热成形钢气体保护电弧焊接头组织及性能

吕冬[1,2]，冉茂宇[3]，芦延鹏[1,2]，曹正[1,2]，徐鑫[1,2]
（1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室，辽宁 鞍山 114001；2. 鞍钢集团钢铁研究院，辽宁 鞍山 114001；
3. 鞍钢神钢冷轧高强汽车钢板有限公司，辽宁 鞍山 114001）

摘要：【目的】旨在研究 1 500 MPa 热成形钢气体保护焊接头的组织及性能。【方法】采用 NB-350 IGBT 型逆变式 CO_2 气体保护电弧焊机对无镀层热成形钢和铝硅镀层热成形钢进行焊接试验，分析接头显微组织、强度、硬度及断口形貌特征。【结果】结果表明，2 种接头焊缝组织均为铁素体+贝氏体，铝硅镀层钢板的焊缝中铁素体相对较多。2 种接头的热影响区（HAZ）组织相似，在 A_{c3} 温度以上，HAZ 组织为马氏体；在 A_{c1} ~ A_{c3} 温度，HAZ 组织为铁素体+回火马氏体。接头维氏硬度变化规律为焊缝硬度最低，温度高于 A_{c3} 的 HAZ 硬度达到最高，两相区硬度处于焊缝和母材之间。采用 ER50-6 焊丝焊接 2 种热成形钢属于低强匹配，接头强度仅为母材强度的 1/2 左右。接头断口为脆性+韧性混合断口，熔合区是接头最薄弱位置。【结论】由于铝硅镀层钢板的焊缝中软质铁素体含量较多，其接头强度（805 MPa）低于无镀层钢板接头（866 MPa）。

关键词：热成形钢；气体保护电弧焊；力学性能；显微组织

中图分类号：TG442　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.12073/j.hj.20230627001

Microstructure and mechanical properties of gas shielded arc welded joints of hot stamping steel

LYU Dong[1,2], RAN Maoyu[3], LU Yanpeng[1,2], CAO Zheng[1,2], XU Xin[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114001, Liaoning, China;
2. Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, Anshan 114001, Liaoning, China;
3. Ansteel-Kobelco Cold Rolled High-strength Automobile Steel Co., Ltd., Anshan 114001, Liaoning, China)

Abstract: [**Objective**] The purpose was to study microstructure and mechanical properties of gas shielded welded joints of 1 500 MPa hot stamping steel. [**Methods**] NB-350 IGBT inverter CO_2 gas shielded arc welding machine was used to carry out welding test on uncoated hot stamping steel and Al-Si coated hot stamping steel, and microstructure, strength, hardness and fracture morphology of welded joints were analyzed. [**Results**] The results indicated that weld's microstructure of both welded joints were composed of ferrite and bainite, and there were more ferrite in the weld of Al-Si coated hot stamping steel plate. Microstructure of heat affected zone (HAZ) of the two kinds of welded joints were similar, HAZ above A_{c3} temperature was composed of martensite, and HAZ between A_{c1} and A_{c3} temperature was composed of ferrite and tempered martensite. Variation law of vickers hardness of welded joints was that hardness of weld was the lowest, hardness reached the highest in HAZ above A_{c3} temperature, and hardness of the two-phase zone was between that of weld and base metal. Welded joints of the two kinds of hot stamping steel with ER50-6 welding wire were undermatching, strength of welded joints was only about 1/2 that of base metal. Fracture of welded joints was a mixture of brittleness and toughness, and fusion zone was the weakest position of welded joints. [**Conclusion**] Due to relatively high content of soft ferrite in the weld of Al-Si coated hot stamping steel, its strength (805 MPa) of welded joints was lower than that (866 MPa) of welded joints of uncoated hot stamping steel.

Key words: hot stamping steel, gas shielded arc welding, mechanical properties, microstructure

收稿日期：2023-06-27

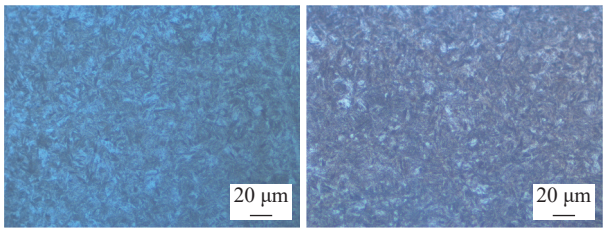
0 前言

随着汽车轻量化要求的不断提高，在白车身中应用超高强度钢是实现车身减重的重要手段。文献报道汽车车身重量每降低 10%，即可实现燃油效率提高 6%～8% 的效果[1－2]。因此，白车身中大量应用超高强度钢成为目前车身设计的主流趋势。热成形钢具备良好的高温成形性和超高强度受到业界广泛关注，产品的强度主要有 1 500 MPa，1 800 MPa 和 2 000 MPa，在车身中的应用部位有汽车门环、前后保险杠、车门内板等对强度要求较高的汽车零部件[3－4]。

热成形钢零部件在车身中的应用主要采用电阻点焊、激光拼焊和气体保护焊等焊接方式[5]，其中点焊和激光拼焊的研究较多，通过对焊接工艺参数优化及焊接材料的开发获得了良好的焊接接头。但是关于热成形钢气体保护电弧焊的研究较少，该文采用无镀层热成形钢和铝硅薄镀层热成形钢进行气体保护电弧焊接试验，研究了热成星钢气体保护电弧焊接头性能，揭示了接头组织及性能转变特点，为产品的设计和应用提供数据支撑。

1 试验材料及方法

试验用厚度为 1.6 mm 厚无镀层热成形钢及铝硅镀层热成形钢，母材的组织均为马氏体组织，如图 1 所示。焊丝为天津大桥公司生产的牌号为 THQ-50C 气体保护电弧焊丝，焊丝直径 1.0 mm，符合国家标准 GB/T 8110—2020《熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝》标准中 ER50-6 型号要求。母材及焊丝的化学成分、力学性能（80 mm 标距）分别见表 1、表 2。



(a) 无镀层热成形钢　(b) 铝硅镀层热成形钢

图 1 母材组织

Fig. 1 Microstructure of base metal. (a) uncoated hot stamping steel; (b) Al-Si coated hot stamping steel

表1 化学成分（质量分数，%）

Tab. 1 Chemical composition (wt.%)

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	B	Ti	C_{eq} ①
无镀层热成形钢	0.25	0.31	1.40	0.003	0.010	0.28	0.003	0.04	0.54
铝硅镀层热成形钢	0.22	0.25	1.25	0.005	0.011	0	0.003	0.05	0.42
焊丝	0.08	0.89	1.50	0.012	0.013	0.02	0	0	0.33

注：①碳当量 $C_{eq}=C+Mn/6+(Cr+V+Mo)/5+(Cu+Ni)/15$

表2 热成形钢力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of hot stamping steel

材料	屈服强度 R_{eH}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A(%)	镀层质量 m/(g·m^{-2})
无镀层热成形钢	1 120	1 569	5.6	—
铝硅镀层热成形钢	1 135	1 550	6.0	35
焊丝（熔覆金属）	450	560	26	—

试验采用 NB-350IGBT 型逆变式 CO_2 气体保护电弧焊机。焊接采用数字化逆变控制技术，焊接工艺参数精准控制，具有一体化参数调节功能，引弧平稳，飞溅少，抗干扰能力强。力学性能测试采用 Z100 型拉伸试验机，组织分析采用 DMI5000M 型光学显微镜，接头硬度采用 FM-700 型维氏硬度计进行检测。焊接试验采用焊接电流 87 A，电弧电压 20 V，焊接速度 10 mm/s，100% CO_2 气体保护，气体流量为 10 L/min。采用搭接焊方式焊接，搭接宽度 20 mm，如图 2 所示。钢板两端首先焊接固定焊点，然后采用横焊法焊接，焊丝与钢板在垂直面夹角在 15°左右，确保钢板不被焊穿。

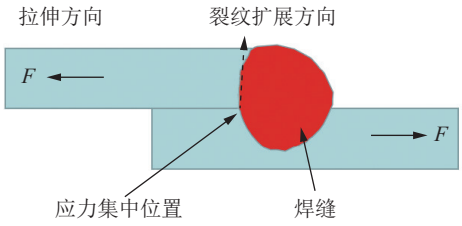


图 2　焊接位置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of welding position stamping steel

2　试验结果与分析

2.1　接头力学性能

钢板焊接后采用线切割方式加工力学检测试样，焊缝位于试样平行段中间。力学检测结果见表 3。在相同的焊接工艺下，无镀层热成形钢的接头抗拉强度均值为 866 MPa，而铝硅镀层热成形钢的接头抗拉强度为 805 MPa，无镀层钢的强度明显高于铝硅镀层钢的接头强度。所有试样断裂位置均为熔合区，焊接接头强度未达到钢板的设计强度 1 500 MPa 的水平。从强度匹配角度考虑，焊接材料选择有低强度匹配、等强度匹配和高强度匹配。THQ-50C 焊丝的强度远低于钢板的强度，属于低强度匹配，焊缝的强度最低，在拉伸检测中钢板与焊缝交接区应力最大，容易产生裂纹，裂纹产生后沿着截面积最小的熔合区开裂，如图 2 所示。因此，焊接接头拉伸检测中试样断裂位置位于熔合区。

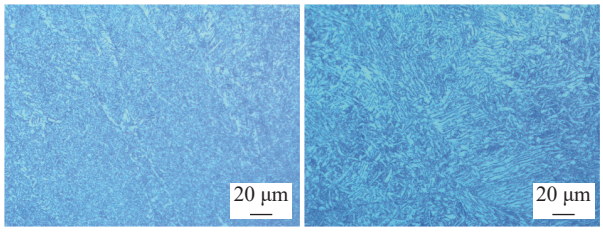
表3　焊接接头力学性能检测结果

Tab. 3　Mechanical properties testing results of welded joints

接头	屈服强度 R_{eH}/MPa		抗拉强度 R_m/MPa		断裂位置
	测量值	平均值	测量值	平均值	
无镀层热成形钢	674, 630, 619	641	838, 887, 872	866	熔合区
铝硅镀层热成形钢	600, 581, 555	579	829, 815, 771	805	熔合区

2.2　焊接接头组织

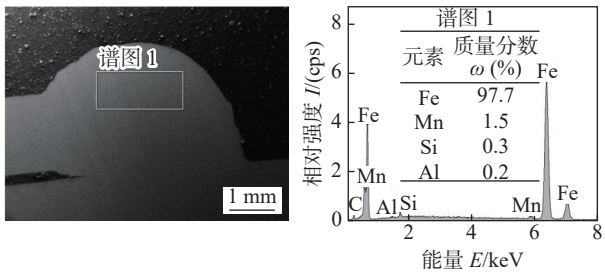
2 种钢板的焊缝组织均为铁素体+贝氏体组织，如图 3 所示。无镀层热成形钢焊缝中铁素体组织较少，其形态为多边形和针状铁素体。而铝硅镀层热成形钢焊缝中的铁素体明显增多，大量的铁素体形态多呈长条状。采用扫描电镜对焊缝区进行成分分析，结果显示：无镀层热成形钢焊缝内铝含量为 0%，而铝硅镀层钢的焊缝铝含量为 0.2%，如图 4 所示，表明钢板表面的铝硅镀层进入到了焊缝中，促进了焊缝中铁素体组织的形成。铁素体含量越多，强度越低，因此，拉伸检测中无镀层钢的强度明显大于铝硅镀层钢的强度。



(a) 无镀层热成形钢　(b) 铝硅镀层热成形钢

图 3　焊缝组织

Fig. 3　Microstructure of weld. (a) uncoated hot stamping steel; (b) Al-Si coated hot stamping steel weld



(a) 检测区域　(b) 检测结果

图 4　焊缝成分分析结果

Fig. 4　Analysis result of composition of weld. (a) test area; (b) test result

热影响区组织变化较大，靠近熔合区位置的组织均为马氏体组织[6]，2 种钢板的组织无显著的差别，图如 5 所示。

随着距离熔合区距离的增加，热影响区组织由马氏体组织逐渐转变为铁素体+马氏体组织，如图 6 所

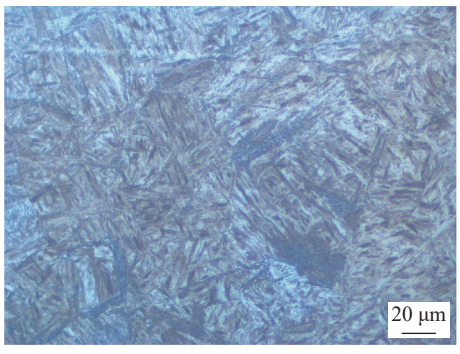


图 5　热影响区马氏体组织

Fig. 5　Martensite microstructure in heat affected zone

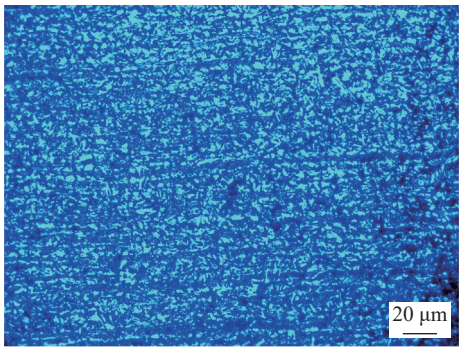


图 6　热影响区铁素体+马氏体组织

Fig. 6　Ferrite+martensite microstructure in heat affected zone

示。经测量该区域(宽度)大约为 0.34 mm。

受焊缝热源的影响，钢板高于 A_{c3} 温度的区域已经完全奥氏体化，该温度较高，冷却时具有较大的冷却速度，受钢板合金含量高、淬透性大的影响，奥氏体化的组织冷却后形成了马氏体组织，形成了一个完全淬火区[7]。温度位于 A_{c1} ~ A_{c3} 区间时，钢板部分组织发生奥氏体化，该区间温度较低，并且受焊缝热传导的影响冷却速度较慢，因此，发生奥氏体化的组织冷区后形成了铁素体组织，未奥氏体化的马氏体组织发生回火形成的回火马氏体，该区域为不完全淬火区[8－9]。

2.3　接头硬度

焊接接头的硬度检测是间接考察焊缝性能变化趋势的重要手段。图 7 为 2 种钢板焊接接头系列硬度曲线。2 种钢板焊缝的硬度均在 260 HV 左右，紧邻焊缝的硬度突然升高至 400 HV 和 470 HV 的水平，随后硬度降低至 260 HV 左右后，缓慢升高至母材的硬度水平。

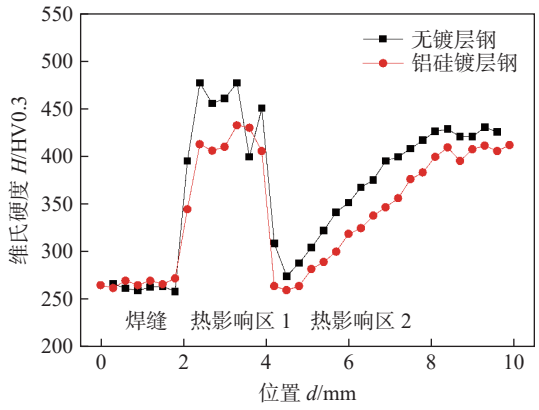


图 7　接头硬度分布

Fig. 7　Microhardness distribution of welded joints

焊缝组织为铁素体+贝氏体组织，因此，其强度较低。虽然焊缝组织中铁素体比例略有不同，但是在宏观硬度上未显示有明显的差别。热影响区处于完全淬火区的位置，其组织为马氏体组织硬度相对较高。未完全淬火区属于两相区，随着距离焊缝越来越远，温度越来越低，铁素体和回火马氏体均呈减少趋势，其硬度表现为逐步增加的趋势。从硬度数值上看，无镀层钢在完全淬火区和不完全淬火区的硬度均高于铝硅镀层热成形钢，说明无镀层热成形钢的淬透性高于铝硅镀层热成形钢。无镀层热成形钢碳当量为 0.54，而铝硅镀层热成形钢碳当量为 0.42，也说明无镀层热成形钢具有较高的淬透性[10－11]。在相同的冷却条件下，淬透性越大，获得的淬火组织越多，硬度越高。

2.4　断口分析

图 8 为拉伸试样断口开裂区形貌，2 种钢板焊接断口均为脆性断裂+韧性断裂的混合断口。在脆性断裂区断口平直光亮，存在大解理面和小解理面混合特征。在小解理面区域掺杂着韧性区域，断口特征是韧窝，形成韧窝和解理面混合的断口特征。从宏观上看，铝硅镀层热成形钢韧窝略高于无镀层热成形钢。

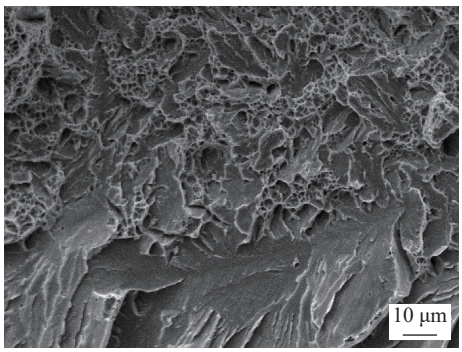


图 8　断口表面形貌

Fig. 8　Morphology of fracture surface

由于断裂位置在熔合区，该区域是焊缝与母材过渡区域，在组织上具有较大的不均匀性[12]，造成断口呈现出不均匀的断裂特征。断口母材一侧组织为马氏体组织，而焊缝侧为贝氏体+铁素体组织，高强度的马氏体断口呈现出脆性断裂特征，而焊缝中的铁素体强度低、韧性好，在断口中呈现出韧性断裂特征。

3　结论

(1)采用 ER50-6 焊丝焊接热成形钢属于低强度

匹配选材，拉伸检测试样断裂于熔合区，焊缝强度仅为钢板强度的 1/2 左右。焊缝组织为铁素体+贝氏体组织，焊接铝硅镀层热成形钢时，焊缝组织中铁素体量显著增加，并且呈长条状形态。

（2）热成形钢气体保护电弧焊的焊接热影响区组织分为完全淬火区和不完全淬火区，完成淬火区组织是马氏体组织，不完全淬火区组织为铁素体+马氏体组织。

（3）焊接接头硬度波动较大，焊缝硬度最低在 260 HV 左右，完全淬火区硬度最高在 400～460 HV 之间，不完全淬火区硬度由 260 HV 逐渐增加至母材硬度，且无镀层热成形钢硬度略高于铝硅镀层热成形钢。

参考文献

[1] DE COOMAN B C. Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8: 285－303.

[2] KUZIAK R, KAWALLA R, WAEGLER S. Advanced high strength steels for automotive industry[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2008, 8: 103－117.

[3] ZUIDEMA B K. Bridging the design-manufacturing-materials data gap: material properties for optimum design and manufacturing performance in light vehicle steel-intensive body structures[J]. JOM, 2012, 64: 1039－1047.

[4] SHAW J R, ZUIDEMA B K. New high strength steels help automakers reach future goals for safety, affordability, fuel efficiency and environmental responsibility[J]. Journal of Materials and Manufacturing, 2001, 110: 976－983.

[5] 吕冬, 芦延鹏, 刘仁东, 等. 冷轧 DP980 电阻点焊接头断裂模式特征与组织分析 [J]. 焊接, 2019(10): 52－57.
LYU Dong, LU Yanpeng, LIU Rendong, et al. Fracture mode characteristics and microstructure analysis of resistance spot welded joint of cold rolled DP980[J]. Welding & Joining, 2019(10): 52－57.

[6] 陈树君, 王超, 于洋, 等. 热冲压高强度钢伺服点焊工艺 [J]. 焊接技术, 2012, 41(3): 19－22.
CHEN Shujun, WANG Chao, YU Yang, et al. Hot stamping high-strength steel servo spot welding process[J]. Welding Technology, 2012, 41(3): 19－22.

[7] 林建平, 胡琦, 王立影, 等. USIBOR1500 超高强度淬火钢板点焊性能研究 [J]. 中国工程机械学报, 2007, 5(3): 317－321.
LIN Joanping, HU Qi, WANG Liying, et al. Spot welding property study of ultra high strength quenching steel plate USIBOR1500[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2007, 5(3): 317－321.

[8] 魏艳红, 刘仁培, 董祖珏. 不锈钢焊接凝固裂纹温度场的数值模拟 [J]. 焊接学报, 1999(3): 199－204.
WEI Yanhong, LIU Renpei, DONG Zujue. Numerical simulation of temperature fields for weld metal solidification cracking in stainless steels[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999(3): 199－204.

[9] 韩立军, 谷诤巍, 张正林, 等. 超高强淬火钢板中频点焊接头组织与断口形貌 [J]. 焊接学报, 2010, 31(4): 101－104.
HAN Lijun, GU Zhengwei, ZHANG Zhenglin, et al. Microstructure and fractography of intermediate frequency spot welding of precision ultra-high strength quenching steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(4): 101－104.

[10] 刘军利, 林晓娉, 李日, 等. 碳对马氏体钢显微组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2006, 35(24): 34－36.
LIU Junli, LIN Xiaoping, LI Ri, et al. Influence of carbon on microstructure and mechanical property of low-carbon martensite steel[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(24): 34－36.

[11] 贺优优, 王东帅. 热冲压钢电阻点焊形核热过程及组织特征分析 [J]. 焊接技术, 2019, 48(4): 15－18.
HE Youyou, WANG Dongshuai. Analysis of the hot process and microstructure of resistance spot welding of hot stamping steel[J]. Welding Technology, 2019, 48(4): 15－18.

[12] 赵熹华, 姜以宏. 薄件点焊熔核凝固组织分析 [J]. 焊接学报, 1994, 15(2): 89－93.
ZHAO Xihua, JIANG Yihong. Analysis of solidified organism in thin piece spot welding nugget[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1994, 15(2): 89－93.

第一作者： 吕冬，高级工程师；主要从事汽车板点焊、激光焊工艺研究及开发工作；lvdong_2002@163.com。

（编辑：王龙权）

本文引用格式：

吕冬, 冉茂宇, 芦延鹏, 等. 热成形钢气体保护电弧焊接头组织及性能[J]. 焊接, 2025(1): 92－96.

LYU Dong, RAN Maoyu, LU Yanpeng, et al. Microstructure and mechanical properties of gas shielded arc welded joints of hot stamping steel[J]. Welding & Joining, 2025(1): 92－96.