

表面失效及防护

轨梁 BD1 轧辊表面激光熔覆改性技术

甘伟^{1,2}, 徐科¹, 刘涛², 徐金梧¹, 焦建鹏², 周东东¹

(1.北京科技大学, 北京 100083; 2.邯郸钢铁集团有限责任公司, 河南 邯郸 056000)

摘要: **目的** 解决轨梁轧制过程中 BD1 轧辊耐磨性低且易沾钢的问题。**方法** 采用激光熔覆技术, 研究熔覆层材质适用性, 设定化学成分组分以析出大量碳化物为主要目标, 同时考虑耐磨性、抗冷热疲劳性、焊接性能, 采用正交试验研究 C、Cr、Ni、Mo、W、Si、B 元素在激光熔覆材料中的作用, 由金相法检测晶粒取向及放大 500 倍观察微观裂纹评判确定最佳的粉料化学成分, 并分析了熔覆材料的宏观硬度、金相组织等材料性能。同时, 研究了激光功率、线速度、搭接量和送粉量等熔覆工艺参数对 BD1 轧辊表面质量的影响。**结果** 轨梁 BD1 轧辊孔型表面激光熔覆改性技术后, 由于熔覆层表面形成了一层与轧材显著不同的金相组织, 使得“焊合”现象不再发生, 消除了粘钢现象。熔覆层氧化膜具有较高的耐磨损性能, 提高了轧辊耐磨性。良好的冶金结合保证了熔覆层具有足够的抗压、抗冲击、抗机械疲劳和冷热疲劳能力。经过激光熔覆后, 过钢量由原来的不足 1000 t 可以提高到 6000 t 以上。**结论** 激光熔覆改性处理改变了 BD1 轧辊表面材料, 克服了粘钢现象, 提高了其耐磨性, 实现了 BD1 轧辊的高效循环利用, 显著地提高了轨梁 BD1 轧辊的使用寿命。

关键词: 铸钢; 轨梁; BD 辊孔型; 表面; 粘钢; 激光熔覆改性

中图分类号: TG174.442 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)10-0205-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.10.023

Laser Cladding Modification Technology for Cast Steel BD1 Roller Surface

GAN Wei^{1,2}, XU Ke¹, LIU Tao², XU Jin-wu¹, JIAO Jian-peng², ZHOU Dong-dong¹

(1.University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2.Handan Iron and Steel Group Co., Ltd, Handan 056000, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the BD1 roller has low wear resistance and is easy to stick steel during the rail beam rolling process. The laser cladding technology was used to study the applicability of the cladding material, and the chemical composition was set to precipitate a large amount of carbides. At the same time, the wear resistance, cold and thermal fatigue resistance and welding performance were considered. The role of Cr, Ni, Mo, W, Si and B elements in laser cladding was studied by orthogonal experiment, the grain orientation was detected by metallographic method and the best powder chemical composition was determined by evaluation of 500× observation microcracks. Moreover, the macroscopic hardness and

收稿日期: 2019-07-03; 修订日期: 2020-01-13

Received: 2019-07-03; Revised: 2020-01-13

基金项目: 国家自然科学基金 (51874022)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51874022)

作者简介: 甘伟 (1972—), 男, 在读博士, 主要研究方向为轧制过程管理及控制。

Biography: GAN Wei (1972—), Male, Doctoral candidate, Research focus: management and control of rolling process.

通讯作者: 徐科 (1972—), 男, 博士, 研究员, 博导, 主要研究方向为人工智能及机器视觉应用。邮箱: xuke@ustb.edu.cn

Corresponding author: XU Ke (1972—), Male, Doctor, Professor, Ph. D. supervisor, Research focus: artificial intelligence and machine vision applications. E-mail: xuke@ustb.edu.cn

引文格式: 甘伟, 徐科, 刘涛, 等. 轨梁 BD1 轧辊表面激光熔覆改性技术[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 205-213.

GAN Wei, XU Ke, LIU Tao, et al. Laser cladding modification technology for cast steel BD1 roller surface[J]. Surface technology, 2020, 49(10): 205-213.

metallographic structure of cladding material were analyzed. Then, the effects of cladding process parameters such as laser power, linear velocity, overlap and powder feeding on the surface quality of BD1 roller were studied. After the laser cladding modification technology of the BD1 roller surface of the rail beam, a metallographic structure significantly different from the rolled material was formed on the surface of the cladding layer, so that the phenomenon of “welding” no longer occurred, and the phenomenon of sticking steel was eliminated. The cladding oxide film had high wear resistance and improved roller wear resistance. While the good metallurgical bonding ensured that the cladding layer had sufficient resistance to pressure, impact, mechanical fatigue and thermal fatigue. After laser cladding, the amount of steel could be increased from less than 1,000 tons to more than 6,000 tons. The surface material of BD1 roller is changed, the phenomenon of sticking steel is overcome, and the wear resistance is improved, which realizes high-efficiency recycling of BD1 roller and significantly improves the service life of the BD1 roller of the rail beam.

KEY WORDS: cast steel; rail beam; BD roller; surface; sticking steel; laser cladding modification technology

轨梁用钢（如高速钢轨、H 型钢等）是交通、建筑、国防等领域的重要基础材料，其表面质量、轧制效率已经成为产品质量的重要影响因素之一^[1-3]。大型型钢生产线 DB1 轧机轧辊，由于承受了较大的轧制压力，只能采用强度较高的铸钢轧辊^[4-5]，但铸钢轧辊由于组织、性能的制约，比冷硬铸铁等耐磨材料的硬度低很多，耐磨性差^[6-9]，且容易发生粘钢，严重制约了轧制效率和轧辊的使用寿命。

激光熔覆是现代表面改性制造技术中的一种极有发展前途的高新技术，通过激光熔覆技术，可显著改善钛合金的表面耐磨性^[10]。蔡利芳等^[11]介绍了激光表面重熔（LSM）、激光熔覆（LC）及激光表面合金化（LSA）3 种表面激光改性方法及其对铝合金表面组织的影响及改性效果。王东生等^[12]为了解决激光表面改性裂纹及可重复性差的问题，分别从激光表面改性过程中工艺参量优化、裂纹产生机理及控制、纳米改性层及功能梯度改性层制备、激光原位合成及熔覆非晶涂层等方面进行了研究，以进一步提高钛合金激光表面改性层的性能。刘宇刚等^[13]对普通刀具材料表面进行激光表面改性，不但可以减少贵金属的使用量，同时具有耐热、耐磨、耐腐蚀、抗高温氧化等优越性能。韩彬等^[14-15]采用激光熔覆-离子渗硫复合工艺分别对 45 钢表面进行强化，得到了复合固体润滑渗硫层及镍基合金涂层，与熔覆层相比，复合改性层的摩擦系数和磨损量都显著降低，减摩和耐磨效果明显。李鹏飞等^[16]采用粉末共渗法在镍基高温合金表面获得约为 280 μm 厚的铝硅涂层，以纳米氧化铈含胶浆料作为中间体，在铝硅涂层表面形成透光预置层后进行激光熔注试验，获得稀土改性的铝硅涂层。徐泽洲、Zhang、Kusinski 等^[17-19]分别采用激光熔覆改性

技术对不锈钢及表面涂层的影响进行了分析。

综上可知，激光熔覆技术在表面改性方面得到了广泛的应用，但通过激光熔覆改性技术对铸钢轨梁 BD1 轧辊表面的研究尚不多见。本研究中研究了激光功率、光斑形状和尺寸、焦距、线速度、搭接量和送粉量等熔覆工艺参数对轨梁 BD1 轧辊表面的影响，通过激光熔覆工艺在孔型表面熔覆一层耐磨合金，该层耐磨合金与轧辊母材可以形成良好的冶金结合，较好地解决了轧辊粘钢问题，并使其耐磨性大幅提高。通过熔覆层一定的厚度补偿，还使得每次车削量大幅减少，使铸钢材质的 DB1 轧辊的使用寿命成数倍提高。通过激光熔覆后的铸钢轧辊，完全克服了粘钢缺陷，使用寿命成倍提高，轧辊下机车削量大幅减少，提高了大型型钢生产效率，大幅降低了轧辊损耗。

1 轨梁 BD1 轧辊使用现状

1.1 材质及物理性能指标

轨梁 BD1 轧辊材质为 60CrNiMo，这种材质是在亚共析钢的基础上，加入一定量的 Cr、Ni、Mo 合金元素，其化学成分如表 1 所示。通过特殊的铸造工艺和热处理工艺，获得比普通共析钢更高的抗拉强度和韧性，并具有优良的抗冲击能力和抗热裂性能，其物理性能指标如表 2 所示。

表 1 轨梁 BD1 轧辊的化学成分
Tab.1 Chemical composition of BD1 roller of rail beam
wt%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.55~0.65	0.2~0.6	0.5~1.0	≤0.035	≤0.03	0.8~1.2	0.2~1.5	0.2~0.6

表 2 轨梁 BD1 轧辊的物理性能指标
Tab.2 Physical performance indexes of BD1 roller of rail beam

Thermal conduction coefficient/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal expansion coefficient/ (×10 ⁻⁶ °C)	Elasticity modulus/ (×10 ⁴ MPa)	Friction coefficient
30~35	11~12	21~23	0.82~1.05
Body hardness(HSD)	Neck tensile strength/MPa	Density/(kg·m ⁻³)	Specific heat/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
40~45	≥800	7700	0.54~0.67

1.2 使用情况分析

在使用中, 轨梁 BD1 轧辊孔型立面、倾斜面极易发生粘钢现象, 如图 1a 所示。轨梁 BD1 轧辊的失效主要表现为早期局部粘钢严重, 有些轧辊甚至轧制几十吨就需要修整, 大大制约了轧辊的使用寿命。除

了局部粘钢现象外, 其主要失效方式表现为: 孔型表面材料流失, 粘钢面疲劳裂纹形成较早, 一次上机过钢量始终难以超过 3000 t, 为去除立面的疲劳裂纹, 直径方向每次车修量往往超过 20 mm 以上, 大大降低了轧辊的服役次数, 一对 BD 轧辊全程过钢量达不到 2 万吨, 有些甚至更少。

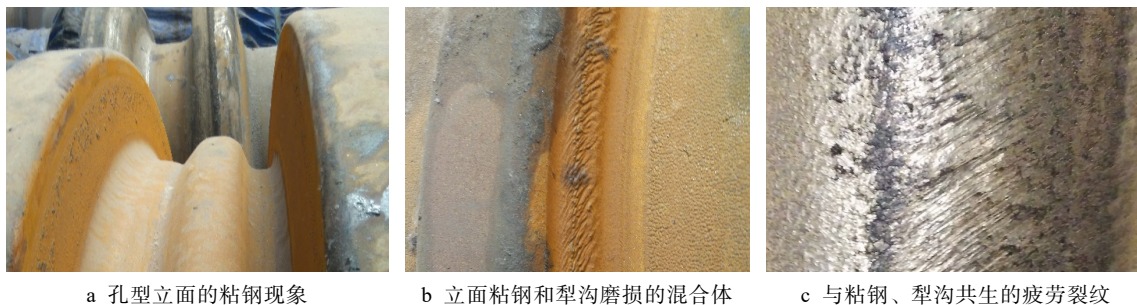


图 1 轨梁 BD1 轧辊粘钢及其影响

Fig.1 Sticking steel phenomenon and its effects of BD1 roller of rail beam: (a) sticking steel phenomenon of hole façade, (b) mixture of furrow wear sticking steel, (c) fatigue crack

BD1 轧辊粘钢的形成可分为三个过程: 第一, 孔型内表面凸点部位受轧制压力作用下的轧材强力挤压, 形成两种材料的“焊合”, 然后轧材与轧辊离开, 焊点被撕裂, 高温轧材的强度低于轧辊, 焊点自轧材侧断裂, 焊合点被留在轧辊表面形成粘钢; 第二, 滑差引起的粘钢材料位移, 促进了粘着物的累积; 第三, 随着粘着物的移动, 严重破坏了表面光洁度, 加重了轧辊表面的“凹凸不平”, 出现了更多的“焊点”, 粘钢进一步加剧。随着轧钢生产的连续进行, 上述三个过程不断循环, 虽然有一些粘着物脱落, 但脱落量远不及新增加的“焊合”量, 粘钢现象越来越严重, 最终导致轧辊失效。造成粘钢现象严重的根本原因是 60CrNiMo 的高温相与轧材的高温相组织相近。轧制过程中, 轧辊与高温轧材接触部位的瞬间温度可以达到 580 °C 左右, 此时的金相组织为高温珠光体, 而轧材的金相组织为高温奥氏体, 高温珠光体片层中的铁素体与高温奥氏体的性能极为相近, 根据粘着磨损理论中“相相近或相同的两种组织, 凸点容易‘焊合’”的原理, 粘钢就是必然的了。

除去粘钢因素外, 轧制过程中造成轧辊磨损还有摩擦磨损和疲劳应力两大因素。通过对实际磨损现象的分析, 造成铸钢 BD1 轧辊孔型表面磨损的主要因素是粘钢突起物在滑差推力作用下造成犁沟磨损, 仅作用在滑差大、轧制压力大的立面中间部位, 此部位同时还伴有疲劳裂纹。图 1b 为立面粘钢和犁沟磨损的混合体, 犁刃主要是粘着突起物, 在滑差和正压力作用下被轧材推移开生成部位, 一端嵌入高温轧材, 另一端“犁入”轧辊表层, 随着轧材和轧辊的相对运动轨迹旋出, 经过多次重复, 轧辊孔型立面被严重破坏, 形成粘钢与犁沟共同的破坏方式。图 1c 为与粘钢、犁沟共生的疲劳裂纹, 由于立面的提前失效, 其

他部位还没有达到疲劳极限, 且犁沟可起到强力加工硬化作用, 所以疲劳裂纹在粘钢、犁沟磨损最严重的部位首先产生。

通过以上分析, 可以得出如下结论: (1) 60CrNiMo 作为 BD1 轧辊材质, 可承受复杂孔型下轧制力、咬钢时的冲击力等均衡载荷和突发载荷的作用, 扁头、辊颈和辊身孔型内各部位的抗拉强度设计是合理的; (2) 该材质的抗粘钢性能极差; (3) 该材质的耐磨性较低; (4) 因孔型形状的原因, 孔型磨损后, 尤其是立面磨损后, 一次车修量大, 轧辊服役周期仅有 5~7 次。改变轨梁 BD1 轧辊表面材料、克服粘钢现象、提高耐磨性, 实现孔型磨损的可修复性, 是提高轧辊使用寿命的关键。

2 表面改性方法的选择

2.1 改进方向

根据第 1 节的结论, 需要对 BD1 辊孔型表面通过某种方法进行改性, 这就涉及到两方面的问题: 改性材料的选择和改性方法的选择。

改性材料应具备的物理化学特征: 应与高温奥氏体有明显区别的金相组织, 以确保消除粘钢现象; 应有足够高的耐高温耐磨性, 以克服轧制过程中的磨损, 尤其是犁沟磨损; 应能在磨损部位增材, 实现孔型磨损的可修复性。材料固有的线性热膨胀系数 (以下简称线胀系数) 与轧辊母材相近, 以避免轧制冷热循环作用下造成增材与母材因膨胀错位而造成脱落。

改性方法应具有如下优势: 应能实现改性材料与轧辊母材的良好冶金结合; 应能方便地控制增材厚度; 具有工艺可操作性; 具有合理的工艺成本; 安全、环保。

2.2 改性材料的选择方向

从线胀系数考虑,应选用黑色金属类的材料(各种物料的线胀系数可以自公共资源查阅,不再说明)。目前通用的黑色金属类耐磨材料主要有三大类:合金铸钢系

列、合金冷硬铸铁系列和硬质合金(含金属陶瓷)系列。

依据本文 2.1 节的要求,三类材料的物理化学性能对比见表 3,比较表中材料对要求的适应性,选择Ⅱ类合金铸钢作为熔覆材料的成分设计范围。

表 3 不同黑色金属类耐磨材料的性能对比
Tab.3 Performance comparison of different wear-resistant ferrous metal materials

Actual requirement	Item		Metallographic structure	Abrasive resistance	Welding performance	Expansion coefficient
	Description		Significantly different from high temperature austenite	HS≥(45+15)HSD	w(C)%≤0.6	Close to 10~12
Material characteristics	Cast alloy steel	Class I	Bainite + carbide	45~60	1.4~2.0	10~12
		Class II	Composite matrix + certain carbides	55~70	0.4~0.8	10~12
		Class I II	Complex matrix + more carbides	78~85	0.8~1.4	10~11
	Cast alloy iron	Class I	Bainite + eutectic carbide	65~78	3.0~3.3	9~10
		Class II	Martensite + complex carbide	75~88	3.0~3.3	9~10
	Hard alloy	WC	WC particles + adhesive	≥90		2.5~3.5
		Metal ceramic	WC particles + iron-based adhesive	≥85		4~5.5

2.3 工艺方法的比较与选择

目前,比较通用的金属材料表面增强、增材方法主要有:电镀、电刷镀、表面渗碳(渗氮)处理、超

音速喷涂、堆焊、激光合金化、激光熔覆等。按 2.1 节的要求,这些方法的适用性对比见表 4,比较表 4 中方法对要求的适应性,选择激光熔覆作为 BD1 辊孔型表面改性的工艺方法。

表 4 金属材料表面增强、增材方法的适用性对比
Tab.4 Comparison of applicability of surface strengthening and additive methods for metallic materials

Requirement	Item	Metallurgical combination	Additive methods	Operability	Process cost	Environmental protection
	Description	Combination of the additive and the base material	The thickness of additive is between 0.2~2.5 mm	The equipment and operation facilitate the realization of industrial modification	the level of the cost	Major types and degrees of pollution
Process characteristics	Electroplate	Short-range intermolecular forces	≤0.1 mm	Poor manoeuvrability	Slightly higher	Severe water pollution
	Brushing electroplating	Short-range intermolecular forces	≤0.2 mm	Simple operation	Slightly lower	Slight dust pollution in small areas
	Surface carburizing	Carbon immersion: 0.1~3 mm	No addition	Simple operation	Low	Slight smoke pollution
	Supersonic spray	Long-range intermolecular forces+slight melt	≤0.5 mm	Complicated operation	Slightly higher	Severe dust pollution, operating in isolation room
	Overlaying	Molten combination	2~20 mm	Complicated operation relatively	High	Smoke pollution, slight dust pollution
	Laser alloying	Molten combination	0.05~0.3 mm	Simple operation	Slightly higher	Slight dust pollution
	Laser cladding	Molten combination	0.2~3 mm	Complicated operation relatively	Relatively higher	Slight dust pollution

3 熔覆层材料的设计、研究

3.1 物料特性

依据 2.3 节结论,结合 DB1 辊复杂的孔型形状,选择“激光熔覆工艺+同步送粉”工艺。因此,熔覆

层物料的特征为:

- 1) 形状。圆形细小颗粒,简称“粉料”,圆形表面积小、熔融能耗低,且流动性好,便于输送。
- 2) 粒度。粒度过大,易发生“熔不透”,粒度过小,则易发生输送阻塞,因此粒度选择 100~200 目。
- 3) 物料组分。按化学成分设计要求的各元素进

行配比、混合、干燥。

3.2 化学成分

Ⅱ类合金铸钢的主要元素包括：碳，碳化物形成元素和其他辅助元素。碳化物形成元素主要有：铬（Cr）、钼（Mo）、钨（W）、钒（V）等，辅助元素主要包括硅（Si）、镍（Ni）、硼（B）等。各元素在激光熔覆材料中的主要作用如下所述。

碳：碳化物形成元素，碳元素与铁元素形成正八面体晶体，相邻两个晶体共用 2 个共价键，碳的配位数是 6，铁的配位数是 2，属于亚稳态结构，稳定程度仅与温度有关。当合金元素量足够高时，碳也和其他合金元素结合为金属间化合物，根据配对元素的不同，配位数也不同，热稳定性也有很大的差异。液体金属凝固过程中如果过冷度足够，碳化物是领先项，当含碳量较低时，碳化物周围会结晶出贫碳组织，如铁素体、低温奥氏体等。

铬：强烈促进碳化物形成元素；含量足够时，可形成各类碳化铬（（FeCr）₇C₃、Cr₂₃C₆等）；各元素可以提高材料的淬硬深度，使得材料的硬度自表及里趋向均匀硬度层；同时，铬元素还有固溶强化基体的作用。

钼：强烈促进碳化物形成元素，主要形成 Mo₂C 类碳化物，钼含量足够时，材料还会有共析碳化钼产生；其与镍元素配合，可提高材料抵抗冷热疲劳能力。

钨：强烈促进碳化物形成元素，可形成 WC、W₂C 等特殊碳化物，保持材料的高温硬度。

镍：固溶强化元素；与钼配合，可提高材料抵抗冷热疲劳能力；提高材料的焊接性。

定量的 Si、B，用于净化熔化合金。

根据以上各元素的作用，采用正交试验的方法进行筛选，正交试验组分及结果如表 5—6 所示。基于

表 5 粉料化学成分正交试验的组分
Tab.5 Chemical composition orthogonal test of chemical composition

Serial number	wt%					
	C	Cr	Ni	Mo	W	Si、B
Cr25	0.4	25	12	2	8	3
Cr20	0.4	20	12	2	8	3
Ni20	0.4	25	20	3	8	3
Ni20W15	0.4	25	20	3	15	3
Cr20W15	0.4	20	12	2	15	3

表 6 粉料化学成分正交试验的结果分析
Tab.6 Results analyses of chemical composition orthogonal test

Serial number	HSD	Grain orientation	Crack sensitivity	Metallurgical combination
Cr25	65~75	>80% Orientation	Medium	Good
Cr20	60~70	>80% Orientation	Weak	Good
Ni20	60~70	>90% Orientation	Weak	Good
Ni20W15	65~80	>90% Orientation	Strong	Good
Cr20W15	65~75	>80% Orientation	Strong	Good

正交试验结果，结合试用中出现的问题进行改进，最终确定了粉料的组分如表 7 所示。

表 7 熔覆粉料的化学成分
Tab.7 Chemical composition of cladding powder

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	B
0.25~0.3	1.8~2.0	0.4~0.6	24~25	19.5~20.5	3.2~3.5	7.8~8.2	0.3~0.4

3.3 熔覆层的宏观硬度

采用 SHT300 型硬度计 HSD 标尺测试，每点测 5 次并取平均值，经多支轧辊多点测试，其结果见表 8。从表 8 中可知，硬度在 63~72HSD 之间，熔覆层的宏观硬度随着熔覆层厚度的变化呈现出不同的特点。当熔覆层厚度≤0.2 mm 时，宏观硬度呈离散状，硬度测试数值极为分散且没有规律；当熔覆层厚度≥0.3 mm、稀释率极低时，硬度测试趋于正常。

表 8 熔覆层硬度分布检测结果
Tab.8 Test results of cladding layer hardness distribution

HSD range	60~65	65~70	70~75	75~80
Measuring points	22	84	18	7

3.4 熔覆层及结合层的金相组织

采用大工件显微镜，对熔覆层内部、结合层进行金相检测。

图 2a 为熔覆层表层金相组织。金相组织特点是：碳化物面积含量大于 70%，呈均匀、细小的棒状，这些细小棒状碳化物排列有规律性，相互呈 90°交叉，构成编织物状，瞬时凝固特征明显。碳化物为领先项，是典型的共晶碳化物特征。

图 2b、c 为熔覆层两条熔覆带搭接部位的金相组织。金相组织组成同图 2a；搭接部位没有发现气孔、夹渣、裂纹、碳化物聚集等缺陷；后搭接熔覆条对前一道熔覆层的晶粒取向有一定的扰动，见图片左下方。图 2b 为 100 倍下熔覆层、结合“层”与母材的微观形貌。可以看到，熔覆层与母材间没有明显的“结合层”过渡，而是直接形成冶金结合。图 2c 为 500 倍下结合部位的的微观形貌，可见熔覆层和母材形成“犬牙交错”的形态，且两种组织相互“镶嵌”、结合良好，没有发现气孔、夹渣、裂纹、碳化物聚集等缺陷。

金相组织分析显示，熔覆层由大量的碳化物组成，而碳化物在 580 ℃左右时组织稳定。因此，辊面在轧制过程中主体组织不变，仍为大量碳化物。这些碳化物凸点在与轧材凸点接触时，不会发生“焊合”现象，也不会发生粘钢现象。由于轧制时产生的磨粒和犁头的显微硬度都远低于熔覆层内碳化物的硬度，又由于这些碳化物在高温时仍然能够保持高的显微

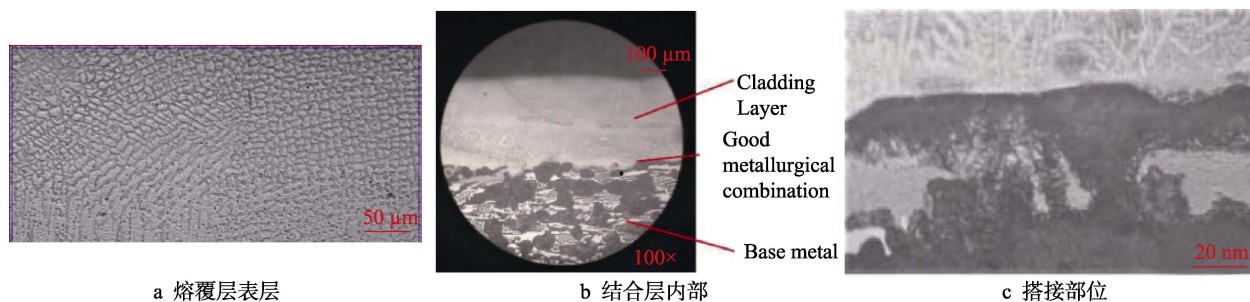


图 2 熔覆层的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of cladding layer: (a) surface of cladding layer, (b) bonding layer interior, (c) lap joint

硬度,轧制材料很难将其磨损,使其耐磨性显著提高。瞬时凝固造成定向凝固的独特方式,加上较高的镍、钼合金的固溶强化作用,使得材料的抗冷热疲劳能力显著提高,裂纹产生和拓展的速率都大幅降低。因此,由于疲劳裂纹引起的磨损、脱落时间被大幅延长。熔覆层良好的冶金结合,极大地降低了微观裂纹的产生、扩展几率,使得熔覆层在历经轧制过程中各种机械力、交变热应力等作用时,得以长久地保持。如果轧制过程中辊面温度、冷却水量和温度均达到合适的条件时,熔覆层表面会产生一层坚硬、有极高耐磨性的铬氧化膜,既保护了熔覆层表面不被磨损,又可进一步提高耐磨性。

4 激光熔覆工艺参数的研究和确定

激光熔覆工艺参数主要包括激光功率、光斑形

状和尺寸、焦距、线速度、搭接量和送粉量等,工艺参数选取的正确与否直接关系到激光熔覆改性的效果。

4.1 激光功率

激光功率由式(1)计算,取光斑直径 D 为 5 mm,线速度 V 为 20 mm/s,熔池深度为 0.5 mm,材料平均密度 ρ 为 7 g/cm³,单位时间内熔覆材料和基体材料吸收的能量 Q_1 经计算为 700 J/g,则得出 βP 为 2000 W。由于输出功率 P 部分被粉料和基体吸收,部分被飞溅物吸收及被反射,必定会有一定的能量损失,本研究中输出功率的有效利用系数 β 选择为 0.65,则计算出的激光功率 P 为 3077 W。按扫描速度为 20 mm/s,送分率为 40 g/min,搭接系数为 10%,激光功率分别为 2500、3000、3600 W,进行单道熔覆实验,实验后熔覆层表面见表 9。激光功率为 2500 W 时,熔覆

表 9 激光功率对熔覆层表面的影响
Tab.9 Effect of laser power on cladding surface

Power/W	Macrophotograph	Metallograph	Brief description
2500			Macroscopic scale: Flat surface and deep lap joint, uneven distribution of light spot power Microscopic scale: The grain structure changes obviously
3000			Macroscopic scale: Smooth、balance Microscopic scale: Normal structure
3600			Macroscopic scale: Melting phenomenon Microscopic scale: Contains tempered structure

表面有少量气孔及裂纹；当激光功率为 3000 W 时，表面无气孔裂纹，且表面光滑；当激光功率为 3600 W 时，表面有裂纹，且表面粗糙。综上可知，激光功率为 3000 W 时，熔覆层表面质量较好。

$$\beta \cdot P = \frac{Q_1}{VD\rho}$$

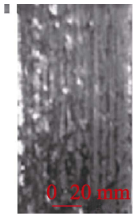
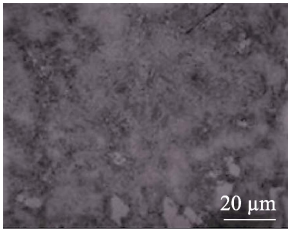

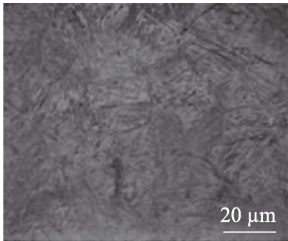
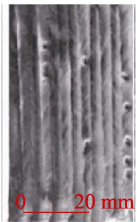
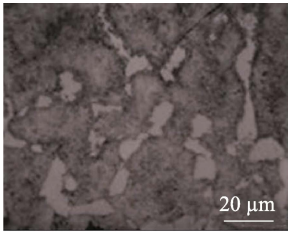
(1)

4.2 搭接率

搭接率直接影响熔覆层材料的熔化程度、母材与熔覆层的结合以及熔覆表面的平整度。如果被照射部位在 x - z 面上的投影是直线，则熔覆层顶面为弧形，弧形的矢高与熔覆层厚度成正比、与能量密度成反比。入射角为 0° 时，弧形沿照射方向中轴线对称；入射角不是 0° 时，弧顶会向入射角一侧倾斜。如果被照射部位在 x - z 面上的投影是曲线，光斑弧顶会随着曲

线变形，且与曲线的曲率半径成正比，照射面积、能量分布均会发生显著改变。光斑内同心放射状能量分布偏向长轴入射方、光斑移动轨迹在 x - z 平面内沿着 z 轴方向移动时，搭接率就要大于直角照射时的搭接率。搭接率至少在 20% 以上，才有可能使高能量区连续起来。按激光功率为 3000 W，扫描速度为 20 mm/s，送粉率为 40 g/min，搭接率分别为 10%、30%、50%，进行单道熔覆实验，熔覆层表面见表 10。实验表明，当搭接率为 10% 时，相邻单道有凹陷；当搭接率为 30% 时，相邻单道较平滑，单道间间隙较小；搭接率为 50% 时，相邻单道有隆起。因此，为避免因能量不足造成结合不良，甚至粉料熔化不充分，也为了达到熔覆后表面不平整度 <0.2 mm 的用户要求，结合理论分析和试验，搭接率设定在 30% 较为稳妥。

表 10 搭接率对熔覆层表面的影响
Tab.10 Influence of overlap rate on cladding surface

Overlap rate	Macrophotograph	Metallograph	Brief description
10%			Macroscopic scale: The surface is not smooth, there are pits, pores, protrusions and other defects at the lap joint Microscopic scale: Not uniform, the presence of micromelt particles
30%			Macroscopic scale: Smooth、balance Microscopic scale: Uniform structure
50%			Macroscopic scale: The gas hole caused by the superfusion of the parent material Microscopic scale: Large structure

4.3 送粉率

熔覆层的目标厚度是 0.3~0.5 mm，因送粉过程中影响有效利用率的因素随机性较大，故采用以实验为主的方式寻求最佳工艺参数。按激光功率为 3000 W，扫描速度为 20 mm/s，搭接率为 30%，送粉率分别为 20、40、60 g/min，进行单道熔覆实验，实验结果见表 11。送粉率为 20 g/min 时，熔覆层表面略粗糙；送粉率为 40 g/min 时，熔覆层无杂纹裂纹，且表面光滑；送粉率为 60 g/min 时，熔覆层有个别气孔和裂纹。

根据实际使用反馈结果，激光熔覆层厚度达到 0.3~0.4 mm 时，既可以满足耐磨性的要求，又能够最大限度地减少激光熔覆缺陷。因此，确定送粉率为 30~40 g/min、气压为 1.5~1.8 MPa 时为最佳值，此时粉料收得率大于 60%。

4.4 扫描速度

按激光功率为 3000 W，送分率为 40 g/min，搭接率为 30%，扫描速度分别为 10、20、30 mm/s，进行单道熔覆实验，结果见表 12。扫描速度为 10 mm/s

时, 熔覆层表面略粗糙, 且有氧化现象; 扫描速度为 20 mm/s 时, 熔覆层表面光滑, 且无杂纹裂纹; 扫描速度为 30 mm/s 时, 熔覆层表面有气孔和裂纹。实验结果表明, 扫描速度为 20 mm/s 时, 表面质量较好。

表 11 送粉率对熔覆层表面的影响
Tab.11 Influence of powder feeding rate on cladding surface

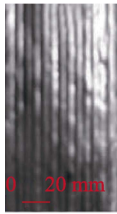
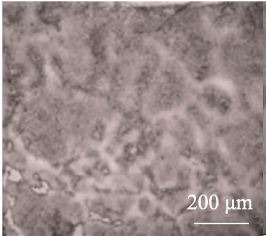
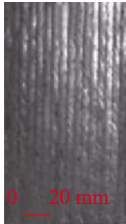
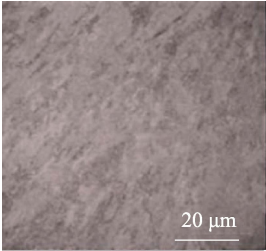

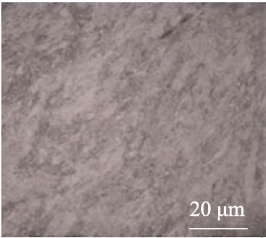

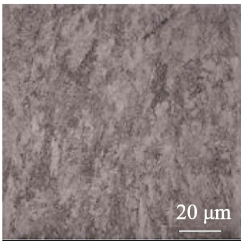

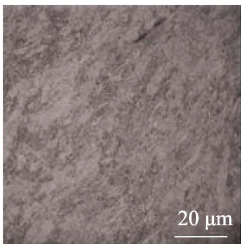
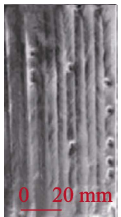
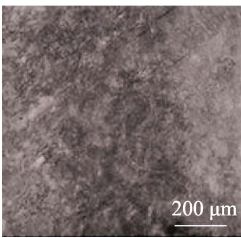
Powder feeding rate/(g·min ⁻¹)	Macrophotograph	Metallograph	Brief description
20			Macroscopic scale: Poor lap flatness Microscopic scale: High dilution degree, locally visible base structure of base material
40			Macroscopic scale: Lap flatness Microscopic scale: Uniform structure
60			Macroscopic scale: Poor lap flatness, Local bulge Microscopic scale: Uniform structure

表 12 扫描速度对熔覆层表面的影响
Tab.12 Influence of scanning speed on cladding surface

Scanning speed/(mm·s ⁻¹)	Macrophotograph	Metallograph	Brief description
10			Macroscopic scale: The surface is not smooth, there are raised, pores defects Microscopic scale: Large structure relatively
20			Macroscopic scale: smooth、 Microscopic scale: uniform structure
30			Macroscopic scale: The surface has the stomata and the insufficient melts phenomenon Microscopic scale: Visible loose structure and inadequate feeding

综上可知, 最佳激光熔覆工艺参数见表 13, 熔覆层与母材的物理指标见表 14。通过激光熔覆工艺改性后, 轨梁 BD1 轧辊孔型内任何部位均没有粘钢的痕迹; 激光熔覆层仍然保持着初始状态, 没有明显的磨损失重; 孔型立面的激光熔覆层表面形成了一层黑亮色的氧化膜, 且氧化膜没有被磨损破坏的迹象。激光熔覆层没有发现任何剥蚀、脱落的现象。

由于激光熔覆层仍然保留着良好的表面形态和孔型形状, 经过激光熔覆后, 过钢量由原来的不足 1000 t 可以提高到 6000 t 以上。轨梁 BD1 轧辊的耐磨性可提高 4 倍左右; 磨损的立面熔覆修补后, 轧辊服役周期可达 10 次; 扣除激光熔覆成本, 仍可将辊耗降低到原来五分之一以下, 大幅度降低 DB1 轧辊的消耗。

表 13 最佳激光熔覆工艺参数
Tab.13 Optimum laser cladding parameters

Laser power/ W	Spot diameter/ mm	Scanning speed/ (mm·s ⁻¹)	Step size/ (mm·circle ⁻¹)	Powder feeding rate/ (g·min ⁻¹)
3000~4000	5	12~20	2.5~3.2	30~40

表 14 熔覆层与母材的物理指标
Tab.14 Physical index of cladding surface and base metal

Content	Hardness(HSD)	Density/ (kg·m ⁻³)	Specific heat/ (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thermal expansion coefficient/ (×10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	Elastic modulus/ (×10 ⁴ MPa)	Friction coefficient
Base metal	40~45	7700	0.54~0.67	30~35	11~12	21~23	0.82~1.05
Cladding layer	63~72	8000			10~11	20~24	

5 结论

1) 用激光熔覆技术对轨梁 BD1 轧辊表面进行处理, 熔覆层表面形成了一层与轧材显著不同的金相组织, 消除了粘钢现象。
2) 激光熔覆改性的最佳参数为: 激光功率 3000~4000 W, 扫描速度 20 mm/s, 送粉率 30~40 g/min, 搭接率 30%。
3) 经过激光熔覆改性后, 轨梁 BD1 轧辊表面熔覆层具有足够的抗压、抗冲击、抗机械疲劳和冷热疲劳能力, 使用寿命成倍提高, 轧辊下机车削减径量大 幅减少, 辊耗降低到改性前五分之一以下, 提高了轧制生产效率, 降低了轧辊辊耗。

参考文献:

[1] KIM Jaehyun, PARK Kee-cheol, KIM Do-nyun. Investigating the fluting defect in v-bending due to the yield-point phenomenon and its reduction via roller-leveling process[J]. Journal of materials processing technology, 2019, 270: 59-81.
[2] GAO Qiang, LIU Wen-jie, LI Dong, et al. Research and implementation of the roll position automatic adjustment system based on roller parameters prediction[J]. Journal of advanced manufacturing systems, 2019, 18(2): 273-292.
[3] JING Liu, TANG Chang-ke, SHAO Yi-min. An innovative dynamic model for vibration analysis of a flexible roller bearing[J]. Mechanism and machine theory, 2019, 135: 27-39.
[4] YU Yang, CHENG Jun-sheng. A roller bearing fault diag-

nosis method based on EMD energy entropy and ANN[J]. Journal of sound and vibration, 2006, 294(2): 269-277.
[5] 周旬, 王晓东, 苏长水, 等. 高铬铸钢轧辊的组织及其氧化行为[J]. 中国冶金, 2019, 29(5): 38-43.
ZHOU Xun, WANG Xiao-dong, SU Chang-shui, et al. Microstructure and oxidation behavior of high Cr cast steel roll[J]. China metallurgy, 2019, 29(5): 38-43.
[6] 王建升, 唐明奇, 吕瑞丽, 等. 铸钢轧辊亚微米 WC-4Co 电火花沉积涂层高温性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 49-53.
WANG Jian-sheng, TANG Min-qi, LYU Rui-li, et al. High temperature performance of sub-micron WC-4Co EDM coating for cast steel rolls[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 49-53.
[7] 曹燕, 张军田, 王巍, 等. 高铬铸钢轧辊热疲劳过程的组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10): 1414-1417.
CAO Yan, ZHANG Jun-tian, WANG Wei, et al. Microstructure and thermal fatigue properties of high chromium cast steel roll [J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2011, 32(10): 1414-1417.
[8] 王建升, 孟惠民, 张瑞珠, 等. 铸钢轧辊电火花沉积 WC-4Co 涂层组织和性能分析[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 43-46.
WANG Jian-sheng, MENG Hui-min, ZHANG Rui-zhu, et al. Microstructure and properties analysis of WC-4Co coating on cast steel roll EDM [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(10): 43-46.

- science and technology A, 1986, 4(6): 2740-2746.
- [17] RUKANSKIS M. Control of metal surface mechanical and tribological characteristics using cost effective electro-spark deposition[J]. Surface engineering and applied electrochemistry, 2019, 55(5): 607-619.
- [18] 张瑞珠, 郭鹏, 王建升, 等. 铸钢 0Cr13Ni5Mo 表面电火花沉积 YG8 涂层的组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3366-3371.
ZHANG Rui-zhu, GUO Peng, WANG Jian-sheng, et al. Microstructures and properties of YG8 coating on 0Cr13-Ni5Mo cast steel fabricated by electro-spark deposition[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2012, 22(12): 3366-3371.
- [19] PETERKIN S. Electro-spark deposition machine design, physical controls and parameter effects[D]. Ontario: University of Waterloo, 2017.
- [20] 郭锋, 苏勋家, 李平, 等. 铝合金表面电火花沉积层组织与性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 101-104.
GUO Feng, SU Xun-jia, LI Ping, et al. Microstructure and properties of ESD coating on aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 101-104.
- [21] WANG Wei-fu, WANG Mao-cai, SUN Feng-jun, et al. Microstructure and cavitation erosion characteristics of Al-Si alloy coating prepared by electrospark deposition[J]. Surface and coatings technology, 2008, 202: 5116-5121.
- [22] KUDRYASHOV A E, LEBEDEV D N, POTANIN A Y, et al. Structure and properties of coatings produced by pulsed electrospark deposition on nickel alloy using Mo-Si-B electrodes[J]. Surface and coatings technology, 2018, 335: 104-117.
- [23] 张国鹏. 热处理工艺对新型 6XXX 系铝合金组织与性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHANG Guo-peng. The effect of heat treatment on the microstructure and tensile properties of 6XXX alloys[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [24] 王维夫, 陈军, 徐贤统, 等. 铝合金电火花沉积层的组织和抗空蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(6): 120-124.
WANG Wei-fu, CHEN Jun, XU Xian-tong, et al. Microstructure and cavitation erosion resistance of aluminum alloy coatings fabricated by electrospark deposition[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2013, 34(6): 120-124.
- [25] MARYA M P. Aged-hardenable aluminum alloy with environmental degradability: United States, US8211248B2[P]. 2012-07-03.

(上接第 213 页)

- [9] 曹燕, 张军田, 殷福星, 等. 高铬铸钢轧辊外层凝固组织研究[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(11): 31-34.
CAO Yan, ZHANG Jun-tian, YIN Fu-xing, et al. Solidifying microstructure at outer layer of high chromium steel roll [J]. Journal of iron and steel research, 2009, 21(11): 31-34.
- [10] 郭桂芳, 陈芙蓉, 李林贺. 激光熔覆技术在钛合金表面改性中的应用[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 66-69.
GUO Gui-fang, CHEN Fu-rong, LI Lin-he. Application of laser cladding in surface modification of titanium alloy [J]. Surface technology, 2006, 35(1): 66-69.
- [11] 蔡利芳, 席明哲, 张永忠, 等. 铝合金激光表面改性技术研究进展[J]. 材料保护, 2006(10): 49-53.
CAI Li-fang, XI Ming-zhe, ZHANG Yong-zhong, et al. Research progress in laser surface modification of aluminum alloys[J]. Materials protection, 2006(10): 49-53.
- [12] 王东生, 田宗军, 沈理达, 等. 钛合金激光表面改性技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2008(6): 24-32.
WANG Dong-sheng, TIAN Zong-jun, SHEN Li-da, et al. Research states of laser surface modification technology on titanium alloys [J]. Laser & optoelectronics progress, 2008(6): 24-32.
- [13] 刘宇刚, 游明琳, 李安书. 激光熔覆技术在数控刀具表面改性中的应用[J]. 工程与试验, 2010, 50(1): 58-60.
LIU Yu-gang, YOU Ming-lin, LI An-shu. Application on laser cladding technology for surface modification research of CNC tool [J]. Engineering & test, 2010, 50(1): 58-60.
- [14] 韩彬, 齐从华, 王勇, 等. 激光熔覆-离子渗硫复合改性层的减摩耐磨性能[J]. 中国表面工程, 2014, 27(4): 70-75.
HAN Bin, QI Cong-hua, WANG Yong, et al. Properties of antifriction and wear resistance of laser cladding-ion sulfide layer [J]. China surface engineering, 2014, 27(4): 70-75.
- [15] 韩彬, 张蒙科, 崔岗, 等. 镍基合金激光熔覆-离子渗硫复合改性层组织性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(10): 1-4.
HAN Bin, ZHANG Men-ke, HE Gang, et al. Microstructure and properties of Ni based alloy composite coating by laser [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(10): 1-4.
- [16] 李鹏飞, 王宏宇, 汪涵, 等. 激光熔注氧化铈改性铝硅涂层的工艺优化及微观组织[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(7): 145-150.
LI Peng-fei, WANG Hong-yu, WANG Han, et al. Process optimization and microstructure of cerium oxide modified Al-Si coatings by laser melt injection[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2017, 38(7): 145-150.
- [17] 徐泽洲, 王志英, 何志军, 等. 激光功率对激光熔覆 CeO₂ 改性 316L 涂层组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2019(6): 1-6.
XU Ze-zhou, WANG Zhi-ying, HE Zhi-jun, et al. Effect of laser power on microstructure and properties of laser cladding CeO₂ modified 316L coating [J]. Chinese journal of rare metals, 2019(6): 1-6.
- [18] 张昌春, 石岩. 激光熔覆高厚度涂层技术研究现状及发展趋势[J]. 激光技术, 2011, 35(4): 448-452.
ZHANG Chang-chun, SHI Yan. Current status and development of high thickness coating by laser cladding technology [J]. Laser technology, 2011, 35(4): 448-452.
- [19] KUSINSKI J, KAC S, KOPIA A, et al. Laser modification of the materials surface layer—A review paper[J]. Bulletin of the polish academy of sciences: Technical sciences, 2012, 60(4): 711-728.