YANG S L, LYU X Q, ZOU Z D, et al. Investigation of surfacing electrode with high hardness based on lath martensite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006(438/439/440):281-284.
- [14] 石秋红,张勤. 650 轧机轧辊埋弧焊修复工艺[J]. 电焊机,2018,48(1):99-100.
- [15] 李亚军,赵太源,肖莉,等. 冶金轧辊磨损辊面修复技术研究及应用[J]. 金属制品,2019,45(3):33-37.
- [16] 韩剑,黄旭,许强,等. MC3 冷轧辊辊颈激光堆焊与氩弧堆焊修复的对比研究[J]. 热加工工艺,2018,47(15):246-249.
- [17] YU H J. Development status of laser clad cobalt-based alloy coatings[J]. Advanced Materials Research, 2013, 748:192-195.
- [18] 任嘉. 球墨铸铁轧辊激光熔覆表面修复的研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [19] 韩晨阳,孙耀宁,王国建,等. 不锈钢冷轧辊激光表面修复工艺研究[J]. 应用激光,2020,40(4):598-604.

收稿日期:2022-09-06

(上接第 66 页)

- [9] NAZARI M, SAKHAEI S M, NAZARI M, et al. Variational mode extraction: a new efficient method to derive respiratory signals from ECG[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2018, 22(4):1059-1067.
- [10] PANG B, NAZARI M, SUN Z D, et al. An optimized variational mode extraction method for rolling bearing fault diagnosis[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(2):558-570.
- [11] 张云强,张培林,王怀光,等. 基于变分模式分解的滑动轴承摩擦故障特征提取与状态识别[J]. 内燃机工程,2017,38(4):89-96.
- [12] ZHONG X, XIA T, MEI Q. A parameter-adaptive VME method based on particle swarm optimization for bearing fault diagnosis[J]. Experimental Techniques, 2023, 47(2):435-448.
- [13] 王贤瑞,赵国新,刘昱,等. 基于改进稀疏主元分析的在线故障监测和诊断[J]. 计算机仿真,2022,39(3):448-453.
- [14] LIU K L, JIN X, FEI Z S, et al. Adaptive partitioning PCA model for improving fault detection and isolation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(6):981-991.
- [15] 林盖,林述温. 基于主成分分析的高速铣削振动特性研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(5):28-32.
- [16] 殷海双,胡泽彪,刘远红,等. 基于鲁棒局部线性嵌入投票的轴承故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(8):81-84,89.
- [17] 吴振宇,侯冰洋,王辉兵,等. 半监督稀疏近邻保持投影[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(4):934-940.
- [18] QIAO L S, CHEN S C, TAN X Y. Sparsity preserving projections with applications to face recognition[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1):331-341.
- [19] RANDALL R B, ANTONI J, CHOBSAARD S. The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5):945-962.
- [20] 王珂,吕勇,易灿灿. 压缩感知框架下的共振解调故障诊断方法[J]. 中国机械工程,2018,29(16):1907-1911.

收稿日期:2022-09-06