

For citation: Zhang Xi, Guryev A.M., Lygdenov B.D. Study on the effect of saturating medium composition on the properties of steels during diffusion borosiliconizing // Grand Altai Research & Education — Выпуск 1 (26)'2026 (DOI: 10.25712/ASTU.2410-485X.2026.01) — EDN: <https://elibrary.ru/MXZJRA>

UDK 669

STUDY ON THE EFFECT OF SATURATING MEDIUM COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF STEELS DURING DIFFUSION BOROSILICONIZING

Zhang Xi¹, A.M. Guryev^{1,2,3}, B.D. Lygdenov²

1 Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, 656038, Russia

2 Hubei Digital Textile Equipment Key Laboratory, Wuhan Textile University, Wuhan, 430200, China

3 Zhejiang Pinuo Machinery Co., Ltd., Shaoxing, 312000, China

E-mail: 1822169026@qq.com ; guriavam@mail.ru

Abstract. This study investigates the effect of ferrosilicon (FeSi) concentration (10%, 15%, 20%, and 25%) on the microstructure and properties of borosiliconized layers formed on GB 12Mn, AISI H13, and GB S50C steels. The pack boriding process was conducted at 950°C for 4 hours. The corrosion resistance, high-temperature oxidation resistance, and microhardness of the treated samples were systematically evaluated through immersion tests in 10% H₂SO₄ solution for 96 h, oxidation tests at 800 °C for 8 h, and microhardness measurements. The results show that as the FeSi concentration increases from 10% to 25%, the mass loss due to corrosion increases significantly for all three steels. GB 12Mn exhibits the best corrosion resistance (mass loss of 0.87%–1.41%), followed by GB S50C, while AISI H13 shows the highest mass loss (14.63%–42.87%). In high-temperature oxidation tests, all samples exhibit mass loss rates below 0.04%, indicating that borosiliconizing effectively enhances the oxidation resistance of the steels. Microhardness analysis reveals that FeSi concentration significantly affects the hardness characteristics: GB 12Mn achieves the highest surface hardness (1427 HV) and deepest hardened layer (approx. 130μm) at 10% FeSi; GB S50C exhibits optimal comprehensive performance at 15% FeSi, with a surface hardness of 1641 HV and a layer depth of approximately 150μm; AISI H13 shows a continuous increase in surface hardness with increasing FeSi concentration, reaching 1455 HV at 25% FeSi, but the hardened layer is relatively thin and exhibits non-uniform hardness distribution. Considering corrosion resistance, oxidation resistance, and hardness properties, 10% FeSi is recommended for GB 12Mn, 15% FeSi for GB S50C, and higher FeSi concentrations for AISI H13 depending on specific application requirements.

Keywords: borosiliconizing; corrosion resistance; high-temperature oxidation resistance; microhardness

扩散硼硅共渗过程中饱和介质成分对钢性能的影响的研究

张熙¹, 古里耶夫 亚历山大^{1,2,3}, 吕格登诺夫 布里杨¹

1 阿尔泰国立技术大学·波尔祖诺夫, 巴尔瑙尔, 656038, 俄罗斯;

2 湖北省数字化纺织装备重点实验室, 武汉纺织大学, 武汉, 430073, 中国;

3 浙江品诺机械有限公司, 绍兴, 312000, 中国

E-mail: 1822169026@qq.com ; guriavam@mail.ru

摘要: 本研究探究了不同浓度硅铁 (FeSi) (10%, 15%, 20%, 25%) 对硼硅共渗层组织与性能的影响. 对 GB 12Mn, AISI H13 和 GB S50C 三种钢材在 950°C 下进行粉末包埋渗硼处理 4 小时, 通过腐蚀试验 (10% H₂SO₄ 溶液浸泡 96h), 高温氧化试验 (800°C 氧化 8h) 和显微硬度测试, 系统评估了 FeSi 浓度对渗层耐蚀性, 抗高温氧化性及硬度特性的影响规律. 结果表明: 随着 FeSi 浓度从 10% 增加至 25%, 三种钢材的腐蚀质量损失率均显著上升, 其中 GB 12Mn 腐蚀失重最小 (0.87%~1.41%), AISI H13 最大 (14.63%~42.87%), GB S50C 居中. 高温氧化测试中, 所有试样质量损失率均低于 0.04%, 表明硼硅共渗可显著提升钢材的高温抗氧化性能. 硬度分析显示, FeSi 浓度对硬度特性影响显著: GB 12Mn 在 10% FeSi 时获得最高表层硬度 (1427 HV) 和最深渗层 (约 130μm); GB S50C 在 15% FeSi 时综合性能最优, 表层硬度达 1641 HV, 渗层深度约 150μm; AISI H13 表层硬度随 FeSi 增加而持续上升, 25% 时达 1455 HV,

但渗层较薄且均匀性欠佳. 综合考虑耐蚀性, 抗氧化性和硬度特性, GB 12Mn 推荐采用 10% FeSi 工艺, GB S50C 推荐 15% FeSi, AISI H13 可根据使用需求选择较高 FeSi 浓度.

关键词: 硼硅共渗; 耐腐蚀性; 高温抗氧化性; 显微硬度

1 前言

现代工业中, 金属材料因其优异的力学性能被广泛应用于高温, 高压及腐蚀性介质等极端工况环境. 然而, 此类环境对材料表面性能提出了严苛要求, 尤其在耐磨性, 耐腐蚀性及高温抗氧化性方面亟待提升 [1;2]. 为此, 化学热处理工艺成为优化金属表面性能的有效手段, 其中渗硼技术通过硼原子在基体中的扩散, 可在材料表面构建厚度为 30-200μm 的梯度渗硼层 (FeB/Fe₂B 双相结构), 使显微硬度显著提升至 1300-2000 HV, 并同步改善表面耐蚀性与高温氧化抗力 [3;4].

近些年来, 硼与其他元素的多重共渗变得更加流行, 以迎合不同的应用需求, 如硼硅共渗, 硼钛共渗, 硼铬共渗等, 可以进一步提高耐磨性, 耐热性, 耐腐蚀性等 [5-8].

本研究的主要内容是硼硅共渗, 探究不同浓度的 FeSi 对不同牌号钢材的性能影响.

2 材料与方法

一, 实验目的

本文旨在探究不同浓度的硅铁 (FeSi) 在粉末渗硼过程中, 对 GB 12Mn, AISI H13 及 50 号钢 (GB S50C) 三种钢材性能的影响, 具体实验方案见表 1. 通过系统研究, 为钢材表面改性及性能优化提供理论依据和实践参考.

二, 实验方案

(1) 渗剂准备

采用粉末渗硼方法, 将不同浓度的 FeSi 粉末与硼粉充分均匀混合, 以确保渗剂在渗硼过程中能够均匀作用于钢材表面.

(2) 实验基材

选用 12Mn, H13 及 50 号钢作为实验基材. 12Mn 化学成分为: 0.069%C, 0.569%Si, 1.400%Mn, 0.121%Cr, 0.012%S, 0.010%P. H13 化学成分为: 0.365%C, 0.812%Si, 0.459%Mn, 5.139%Cr, 0.012%S, 0.018%P. 50 号钢化学成分为: 0.503%C, 0.226%Si, 0.768%Mn, 0.121%Cr, 0.012%S, 0.010%P. 在实验前, 为保证实验结果的准确性, 使用 800 目的砂纸对样品表面进行精细研磨, 以有效除去表面杂质和氧化层, 确保渗硼过程的顺利进行.

(3) 渗硼工艺

将处理好的样品置于 SNOL 炉中, 并使用 Termodat 16-E3 PID 控制器, 加热温度设定为 950°C, 并保持 4 小时的恒温时间, 以保证渗硼过程的充分进行. 加热完毕后, 将样品从加热设备中取出, 在空气中自然冷却, 使样品内部组织充分稳定.

三, 性能测试

表 1. 实验方案

Table 1. Experimental plan

FeSi	硼粉	钢材牌号	样品编号
10%	90%	GB 12Mn	1,13,25
		GB S50C	2,14,26
		AISI H13	3,15,27
15%	85%	GB 12Mn	4,16,28
		GB S50C	5,17,29
		AISI H13	6,18,30
20%	80%	GB 12Mn	7,19,31
		GB S50C	8,20,32
		AISI H13	9,21,33
25%	75%	GB 12Mn	10,22,34
		GB S50C	11,23,35
		AISI H13	12,24,36

(一) 耐腐蚀试验

将渗硼处理后的样品放入浓度为 10% 的硫酸 (H_2SO_4) 溶液中进行耐腐蚀试验, 浸泡时间为 96 小时. 浸泡结束后, 小心取出样品, 使用高精度天平记录试验前后样品的重量变化, 以此评估样品的耐腐蚀性能.

(二) 高温氧化试验

将样品放入高温炉中进行高温氧化试验, 加热至 $800^{\circ}C$ 并持续 8 小时, 模拟样品在高温环境下的使用情况. 加热结束后, 将样品从炉中取出, 在空气中自然冷却. 待样品冷却至室温后, 使用高精度天平记录清洁前样品的重量, 使用刷子轻轻清洁样品表面, 除去表面生成的氧化物, 再次使用高精度天平记录清洁后样品的重量, 记录重量变化, 从而评估样品的高温抗氧化性能.

(三) 涂层硬度测试

将样品依次进行切割, 镶嵌, 研磨和抛光处理后, 采用中国上海联纳测试设备有限公司生产的 HV-1000 型微硬度测试仪, 沿涂层深度方向进行显微硬度测试. 测试载荷为 100 克, 保载时间为 5 秒. 自涂层表面起, 以 20 微米为间隔逐点测量, 从而获得样品截面上的硬度梯度分布.

通过上述实验过程, 全面研究不同浓度的 FeSi 在不同钢材上进行渗硼处理后的性能变化, 为钢材的实际应用提供重要的参考依据.

3 结果与分析

由表 2 可知, 当 FeSi 粉浓度为 10% 时, 12Mn 钢, H13 钢和 50 号钢样品的质量损失系数分别为 0.87%, 4.17% 和 14.63%. 随着 FeSi 粉末浓度的增加, 三个钢种样品的质量损失系数呈增大趋势. 当 FeSi 粉末浓度为 25% 时, 3 个钢种样品的质量损失系数均达到最大值, 分别为 1.41%, 12.42% 和 42.87%. 对比 3 个钢种可知, 各级 FeSi 粉末浓度下, 12Mn 钢样的质量损失系数最小, 50 号钢样的质量损失系数一般, H13 钢样的质量损失系数最大.

表 2. 不同方案的耐腐蚀试验结果

Table 2. Corrosion test results of different schemes

FeSi	样本	腐蚀前重量 (g)	腐蚀后重量 (g)	重量减少 (g)	重量减少百分比 (%)
10%	1	16.153	16.013	0.140	0.87
	2	16.278	15.599	0.679	4.17
	3	16.010	13.668	2.342	14.63
15%	4	17.916	17.673	0.243	1.36
	5	16.427	15.033	1.394	8.49
	6	17.474	14.120	3.354	19.19
20%	7	15.815	15.243	0.572	3.62
	8	15.483	13.395	2.088	13.49
	9	15.470	9.047	6.423	41.52
25%	10	16.106	15.879	0.227	1.41
	11	16.350	14.320	2.030	12.42
	12	16.063	9.176	6.887	42.87

如表 3 所示, 在高温氧化试验中, 12Mn, H13 和 50 号钢样品的质量损失百分比极低, 在 0.006%–0.035% 范围内. 由此可知, 硼硅共渗可以使这些钢材获得较高的高温抗氧化性.

表 3. 不同方案的高温氧化试验结果

Table 3. High temperature oxidation test results for different schemes

FeSi	样本	清洁后重量 (g)	清洁后重量 (g)	重量减少 (g)	重量减少百分比 (%)
10%	13	16.931	16.925	0.006	0.035
	14	15.641	15.635	0.006	0.038
	15	17.049	17.047	0.002	0.012
15%	16	16.532	16.530	0.002	0.012
	17	16.030	16.027	0.003	0.019
	18	16.648	16.645	0.003	0.018
20%	19	15.931	15.928	0.003	0.019
	20	15.975	15.971	0.004	0.025
	21	18.221	18.219	0.002	0.011
25%	22	16.718	16.717	0.001	0.006
	23	16.321	16.317	0.004	0.025
	24	16.482	16.479	0.003	0.018

对三种钢材经不同配比渗剂处理后的试样沿截面进行了显微硬度测试, 结果如图 1 所示. 由图可见, FeSi 浓度对表层硬度及渗层深度具有显著影响, 且不同钢材表现出不同的变化规律.

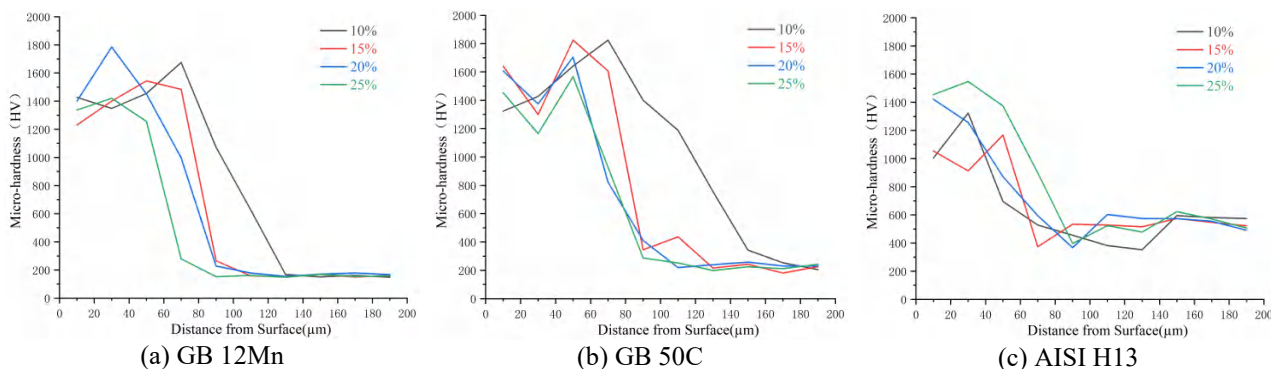


Fig. 1. Hardness of Surface

对于 GB 12Mn 钢 (图 1a), 当 FeSi 浓度为 10% 时, 表层硬度最高, 达到 1427 HV, 渗层深度约为 130 μm (硬度降至 168 HV). 随着 FeSi 浓度增加至 15%, 20% 和 25%, 表层硬度略有波动, 分别为 1231 HV, 1400 HV 和 1337 HV, 但渗层深度逐渐减小至约 90 μm . 这表明低碳钢 GB 12Mn 在较低 FeSi 浓度下可获得较厚的硬化层, 而过高的 FeSi 可能抑制硼原子的扩散, 导致渗层减薄.

GB S50C 钢 (图 1b) 在 15% FeSi 时表现出最优异的硬度性能, 表层硬度高达 1641 HV, 渗层深度约 150 μm (硬度降至 216 HV). 当 FeSi 浓度为 10%, 20% 和 25% 时, 表层硬度分别为 1323 HV, 1607 HV 和 1453 HV, 渗层深度分别为 150 μm , 110 μm 和 90 μm . 可见, 15% FeSi 是该钢种获得高硬度和深厚渗层的最佳配比, 可能与中碳钢在适宜硼硅活性下形成致密硼化物层有关.

AISI H13 钢 (图 1c) 的表层硬度随 FeSi 浓度增加而持续上升, 从 10% 时的 1004 HV 升至 25% 时的 1455 HV, 但渗层深度较浅, 均在 90~110 μm 范围内, 且硬度分布不均匀, 在 20% FeSi 时甚至出现硬度异常回升现象 (90 μm 处 367 HV, 110 μm 处 603 HV). 这可能归因于 H13 钢中高含量的 Cr, Mo 等合金元素在渗层形成过程中与硼, 硅相互作用, 导致局部组织复杂化, 影响了渗层的均匀性和深度.

综上所述, FeSi 浓度对三种钢材的硬度特性影响各异: GB 12Mn 在低 FeSi 浓度下获得最佳硬度与渗层深度; GB S50C 在 15% FeSi 时综合性能最优; 而 AISI H13 需较高 FeSi 浓度才能获得高表层硬度, 但渗层较薄且均匀性欠佳. 实际应用中需根据钢材牌号和使用要求选择合适的渗剂配比.

4 结论

1. FeSi 浓度对三种钢材的耐腐蚀性能影响显著. 随着 FeSi 浓度从 10% 增加至 25%, 三种钢材在 10% H_2SO_4 溶液中的腐蚀质量损失率均呈上升趋势. 其中 GB 12Mn 的耐腐蚀性能最佳 (失重率 0.87%~1.41%), AISI H13 最差 (14.63%~42.87%), GB S50C 居中. 这表明低碳钢 GB 12Mn 更适宜采用硼硅共渗工艺提升耐蚀性.

2. 硼硅共渗处理使三种钢材均获得优异的高温抗氧化性能. 在 800°C 氧化 8h 后, 所有试样的质量损失率均低于 0.04%, 其中 GB 12Mn 在 25% FeSi 时表现最佳 (失重率 0.006%). FeSi 浓度对高温抗氧化性能的影响相对较小.

3. FeSi 浓度对渗层硬度特性影响显著, 且不同钢材呈现不同规律:

(一) GB 12Mn 在 10% FeSi 时获得最高表层硬度 (1427 HV) 和最厚渗层 (约 130 μm);

(二) GB S50C 在 15% FeSi 时综合性能最优, 表层硬度达 1641 HV, 渗层深度约 150 μm ;

(三) AISI H13 表层硬度随 FeSi 增加持续上升, 25% 时达 1455 HV, 但渗层较薄且均匀性欠佳.

4. 综合考虑耐腐蚀性, 抗高温氧化性和硬度特性, 推荐工艺参数如下: GB 12Mn 宜采用 10% FeSi, GB S50C 宜采用 15% FeSi, AISI H13 可根据使用需求选择较高 FeSi 浓度 (20%~25%) 以获得高表层硬度.

5. 后续研究可进一步分析渗层物相组成及微观结构, 深入揭示 FeSi 浓度对渗层形成机制及性能影响的内在机理.

References

- [1] Jianjun H., Jing Z., et al. Microstructures and Wear Resistance of Boron-Chromium Duplex-Alloyed Coatings Prepared by a Two-Step Pack Cementation Process. *Coatings* 2019, 9(9), 529.
- [2] Michalski J., Marszalek J., et al. An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials. *Coatings* 2000, 240, 168-179.
- [3] Kul M., Danaci I., et al. Effect of boronizing composition on hardness of boronized AISI 1045 steel. *Materials Letters*, 2020, 279, 128510.
- [4] Zemskov, G.V., Kaidash, N.G. Borosiliconizing iron and steel. *Metal Science and Heat Treatment*. 1964, 6(3), 179-181.
- [5] Ivanov, S.G., Guryev, A.M. et al. Study of the Effect of Thermal Diffusion Borosiliconizing on the Structure and Properties of the 30KhGSA Steel. *Tech. Phys.* 2023, 68, 228-231.
- [6] Quan Z., Shunqi M., et al. Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing. *Ceramics International*, 2024, 50(6), 8760-8776.
- [7] Lygdenov B.D., Guriev A.M., Mosorov V.I., Butukhanov V.A. Promising diffusion coatings. Raleigh, North Carolina, 2015.
- [8] Mei S., Zhang Y., Zheng Q., Fan Y., Lygdenov B., Guryev A. Compound boronizing and its kinetics analysis for H13 steel with rare earth CeO_2 and Cr_2O_3 . *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022. T.12. № 7.