轧辊表面高速激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金涂层耐高温性能的研究

穆鸿敏[1]，梁晓捷[1]，王豫跃[2]，李超越[1]，刘鹏辉[2]，何瑞临[2]，卢　韬[2]
（1. 太原重工股份有限公司，山西 太原　030024；
2. 西安交通大学材料科学与工程学院，陕西 西安　710049）

[摘　要]为了研究提高轧辊使用寿命的方法，在轧辊常用材料 5CrMnMo 钢表面采用高速激光熔覆技术，分别熔覆了 Fe 基、Ni 基、Co 基合金涂层。采用扫描电镜、硬度仪测试了涂层的组织与硬度，并对涂层进行高温压缩测试、热冲击测试和高温磨损测试，以研究其耐高温磨损性能。结果表明，涂层随温度的升高其硬度均有一定程度的降低。Fe 基、Ni 基涂层在高温压缩与热震测试中未发现开裂、脱落现象。从磨损失重角度而言，Fe 基重熔涂层与加入硬质相的 Fe 基涂层能够发挥较好的高温耐磨性能，其在 300 ℃下的摩擦磨损形式为磨粒磨损和黏着磨损。3 种涂层均具有较高的耐高温磨损性能。

[关键词]激光熔覆；耐磨性；高温磨损；5CrMnMo 钢
[中图分类号] TG655；TG174.44　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0012
[文章编号] 2097-5317(2026)03-0001-06

Study on High Temperature Resistance of Fe-Based/Ni-Based/Co-Based Alloy Coating by High Speed Laser Cladding on Roll Surface

MU Hongmin[1], LIANG Xiaojie[1], WANG Yuyue[2], LI Chaoyue[1], LIU Penghui[2], HE Ruilin[2], LU Tao[2]
(1. Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to study methods to prolong the service life of rolls, high-speed laser cladding was used on the surface of 5CrMnMo steel, a commonly used material for rolls, and Fe-based, Ni-based, and Co-based alloy coatings were respectively deposited. The microstructure and hardness of the coatings were tested using a scanning electron microscope and a hardness tester. The coatings were subjected to high-temperature compression testing, thermal shock testing, and high-temperature wear testing to investigate their high-temperature wear resistance properties. The results indicated that the hardness of the coatings decreases to a certain extent with the increase of temperature. No cracking or peeling phenomenon was found in the Fe-based and Ni-based coatings during high-temperature compression and thermal shock tests. From the perspective of wear loss, Fe-based remelted coatings and Fe-based coatings with added hard phases could exhibit good high-temperature wear resistance. Their fric-

收稿日期：2025-03-19
Received：2025-03-19
通信作者：王豫跃(1972-)，博士，副教授，研究领域：激光熔覆、3D 打印、热喷涂涂层技术，E-mail：wangyy@mail.xjtu.edu.cn
Corresponding Author: WANG Yuyue (1972-), Ph.D., Associate Professor, Research Focus: Laser Cladding, Additive Manufacturing, and Thermal Spray Coatings, E-mail: wangyy@mail.xjtu.edu.cn

tional wear machanism at 300 ℃ were abrasive wear and adhesive wear. All three coatings have excellent high-temperature wear resistance.

Key words: laser cladding; wear resistance; high temperature wear; 5CrMnMo steel

0 前 言

5CrMnMo 钢具有良好的耐磨性和较高的强度[1],是轧辊的常用材料。轧辊是工业生产中重要的消耗性器件,在服役过程中,需面临周期性的高温、高压工作环境[2]。在此环境下,轧辊的失效原因主要有热疲劳和磨损等[3,4],这极大影响了轧辊的使用寿命,不仅带来了工业生产的安全隐患,还会造成巨大的经济损失[5]。

激光熔覆具有能量密度高、冷却速度快、对基材热影响小等特点,所得到的涂层晶粒细小,与基体呈冶金结合,不易脱落[6],是提高轧辊耐磨性、延长其使用寿命的有效手段。常用的激光熔覆材料有 Fe 基、Ni 基和 Co 基等合金[7]。Fe 基熔覆层具有较小的开裂倾向及较高的耐磨性[8];Ni 基涂层有良好的耐磨性与耐腐蚀性,与基体结合强度高,性价比高[9];Co 基涂层具有较高的高温强度、硬度及抗热疲劳性等特性[10]。

然而,目前关于激光熔覆 Fe 基、Ni 基和 Co 基合金涂层的耐高温性能尚不明确。因此,本工作采用高速激光熔覆的方法在 5CrMnMo 钢基体表面制备了 Fe 基、Ni 基、Co 基合金涂层,对各涂层的高温耐磨性能进行了系统性研究。

1 实 验

1.1 试样制备

实验所使用的基材为轧辊常用材料 5CrMnMo 钢板。熔覆所使用的 Fe 基、Ni 基和 Co 基合金粉末均为自研。Fe 基合金粉末组成为 16%(质量分数,下同) Cr,其他强化相<1%;Ni 基合金粉末组成如表 1 所示;Co 基合金粉末中 Cr 含量约为 30%,其他合金元素有 Mo、Ni、W 等。为方便叙述,将 Fe 基合金粉末命名为 F1,Ni 基粉末命名为 N1,Co 基粉末命名为 C1。

表 1 镍基复合合金粉末成分组成(质量分数) %

Table 1 Composition of Ni-based composite alloy powder (mass fraction) %

成分	强碳化物生成元素	硬质相 1	硬质相 2	镍基合金粉末
质量分数	<10	<30	<10	>50

将由 Fe 基合金粉末制备的涂层命名为 F1 涂层,Ni 基合金粉末制备的涂层命名为 N1 涂层,Co 基合金粉末制备的涂层命名为 C1 涂层。为进一步探索和优化 Fe 基涂层的性能,对 Fe 基涂层进行重熔处理,命名为 F1(r)涂层;在 F1 粉末中加入 WC 等陶瓷类硬质相后制备的涂层称为 F2 涂层。各涂层激光熔覆的工艺参数如表 2 所示,其中 F1(r)涂层的重熔工艺参数为功率 1.8 kW、扫描速度 15 mm/s。

表 2 激光熔覆涂层制备工艺参数

Table 2 Process parameters for laser cladding coating preparation

涂层	功率/kW	扫描速度/(mm·s^{-1})	步距/mm	送粉速度/(g·min^{-1})
F1 涂层	2.1	30	1.8	35
F1(r)涂层	2.1	30	1.8	35
F2 涂层	2.1	30	1.8	35
N1 涂层	1.8	30	1.8	25
C1 涂层	2.7	30	1.8	28

1.2 测试分析

将所制备的 F1、N1、C1 合金涂层采用线切割切割为 10 mm×10 mm 规格的试样,使用 VEGA Ⅱ XMU-INVA 扫描电子显微镜和 CX-SPC 光学显微镜观察 Fe 基、Ni 基、Co 基涂层截面组织。将所制备的涂层采用线切割切成 10 mm×10 mm 规格的试样,将涂层面用砂纸抛磨去除表面氧化物,采用 HV-1000Z 型数字显微维氏硬度计分别对 F1 涂层、F1(r)涂层、F2 涂层、N1 涂层、C1 涂层进行显微硬度测试。

将所制备的 F1、F1(r)、F2、N1、C1 涂层采用线切割制成 ϕ10 mm×10 mm 规格的试样,将涂层面用砂纸抛磨去除表面氧化物,使用美国 DSI 公司生产的 Gleeble 3800 热模拟机对试样进行热冲击测试。将所制备的 5 种合金涂层线切割为 ϕ40 mm×10 mm 规格的试样各 3 个,将涂层面用砂纸抛磨至 1 000 目,再用铁丝固定。实验参照 ISO 14188-2012 “抗热震性的试验方法”,在马弗炉内将炉温升至 300 ℃,放入试样保温 10 min,确保试样温度达到测试温度 300 ℃,随后迅速出炉放入 25 ℃的清水中,冷却至常温后观察试样表面有无开裂和缺陷,若无异常则继续重复上述操作。

将 F1、F1(r)、F2、N1、C1 涂层制备成试样,盘试样尺寸为 ϕ25 mm×8 mm,销试样尺寸为 ϕ6 mm×15

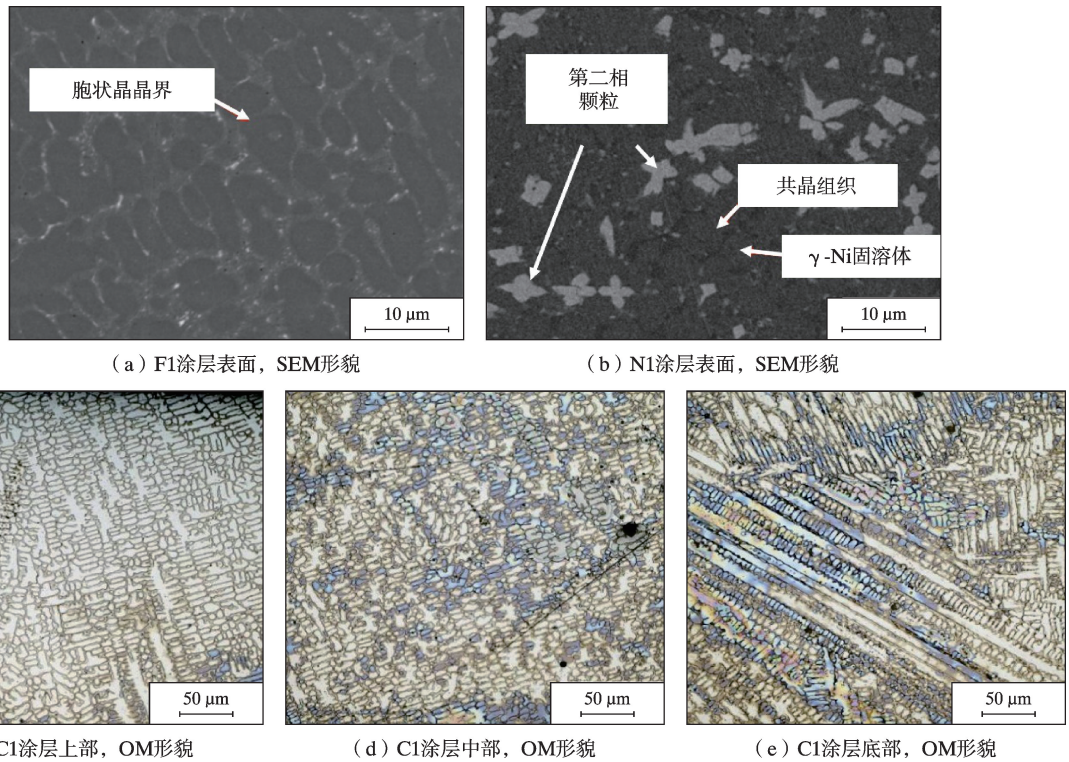
mm。采用 THT01-04015 销盘式摩擦磨损试验机对涂层耐磨性能进行评价,实验测试结果由 4 组实验、每组取 2 个相同试样求平均值获得,实验参考 ASTM G-99-2004"销盘式磨损实验标准"。实验分别在 300 ℃和 500 ℃下进行,获取各试样的磨损失重情况。将经高温摩擦磨损后的试样放入盛有无水乙醇的烧杯中,使用超声清洗设备清洗掉试样表面残存的油污,随后使用 VEGA Ⅱ XMUINVA 扫描电子显微镜观察涂层摩擦磨损情况。

2 结果与讨论

2.1 涂层形貌与硬度

图 1 为各涂层在电镜下的组织结构。如图 1a 所示,F1 涂层整体组织细小,存在大量细小的胞状晶,其中白色部分为胞状晶的晶界。图 1b 中 N1 涂层内分布着白色的第二相颗粒,形貌呈星形,其中大尺寸的白色第二相颗粒主要为成分设计时直接添加,小尺寸的白色第二相颗粒为激光熔覆过程中原位生成。图 1c-1e 分别为 C1 涂层的光镜局部放大金相照片:涂层上部组织细小,但局部存在细小树枝晶;涂层中部可观察到大量细小的胞状晶;涂层底部区域,细小的胞状晶逐渐消失,转变为拉长的胞状树枝晶。

涂层硬度的测试结果如表 3 所示。实验结果表明,基体 5CrMnMo 的显微硬度值为 380.00 HV,激光熔覆制备的 F1 涂层、F1(r)涂层、F2 涂层、N1 涂层、C1 涂层常温下的显微硬度分别为 570.00、616.00、604.00、405.00、520.00 HV,分别为基体硬度的 1.50、1.62、1.59、1.07、1.37 倍。这说明所制备的激光熔覆涂层均能提高 5CrMnMo 基体的表面硬度,从而达到提升轧辊表面耐磨性能的目的。



(a) F1涂层表面，SEM形貌　(b) N1涂层表面，SEM形貌

(c) C1涂层上部，OM形貌　(d) C1涂层中部，OM形貌　(e) C1涂层底部，OM形貌

图 1 各涂层的显微组织结构

Fig. 1 Microstructure of each coating

表 3 涂层显微硬度 HV

Table 3 Microhardness of coatings HV

材料	F1 涂层	F1(r)涂层	F2 涂层	N1 涂层	C1 涂层
常温硬度均值	570.00	616.00	604.00	405.00	520.00
300 ℃硬度均值	407.23	440.24	350.86	391.47	412.58
500 ℃硬度均值	373.86	434.69	322.40	369.43	381.02

当温度升高时,各涂层硬度均有一定程度的降低。F1、F1(r)、F2 和 N1 涂层的硬度随温度升高而降低,原因是高温导致熔覆层金属内部位错运动发生变化:温度升高时,位错运动阻力减小,其他缺陷对位错的阻碍和钉扎作用减弱;此外,温度越高,金属内部原子及缺陷的扩散能力越强,有助于位错滑移,因此熔覆层表现出软化现象,硬度呈下降趋势。F1 涂层经

激光重熔处理后硬度略有提升,这与激光重熔后晶粒细化有关。

C1 涂层(Co 基涂层)的硬度下降,是由于金属 Co 在 417 ℃时会发生同素异构晶体结构转变:高温时以面心立方结构(α-Co)形式存在,低温时则以密排六方结构(ε-Co)形式存在。随着温度升高,Co 的晶格结构从密排六方转变为面心立方,导致涂层硬度下降,但碳化物等硬质相仍能维持高温红硬性。高于相变点后,表面形成氧化膜并发挥润滑作用,使摩擦系数显著降低,磨损机制由低温磨粒磨损转变为高温氧化磨损,涂层耐磨性反而提升。

2.2 涂层的耐高温性能

将 F1、F1(r)、F2、N1、C1 5 种涂层分别在 300 ℃、100 MPa 与 320 MPa 压力下进行高温压缩测试,5 种涂层表面状态均良好,无开裂、脱落现象,表明涂层具有良好的热压缩性能。相同温度下的热震实验结果表明,F1、F1(r)、F2、N1、C1 5 种涂层与基体结合牢固,200 次热冲击实验后未发现涂层开裂、脱落现象。

表 4 为各试样在 300、500 ℃下的平均磨损失重。由表可知,基体、F1(r)涂层、F2 涂层的磨损失重量随温度升高而增加,而 F1 涂层、N1 涂层、C1 涂层的磨损失重量随温度升高而降低。F1 涂层在 300 ℃处于中温软化区间,涂层基体硬度下降明显,且未形成致密保护性氧化膜,摩擦界面易发生严重黏着磨损与疲劳剥落,孔隙、未熔颗粒等原始缺陷成为裂纹源,加速材料流失;500 ℃时涂层表面生成氧化层,可在一定程度上阻隔金属直接接触,同时高温下涂层塑性提升,脆性剥落减弱,因此磨损失重降低。N1 涂层以奥氏体固溶体为基体,兼具良好的高温塑性与抗氧化性,300 ℃时涂层硬度较高,以磨粒磨损与轻微黏着磨损为主,磨损失重相对较高;500 ℃下界面生成连续的 $NiO-Cr_2O_3$ 复合氧化膜,发挥固体润滑与防护作用,黏着磨损减弱,磨损失重降低。C1 Co 基涂层在 300 ℃与 500 ℃下的磨损失重均最低,表现出最优的高温耐磨性。Co 基合金基体具有优异的高温强度、热稳定性与抗氧化性,摩擦界面可快速生成致密连续的 Cr_2O_3 基复合氧化膜,该氧化膜与基体结合牢固、高温下不易剥落,既能有效阻隔金属直接接触与黏着,又能抵抗磨粒犁削与剪切损伤;同时 Co 基合金在高温摩擦应力下发生应变诱导马氏体相变,提升表面加工硬化能力,进一步抑制塑性流失与磨屑脱落,磨损机制以轻微氧化磨损与磨粒磨损为主,随温度升高氧化膜致密度提升,500 ℃时磨损失重较 300 ℃进一步降低,呈现出优异的高温抗磨稳定性。

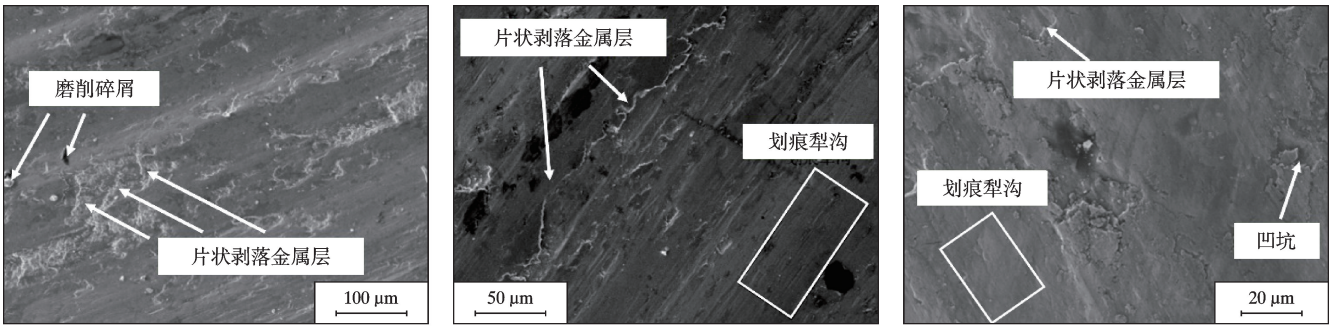
表 4 基体及各涂层 300、500 ℃平均磨损失重

Table 4 Average wear loss of matrix and coatings at 300, 500 ℃

试样	平均失重/mg	
	300 ℃	500 ℃
基体	3.95	7.00
F1(r)	2.70	5.35
F1	6.55	3.65
F2	2.80	4.70
N1	5.75	3.85
C1	1.00	0.73

各涂层高温摩擦磨损后试样形貌见图 2。图 2a 为 F1(r)涂层在 300 ℃摩擦磨损后的形貌,可观察到试样表面存在明显的片状剥落金属层及磨削碎屑。片状剥落金属层表明 F1(r)涂层存在黏着磨损:F1(r)涂层和对磨盘表面虽经抛光,但微观上仍凹凸不平,两物体之间以凸起处为接触点,随着压应力的施加和滑动摩擦的进行,部分承受压应力的凸点发生塑性变形,导致表面氧化膜被挤破,两物体金属面直接接触,接触面原子因键合作用产生黏着(冷焊);在后续滑动过程中,黏着点被剪断并转移至一方金属表面,脱落形成磨屑,造成涂层金属剥离损失。磨削碎屑的存在,表明激光熔覆 F1(r)涂层内部存在高硬碳化物,磨损过程中这些硬质相暴露并脱落进入摩擦副之间,形成磨粒磨损,加速涂层摩擦磨损。综上,激光熔覆 F1(r)涂层的磨损形式为磨粒磨损与黏着磨损共同作用。

图 2b 为 F1 涂层在 300 ℃摩擦磨损后的形貌,同样可观察到片状剥落金属层及明显的犁沟划痕,其磨损形式与 F1(r)涂层相似,均为黏着磨损与磨粒磨损共同作用,但 F1 涂层的磨损程度更为严重。已有研究表明[11],材料的耐磨性能在一定程度上与硬度正相关,分析认为,F1(r)涂层经重熔处理后显微硬度提升,因此其耐磨性较 F1 涂层更优。图 2c 为 F2 涂层在 300 ℃摩擦磨损后的试样形貌,由于 F2 涂层中加入了较高含量的硬质相,其摩擦磨损情况较未加入硬质相的 F1 涂层更好;此外,可观察到部分因硬质相脱落形成的凹坑、犁沟划痕及少量片状剥落金属层,据此可得出结论:F2 涂层在 300 ℃下的摩擦磨损形式为磨粒磨损与黏着磨损。

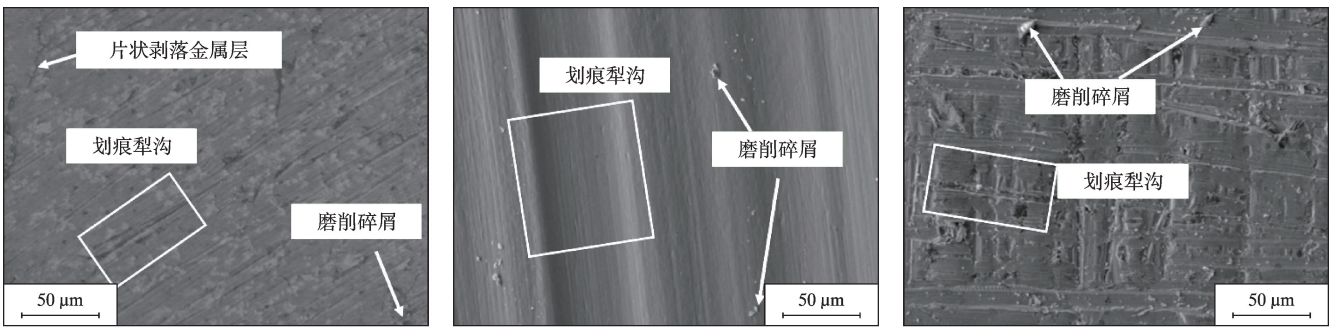


（a）F1(r)涂层　（b）F1涂层　（c）F2涂层

图 2　铁基涂层高温摩擦磨损后试样 SEM 形貌

Fig. 2　SEM morphology of Fe-based coatings after high temperature friction and wear

图 3a 为 N1 涂层在 300 ℃摩擦磨损后的试样表面形貌，涂层内分布着星形白色第二相颗粒，可观察到因黏着磨损产生的片状剥落金属层，以及因磨粒磨损产生的磨削碎屑和犁沟划痕，表明 N1 涂层在 300 ℃下的摩擦磨损形式为黏着磨损与磨粒磨损。图 3b 为激光熔覆 C1 涂层在室温摩擦后的形貌，试样表面光滑但存在较宽的犁削沟，且可观察到磨削碎屑。图 3c 为激光熔覆 C1 涂层在高温磨损后的形貌，明显可见高温磨损后试样表面犁削作用减轻，犁削沟槽宽度变窄，说明激光熔覆 C1 涂层在高温下的磨粒磨损减轻。



（a）N1涂层，300 ℃　（b）C1涂层，室温　（c）C1涂层，300 ℃

图 3　镍基与钴基涂层高温摩擦磨损后试样 SEM 形貌

Fig. 3　SEM morphology of Ni-based and Co-based coatings after high temperature friction and wear

3　结　论

（1）涂层随温度的升高其硬度均有一定程度的降低。F1 涂层、F1(r)涂层、C1 涂层的常温硬度和高温硬度均较高，可显著提升轧辊的耐磨性；N1 涂层硬度随温度升高而降低的幅度较其他涂层更小。

（2）F1 涂层、F1(r)涂层、F2 涂层、N1 涂层、C1 涂层表面状态均良好，无开裂、脱落现象，5 种涂层均具有良好的热压缩性能。热震实验结果表明，5 种涂层与基体结合牢固，200 次热冲击实验后未发现涂层开裂、脱落现象。

（3）通过统计涂层的磨损失重量可知，就磨损失重而言，F1(r)、F2 涂层能发挥较好的高温耐磨性能。F1、F1(r)涂层在 300 ℃下的摩擦磨损形式均为磨粒磨损和黏着磨损，其中 F1 涂层的磨损情况更为严重；F2 涂层在 300 ℃下的摩擦磨损形式为磨粒磨损与黏着磨损，其磨损情况较 F1、F1(r)涂层更优。Ni 基涂层在 300 ℃下的摩擦磨损形式为黏着磨损与磨粒磨损，其磨损情况较上述 3 种 Fe 基涂层更优，表明 Ni 基涂层具有良好的高温耐磨性。Co 基涂层在常温及 300 ℃下的摩擦磨损形式均为磨粒磨损。

[参 考 文 献]

[1] 李　禧，张　莹，陈志英，等. 5CrMnMo 模具钢销盘磨损试验及仿真验证[J]. 模具工业，2021，47(8)：67-70.
LI X，ZHANG Y，CHEN Z Y，et al. Pin-on-disc wear test of 5CrMnMo die steel and the simulation verification [J]. Die & Mould Industry，2021，47(8)：67-70.

[2] 黄华贵，郑加丽，胡淇伟，等. 热轧工作辊磨损模型与运维策略研究进展[J]. 河北冶金，2022(9)：1-5.
HUANG H G，ZHENG J L，HU Q W，et al. Research Progress of Hot Rolling Work Roll Wear Model and Opera-

tion and Maintenance Strategy [J]. Hebei Metallurgy, 2022(9): 1-5.

[3] 张俊鹏, 武纪宇, 薛曙冰, 等. 轧辊失效形式及修复方法的研究进展[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(2): 71-74.
ZHANG J P, WU J Y, XUE S B, et al. Research Progress on Failure Forms and Repair Methods of Roll[J]. Machine Building & Automation, 2024, 53(2): 71-74.

[4] DONG Q, ZHANG J, LIU 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.

[5] KOSEKI T. Recent activities in research of casting[J]. Kawasaki Steel Technical Report, 1999(41): 67-69.

[6] XU S, CAI Q, LI G, et al. Effect of scanning speed on microstructure and properties of TiC/Ni60 composite coatings on Ti6Al4V alloy by laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 154: 108309.

[7] 赵 坚, 陈小明, 刘 伟, 等. 激光熔覆 Fe 基/Ni 基/Co 基合金修复层的微观结构及抗磨损性能[J]. 材料保护, 2018, 51(4): 16-19.
ZHAO J, CHEN X M, LIU W, et al. Microstructure and Wear Resistance of Fe-Based/Ni-Based/Co-Based Repaired Coating by Laser Cladding[J]. Materials Protection, 2018, 51(4): 16-19.

[8] 向南鑫, 周后明, 王宇豪, 等. 高速激光熔覆铁基非晶合金涂层的组织及性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 282-291.
XIANG N X, ZHOU H M, WANG Y H, et al. Research on Microstructures and Properties of High-Speed Laser-Cladded Iron-Based Amorphous Alloy Coatings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 282-291.

[9] 刘英鹏, 符寒光. 改善激光熔覆镍基复合涂层耐磨性研究进展[J]. 材料保护, 2023, 56(7): 145-156.
LIU Y P, FU H G. Research Progress on Improving Wear Resistance of Nickel-Based Composite Coatings by Laser Cladding[J]. Materials Protection, 2023, 56(7): 145-156.

[10] 尹 燕, 李志慧, 李 辉, 等. 铸轧辊套表面超高速激光熔覆钴基熔覆层高温耐磨性能[J]. 焊接学报, 2021, 42(9): 81-89.
YIN Y, LI Z H, LI H, et al. High temperature wear resistance of cobalt based cladding layer on the surface of casting roller sleeve by ultra high speed laser cladding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(9): 81-89.

[11] 邵荷生,张 清,王成彪. 几种不同硬度材料的滑动磨粒磨损特征[J]. 摩擦学学报, 1994, 14(3): 213-219.
SHAO H S, ZHANG Q, WANG C B. Sliding abrasive wear characteristics of several materials with different hardness[J]. Tribology, 1994, 14(3): 213-219.

[编校:陈 鸣]