

# 包钢高性价比低合金锌铝镁镀层产品的开发与应用

王鹏飞<sup>1</sup>, 张晓龙<sup>2</sup>

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢冷轧板材厂, 内蒙古 包头 014010;  
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢板材厂, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 文章针对 S350GD + ZAM、S450GD + ZAM 锌铝镁结构钢, 在生产中存在热轧原料强度偏高、酸轧辊耗大、轧机易打滑、屈服强度波动大、成本偏高等问题, 通过优化 Mn、Ti、N 强化元素成分控制范围, 采用分阶段工业试验与性能闭环调控方法, 系统地研究了成分调整对钢材力学性能及生产成本的影响。结果表明: 优化后两类产品力学性能均满足标准要求, S350GD + ZAM 性能达标率由 96.4% 提升至 98.7%, S450GD + ZAM 屈服强度余量充足、达标率为 98.2%; 2024 年两类产品累计降本 74.932 万元, 有效解决生产瓶颈, 实现降本增效, 为锌铝镁镀层结构钢低成本稳定生产提供可复制的工业化技术路径。

**关键词:** 锌铝镁结构钢; 成分优化; 力学性能; 降本增效; 工业试验

中图分类号: TG146

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2026)03 - 0041 - 04

## Development and Applications of Cost-effective Low Alloy Products with Zn-Al-Mg Coating of Baotou Steel

Wang Pengfei<sup>1</sup>, Zhang Xiaolong<sup>2</sup>

- (1. Cold Rolled Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;  
2. Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In the paper, the effects of composition adjustment on mechanical properties and production costs of steel are systematically studied through optimizing the composition control range of such strengthening elements as Mn, Ti and N as well as adopting staged industrial tests and regulating methods of closed-loop characteristics aiming at such problems as higher strength of raw materials in hot rolling, more roll consumption of pickling line tandem cold mill, easy slipping of rolling mill, large fluctuation of yield strength and higher costs in the production of S350GD + ZAM and S450GD + ZAM Zn-Al-Mg structural steels. The results showed that the mechanical properties of both products could meet standard requirements after optimization, rate of reaching the standard for properties of S350GD + ZAM was increased from 96.4% to 98.7%, allowance of yield strength for S450GD + ZAM was sufficient and its rate of reaching the standard was 98.2%; accumulated cost reduction of them in 2024 was RMB 749,320 Yuan so that production bottleneck was effectively broken as well as cost decreasing and benefit increasing were realized, which could provide reproducible industrial technical path for low-cost and stable productions of structural steel with Zn-Al-Mg coating.

**Key words:** Zn-Al-Mg structural steel; composition optimization; mechanical properties; cost decreasing and benefit increasing; industrial test

收稿日期: 2025 - 12 - 17

作者简介: 王鹏飞(1987 -), 男, 内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗人, 高级工程师, 现从事材料成型及控制工程专业工作。

锌铝镁合金镀层钢板具有优异的耐腐蚀性、成型性及焊接性能,广泛应用于建筑、家电、交通运输等领域。包钢在规模化生产 S350GD + ZAM、S450GD + ZAM 锌铝镁结构钢过程中,发现 S350GD + ZAM 存在热轧原料强度高、酸轧工序辊耗大、轧机易打滑等问题;S450GD + ZAM 存在屈服强度波动大、整体强度偏高等问题,两类产品生产成本偏高。

1 试验材料

试验材料为包钢生产的 S350GD + ZAM(厚度 0.60 ~ 2.50 mm)与 S450GD + ZAM(厚度 1.45 ~ 2.50 mm)锌铝镁结构钢。以常规生产的非试验钢为对照基准,重点优化元素为 Mn、Ti、N,降低昂贵强化元素用量,严格控制有害元素影响<sup>[1]</sup>。

2 实验方法

试验钢经炼钢、连铸、热轧、酸轧等工序生产后,抽样检测化学成分(Mn、Ti、N,单位:%)及力学性能,包括屈服强度  $R_{el}$ (MPa)、抗拉强度  $R_m$ (MPa)、伸长率  $A$ (%),统计性能达标率,对比分析成分调整对性能及成本的影响<sup>[2]</sup>。

3 实验方案

3.1 S350GD + ZAM 试验方案

生产锌铝镁结构钢 S350GD + ZAM 的过程中,热轧原料卷强度高、酸轧工序的轧制力较大,出现辊耗大、轧机打滑现象。通过降低热轧原料强度改善上述现象。根据该产品实际强度范围,同时结合我厂降本需求,通过降低 S350GD + ZAM 强化元素成分,即 Mn 元素目标值从 0.70% 降低到 0.60%;为稳定产品强度范围 Ti 元素内控范围由 0.040% ~ 0.055% 优化为 0.040% ~ 0.050%、N 元素增加内控范围(不大于 0.005 5%)。

第一阶段锰含量由 0.70% 降低至 0.60%,试验计划执行日期 2024 年 1 ~ 3 月,试验总量 22 218 t。由于在内控范围内的试验钢屈服强度占比不足(实际为 96.4%,要求不小于 98%);第二阶段调整试验方案为锰含量由 0.70% 降低至 0.60%、钛含量内控范围由 0.040% ~ 0.055% 调整为 0.040% ~ 0.050%、增加氮含量内控范围 $\leq 0.005 5\%$ 。

本次 S350GD + ZAM 性能检测屈服强度(MPa)、伸长率(%)、抗拉强度(MPa)等主要性能指标,测试性能结果见图 1。

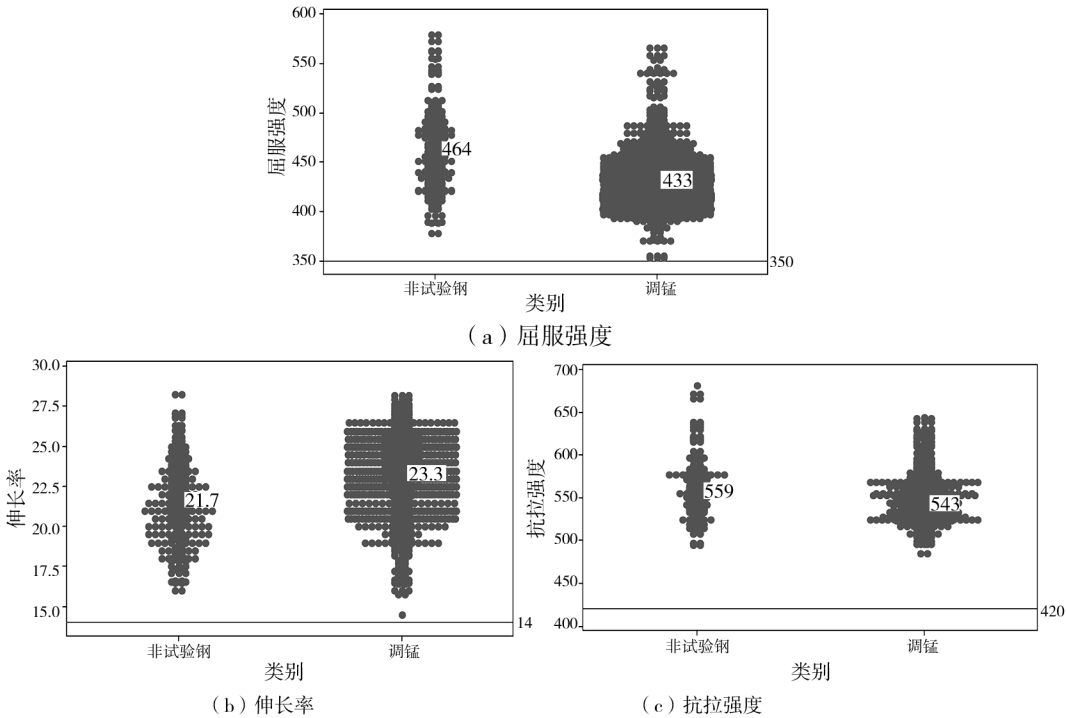


图 1 S350GD + ZAM 性能检测

3.2 S450GD + ZAM 试验方案

锌铝镁结构钢 S450GD + ZAM,屈服强度波动范围大、整体屈服强度偏高,计划通过调整化学成分予以改善,即锰元素目标值从 0.75% 降低到 0.70%,增加氮元素内控范围即 $\leq 0.006\ 0\%$ 。采用分阶段工业试验方式,根据产品性能反馈动态调整成分参数:锰含量由 0.75% 降低至 0.65%、增加氮含量内控范围 $\leq 0.005\ 0\%$ 。试验计划执行日期 2024 年 2 ~ 5 月,试验总量 2 047 t,力学性能均满足要求。屈

服强度为 452 ~ 622 MPa、抗拉强度为 569 ~ 690 MPa、伸长率 14.0% ~ 24.2% (处于屈服强度 450 ~ 620 MPa 范围的比例为 97.3%)。由于最小屈服强度余量较小,调整试验方案为锰含量由 0.75% 降低至 0.70%、增加氮含量内控范围 $\leq 0.006\ 0\%$ 。

本次 S450GD + ZAM 性能检测屈服强度 (MPa)、伸长率 (%)、抗拉强度 (MPa) 等主要性能指标,测试性能结果见图 2。

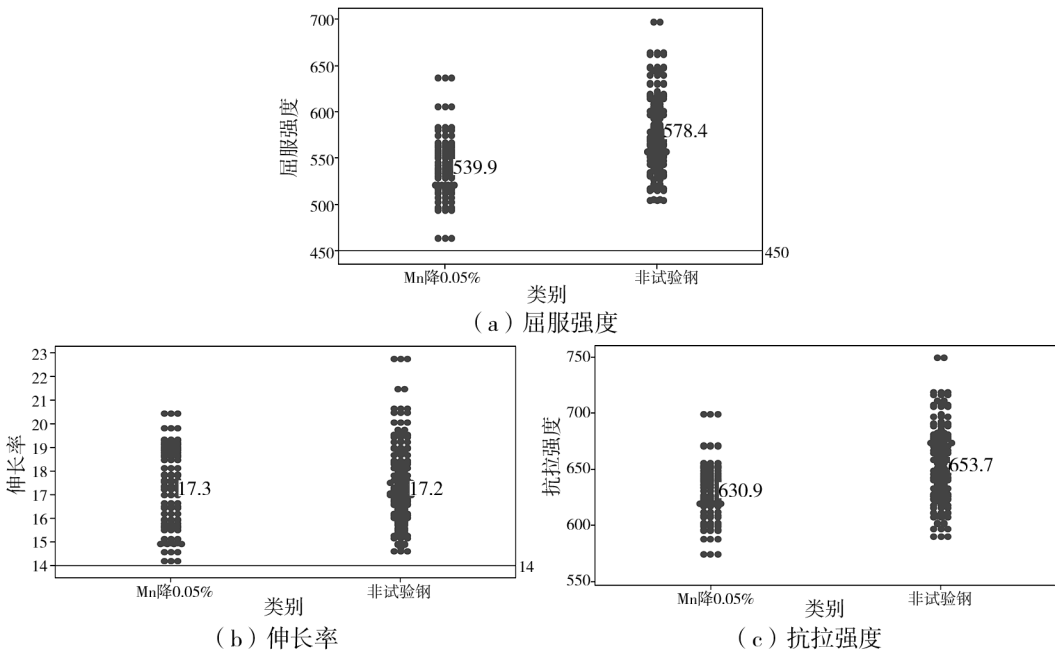


图 2 S450GD + ZAM 性能检测

4 试验结果

4.1 S350GD + ZAM 降本试验结果

(1)化学成分控制效果:第一阶段试验钢平均 Mn 含量较非试验钢降低 0.10%,第二阶段 Mn 含量稳定在 0.55% ~ 0.69%,Ti 含量控制在 0.040% ~ 0.050%,N 含量 $\leq 0.005\ 5\%$ ,均满足调整要求<sup>[3]</sup>。

2024 年炼钢工序生产试验钢 210 炉,实际 Mn 含量为 0.55% ~ 0.69% (试验计划要求 0.55% ~ 0.70%)、实际 Ti 含量 0.040% ~ 0.050% (试验计划要求 0.040 ~ 0.050%)、实际 N 含量为 0.000 9% ~ 0.005 5% (试验计划要求不大于 0.005%)。试验钢相较非试验钢平均 Mn 含量降低 0.1%、平均 Ti 含量降低 0.03%。N 含量由于新增检测内容没有对

比数据。N 含量优化理论依据为:S350GD + ZAM 成分设计主要为 C、Mn 固溶强化,Ti 微合金析出强化,其中以 Ti 微合金析出强化最为显著。Ti 元素强化作用主要是形成 TiC,在连铸、热轧、退火等过程中析出,起到细晶、析出强化作用。N 元素会与 Ti 元素形成 TiN,在炼钢过程中析出,形成夹杂并影响起强化作用 Ti 的含量。为提高 Ti 元素强化作用及强化稳定性,需严格控制 N 元素含量。

(2)力学性能变化:两阶段试验钢力学性能均符合质量计划 ( $R_{el} \geq 350\ \text{MPa}$ 、 $R_m \geq 420\ \text{MPa}$ 、 $A \geq 14\% \sim 16\%$ )。第一阶段平均屈服强度降低 31 MPa、抗拉强度降低 16 MPa、伸长率提高 1.6%,屈服强度达标率 96.4%;第二阶段优化后,平均屈服强度进一步降低 52 MPa、抗拉强度降低 27 MPa、

伸长率提高 2.3%, 达标率提升至 98.7%, 满足预期指标。

第一阶段锰含量由 0.70% 降低至 0.60%, 试验计划执行日期 2024 年 1~3 月, 试验总量 22 218 t, 力学性能均满足要求。屈服强度 353~565 MPa、抗拉强度 484~644 MPa、伸长率 14.5%~28.2% (处于屈服强度 360~490 MPa 范围比例 96.4%)。由于在内控范围内的试验钢屈服强度占比不足 (实际 96.4%, 要求不小于 98%)。第二阶段调整试验方案, 锰含量由 0.70% 降低至 0.60%、钛含量内控范围由 0.040%~0.055% 调整为 0.040%~0.050%、增加氮含量内控范围不大于 0.005 5%。试验计划执行日期 2024 年 2~12 月, 试验总量 45 320 t, 力学性能均满足要求。屈服强度 360~516 MPa、抗拉强度 486~646 MPa、伸长率 16.18%~28.6% (处于屈服强度 360~490 MPa 范围比例 98.7%)。试验结果满足项目预期指标。

(3) 降本效益: Mn 含量降低 0.1%, 吨钢成本降低 10 元左右 (根据市场价格存在波动), 第一阶段 22 218 t 试制钢实现降本 22.218 万元, 第二阶段 45 320 t 试制钢降本 48.945 万元, 累计降本 71.163 万元, 吨钢平均降本约 10.8 元。

#### 4.2 S450GD + ZAM 降本试验结果

(1) 化学成分控制效果: 第一阶段试验钢平均 Mn 含量降低 0.08%, N 含量  $\leq 0.004 0\%$ ; 第二阶段平均 Mn 含量降低 0.055%, N 含量控制在 0.002 8%~0.004 0%, 成分稳定性良好。

2024 年炼钢工序生产试验钢 6 炉, 实际 Mn 含量 0.65%~0.72% (试验计划要求 0.60%~0.75%)、实际 N 含量 0.003 1%~0.004 0% (试验计划要求  $\leq 0.005 0\%$ )。试验钢相较非试验钢平均 Mn 含量降低 0.08%。N 含量由于新增检测内容没有对比数据, N 含量优化理论依据为: S450GD + ZAM 成分设计主要为 C、Mn 固溶强化, Ti 微合金析出强化, 其中已 Ti 微合金析出强化最为显著。Ti 元素强化作用主要是形成 TiC, 在连铸、热轧、退火等过程中析出起到细晶、析出强化作用。N 元素会与 Ti 元素形成 TiN, 在炼钢过程中析出形成夹杂并影响起强化作用 Ti 的含量。为提高 Ti 元素强化作用及强化稳定性, 需严格控制 N 元素含量。

(2) 力学性能变化: 试验钢均满足质量要求 ( $R_{el} \geq 450$  MPa,  $R_m \geq 510$  MPa,  $A \geq 14\%$ )。第一阶

段平均屈服强度降低 52 MPa、抗拉强度降低 35 MPa、伸长率提高 2.0%, 但最小屈服强度余量仅 2 MPa; 第二阶段调整后, 平均屈服强度降低 38 MPa、抗拉强度降低 23 MPa, 屈服强度余量显著提升, 达标率达 98.2%。

第一阶段锰含量由 0.75% 降低至 0.65%、增加氮含量内控范围不大于 0.005 0%。试验计划执行日期 2024 年 2~5 月, 试验总量 2 047 t, 力学性能均满足要求。屈服强度 452~622 MPa、抗拉强度 569~690 MPa、伸长率 14.0%~24.2% (处于屈服强度 450~620 MPa 范围比例为 97.3%)。由于最小屈服强度余量较小, 调整试验方案锰含量由 0.75% 降低至 0.70%、增加氮含量内控范围不大于 0.006 0%。试验计划执行日期 2024 年 10~12 月, 试验总量 1 397 t, 力学性能均满足要求。屈服强度 463~636 MPa、抗拉强度 574~699 MPa、伸长率 14.2%~20.4% (处于屈服强度 450~620 MPa 范围比例 97.8%)。

(3) 降本效益: 2024 年累计试制 3 444 t, 实现降本 3.769 万元, Mn 含量每降低 0.05%, 吨钢成本降低约 5 元。

## 5 结论

通过优化化学成分, S350GD + ZAM (Mn = 0.60%、Ti 含量为 0.040%~0.050%、N 含量不大于 0.005 5%) 与 S450GD + ZAM (Mn 含量为 0.70%、N 含量不大于 0.006 0%) 的力学性能均满足质量计划要求, 解决了原工艺中辊耗大、强度波动的问题。2024 年两类产品累计降本 74.932 万元, 降本效果显著, 其中 S350GD + ZAM 试制规模更大, 降本贡献突出。分阶段动态调整成分的试验方法, 既保证了降本目标实现, 又通过性能反馈优化参数, 为同类锌铝镁钢产品的降本工艺优化提供了可复制的技术路径。

## 参 考 文 献

- [1] 中国钢结构协会. 钢结构用高强度钢板应用技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [2] 王先进. 热镀锌及锌合金镀层钢板生产与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2018.
- [3] GB/T 223.63—2022, 钢铁及合金化学分析方法[S].