

低Al和高Al两种成分体系合金化热镀锌DP780性能对比

杜小峰¹, 陈园林², 杨 芑², 杜 蓉¹

¹宝钢股份中央研究院(武钢有限技术中心), 湖北 武汉

²宝钢股份武汉钢铁有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年8月23日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月28日

摘 要

针对传统DP780, 本文采用Al元素替代部分Cr元素, 在相同热轧温度、冷轧压下率、退火温度等生产工艺条件下, 完成了低Al与高Al两种成分体系DP780合金化镀锌板生产试制, 并对其性能进行了详细对比。结果表明, 高Al系DP780与低Al系DP780相比, 基体微观组织更加均匀, 横纵向性能差异更小, 扩孔性能更优, 且对合金化镀层无影响。因此, 用适量Al元素替代部分Cr元素, 不仅可以明显降低成本, 还有效提升了DP780综合性能。

关键词

双相钢, DP780, 合金化镀锌, 组织, 扩孔性能

The Comparison of Properties between Low-Al and High-Al Annealed Hot-Dip Galvanizing DP780

Xiaofeng Du¹, Yuanlin Chen², Peng Yang², Rong Du¹

¹Baosteel Central Research Institute (R & D Center of Wuhan Iron and Steel Company Limited), Wuhan Hubei

²Baosteel Wuhan Iron and Steel Company Limited, Wuhan Hubei

Received: Aug. 23rd, 2022; accepted: Sep. 20th, 2022; published: Sep. 28th, 2022

Abstract

For traditional DP780, this paper uses Al element to replace part of Cr element. Under the same

production process conditions as hot rolling temperature, cold rolling reduction rate and annealing temperature, the trial production of DP780 annealed galvanized sheet with low Al and high Al component was completed, and its properties were compared in detail. The results show that when comparing high Al series DP780 with low Al series DP780, the matrix microstructure is more uniform, the difference in transverse and longitudinal properties is smaller, the hole expansion performance is better, and it has no effect on the alloyed coating. Therefore, replacing some Cr elements with an appropriate amount of Al elements can not only significantly reduce the cost, but also effectively improve the comprehensive performance of DP780.

Keywords

Dual Phase Steel, DP780, Galvannealing, Structure, Hole Expansion Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双相钢(Dual Phase Steel, 简称 DP 钢)以马氏体等第二相粒子分布于铁素体基体中, 具有低屈强比、高强度、易成型、初始加工硬化指数高等特点[1], 广泛应用于汽车纵横梁、A 柱、B 柱及其它车身结构件上。双相钢的主要成分为 C 和 Mn, 通常添加的合金元素有 Cr、Mo、Si、Ti、Nb 等, 组织为铁素体和马氏体, 在具有较高强度的同时, 也具有较好的成形性能, 非常适合冲压那些对强度和成形性均有较高要求的汽车零部件。

合金化热镀锌钢板(简称 GA 钢板), 相比纯锌板, 其具有更优良的耐蚀性、涂装性和焊接性能, 已越来越多地应用于日系汽车车身上。随着汽车轻量化的不断发展以及乘员安全性要求的不断提高, 近年来高强钢在日系汽车白车身中的比例逐渐增大, 而合金化热镀锌双相钢因其优良的性能, 广泛应用在日系汽车零部件上。

目前冷轧双相钢的成分设计广泛采用较高的 Si, 其 Si 含量普遍在 0.4% 以上[2], 但 Si 元素容易在表面氧化富集, 影响镀锌质量, 只适合连退产品。因此, 合金化热镀锌双相钢通常添加 Cr、Mo 元素增加淬透性, 以获得铁素体+马氏体双相组织。但 Cr 元素价格贵, 合金成本较高。为降低生产成本, 本论文采用 Al 元素替代部分 Cr 元素进行生产试制, 并对两种体系 DP780 性能进行了详细对比。

2. 试验材料与方法

试制钢 DP780 分别采用低 Al 系(不添加 Al)和高 Al 系(以 Al 替 Cr)两种成分体系, 其化学成分如表 1 所示。采用 Quanta 400 扫描电子显微镜对其形貌进行观察, 采用 Neophotz 金相显微镜对其金相组织进行观察, 样品均沿轧制方向进行观察。力学性能实验在 WE-60 万能拉伸机上进行, 拉伸试样加工成横向试样, 试样宽度 b 为 20 mm, 标距 L₀ 为 80 mm。镀层 Fe 含量采用等离子体发射光谱法(ICP)进行测量, 采用直径 10 mm 冲头冲制原始孔, 然后使用 60°圆锥冲头进行扩孔试验。

两种成分体系 DP780 试制钢生产工艺保持一致, 其关键工艺点控制如下: 热轧板坯加热温度 $\geq 1200^{\circ}\text{C}$, 终轧温度 $\geq 880^{\circ}\text{C}$, 卷取温度 $\leq 650^{\circ}\text{C}$; 冷轧压下率 62%, 成品厚度 1.6 mm, 热镀锌退火温度 800°C , 合金化温度 500°C 。

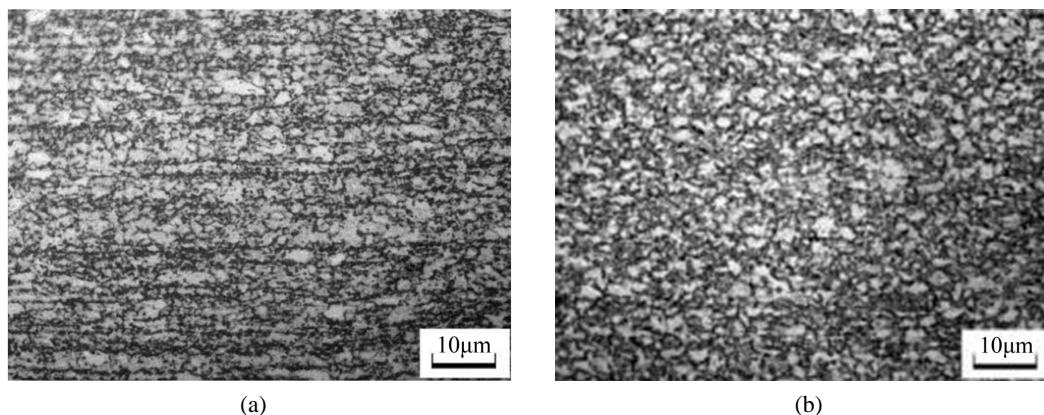
Table 1. Chemical composition (wt%) of low-Al and high-Al DP780 (wt%)**表 1.** 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 的化学成分(wt%)

试制钢	C	Si	Mn	Als	Cr	Mo	Nb
低 Al 系 DP780	0.09	0.03	1.80	0.03	0.40	0.20	0.01
高 Al 系 DP780	0.09	0.03	1.90	0.60	0.20	0.20	0.01

3. 结果与讨论

3.1. 金相组织

图 1 为两种成分体系 DP780 试制钢的金相组织, 可见高 Al 系双相钢基体组织均匀, 马氏体均匀分布在铁素体晶界; 而 Cr 含量较高的低 Al 系双相钢存在轻微带状组织。钢种冶炼连铸坯在凝固过程中, 由于钢中各元素的扩散速度不一样, 容易产生枝晶偏析。碳元素容易均匀扩散, 而其他合金元素扩散较困难且不容易均匀化[3]。从表 1 可知, 低 Al 系试制钢 Cr 含量远高于高 Al 系试制钢, Cr 与 Mn 元素加重原始偏析, 从而更易形成带状组织。

**Figure 1.** The metallographic structure of DP780 with low Al and high Al. (a) Low Al system; (b) High Al system**图 1.** 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 金相组织。(a) 低 Al 系; (b) 高 Al 系

分别选取 20 张不同位置金相照片, 对 DP780 铁素体晶粒尺寸和马氏体体积分数进行统计, 最后求平均数, 分析结果如表 2 所示。可见两者马氏体体积分数相差不大, 但高 Al 系铁素体晶粒尺寸较低 Al 系小。这是由于, Al 元素是很强的固溶元素, 容易与钢中的 N 元素形成 AlN 沉淀相, 从而细化奥氏体晶粒。同时, 研究表明[4], Al 元素能够有效扩大两相区温度窗口, 有利于实际退火过程中高温段相比例的调控, 同时整体马氏体相变温度区间上移。因此, 高 Al 系 DP780 生产工艺窗口更大, 更有利于大生产控制。

Table 2. Statistical results of ferrite and martensite of DP780 with low Al and high Al compositions**表 2.** 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 铁素体和马氏体统计结果

试制钢	铁素体晶粒尺寸/ μm	马氏体体积分数(%)
低 Al 系	2.03	33.7
高 Al 系	1.72	32.5

3.2. 力学性能

表 3 是两种成分体系 DP780 试制钢的力学性能, 两种试验钢均能满足力学性能要求, 相比低 Al 系

DP780, 高 Al 系 DP780 横向和纵向性能差异性更小。这是因为, 低 Al 系试制钢存在较多带状组织, 组织均匀性较差, 从而导致横向和纵向屈服强度和抗拉强度差别较大。且低 Al 系纵向抗拉强度偏下限, 当生产工艺存在波动时, 可能导致纵向抗拉强度不合。对于纵向使用的用户, 高 Al 系 DP780 更加适用。

Table 3. Mechanical properties of DP780 with low Al and high Al compositions

表 3. 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 力学性能

试制钢	方向	屈服强度(MPa)	抗拉强度(MPa)	延伸率(%)	n 值(10%~20%)
低 Al 系	轧向(0°)	478	796	18.0	0.12
	横向(90°)	499	825	16.0	0.11
高 Al 系	轧向(0°)	475	816	18.0	0.12
	横向(90°)	470	822	18.0	0.12

3.3. 合金化镀层结构

两种成分体系 DP780 试制钢的合金化镀层表面及截面形貌如图 2 所示, 可见两者表面均由 δ 相和少量 ζ 相构成, 截面 γ 相厚度也均在 $1\ \mu\text{m}$ 以下, 未见明显差异。镀层中 Fe 含量如表 4 所示, 均在 9%~10% 之间, 且在操作侧(W.S.)、中部(Center)、传动侧(D.S.), 即钢板边中边不同位置 Fe 含量波动较小, 合金化程度均匀性良好。由此可知, 两种成分体系 DP780 试制钢均可满足合金化镀层要求。

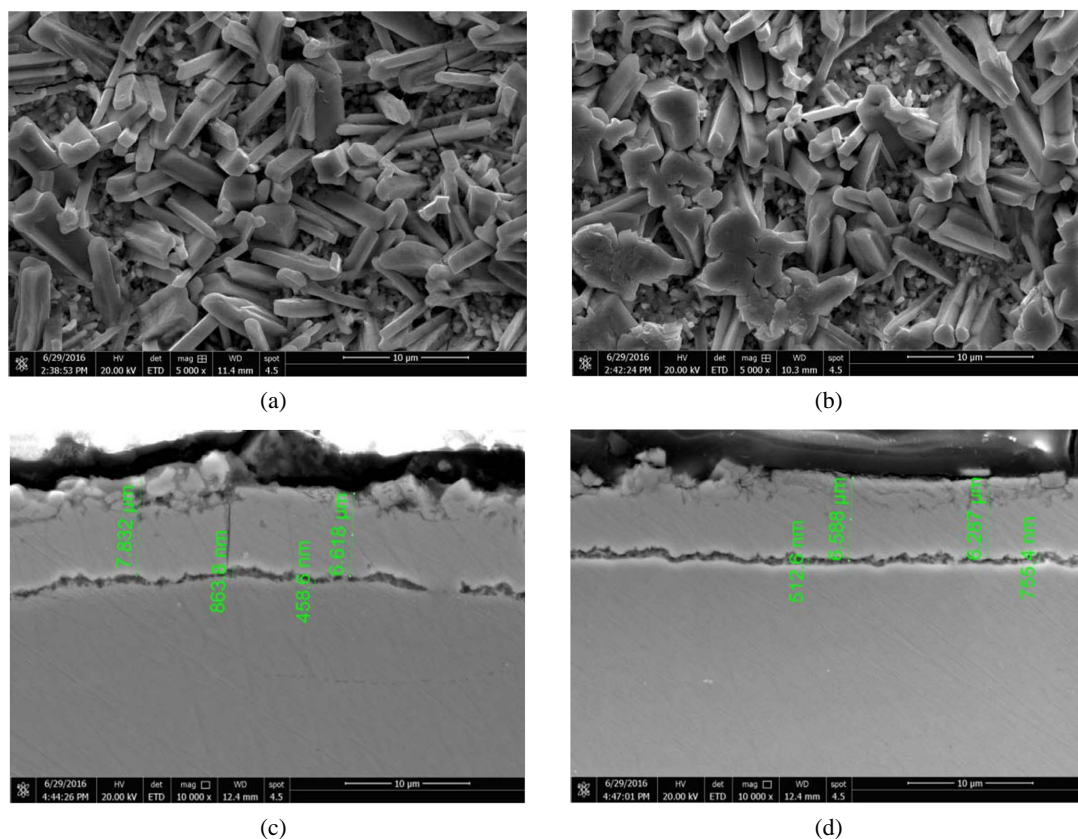


Figure 2. Surface and cross-sectional morphologies of DP780 coatings with low Al and high Al systems. (a) Low Al system; (b) High Al system

图 2. 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 镀层表面及截面形貌。(a) 低 Al 系; (b) 高 Al 系

Table 4. Fe content in of DP780 alloyed coatings with low Al and high Al systems (%)**表 4.** 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 合金化镀层中 Fe 含量(%)

试制钢	W.S.	Center	D.S.
低 Al 系	9.36	9.48	9.52
高 AL 系	9.76	9.77	9.84

3.4. 扩孔性能

双相钢在使用过程中的一个主要问题是随着强度的升高, 其塑性成形性能会急剧下降, 给零件的设计制造带了一定的难度, 主要表现在成形过程中对模具的磨损较重, 冲压时常有开裂, 尤其翻边和扩孔开裂最为常见。而扩孔和翻边工艺是 DP780 冲压成形中常见的加工类型, 因这两种成形工艺导致的开裂是零件失效的主要表现, 扩孔性能的好坏在很大程度上决定了双相钢的使用性能[5] [6] [7]。

Table 5. Hole expansion performance of DP780 with low Al system and high Al system (%)**表 5.** 低 Al 系和高 Al 系两种成分体系 DP780 扩孔性能(%)

试制钢	W.S.	Center	D.S.
低 Al 系	24.2	25.4	25.8
高 AL 系	34.2	34.5	35.6

表 5 是两者扩孔性能比较, 可见高 Al 系 DP780 扩孔性能优于低 Al 系扩孔性能, 这与添加 Al 元素后铁素体晶粒尺寸更小、组织均匀性更好有关。因此, 采用 Al 元素替代 Cr 元素, 可有效改善材料的扩孔性能。

4. 结论

- 1) 添加 Al 元素后, 高 Al 系 DP780 铁素体晶粒尺寸变得更为细小, 带状组织消失, 组织均匀性较低 Al 系更好。
- 2) 两种成分体系 DP780 合金化镀层结构一致, 可见添加适量的 Al 元素对合金化镀层没有明显影响。
- 3) 高 Al 系 DP780 相较于低 Al 系 DP780, 其横纵向性能差异更小, 扩孔性能更优, 适用范围更广; 因此, 用适量 Al 元素替代部分 Cr 元素, 不仅可以明显降低成本, 还有效提升了产品综合性能。

参考文献

- [1] 潘恩宝, 邸洪双, 鲍成人. 热镀锌双相钢的发展和应[J]. 钢铁研究, 2010(4): 56-59.
- [2] 詹 华, 潘红波, 刘永刚, 等. 合金元素与退火工艺对冷轧双相钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2015, 40(5): 20-24.
- [3] 张博睿, 管传华, 陈红雨. 热轧工艺对低合金结构钢带状组织的影响[J]. 山东冶金, 2019, 41(3): 34-41.
- [4] 冷德平, 肖洋洋, 卢茜倩, 等. 合金元素 Al 对 C-Si-Mn 系高强钢高温热力学影响[J]. 科技视界, 2020(22): 68-70.
- [5] 祝洪川, 王有禄, 魏星, 等. 450-780MPa 系列双相钢扩孔性能实验[J]. 精密成形工程, 2017, 9(6): 27-31.
- [6] Terrazas, O.R., Findley, K.O. and Van Tyne, C.J. (2017) Influence of Martensite Morphology on Sheared-Edge Formability of Dual-Phase Steels. *ISIJ International*, **57**, 937-944.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-602>
- [7] Karelova, A., Kremaszky, C. and Wernere, E. (2010) Hole Expansion of Dual-Phase and Complex-Phase AHS Steels-Effect of Edge Conditions. *Steel Research International*, **80**, 71-77.