汽车结构件用镀锌热成形钢性能分析

李小艳[1] 龙袁[2] 付参[2] 张忠伟[1] 曹凯[3] 青靓[3]

（1.重庆长安汽车股份有限公司，重庆 400000；2.首钢集团有限公司技术研究院，北京 100043；3.北京首钢股份有限公司，北京 100043）

摘要：为研究镀锌热成形钢应用性能，从焊接、胶接、涂装、热冲压等方面对纯锌镀层热成形钢进行使用性能分析，并将部分使用性能与铝硅镀层热成形钢进行对比分析。结果表明，镀锌热成形钢具有良好的点焊、胶接和涂装性能，与铝硅镀层热成形钢使用性能相当，其中，纯锌镀层电泳耐蚀性能明显优于铝硅镀层，能更好地提升车身防腐性能；镀锌热成形钢热冲压性能良好，成形后未出现开裂，且镀层下微裂纹深度小于10 μm；在现有工况下，镀锌热成形钢可获得良好的冲压、胶接、焊接、涂装性能。

关键词：热成形钢 镀锌 焊接 胶接 耐蚀

中图分类号：U465.2 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250294

Performance Analysis of Galvanized Hot-Formed Steel for Automotive Structural Components

Li Xiaoyan[1], Long Yuan[2], Fu Can[2], Zhang Zhongwei[1], Cao Kai[3], Qing Jing[3]

(1. Chonging Chang'an Automobile Co., Ltd., Chongqing 400000; 2. Technology Research Institute of Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043; 3. Beijing Shougang Co., Ltd., Beijing 100043)

Abstract: To study the application performance of galvanized hot-formed steel, the usage performance of pure zinc-coated hot-formed steel is analyzed from aspects such as welding, bonding, coating, and hot stamping. Some of the usage performances are compared and analyzed with those of aluminum-silicon-coated hot-formed steel. The results show that the galvanized hot-formed steel has excellent spot welding, bonding and painting performance, which is comparable to that of the Al-Si coated hot-formed steel. Among them, the electrophoretic corrosion resistance of the pure zinc coating is significantly better than that of the Al-Si coating, which can better improve the anti-corrosion performance of the vehicle body. The hot stamping performance of the galvanized hot-formed steel is good, and no cracking occurs after forming, and the depth of the micro-cracks under the coating is less than 10 μm. Under the existing working conditions, the galvanized hot-formed steel can obtain good stamping, bonding, welding and painting performance.

Key words: Hot-formed steel, Galvanized, Welding, Adhesive bonding, Corrosion resistant

1 前言

热成形钢零件在汽车车体结构件上应用十分广泛，主要包括横向支撑梁、悬置固定梁、纵向承载梁、前缓冲梁、A柱、B柱、门槛及车顶侧梁等[1-2]。热成形钢主要包括热成形钢裸板、铝硅镀层热成形钢和锌基镀层热成形钢，其中，锌基热成形钢包括纯锌镀层热成形钢和锌铁合金镀层热成形钢[3]。

在汽车轻量化趋势下，为突破铝硅镀层的专利限制并进一步提升钢板耐腐蚀性能，奥钢联公司于2008年成功研制锌基镀层热成形钢。但锌基镀层在热处理过程中存在锌蒸发、氧化以及液态金属脆化问题，一直制约该材料商业

作者简介：李小艳（1982—），女，工程师，学士学位，研究方向为汽车材料开发与技术研究，lixy2@changan.com.cn。

通信作者：龙袁（1990—），男，高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车用材表面处理、涂装及防腐，longyuan.shougang@qq.com。

参考文献引用格式：

李小艳，龙袁，付参，等. 汽车结构件用镀锌热成形钢性能分析[J]. 汽车工艺与材料，2026(4)：58-63.

LI X Y, LONG Y, FU C, et al. Performance Analysis of Galvanized Hot-Formed Steel for Automotive Structural Components[J]. Automobile Technology & Material, 2026(4): 58-63.

化应用[4]。近年来,奥钢联公司从镀层、热成形工艺等方面开展系统研究,解决镀层挥发、镀层高温氧化和液态金属脆化问题,充分发挥锌基镀层热成形钢的优势。基于以上背景,首钢、宝钢,马钢、河钢等国内主流钢厂均已开始对镀锌热成形钢的性能展开研究。李学涛等[3,5]以加热时间、加热速率、保温时间、镀层表面状态为条件分析其对镀锌热成形钢的镀层组织、裂纹及涂装性能的影响。卢岳等[6-7]对镀层表面颜色、胶接性能进行了研究。陈乐等[8]研究了加热工艺对锌铁合金热成形钢镀层组织的影响。刘丽艳等[9-10]研究了钢基体中的Mn元素和锌液中的Al元素对镀层热处理后组织的影响。钢铁企业在锌基镀层热成形钢的开发方面开展了大量工作。

上述研究对锌基热成形钢材料的表面、镀层组织及部分应用性能进行了较为详细的分析,但对材料应用研究较少,如冲压、焊接,胶接、涂装等方面的材料应用性能。因此,本文以纯锌镀层热成形钢为研究对象,并以铝硅镀层热成形钢为对比,研究主机厂关注的纯锌热成形钢在应用过程中的问题。

2　材料和方法

2.1　试验材料

选用国内某钢厂工业化生产的纯锌镀层热成形钢(GI)和铝硅镀层热成形钢(AS),钢板厚度均为1.4 mm,GI镀层厚度为双面140 g/m^2,AS镀层厚度为双面80 g/m^2。

2.2　试验方法

2.2.1　材料微观性能表征

镀层截面微观形貌采用日本电子公司JSM-7001F扫描电镜进行分析,利用其附带的能谱仪(Energy Dispersive Spectrometer,EDS)分析镀层不同位置的元素组成,以确定镀层的各个组成相。

2.2.2　焊接试验方法

按照SEP 1220-2: 2011《Testing and Documentation Guideline for the Joinability of Thin Sheet of Steel-Part 2: Resistance Spot Welding》对GI钢板和AS钢板进行焊接测试。标准中规定,焊核直径大于$4t^{1/2}$(t为钢板厚度)所对应的电流为最小焊接电流I_{min},未发生焊接飞溅的最大电流为I_{max},基于I_{min}和I_{max}确定焊接电流工艺窗口。

使用Zwick-Z100型拉伸试验机按照ISO 14272: 2016《Resistance Welding—Destructive Testing of Welds—Specimen Dimensions and Procedure for Cross Tension Testing of Resistance Spot and Embossed Projection Welds》进行焊点剪切拉伸性能测试,加载速率为10 mm/min。

采用Leica HXD-1000TM型显微硬度测试仪按照ISO 14271: 2017《Resistance Welding—Vickers Hardness Testing (Low-Force and Microhardness) of Resistance Spot, Projection, and Seam Welds》中维氏硬度的测试方法进行硬度测试,试验载荷为500 gf(HV0.5/10),每个测试点横向间距为0.4 mm,测试轨迹如图1所示。

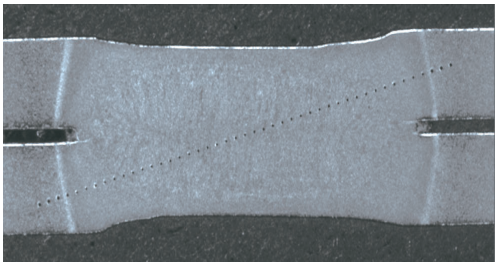


图1　硬度测试轨迹示意

使用浓度为4%的硝酸酒精溶液侵蚀焊点截面金相6~8 s后,通过金相显微镜观察焊点显微组织。

2.2.3　胶接试验方法

测试用材料试样尺寸为25 mm×100 mm,试样表面经脱脂棉擦拭2~3次。测试用胶为某结构胶、点焊密封胶和减震膨胀胶。胶接接头采用单搭接形式,搭接面积为25 mm×12.5 mm,如图2所示。减震膨胀胶和点焊胶胶层的厚度为2 mm,结构胶的厚度为0.2 mm,厚度用不同直径玻璃珠控制,并用蝴蝶夹夹持搭接位置,每组制备3个单搭接接头平行试样。将试样放置于170 ℃的高温烘箱内固化20 min后取出,然后将样片室温静置24 h后进行剪切拉伸测试。使用ZWICK拉伸试验机按照GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》对胶接接头进

行剪切拉伸测试，拉伸速度为5 mm/min，测试后记录断裂界面形貌及剪切强度。每种材料的胶接接头分别进行3组平行试验，剪切强度取平均值。根据GB/T 16997—1997《胶粘剂 主要破坏类型的表示法》，评价剪切破坏位置的破坏类型，包括内聚破坏（CF）、界面破坏（AF）、基材分离破坏（DF）、基材内聚破坏（CSF）等，并计算不同破坏类型的面积比例。

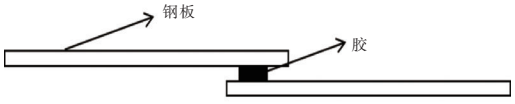


图2 胶接接头截面示意

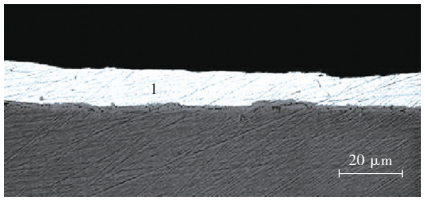
2.2.4 涂装试验方法

测试材料尺寸为100 mm×200 mm×1.4 mm。前处理及电泳在某汽车厂生产线随线完成，磷化前处理液参数为：游离酸FA为0.7 pt，总酸TA为21.5 pt，促进剂AC为4.0 pt，温度为35~40 ℃。电泳参数为：中和当量（Milliequivalents of Electrodeposition Quantification，MEQ）为24.5，pH值为6.0，灰分（Ash Content，ASH）为19.1%，固体份（Non-Volatile，NV）为21.6%，烘干温度为170 ℃。采用上海现代环境工程技术有限公司QFH划格器按照GB/T 9286—2021《色漆和清漆 漆膜的划格试验》进行漆膜附着力测试，采用美国Q-Lab公司Q-FOG循环式腐蚀试验机进行电泳板耐蚀性能测试，检测标准为GMW 14872《Cyclic Corrosion Laboratory Test》。

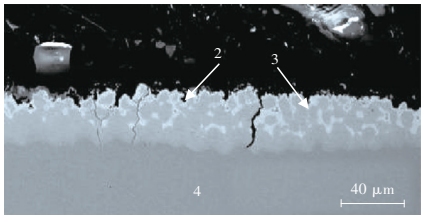
3 试验结果与分析

3.1 镀层性能

纯锌镀层热处理前、后形貌如图3所示。热处理前镀层厚度为9~11 μm，镀层成分中锌含量超过99%。热处理后，由于镀层与铁基体的合金化，镀层厚度增加至25~27 μm，镀层到铁基体分为3个衬度。依据表1结果可知，镀层中发白位置Zn含量为75.33%，Fe含量为24.67%，为Γ相，镀层中发暗位置Zn含量为33.92%，Fe含量为65.27%，并含有少量Mn，为固溶锌的α-Fe(Zn)相；镀层以下主要含Fe及少量Mn，为铁基体。依据不同相的衬度差异可知，Γ相主要分布在镀层上半部分，镀层下半层几乎全为α-Fe(Zn)相。



（a）热处理前



（b）热处理后

图3 镀层热处理前后截面和表面

表1 截面不同位置成分（质量分数） %

位置	Fe	Zn	Mn	Al	相组织
镀锌层1	0.01	99.88		0.11	纯锌相
发白位置2	24.67	75.33			Γ相
浅灰位置3	65.27	33.92	0.81		α-Fe(Zn)相
深灰位置4	97.72		2.28		Fe基体

3.2 点焊性能

3.2.1 焊接窗口

基于SEP 1220-2: 2011，对GI和AS进行了焊接工艺窗口分析，结果如图4所示，GI下限电流I_{min}为5 kA、上限电流I_{max}为6.2 kA，AS下限电流I_{min}为4.8 kA、上限电流I_{max}为6.0 kA，GI上限、下限焊接电流均高于AS，但是两者焊接窗口宽度相同，均为1.2 kA，如图4所示。

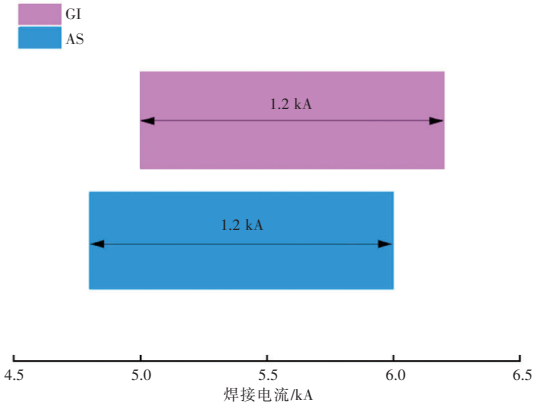


图4 焊接窗口

3.2.2 接头强度

2种材料焊点的最大剪切拉伸力（Tensile

Shear Strength,TSS)测试结果如图5所示。GI在上、下限电流条件下的剪切拉伸最大力均大于AS材料。

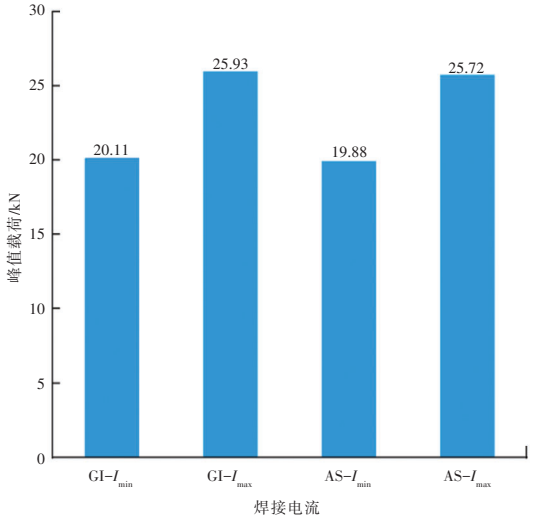


图5　点焊接头强度

3.2.3　焊点硬度分布

焊点硬度测试结果如图6所示,可见2种材料在各自上、下限电流焊接时焊核硬度相近,均在500 HV0.5/10左右。热影响区硬度为300~350 HV0.5/10,低于母材硬度,热影响区存在软化现象。

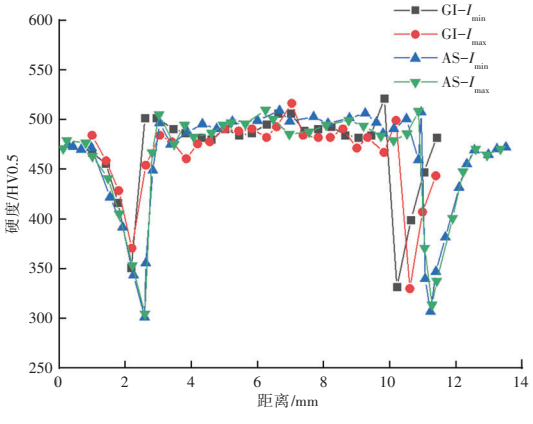


图6　焊点硬度分布

图7中3号位置为母材,该位置没有受到电阻热的影响,微观组织仍为马氏体。焊核区域为图7中1号位置,该区域被加热到Ac3以上温度,马氏体组织完全奥氏体化,在电极压力下快速冷却,晶粒长大,形成粗大的板条马氏体,因此,焊核区域硬度获得提升,高于母材硬度。焊点热影响区如图7中2号位置所示,由于热影响区主要组织为回火马氏体,含有少量碳化物、铁素体、马氏体,因此,该区域发生软化导致硬度低于母材[11-12]。

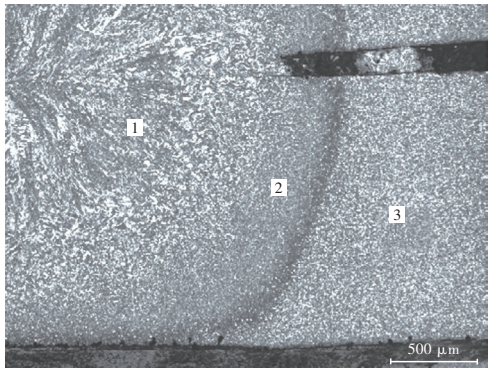


图7　焊点组织分布

3.3　胶接性能分析

GI和AS的3种胶匹配性结果如表2所示。GI与减震胶、点焊胶、折边胶、结构胶的匹配性均较好,内聚断裂(Cohesive Fracture,CF)比例均为100%,与AS相当。可见,纯锌镀层热成形钢在与汽车焊装胶的匹配上不存在限制。

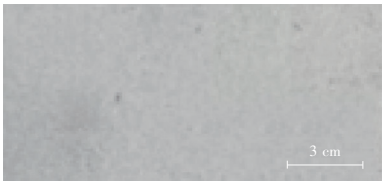
表2　胶接测试结果

胶种类	材料	剪切强度/MPa	剪切断裂模式
点焊密封胶	AS	0.90	100%内聚断裂
	GI	0.89	100%CF
结构胶	AS	30.97	100%CF
	GI	32.19	100%CF
减震膨胀胶	AS	0.42	100%CF
	GI	0.49	100%CF

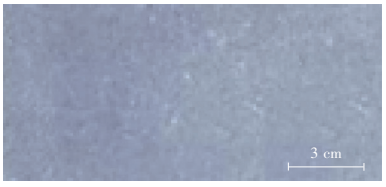
3.4　涂装性能分析

3.4.1　前处理性能

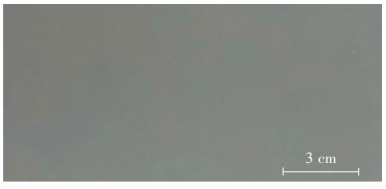
图8所示为GI和AS磷化处理前、后的宏观形貌:GI表面磷化膜均匀、致密、连续,呈深灰色,表面无锈蚀、花斑,无大的磷化渣附着,无严重挂灰,外观质量良好;AS表面呈现为淡蓝色,与磷化前形貌一致。图9所示为GI和AS磷化膜微观形貌:GI磷化膜颗粒尺寸为4~6 μm,表面无露底处,覆盖率为100%;AS表面未发现明显磷化膜上膜痕迹。依据GB/T 9792—2003《金属材料上的转化膜 单位面积膜质量的测定 重量法》配制脱膜溶液,将称量后的磷化板置于脱膜液中,在(75±5)℃温度下浸泡15 min,吹干称量,计算膜重,重复3次取平均值。测得GI磷化膜膜重为2.89 g/m^2,AS膜重近似为0。



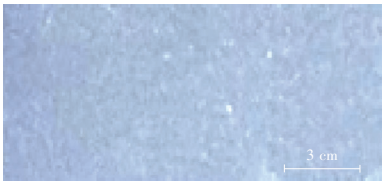
(a)GI磷化前



(b)AS磷化前

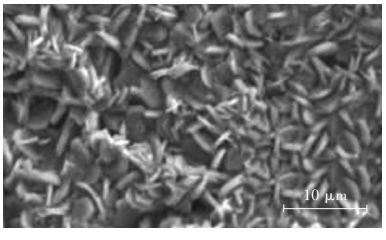


(c)GI磷化后

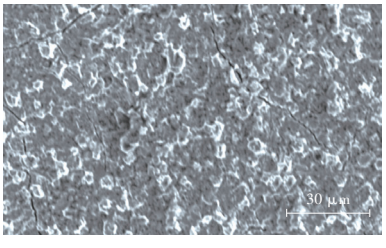


(d)AS磷化后

图8 GI和AS磷化处理前后宏观形貌



(a)GI磷化后

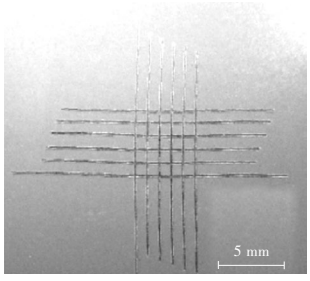


(b)AS磷化后

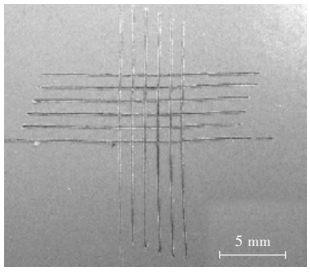
图9 磷化膜微观形貌

3.4.2 电泳漆膜性能

在电泳漆膜表面使用间距为1 mm的划格刀十字交叉划破漆膜,再使用宽度为25 mm、粘附力为(10±1) N/25 mm的胶带粘连,沿对角线撕开观察漆膜剥落情况。漆膜附着力测试结果如图10所示,GI和AS电泳漆膜均未出现漆膜剥落现象,按照漆膜附着力等级评价标准,可定义2种材料的电泳漆膜附着力均为0级,漆膜附着力良好,满足质量要求。



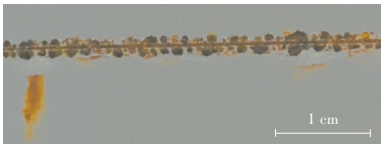
(a)GI



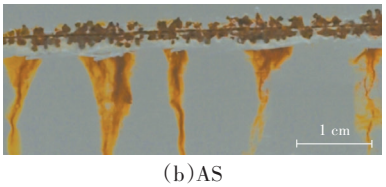
(b)AS

图10 漆膜附着力

电泳板耐蚀性能一般采用加速腐蚀试验进行分析,带镀层钢板一般采用循环盐雾进行加速腐蚀。按照某汽车品牌采用的GMW 14872《Cyclic Corrosion Laboratory Test》循环盐雾标准,测试26个周期,扩蚀宽度<5 mm,视为耐蚀合格。GI和AS电泳板耐蚀结果如图11所示,2种材料均发生了明显的腐蚀,在板材表面出现红锈流淌迹象,去除划线上的腐蚀产物后,垂直于划线处测量最大单边扩蚀宽度。结果表明,GI电泳板单边最大扩蚀宽度为1.2 mm,AS电泳板线单边最大扩蚀宽度为2.1 mm。GI及AS电泳板耐蚀性能均能满足要求,但由于镀层腐蚀产物差异及GI层存在阴极保护作用[13-15],GI电泳板耐蚀性能优于AS电泳板。



(a)GI



(b)AS

图11 漆膜附着力和电泳耐蚀

3.5　冲压及裂纹检测

针对车身的部分梁类、A柱、B柱等结构件,可无缝衔接AS的热冲压工艺,无需改变模具即可完成GI零件冲压成形,零件力学性能正常,表面状态良好,呈现偏黄色,抛丸后三坐标检测符合要求,某零件折弯处裂纹深度为3.2 μm,满足<10 μm的技术要求,零件抛丸前、后局部示意和裂纹检测如图12、图13所示。综合上述焊接、胶结、涂装等性能,GI材料满足使用要求。



(a)抛丸前



(b)抛丸后

图12　某零件抛丸(局部)前、后示意

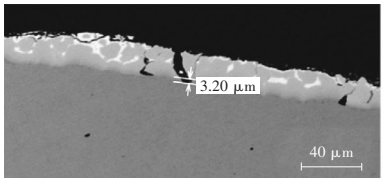


图13　裂纹深度

4　结论

a. 纯锌镀层热成形钢热处理后,镀层存在明显合金化增厚现象,镀层厚度由9~11 μm增加至25~27 μm,镀层含有两相,分别为富锌相Γ相和固溶锌的α-Fe(Zn)相。

b. 纯锌镀层点焊窗口与铝硅镀层相同,但纯锌镀层焊点拉伸强度大于铝硅镀层焊点拉伸强度。

c. 纯锌镀层热成形钢胶接性能良好,与铝硅镀层胶接性能无差异,应用环节不存在限制。

d. 纯锌镀层热成形钢涂装性能优良,其磷化膜和电泳耐蚀性能明显优于铝硅镀层。

e. 纯锌镀层热成形钢热冲压性能良好,可平替铝硅材料进行冲压,镀层下裂纹深度<10 μm。

参考文献:

[1] 曹广祥, 赵隆卿, 井琦, 等. 微合金化2000 MPa级热成形钢的应用性能[J]. 汽车工艺与材料, 2025(4): 46-52.

[2] 冯毅, 高翔, 陈杨冬, 等. 汽车用热成形镀锌钢板应用性能研究[J]. 冶金与材料, 2023, 43(3): 17-19.

[3] 龙袁, 李学涛, 郝玉林, 等. 纯锌镀层热成形钢表面及涂装性能[J]. 中国表面工程, 2025, 38(4): 402-413.

[4] 毕文珍, 洪继要, 王利. 锌基镀层热冲压钢研究进展[J]. 宝钢技术, 2019(6): 38-44.

[5] 李学涛, 邱肖盼, 张杰, 等. 保温时间对镀锌热成形钢镀层组织及裂纹的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(22): 156-158+161.

[6] 卢岳, 张彩东, 齐建军, 等. 镀锌热成形钢表面颜色及氧化物形成规律[J]. 表面技术, 2023, 52(5): 208-217.

[7] 陈屹松, 李志昂, 王立辉, 等. 汽车用镀锌热成形钢胶接性能的研究[C]// 第十四届中国钢铁年会论文集, 2023: 83-92.

[8] 陈乐, 晋家春, 周世龙, 等. 加热工艺对锌铁合金热成形钢镀层组织的影响[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2021, 31(2): 9-12.

[9] 刘丽艳, 毕文珍, 韦习成. Mn元素对热冲压钢镀锌层组织演变的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(4): 93-99.

[10] 杨洪林, 张深根, 洪继要, 等. 锌液中的Al含量对热冲压钢锌层组织的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 28(1): 23-30.

[11] 才贺龙, 易红亮, 吴迪. 22MnB5热成形钢点焊接头组织演变与性能分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 151-154+167.

[12] 王伟峰, 陈友志, 洪永昌. 铝硅镀层热成形钢和DC56D异种钢点焊接头组织性能研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(8): 47-50.

[13] 王辉, 李子涛, 计遥遥, 等. 不同镀层热成形钢的腐蚀行为研究[J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2021, 31(4): 25-27.

[14] 周林, 王辉, 姜进京. 不同镀层热成形钢的涂装性能对比研究[J]. 材料保护, 2021, 54(3): 106-108.

[15] 袁超, 李华鑫, 冯婷婷, 等. 热成型钢板、铝硅镀层钢板和热镀纯锌镀层钢板的耐蚀性研究[J]. 材料保护, 2022, 55(3): 14-18+27.