

DOI: 10.11973/jxgccl250182

矿用磨损链轮的堆焊再制造修复及修复后性能

王亮

(兰州石化职业技术大学能源与动力工程学院, 兰州 730060)

摘要: 采用富氩气体保护焊对矿用40CrNiMoA中碳调质钢链轮磨损表面进行双层堆焊修复, 先采用JM100结构钢焊丝堆焊10 mm厚过渡层并进行400 °C保温2~3 h回火处理再使用YD256耐磨药芯焊丝堆焊10~15 mm厚耐磨层, 对堆焊修复试样进行350 °C×3 h回火处理, 对比未磨损新链轮, 研究了堆焊修复链轮的显微组织、硬度、拉伸性能、冲击性能和耐磨性能。研究表明: 堆焊修复层与母材之间冶金结合性能良好, 无气孔、裂纹等缺陷; 过渡层由大量针状铁素体和少量片状珠光体组成, 晶粒细小且分布均匀; 耐磨层由铁素体、珠光体、回火马氏体和颗粒状碳化物组成。堆焊修复试样的硬度、抗拉强度和冲击功分别为57.2 HRC, 842 MPa, 110 J, 相比未磨损新链轮分别增大了9.6%, 11.8%, 26.4%。堆焊修复试样的摩擦磨损质量损失和磨粒磨损质量损失均较小, 分别约为未磨损新链轮的32%, 24%。堆焊修复链轮的力学性能和耐磨性更优。

关键词: 矿用链轮; 再制造; 堆焊修复; 磨损链轮

中图分类号: TG455

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2025)11-0061-06

0 引言

刮板输送机具有运输能力强、结构强度高、工作布局灵活及适应性强等特点, 适用于高温低速工况下的重载荷、大功率、长距离运输^[1], 是煤矿生产的主要运输设备。链轮是刮板输送机的重要传力部件, 其在电动机驱动下转动并与链环依次啮合从而带动刮板在溜槽中连续运行。链轮转动时要承受脉动和交变冲击载荷^[2], 加之矿井下工作环境恶劣, 难以进行润滑维护, 因此链轮会发生严重的黏着磨损和磨粒磨损, 严重时甚至导致整体设备的失效和报废^[3]。研究^[1-2,4-5]表明, 链轮磨损失效主要是链环与链窝的啮合部位磨损变形从而无法正常啮合, 而其余部位仍可正常使用。对链轮磨损部位进行再制造修复, 可以保障设备稳定运行、延长使用寿命、实现废旧再利用, 还能降低生产成本、节能降耗, 符合国家倡导的“绿色再制造体系建设”要求^[4]。

目前, 传统的针对磨损链轮的再制造修复工艺是采用耐磨焊丝对磨损部位堆焊修复, 这种耐磨堆焊层与母材的结合强度较差, 受到冲击载荷时易从母材表面剥离^[2]。链轮材料常采用中碳调质钢, 碳当

量较高(约为0.85), 焊接性较差^[6], 堆焊过程中易产生淬硬组织, 导致冷裂纹倾向严重以及热影响区脆化和软化^[7-8]。因此, 亟需开发新的磨损链轮再制造修复工艺。采用双层堆焊再制造修复工艺可以得到综合性能优异的堆焊层, 实现对矿用磨损链轮的绿色再制造生产^[9]。其操作步骤如下: 首先采用冲击韧性和连接强度较高的中高强度结构钢焊丝在磨损链轮表面堆焊过渡层; 再采用高硬度和高强度的耐磨焊丝在过渡层上堆焊耐磨层。过渡层与链轮和耐磨层间结合均良好, 可以起到连接作用, 有利于提高链轮的整体性能。作者采用富氩气体保护焊对矿用40CrNiMoA中碳调质钢链轮磨损失效表面进行了双层堆焊再制造修复, 过渡层焊接材料为JM100中高强度结构钢焊丝, 耐磨层焊接材料为YD256耐磨药芯焊丝, 研究了堆焊修复链轮的显微组织和耐磨性能, 以期为矿用磨损失效零部件的再制造堆焊修复工艺的应用与研发提供技术参考。

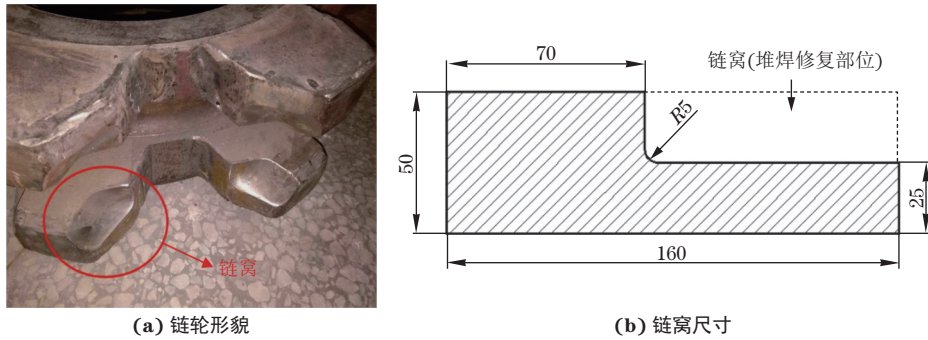
1 试样制备与试验方法

磨损链轮形貌以及需再制造修复的链窝尺寸如图1所示, 在链窝处进行堆焊修复, 使表面平整。链轮材料(母材)为40CrNiMoA中碳调质钢, 显微组织(见图2)由回火索氏体和少量铁素体组成, 抗拉强度为850 MPa, 硬度为45 HRC, 冲击功为63 J。焊接材

收稿日期: 2025-04-25; 修订日期: 2025-10-30

基金项目: 甘肃省教育厅教育科技创新科研项目(2022B-319)

作者简介: 王亮(1982—), 男, 甘肃靖远人, 副教授, 硕士



(a) 链轮形貌

(b) 链窝尺寸

图1 磨损链轮宏观形貌以及链窝尺寸

Fig. 1 Macromorphology of worn sprocket (a) and size of chain nest (b)

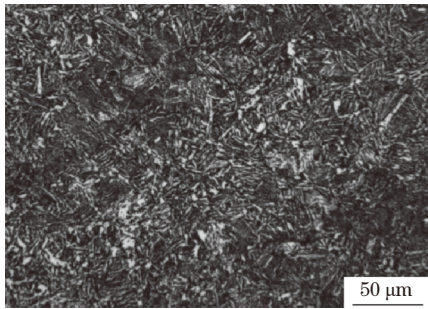


图2 40CrNiMoA中碳调质钢的显微组织

Fig. 2 Microstructure of 40CrNiMoA medium-carbon quenched and tempered steel

料分别为直径 1.2 mm 的 JM100 中高强度结构钢焊丝和直径 1.6 mm 的 YD256 耐磨药芯焊丝(硬度大于 50 HRC)。母材及焊丝的化学成分如表 1 所示。

采用 YD-500GR3 型全数字 CO₂/MAG 气体保护焊机在链窝处进行双层堆焊,堆焊层结构如图 3 所示,焊枪工作角度均为 80°,双层堆焊工艺如下:采用 GWS14-150CI 型角磨砂轮机对磨损链轮待焊表面及两侧 20 mm 内区域进行打磨,去除铁锈及氧化皮,直至表面呈现金属光泽^[10],依次使用丙酮、乙醇清洗^[11],置于简易少氧电阻炉中于 300~330 °C 下预热 2 h^[12]后,使用 JM100 中高强度结构钢焊丝堆焊过渡层,厚度为 10 mm,采用 3 层堆焊,打底焊电流和电压分别为 215 A, 23 V,填充焊电流和电压分别为 240 A, 24 V,焊接速度为 6 mm·s⁻¹,保护气体为 80% Ar+20% CO₂(体积分数,下同),气体流量为

20 L·min⁻¹,焊丝干伸长度为 16 mm,使用角磨砂轮机对成形较差的堆焊层进行打磨,符合要求后堆焊下一层^[13],使用 K 型热电偶温度计测试并控制层间温度在(230±10)°C;对过渡层进行回火处理,在 400 °C 下保温 2~3 h,炉冷至 100 °C,空冷至室温;采用 TX-2X 型 X 射线探伤仪器进行射线探伤,确认无明显缺陷^[14]后对过渡层表面进行打磨,去除金属飞溅及氧化皮,直至呈现金属光泽,依次使用丙酮、乙醇清洗,置于简易少氧电阻炉中 330~350 °C 下预热 2.5 h 后,使用 YD256 耐磨药芯焊丝堆焊耐磨层,厚度为 10~15 mm,采用 2 层堆焊,焊接电流和电压分别为 250 A, 26 V,焊接速度为 7 mm·s⁻¹,保护气体为 80% Ar+20% CO₂,气体流量为 20 L·min⁻¹,焊丝干伸长度为 15 mm,每层堆焊结束后使用角磨砂轮机清理飞溅和氧化皮,使用热电偶测试并控制层间温度在(260±10)°C;堆焊结束后,对双层堆焊试样进行 350 °C×3 h 的回火处理,炉冷至 100~150 °C,空冷至室温。

采用线切割在堆焊修复链轮上垂直于焊缝方向截取试样,打磨、抛光后用体积分数 5% 的稀硝酸溶液腐蚀,用乙醇冲洗^[15],采用 QUANTA-FEG450 型扫描电子显微镜(SEM)观察显微组织。采用 HRS-150 型洛氏硬度计测试堆焊修复层表面硬度,载荷为 1 475 N,保载时间为 12 s,测 5 个点取平均值,测试点间距为 3 mm。根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》,在堆焊修复

表 1 母材和焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire

材料	质量分数/%								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	Fe
40CrNiMoA中碳调质钢	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.60~0.90	1.25~1.75	≤0.025	≤0.025	0.15~0.25	余
JM100中高强度结构钢焊丝	≤0.08	0.20~0.55	1.25~1.8	0.04	1.40~2.10	≤0.01	≤0.01	0.25~0.55	余
YD256耐磨药芯焊丝	0.40~0.60	≤1.30	11.00~16.00	≤5.00	≤5.00	≤0.01	≤0.01	≤4.00	余

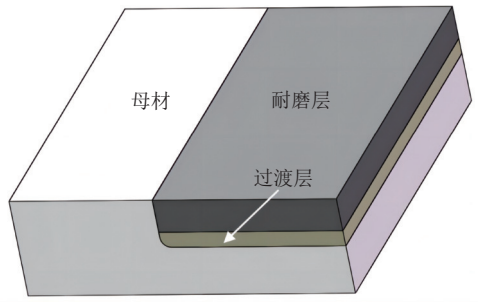


图3 堆焊层结构示意图

Fig. 3 Schematic of surfacing layer structure

层与母材连接处垂直于焊缝方向制取拉伸试样, 尺寸如图4所示, 采用 AGS-S 300KN 型电子万能力学试验机在室温下测试拉伸性能, 拉伸速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。根据 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试样方法》和 GB/T 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》, 在堆焊修复层与母材连接处垂直于焊缝方向制取尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的冲击试样, 在堆焊层与母材熔合界面处设置缺口, 采用 ZBC-300B 型全自动落锤冲击试验机测试室温冲击性能。在堆焊修复层上垂直于焊缝方向制取尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的小圆柱磨销试样, 采用 MPX-3 型销盘式摩擦磨损试验机进行磨损试验, 摩擦磨损用对磨件为直径 45 mm 的 25MnV 中碳合金结构钢(与链轮啮合传动的链环材料)磨盘, 磨粒磨损用对磨件为直径 55 mm 的刚玉砂盘(粒径为 $80 \mu\text{m}$), 载荷均为 30 N , 转速为 $35 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 试验总时间为 90 min , 采用 TSC021-A 型电子天平测试质量, 计算质量损失。设置对照试验, 在未磨损新链轮链窝表面制取尺寸相同的试样, 进行力学和磨损试验, 试验参数与堆焊修复磨损链轮相同, 未磨损新链轮加工工艺为优质钢铸造并调质处理, 其链窝和齿形经淬火处理^[5,15]。

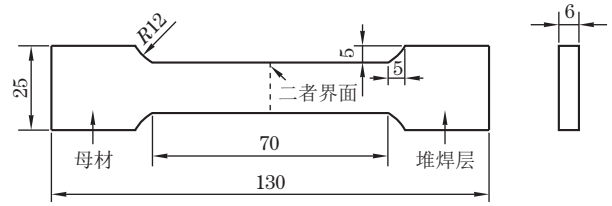


图4 拉伸试样的尺寸

Fig. 4 Size of tensile sample

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

由图5可见: 堆焊修复层与母材熔合区冶金结合性能良好, 无气孔、裂纹等缺陷, 熔合区主要由铁素体、珠光体、弥散分布的颗粒状渗碳体组成; 在焊接热循环的影响下, 热影响区晶粒较母材稍有长大, 无明显的过热组织和重结晶组织, 热影响区主要由回火索氏体和深色的回火屈氏体组成; 修复层中与母材连接的过渡层显微组织由大量针状铁素体和少量片状珠光体组成, 晶粒细小且分布均匀, 此类组织具有较高的强度和良好的低温冲击韧性; 耐磨层显微组织由铁素体、珠光体、回火马氏体和颗粒状碳化物组成, 此类组织具有较高的强度和耐磨性。

堆焊修复层的硬度为 57.2 HRC , 比未磨损新链轮 (52.2 HRC) 增大了 9.6% 。堆焊修复链轮试样的抗拉强度和冲击功分别为 842 MPa , 110 J , 相比未磨损新链轮 (753 MPa , 87 J) 分别增大了 11.8% , 26.4% , 拉伸性能和冲击性能均优于未磨损新链轮。由图6可见: 堆焊修复链轮拉伸试样的断裂位置位于母材, 拉伸断口处出现颈缩, 未磨损新链轮拉伸断口呈脆性断裂状; 堆焊修复链轮试样的冲击断口呈不完全断裂状, 为明显的塑性断裂, 未磨损新链轮冲击断口呈完全断裂状, 为明显的脆性断裂。这说明堆焊修复链轮的塑韧性相对较好。

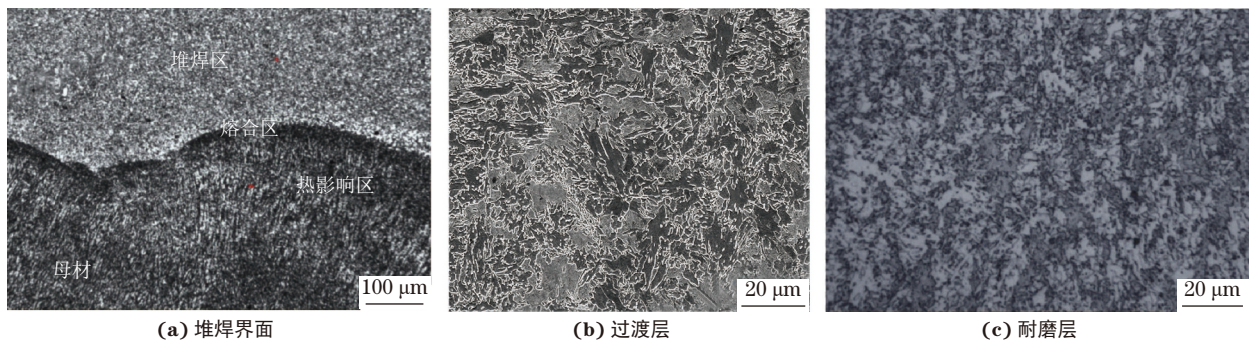
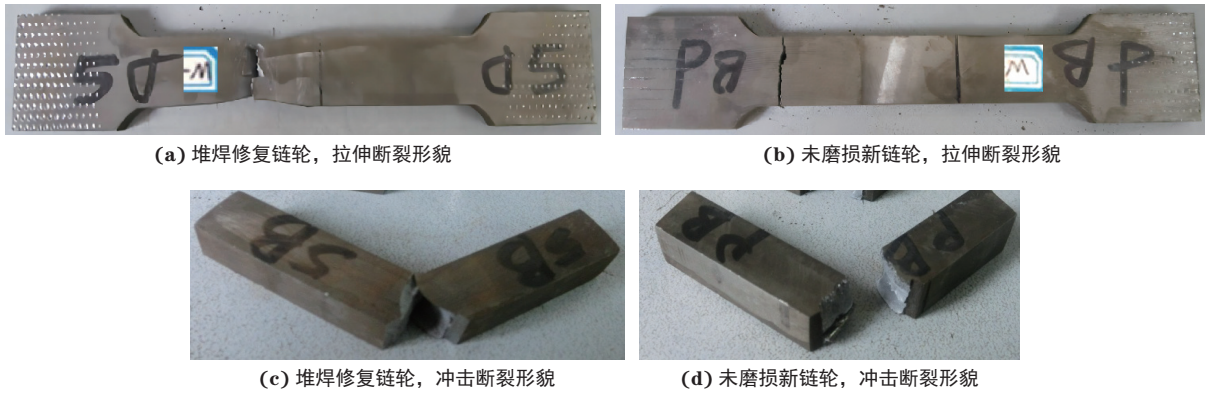


图5 堆焊修复链轮堆焊界面及堆焊修复层的显微组织

Fig. 5 Microstructure at surfacing interface (a) and surfacing repair layer (b-c) of surfacing repair sprocket: (b) transition layer and (c) wear-resistant layer



(a) 堆焊修复链轮, 拉伸断裂形貌

(b) 未磨损新链轮, 拉伸断裂形貌

(c) 堆焊修复链轮, 冲击断裂形貌

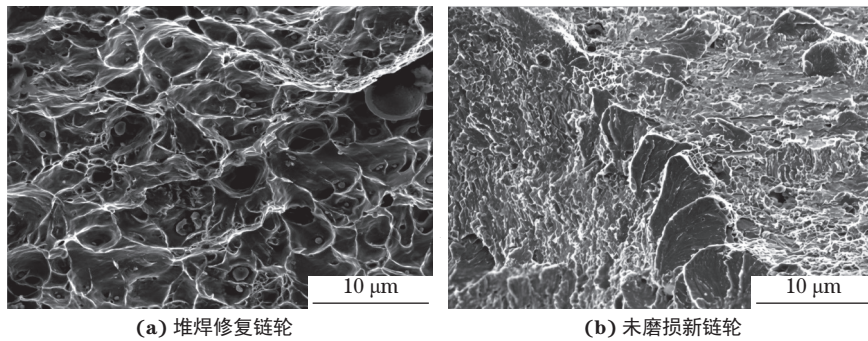
(d) 未磨损新链轮, 冲击断裂形貌

图6 堆焊修复链轮和未磨损新链轮的拉伸和冲击试样断裂宏观形貌

Fig. 6 Tensile (a-b) and impact (c-d) fracture macromorphology of surfacing repair sprocket (a, c) and new non-worn sprocket sample (b, d)

由图7可见: 堆焊修复链轮拉伸断口呈密集分布的韧窝形貌, 为韧性断裂特征, 塑韧性较好, 韧窝由拉伸过程中应力所致的细小裂纹孔洞长大和

聚合成[16]; 未磨损新链轮拉伸断口处存在显著的河流花样, 呈典型的解理断裂特征, 组织的塑韧性较差。



(a) 堆焊修复链轮

(b) 未磨损新链轮

图7 堆焊修复链轮和未磨损新链轮的拉伸断口微观形貌

Fig. 7 Tensile fracture micromorphology of surfacing repair sprocket (a) and new non-worn sprocket (b)

2.2 耐磨性能

试验可得: 相比未磨损新链轮, 双层堆焊磨损链轮的摩擦磨损质量损失(0.002 3 g)和磨粒磨损质量损失(0.079 1g)均较小, 分别约为未磨损新链轮(0.007 1 g, 0.325 4 g)的 32%, 24%, 这说明堆焊修复层的耐磨性较好。

由图8可见: 堆焊修复层的磨粒磨损摩擦因数较小, 波幅随时间延长变化不大; 未磨损新链轮的摩擦因数较大, 波幅随时间延长而增大。这也说明堆焊修复层的耐磨性更好。

堆焊修复链轮修复层与刚玉砂磨盘对磨后, 磨盘上的磨痕较浅且表面呈黑色, 而未磨损新链轮对磨后磨盘上的磨痕较深。这是因为堆焊修复层的硬度更高且耐磨性更好, 表面磨损程度低, 磨粒磨损过程中不会持续出现尖锐及粗糙不平的磨损接触表面。

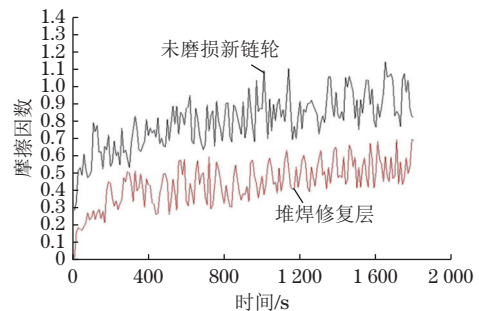


图8 堆焊修复层和未磨损新链轮的摩擦因数曲线

Fig. 8 Friction factor curves of surfacing repair layer and new non-worn sprocket

3 结论

(1)堆焊修复层与母材之间冶金结合性能良好, 无气孔、裂纹等缺陷; 修复层中 JM100 焊丝堆焊形成的过渡层由大量针状铁素体和少量片状珠光体组成, 晶粒细小且分布均匀; YD256 焊丝堆焊形成的耐

磨层由铁素体、珠光体、回火马氏体和颗粒状碳化物组成。

(2)堆焊修复层表面硬度为 57.2 HRC, 比未磨损新链轮(52.2 HRC)提高了 9.6%, 堆焊修复链轮的抗拉强度和冲击功分别为 842 MPa, 110 J, 相比未磨损新链轮(753 MPa, 87 J)分别增大了 11.8%, 26.4%。堆焊修复链轮的力学性能优于未磨损新链轮。

(3)堆焊修复层的摩擦磨损质量损失和磨粒磨损质量损失均相对较小, 分别约为未磨损新链轮的 32%, 24%, 摩擦因数也较小; 堆焊修复链轮的耐磨性较好。

参考文献:

- [1] 何柏岩, 孙阳辉, 聂锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 50-56.
HE B Y, SUN Y H, NIE R, et al. Dynamic behavior analysis on the ring chain transmission system of an armoured face conveyor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(17): 50-56.
- [2] 王淑平, 杨兆建, 王学文. 刮板输送机驱动链轮磨损与啮合力学行为 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 166-171.
WANG S P, YANG Z J, WANG X W. Wear of driving sprocket for scraper convoy and mechanical behaviors at meshing progress[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 166-171.
- [3] 闵希春, 杨广衍, 周丽, 等. 刮板输送机链轮有限元分析及优化 [J]. 机械设计与制造, 2011(3): 21-22.
MIN X C, YANG G Y, ZHOU L, et al. Finite element analysis and optimum design on the sprocket of scraper conveyor[J]. Machinery Design and Manufacture, 2011(3): 21-22.
- [4] 徐滨士, 董世运, 史佩京. 中国特色的再制造零件质量保证技术体系现状及展望 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 84-90.
XU B S, DONG S Y, SHI P J. States and prospects of China characterised quality guarantee technology system for remanufactured parts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 84-90.
- [5] 刘金湘, 唐卫岗, 陈融, 等. 热处理制度对 Ni₃Al 和 Stellite6 堆焊层组织及性能的影响 [J]. 电焊机, 2022, 52(10): 45-50.
LIU J X, TANG W G, CHEN R, et al. Effect of heat treatment regime on microstructure and properties of Ni₃Al and Stellite6 surfacing layers[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 45-50.
- [6] 周春东, 章晓勇, 彭勇, 等. CMT Cycle Step 工艺参数对焊缝表面特征纹路及成形尺寸的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(5): 95-101.
ZHOU C D, ZHANG X Y, PENG Y, et al. Effect of CMT cycle step process parameters on weld surface characteristic texture and forming size[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(5): 95-101.
- [7] 薛强, 王先龙, 陈克华. Q690 钢与 40CrNiMoA 钢的焊接工艺研究 [J]. 煤矿机电, 2018, 39(1): 100-102.
XUE Q, WANG X L, CHEN K H. Study of welding process of steel Q690 and steel 40CrNiMoA[J]. Colliery Mechanical and Electrical Technology, 2018, 39(1): 100-102.
- [8] 王荣武, 宋智丽, 金光日, 等. 矿用链轮堆焊修复工艺 [J]. 焊接, 2012(8): 67-68.
WANG R W, SONG Z L, JIN G R, et al. Surfacing repair technology of mine sprocket[J]. Welding and Joining, 2012(8): 67-68.
- [9] 徐滨士, 朱胜, 史佩京. 绿色再制造技术的创新发展 [J]. 焊接技术, 2016, 45(5): 11-14.
XU B S, ZHU S, SHI P J. Innovative development of green remanufacturing technology[J]. Welding Technology, 2016, 45(5): 11-14.
- [10] 张伟涛, 王焱, 孟繁熙, 等. 自制 CO₂ 气体保护自动焊装置在阀门密封面堆焊应用中的优势 [J]. 焊接技术, 2023, 52(2): 67-70.
ZHANG W T, WANG Y, MENG F X, et al. Advantages of the automatic CO₂ gas shielded welding in the application of valve sealing surface building up welding[J]. Welding Technology, 2023, 52(2): 67-70.
- [11] 曹良裕, 魏战江. 钢的碳当量公式及其在焊接中的应用 [J]. 材料开发与应用, 1999, 14(1): 39-43.
CAO L Y, WEI Z J. Carbon equivalent formula of steel and its application in welding[J]. Development and Application of Materials, 1999, 14(1): 39-43.
- [12] 宗琳, 徐俊尧, 王学钊, 等. 等离子弧堆焊高铬铁基合金的组织形成机制及对显微硬度的影响 [J]. 焊接技术, 2023, 52(1): 17-21.
ZONG L, XU J Y, WANG X Z, et al. Formation mechanism of microstructure of PTA surfacing high chromium Fe-based alloy and its effect on microhardness[J]. Welding Technology, 2023, 52(1): 17-21.
- [13] 段琪影, 岳宏霖, 宋函珂, 等. 刮板输送机中部槽用高铬堆焊耐磨板的组织特征及滑动磨损性能 [J]. 润滑与密封, 2022, 47(11): 114-123.
DUAN Q Y, YUE H L, SONG H K, et al. Microstructure and sliding wear properties of high chromium hardfacing

- plate for middle trough of scraper conveyor[J]. *Lubrication Engineering*, 2022, 47(11): 114-123.
- [14] 俞雄军, 苏斌. 双钨极氩弧焊技术的发展及其在核承压设备耐腐蚀层堆焊中的应用 [J]. *东方电气评论*, 2022, 36(4): 64-68.
- YU X J, SU B. The development of T-TIG and the application on corrosion resistance layer for nuclear pressure equipment[J]. *Dongfang Electric Review*, 2022, 36(4): 64-68.
- [15] 曹学亮, 高强, 程凤方, 等. 矿用圆环驱动链轮修复工艺的研究与应用 [J]. *煤矿机械*, 2012, 33(11): 112-113.
- CAO X L, GAO Q, CHENG F F, et al. Mining-drive sprocket for chains repair technology research and application[J]. *Coal Mine Machinery*, 2012, 33(11): 112-113.
- [16] MILLS A R, THEWLIS G, WHITEMAN J A. Nature of inclusions in steel weld metals and their influence on formation of acicular ferrite[J]. *Materials Science and Technology*, 1987, 3(12): 1051-1061.

Surfacing Remanufacturing Repair and Performance after Repair of Mining Wear Sprocket

WANG Liang

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou Petrochemical University of Vocational Technology, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Double-layer surfacing repair was conducted on worn surfaces of a mining sprocket of 40CrNiMoA medium-carbon quenched and tempered steel by argon-rich gas protection welding. The repairing process was as follows: preparing a 10 mm thick transition layer with JM100 structural steel wires first, and then treating the sample by tempering at 400 °C for 2-3 h; second, preparing a 10-15 mm thick wear-resistant layer with YD256 wear-resistant core electrode, and then treating the surfacing repair, sample by tempering at 350 °C for 3 h. The microstructure, hardness, tensile properties, impact properties and wear resistance of the surfacing repair sprocket were studied comparing with those of the new non-worn sprocket. The results show that the metallurgical bonding between the surfacing repair layer and the base material was good, without defects such as pores and cracks. The transition layer was composed of a large amount of needle-shaped ferrite and a small amount of lamellar pearlite, with fine and uniform grains. The wear-resistant layer was composed of ferrite, pearlite, tempered martensite and granular carbides. The hardness, tensile strength and impact energy of the surfacing repair sample were 57.2 HRC, 842 MPa and 110 J, which were 9.6%, 11.8% and 26.4% higher than those of the new non-worn sprocket, respectively. The friction wear mass loss and abrasive wear mass loss of the surfacing repair sample were lower, approximately 32% and 24% of those of the new non-worn sprocket, respectively. The mechanical properties and the wear resistance of the surfacing repair sprocket was good.

Key words: mining sprocket; remanufacturing; surfacing repair; worn sprocket