doi:10.3969/j.issn.1003 -4226.2026.04.013

基于 RZ -11 焊丝的大型支承辊堆焊层强韧性研究*

刘士彬[1,2]， 董艳春[1,3]， 季 策[4]， 周焱民[5]， 白 斌[6]， 冯志平[2]， 辛胜朋[1,2]
（1.高性能轧辊材料与复合成形全国重点实验室， 河北 邢台 054025； 2.中钢集团邢台机械轧辊有限公司，
河北 邢台 054025； 3.河北工业大学， 天津 300401； 4.燕山大学， 河北 秦皇岛 066000；
5.新余钢铁集团有限公司， 江西 新余 338025； 6.唐山中厚板材有限公司， 河北 唐山 063600）

摘要:为实现大型锻钢支承辊的高性能再制造,采用自主设计的 RZ -11 型高合金药芯焊丝进行埋弧堆焊,并系统分析了堆焊层的微观组织演变、硬度分布、拉伸与冲击性能及断口形貌。结果表明:堆焊层组织主要由板条马氏体及板条间分布的残余奥氏体构成;堆焊面层硬度 50 ~55 HRC,抗拉强度最高 1 260 MPa,展现出优异的强度;但其室温冲击功较低(3.0 ~5.0 J),断口呈现以准解理断裂为主、伴有少量浅小韧窝的混合形貌,其高强度主要源于高碳马氏体及碳化物形成元素的共同作用;而低韧性则归因于高碳马氏体的固有脆性及焊接残余应力。该研究为后续通过成分微调与工艺优化以提高堆焊层综合服役性能提供了明确的理论依据与数据支撑。

关键词:支承辊;埋弧堆焊;药芯焊丝;抗拉强度
中图分类号:TG44 **文献标识码**:A

Study on toughness and strength of large back-up roller cladding layer based on RZ -11 welding wire

Liu Shibin[1,2], Dong Yanchun[1,3], Ji Ce[4], Zhou Yanmin[5], Bai Bin[6], Feng Zhiping[2], Xin Shengpeng[1,2]
(1. *State Key Laboratory of High Performance Roll Materials and Composite Forming*, *Xingtai* 054025, *China*;
2. *Sinosteel Xingtai Machinery & Roll Co., Ltd.*, *Xingtai* 054025, *China*; 3. *Hebei University of Technology*,
Tianjin 300401, *China*; 4. *Yanshan University*, *Qinhuangdao* 066000, *China*; 5. *Xinyu Iron & Steel Group Co., Ltd.*,
Xinyu 338025, *China*; 6. *Tangsteel Heavy Plate Company*, *Tangshan* 063600, *China*)

Abstract: For achieving high-performance remanufacturing of large forged steel back-up rollers, the self-designed RZ -11 type high alloy flux-cored wire was adopted to submerge arc overlay welding. Microstructural evolution, hardness distribution, tensile and impact properties, fracture morphology of overlay layer were systematically analyzed. Results show that the cladding layer structure primarily consists of lamellar martensite and residual austenite distributed between the lamellar plates. The cladding surface exhibits hardness 50 ~55 HRC and tensile strength reaching up to 1 260 MPa, show casing exceptional mechanical properties. However, its low room temperature impact energy (3.0 ~5.0 J) indicates fracture morphology dominated by quasi-cleavage fracture with minor shallow dimples, high strength is attributed to synergistic effects of high-carbon martensite and carbide-forming elements. While low toughness results from inherent brittleness of high-carbon martensite and residual welding stresses. The study provides clear theoretical basis and data support for subsequent improvement of comprehensive service performance of cladding layer through component fine-tuning and process optimization.

Keywords: back-up rolls; submerged arc overlay weld; flux-cored wire; tensile strength

大型锻钢支承辊作为中宽厚板轧线上的核心零部件,单重一般在 80 ~250 t,其服役环境恶劣,承受较大轧制力,在使用过程中与工作辊接触造成严重磨损、局部剥落从而失效,直接更换新辊不仅成本较

* 基金项目。(1)河北省中央引导地方科技发展资金项目,激光增材制造材料结构、功能一体化复合轧辊组织结构及服役行为,项目编号:246Z1023G。(2)河北省高等学校科学研究项目,项目名称:大型工作辊辊颈强化层组织结构及性能研究,项目编号:CXZX2025057。(3)邢台市市级科技计划项目(战略性新兴产业创新专项),中宽厚板用大型工作辊辊颈激光熔覆层材料研究及应用,项目编号:2024ZZ006。(4)邢台市重点研发计划自筹项目,热连轧粗轧工作辊扁面激光熔覆关键技术研发与工业应用,项目编号:2025ZC001。

高，制造周期一般也比较长。因此，采用增材技术对失效报废的大型支承辊进行再制造，已成为延长大型支承辊使用寿命、降低生产成本、推动钢铁企业绿色制造的关键途径[1－3]。

大型支承辊增材再制造关键在于堆焊熔覆层应具有较高的硬度、强度，同时也要具备足够的韧性以抑制疲劳裂纹的萌生和扩展，从而抵抗剥落失效。堆焊熔覆层性能由其微观组织结构决定，而微观组织取决于焊接材料成分与焊接工艺参数[4－8]。因此，针对不同的埋弧焊接材料，系统评估其堆焊熔覆层的强韧性匹配关系，对于指导生产实践、预测大型支承辊服役行为具有至关重要的理论意义与工程价值。

研究选用自主设计的 RZ－11 型高合金钢药芯焊丝，在常规的 Cr5 锻钢试板进行多道次多层埋弧堆焊，以模拟大型支承辊的再制造过程。通过系统的微观组织表征与力学性能测试，重点分析堆焊熔覆层的组织结构特征、抗拉强度、宏观硬度与韧性水平，并结合拉伸断口形貌深入探讨其强度与韧性匹配的内在机制，为该焊丝的优化应用与高性能支承辊的再制造提供坚实的数据支撑与理论指导。

1　试验材料及方法

1.1　试验材料

试板材质为 Cr5 锻钢，尺寸 400 mm×40 mm×25 mm，焊接材料为直径 4.0 mm RZ－11 型药芯埋弧用高合金焊丝，RZ－11 型药芯焊丝化学成分见表 1。配合使用性能较好的碱性熔炼焊剂 HJ260，焊接前将焊丝和焊剂都进行 200～250 ℃预热。

表 1　RZ－11 型药芯焊丝化学成分

Table 1　Chemical composition of RZ－11 flux-cored wire　　*w*/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	其他
0.25～0.35	0.8～1.2	0.5～1.0	0.018	0.022	8.0～10.0	2.0～3.0	1.0～2.0	≤2

1.2　试验工艺与试样制备

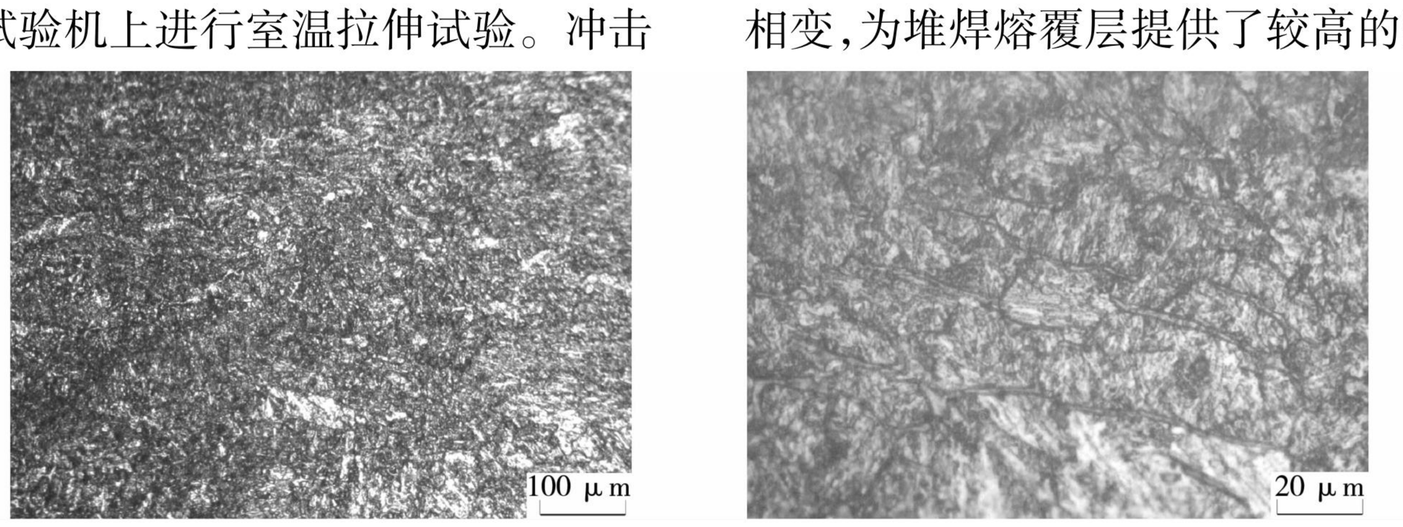
焊接前将试板表面打磨，去除氧化层和残留油污，采用埋弧堆焊工艺在 Cr5 试板上进行多道次多层堆焊，直至达到所需厚度。埋弧焊接采用进口林肯 DC－1000 电源，选择下降特性，电压控制在 28～36 V，电流控制在 440～480 A，焊接速度控制在 500～600 mm/min，预热温度 200～250 ℃，保温 10 min。堆焊熔覆完成后，立即将焊接试板加热到 580 ℃，并随炉冷却至室温，以模拟实际生产中的热处理过程。

从堆焊试板上线切割加工金相试样和标准力学性能试样。金相试样经磨削、抛光后，用体积分数 4% 硝酸酒精溶液腐蚀 30 s，采用 OLYMPUS GX51 光学显微镜及 S－4800 型场发射扫描电镜进行微观组织观察。利用洛氏硬度计测定堆焊层截面宏观硬度分布。在万能试验机上进行室温拉伸试验。冲击试样采用 V 型缺口，在 JBN－300B 冲击试验机上测试室温冲击功。采用扫描电镜（SEM）对拉伸后断口的微观形貌进行观察和分析。

2　试验结果与分析

2.1　堆焊熔覆层的宏观结构与微观组织

堆焊熔覆层宏观形貌良好，无可见气孔、夹渣及裂纹等焊接缺陷，RZ－11 堆焊熔覆层金相组织如图 1 所示。其微观组织主要由高碳马氏体（M）和一定量的分布于马氏体板条间的残余奥氏体（γ）组成，这主要是 RZ－11 药芯焊丝中较高含量的 Cr、Mo、Ni、V 等合金共同作用，导致堆焊熔覆层具有较高淬透性，在埋弧焊接后熔池的快速冷却过程中，奥氏体迅速过冷至 *M*s 点温度以下，发生了切变型的马氏体相变，为堆焊熔覆层提供了较高的强度和硬度。



（a）低倍　　（b）高倍

图 1　RZ－11 堆焊熔覆层金相组织

Fig. 1　Microstructure of RZ－11 overlay cladding layer

2.2 堆焊熔覆层力学性能

2.2.1 硬度分布

由于稀释作用影响,堆焊熔覆层的截面上硬度随着焊接层数呈“梯度上升 - 稳定”趋势。RZ - 11 堆焊熔覆层逐层截面宏观硬度分布如图 2 所示。靠近母材的第 1 层受母材稀释作用较为明显,碳和主要合金元素含量较低;第 2 层稀释程度降低,硬度基本在 35 ~ 45 HRC;第 3 ~ 5 层,随熔覆高度增加,基体稀释的影响降至较低水平,熔覆层的合金成分相对稳定,尤其是在第 4 层以上截面的宏观硬度基本稳定在 50 ~ 55 HRC,基本满足了大型支承辊表面不小于 50 HRC 高硬度的技术要求。

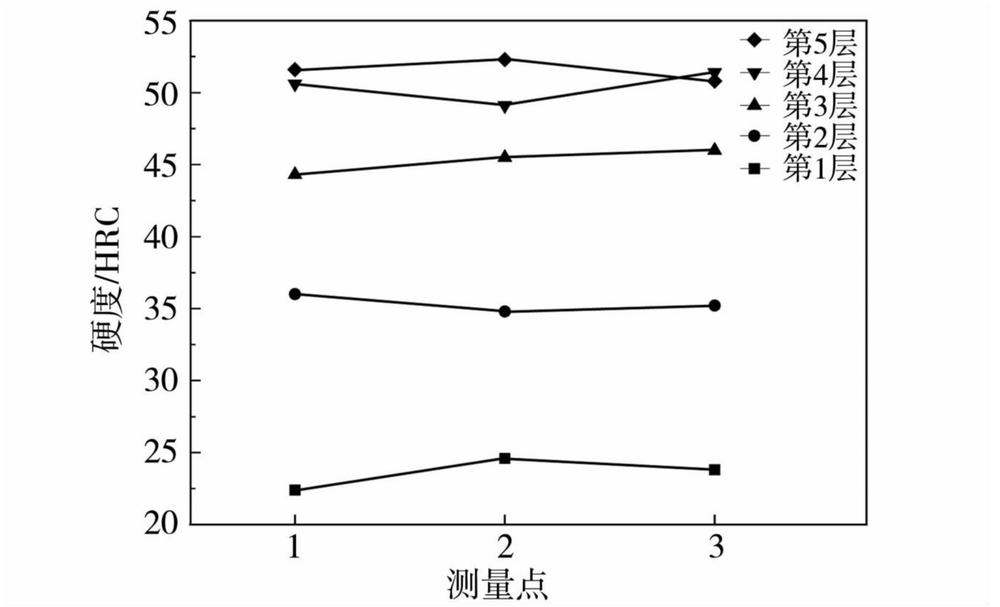


图 2 RZ - 11 堆焊熔覆层截面硬度分布

Fig. 2 Section hardness distribution of the RZ - 11 overlay cladding layer

2.2.2 拉伸冲击性能

RZ - 11 堆焊熔覆层室温拉伸与冲击性能见表 2,其抗拉强度均超过 1 100 MPa,最高可以达到 1 260 MPa,屈服强度也都超过900 MPa,断后伸长率为 10% ~13%,断面收缩率在 20% ~28%,展现了该焊丝堆焊熔覆层具有极高的强度与一定的塑性。然而,其室温冲击功 KV_2 值普遍较低,基本在 3.0 ~5.0 J,表明堆焊熔覆层的冲击韧性不足。

表 2 RZ - 11 堆焊熔覆层室温拉伸与冲击性能

Table 2 Tensile and impact properties of the RZ - 11 overlay cladding layer

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击功 KV_2/J
1	930	1 120	13	22	3.5
2	980	1 180	12	28	5.0
3	950	1 260	10	20	3.0

2.3 断口形貌分析与强韧性

对 RZ - 11 堆焊熔覆层的拉伸冲击试样断口进行金相组织和 SEM 扫描电镜观察,RZ - 11 堆焊层冲击断口 SEM 形貌及元素分布如图 3 所示。由图 3a 可以看出,在低倍金相显微镜下试样断口较为平齐,呈现明显的脆性断裂特征。图 3b 显示,断口主体基本符合准解理断裂形貌特征,可以观察到明显的解理台阶和撕裂棱,在其断口位置发现存在疑似焊接夹渣的物质,对疑似夹渣位置进行主要元素 EDS 含量检测(图 3d),由此推测其主要成分可能为 CaO、Al_2O_3、SiO_2、MnO 等物质组成的复合硅酸盐,导致堆焊熔覆层的强度大大降低[9];同时,在图 3c 局部区域分布着少量较浅的韧窝。这种“准解理为主、韧窝为辅”的混合断口形貌是高强度马氏体钢典型的低温或低韧性断裂特征,与测试结果中较低的冲击功相互印证。

2.4 综合分析

2.4.1 堆焊熔覆层高强度与高硬度来源

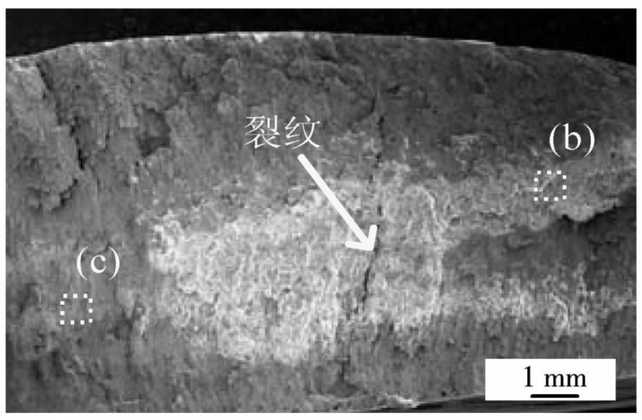
堆焊熔覆层金属较高的强度与硬度主要来源于其高碳马氏体组织,此外合金元素 Cr、Mo、V 的固溶强化作用,以及在回火过程中可能析出的 M_7C_3、M_2C、VC 等碳化物的二次硬化效应,进一步强化了堆焊熔覆层。

2.4.2 低韧性成因分析

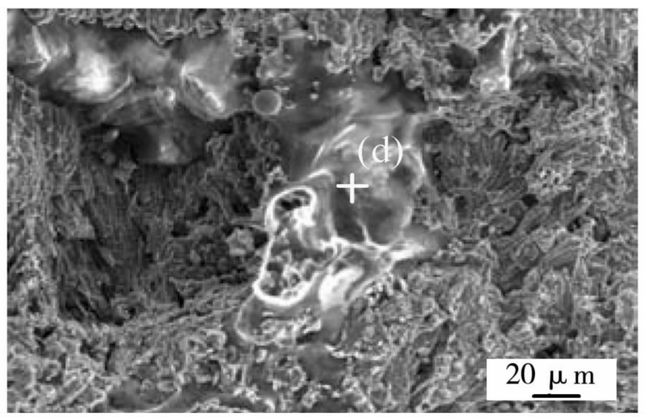
冲击功偏低和断口呈现的准解理断裂特征,共同指向堆焊熔覆层的韧性不足,这主要归因于以下因素。(1)金相组织,高碳马氏体固有的高硬度、高脆性,其板条内部的高位错密度和过饱和的固溶碳原子,使裂纹更易于萌生和扩展;(2)焊接应力,高能量埋弧焊接过程的快速加热与快速冷却不可避免地在焊接位置引入较大的焊接残余应力,在应力集中处更容易促进裂纹的萌生;(3)夹杂缺陷,CaO、Al_2O_3、SiO_2、MnO 等物质组成的复合硅酸盐夹杂物(尺寸 10 ~ 100 μm)破坏堆焊熔覆层的连续性,加速了裂纹的形成与扩展。

2.4.3 强韧性匹配评价

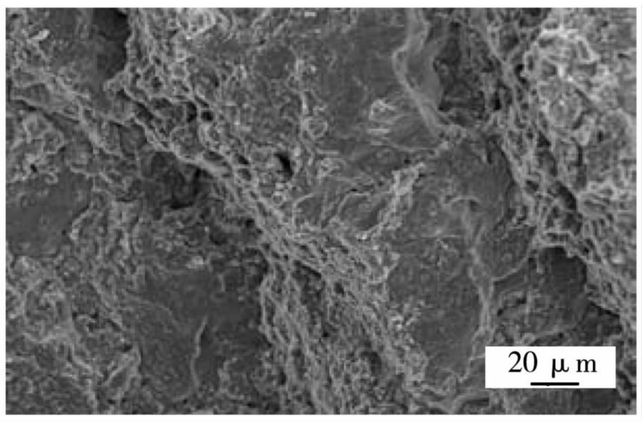
研究结果表明,采用 RZ - 11 药芯焊丝进行埋弧焊接的熔覆层具有典型的“高强度 - 低韧性”特征,这种性能组合使得堆焊熔覆层在承受较高的接触应力磨损时表现优异,但在承受冲击载荷或存在较大应力集中(如剥落坑边缘)时,对裂纹萌生和扩展的抵抗能力较弱,存在服役中发生脆性剥落的风险。



（a）冲击断口低倍形貌



（b）夹渣位置微观形貌



（c）断口韧窝形貌

元素	质量百分比	原子百分比
OK	31.95	47.62
NaK	2.58	2.68
MgK	15.64	15.34
AlK	4.69	4.14
SiK	17.95	15.24
KK	1.26	0.77
CaK	18.15	10.80
CrK	1.81	0.83
MnK	5.97	2.59

（d）夹渣位置元素分布

图 3　RZ – 11 堆焊层冲击断口 SEM 形貌及元素分布

Fig. 3　SEM morphology of impact fracture of the RZ – 11 cladding layer and element distribution

3　结语

使用 RZ – 11 药芯焊丝埋弧堆焊可以制备无宏观缺陷、结构良好的堆焊熔覆层,其熔覆层微观组织为高碳板条马氏体与板条间分布一定量的残余奥氏体,硬度在 50 ~ 55 HRC,抗拉强度最高可以达到 1 260 MPa,满足支承辊对表面强度的技术要求。

该堆焊熔覆层呈现较为明显的“高强度 – 低韧性”特征,室温冲击功偏低(3.5 ~ 5.0 J),断口为准解理 + 少量浅韧窝的混合形貌,根源在于高碳马氏体固有脆性、堆焊过程中的残余应力以及复合硅酸盐夹杂缺陷。

在实际的大型支承辊再制造应用中,应充分肯定该焊丝在提供高硬度耐磨层方面的价值,同时需关注其韧性的局限性。后续工作可以通过微调焊丝成分,如适当降低碳含量并优化 Ni、Mn 等奥氏体稳定元素含量;优化焊后热处理工艺,如采用去应力退火或高温回火等措施,以期在保持高强度的同时,有效提高其韧性,从而获得更好的综合服役性能。

参考文献

[1] 李利霞,靳涛,李园园,等. 重型支承辊大厚度堆焊工艺研究[J]. 电焊机,2024,54(11):75 – 81.

[2] 周彦彬,关升,羊文斯,等. Cr5 支承辊堆焊层的组织及性能[J]. 焊接技术,2020,49(12):30 – 33.

[3] 王志平. 大型锻件支承辊堆焊修复技术研究[J]. 焊接技术,2019,48(9):62 – 65.

[4] 郭太平. 埋弧焊在辊芯修复过程中的堆焊工艺研究[J]. 中国重型装备,2021(3):36 – 37.

[5] 聂斌英. 再制造大型热轧支承辊的堆焊层开裂失效分析[J]. 材料科学与工艺,2010,36(2):20 – 22.

[6] 王建华,刘伟. 轧辊堆焊再制造技术研究进展[J]. 中国表面工程,2019,32(3):1 – 10.

[7] 褚秀军. 大型和超大型冶金轧辊再制造技术研究与应用[J]. 中国高新技术企业,2017(7):65 – 67.

[8] LI Q C,LI L J,CHANG G W,et al. Effects of pulsed current and pulsed magnetic field complex pretreatment onmartensite transformation of Cr5 steel during continuous cooling[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2015,22(12):1131 – 1137.

[9] 秦翔,杨军,邹德宁,等. 轧辊再制造及其表面强化技术的研究进展[J]. 材料保护,2019,52(2):119 – 125.

(收稿日期:2026 – 02 – 26)

作者简介

刘士彬　1986 年生,高性能轧辊材料与复合成形全国重点实验室成员,高级工程师,中钢集团邢台机械轧辊有限公司特种制造分厂副厂长。

董艳春　1971 年生,高性能轧辊材料与复合成形全国重点实验室成员,河北工业大学教授。本文通讯作者。

季　策　1990 年生,燕山大学副教授。

周焱民　1980 年生,新余钢铁集团有限公司高级工程师。

白　斌　1984 年生,高级工程师,唐山中厚板材有限公司轧钢工作部部长。

冯志平　1986 年生,高级技师,中钢集团邢台机械轧辊有限公司特种制造分厂堆焊车间主任。

辛胜朋　1990 年生,高性能轧辊材料与复合成形全国重点实验室成员,中钢集团邢台机械轧辊有限公司研发工程师。