

三层板电阻点焊接头界面力学性能

杜汉斌¹, 朱强², 王武荣², 韦习成²

(1. 浙江吉利汽车研究院, 浙江 宁波 315336; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要: **目的** 为掌握汽车侧撞区域三层板电阻点焊接头不同界面的承载能力, 研究三层板接头力学性能。**方法** 以 B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm 三层板电阻点焊接头为研究对象, 通过剪切拉伸试验结果, 对比分析不同界面的力学性能, 并对焊点熔核区显微组织、界面熔核尺寸、显微硬度以及失效模式进行研究与分析。**结果** 在三层焊中, 当上下两侧板材强度相差很大时, 不同界面的三层板点焊接头具有不同的峰值载荷和断裂能量, 强强界面的剪切承载能力是强弱界面的 6 倍; 熔核区不同板材处的马氏体含量以及界面熔核尺寸均影响点焊接头的力学性能; 热成形钢一侧影响区因原始全马氏体组织出现了软化; 拉伸试验条件下, B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm 界面点焊接头失效模式为纽扣失效, B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm 界面点焊接头失效模式为先纽扣失效, 后母材撕裂。**结论** 在汽车耐撞设计中应通过承载分配, 将碰撞结构力传导至强强界面, 并通过隔离设计尽量避免强弱界面受到结构力影响, 以提高碰撞性能。

关键词: 三层板电阻点焊; 力学性能; 界面熔核尺寸; 失效模式

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.030

中图分类号: TG453⁺.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0192-06

Mechanical Properties of Three-layer Resistance Spot Welding Joint Interface

DU Han-bin¹, ZHU Qiang², WANG Wu-rong², WEI Xi-cheng²

(1. Zhejiang Geely Automobile Research Institute, Ningbo 315336, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

ABSTRACT: The paper aims to understand the bearing capacity of different interfaces of three-layer resistance spot welding joints by studying the mechanical properties of B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm three-layer joint in side impact of vehicle. Based on results of shear tensile test, the mechanical properties of different interfaces were analyzed and the microstructures, fusion zone size, microhardness and failure mode of nugget area were researched and analyzed. Different interfaces of the three-layer spot welding joint had different peak load and fracture energy when the strength of the upper and lower sides was very different. Shear bearing of the joint interface composed of two high strength steels (B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm) was 6 times as big as that of the joint interface composed of both strong and soft steels. The martensite content at different plates in the nugget area and the weld nugget size along sheet/sheet interface affected the mechanical properties of the spot weld joint. Softening appeared in the heat-affected zone of hot-stamping steels due to their full content of marten site. The failure mode of B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm interface spot welding was button failure; and the failure mode of B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm interface was button and pullout failure. To increase the crash capability, it is suggested to transmit the crash force to the interface of high strength steels by load allocation and avoid transmission of crash to the softer interface by isolation design.

KEY WORDS: three-layer resistance spot weld; mechanical property; fusion zone size; failure mode

收稿日期: 2017-07-26

基金项目: 国家自然科学基金 (51475280)

作者简介: 杜汉斌 (1972—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为汽车安全设计。

现代轿车车身发展的趋势是短前悬、大轴距。随着安全法规的逐年升级,对汽车碰撞安全的要求越来越高,要求在越来越小的吸能空间内实现碰撞能量的吸收。同时为了适应汽车轻量化的趋势,车身高强钢的应用比例逐步提高。车身用钢以优质的冷轧钢板为主,在车身纵梁等传力路径上大量使用 340/590 MPa 以上级别的高强钢。在乘员舱,很多主机厂选择大量使用热成形钢,确保车身在高速碰撞时,保持乘员舱结构的完整性。

在汽车车身的整个生产制造流程中会使用到很多种不同形式的焊接,如电阻焊、凸焊、螺柱焊、激光焊、氩弧焊等^[1],但是目前,电阻点焊技术由于其高效率、低成本等优点,是汽车制造工业中最主要的焊接方法。对一辆小型车来说,白车身(BIW)上的焊点就有 4000~6000 个^[2-3],这几千个焊点的质量好坏会直接影响到车身的各项性能指标,如强度、抗冲击性、力学稳定性^[4]等。

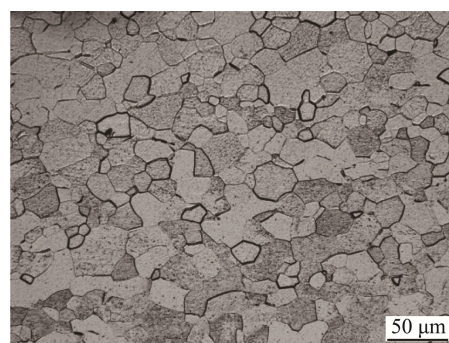
目前国内外学者对点焊接头的力学性能及断裂形式作了大量研究^[5-10],均表明采用合理的焊接工艺后,点焊接头熔核良好,焊点拉剪强度以及断裂形式都能满足实际生产要求。ZHANG Hong-qiang^[11]等人对两层板的断裂失效进行了研究,发现两层板异种钢有界面失效、半界面失效以及纽扣失效 3 种失效模式,拉伸应力导致界面失效,剪切应力导致纽扣失效;另外研究了两层板断裂失效的起始位置。目前,两层焊断裂失效研究较为深入,但在三层焊研究方面比较缺乏。在实际车身中,大量的部位都出现了差强差厚的三层板连接,如车身前纵梁, A/B/C 柱等部位^[12]。三层焊由于比两层焊多一个界面,而使点焊接头在形成过程变得更加复杂,基于目前两层焊的研究成果不能满足生产实际需要,迫切需要对三层焊的相关技术进行更进一步的研究,从而为生产实际提供相关指导。

伊朗学者 M. POURANVARI^[13]等人研究了三层板低碳钢电阻点焊熔核形成过程和力学性能,研究发现界面与界面之间的熔核尺寸是影响焊点强度的重要因素。颜福裕^[14]等人研究了三层板 6061 铝合金点焊接头形式对其力学性能的影响,结果表明不同搭接形式的接头具有不同的接头峰值载荷和吸收能,并且在剪切拉伸测试中,熔核的旋转程度对接头的峰值载荷和吸收能具有重要影响。以上研究都集中于低碳钢和铝合金材料,而没有对目前车身大量运用的高强钢进行相关研究。

基于以上研究现状,文中以 B1500HS-1.4 mm/B-1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm 三层板电阻点焊接头为研究对象,针对三层板焊接形成的 2 个界面,对其点焊接头的力学性能进行了对比,并通过点焊接头熔核微观组织、界面熔核尺寸、显微硬度以及点焊接头失效模式进行了分析。

1 试验

为提高侧碰时的成员空间安全性,汽车 A 柱区域左侧斜支撑和前围底部横梁均采用热冲压成形提高强度,而前围板则需要采用冷轧深冲 DC06 钢板,以保证极高的成形性能。为研究此处电阻点焊接头的连接性能,文中以 1.4 mm 及 1.6 mm 厚的热成形 22MnB5 高硼钢和 0.8 mm 厚的 DC06 钢板所形成的三层板电阻点焊接头为研究对象。22MnB5 钢含有质量分数为 0.233% 的 C, 0.250% 的 Si, 1.21% 的 Mn, 0.147% 的 Cr, 0.063% 的 Al, 0.004% 的 B, 0.028% 的 Ti, 0.012% 的 Cu, 0.011% 的 Ni, 0.005% 的 S, 0.016% 的 P; DC06 钢含有质量分数不大于 0.003% 的 C, 不大于 0.300% 的 Mn, 不大于 0.020% 的 P, 不大于 0.020% 的 S, 不小于 0.015% 的 Al。DC06 钢的显微组织见图 1a,为典型的铁素体组织,抗拉强度大约在 280 MPa 左右。22MnB5 经压力淬火后,组织为分布均匀的板条状马氏体,见图 1b,压淬后的 22MnB5 抗拉强度达到 1542 MPa。



a DC06钢



b 压力淬火后的22MnB5钢

图1 材料的显微组织

Fig.1 Microstructures of materials

试样电阻点焊接头形式为搭接接头,具体搭接形式见图 2,三层焊接头从上及下的材料分别为 B1500HS-1.4 mm, B1500HS-1.6 mm, DC06-0.8 mm。试样尺寸为 113 mm×38 mm,焊接搭接长度为 38 mm。为得到三层点焊接头不同界面的性能,同时为了降低试样拉伸时熔核发生过度旋转而导致峰值载荷降低,在试样两端加上与焊接板材同等厚度的垫片以保证拉伸

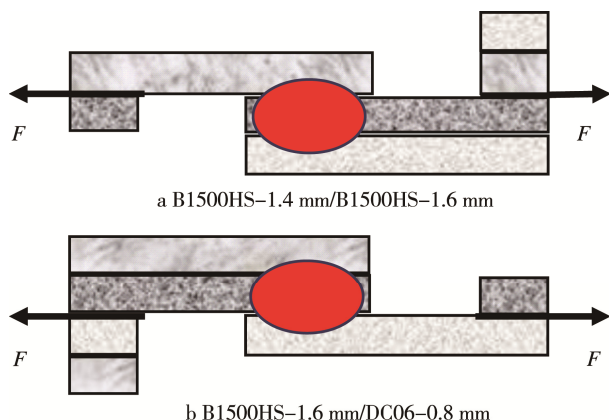


图2 不同界面三层板点焊接头

Fig.2 Three-layer resistance spot welding of different interfaces

时剪切力位于同一界面,垫片尺寸为70 mm×38 mm。

试验采用直流高频电阻点焊机进行焊接,采用“B1500HS-1.4 mm+B1500HS-1.6 mm+DC06-0.8 mm”作为焊板,电流频率为1000 Hz,电极材料为CuCrZr,其端部直径为6 mm。采用2个脉冲进行焊接,焊接电流分别为4.5、8.5 kA,焊接时间为100、400 ms,电极压力为300 MPa,预压时间为100 ms,维持时间为500 ms。焊接前,去除试样表面氧化膜和油污,制备3个剪切拉伸试样和1个金相试样。

采用体积分数为4%的硝酸酒精溶液对试样进行腐蚀,制备金相试样。应用NikonMA-100倒置式金相显微镜观察焊点的显微组织;应用MH-3型显微硬度计对抛光试样横截面进行显微硬度HV测试,显微硬度沿熔核对角线方向测试,点间距为0.50 mm,试验加载力为300 g,压力保持时间为5 s;采用CMT5105型万能拉伸试验机对点焊试样进行剪切拉伸试验,拉伸速率为10 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 剪切拉伸试验

三层板B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm点焊接头不同界面的平均峰值载荷和断裂能量见图3。其中断裂能量为失效力达到峰值载荷时下围的曲线面积。从图3可以看出,B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头的峰值载荷为27.284 kN,远远高于B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头的峰值载荷4.477 kN。对于断裂能量,B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头的断裂能量为37.211 J,亦远大于B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头的断裂能量11.502 J。由于三层焊B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面,即强强界面之间抗剪峰值强度和断裂能量明显高于

B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm之间的强弱界面,在耐撞设计中应尽量通过承载式设计将碰撞结构力传导至强强界面,通过隔离式设计尽量避免弱板受到结构力影响,以免三层焊中抗剪强度较弱的强弱界面受力而产生焊点开裂失效,最终导致车身结构完整性受损和耐撞性下降。

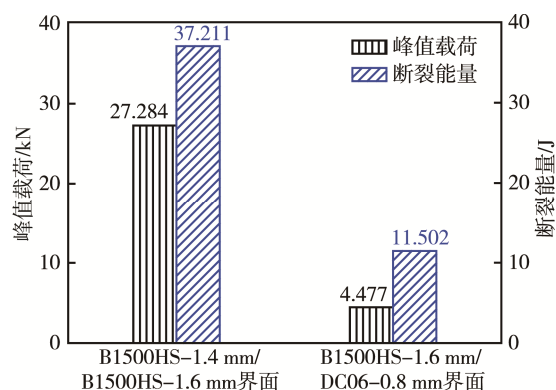


图3 三层板点焊接头不同界面的峰值载荷和断裂能量

Fig.3 Interface peak load and fracture energy of three-layer spot welding joints

2.2 显微组织

熔核区宏观形貌见图4a,由熔核区FZ、热影响区HAZ和母材BM这3部分组成。在熔核区可以看到,其熔核起始位置接近于三层板的几何中心,晶粒长大的方向与散热最快的方向相同,同时晶粒选择性长大,并在熔核边缘联生结晶。图4b—d分别为B1500HS-1.4 mm侧、B1500HS-1.6 mm侧和DC06侧熔核区组织。从图4可以看出,熔核区的组织主要由粗大的板条状马氏体组成。由于熔核区沿电极径向为温度梯度最大的方向,冷却速度非常快,所以熔核区显微组织在形态上呈现出一定的柱状晶形态。另外,B1500HS-1.4 mm侧和B1500HS-1.6 mm侧熔核区马氏体含量明显高于DC06-0.8 mm侧熔核区。有研究表明,熔核区内板条状马氏体组织具有高硬度和高密度位错,是导致接头力学性能强度高的原因,即马氏体含量越高,点焊接头强度越高,因此B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头强度高于B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头。

点焊接头实际熔核宏观形貌见图5。有研究表明^[15],三层焊界面与界面之间的熔核尺寸是影响点焊接头力学性能的重要因素,界面熔核尺寸越大,焊点强度越大。由图5a可以看出,B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头熔核尺寸为7.04 mm,B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头熔核尺寸为5.91 mm,这也是B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头焊点强度高于B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头的原因之一。

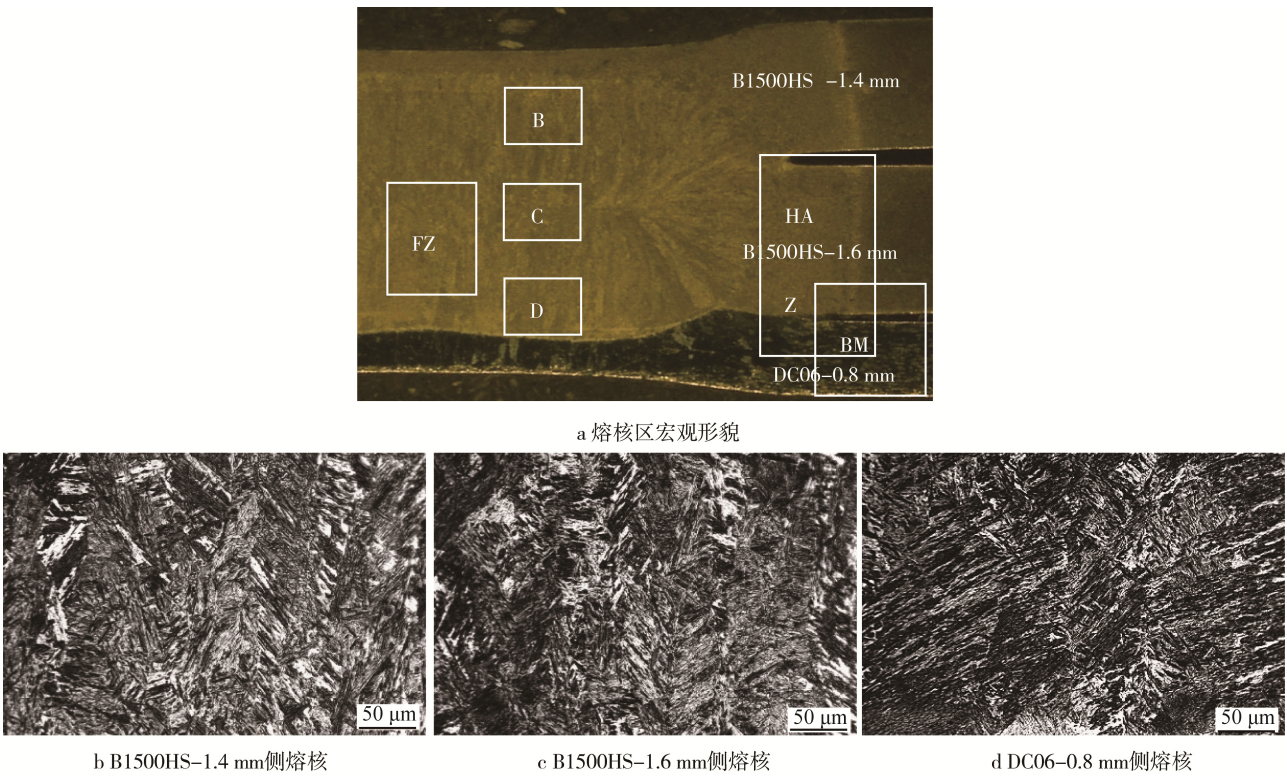


图 4 点焊接头微观组织
Fig.4 Microstructures of spot welding joint

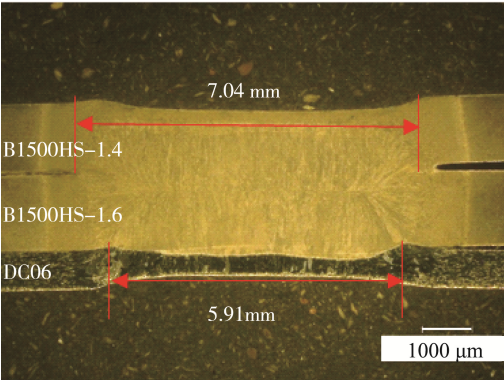


图 5 点焊接头熔核显微照片
Fig.5 Microstructure of nugget

2.3 显微硬度

显微硬度测试结果见图 6,从测量结果可以看出, B1500HS 母材硬度大约在 460HV 左右, DC06 母材硬度大约在 93HV 左右, 熔核区硬度大约在 500HV 左右。B1500HS-1.4 mm 侧热影响区形成了一个明显硬度低谷, 大约在 380HV 左右; 这是由于经过特殊热成形工艺处理的 B1500HS 钢, 在 B1500HS-1.4 mm 侧的原始显微组织几乎全部为马氏体, 从而导致焊接过程中热影响区产生马氏体软化。在 DC06 钢侧热影响区硬度大约在 117HV 左右, 主要原因是热影响区的原始铁素体组织在焊接温度影响下晶粒过度长大产生粗晶区, 形成过热魏氏组织导致强度上升, 塑性

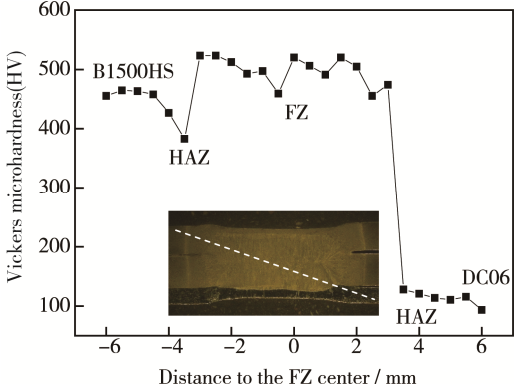


图 6 3 层板点焊熔核硬度分布
Fig.6 Hardness distribution in weld nugget of three-layer spot welding joint

则严重下降。点焊接头的硬度低谷处为焊点熔核最薄弱的地方, 焊点断裂失效一般都从此位置开始。

2.4 点焊接头失效模式分析

不同界面三层板点焊接头经过拉伸后, 共产生的 2 种断裂模式见图 7, B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm 热成形钢界面点焊接头失效样件见图 7a, 可以看出, 熔核从软化热影响区, 即点焊接头的最薄弱处开始脱离并拔出, 是典型的纽扣断裂。另外, 图 7a 所有拉伸剪切试验断裂都从 B1500HS-1.4 mm 侧开始, 这是由于拉伸到一定程度, 熔核发生难免发生旋转, 此时 DC06 钢同 B1500HS-1.6 mm 钢一同受力, 导致

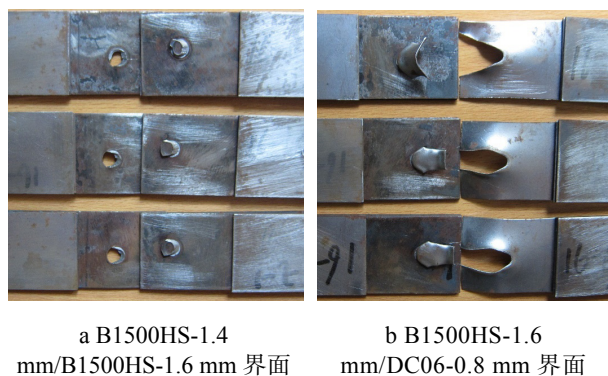


图7 点焊接头断裂模式
Fig.7 Fracture form of spot welding joint

B1500HS-1.4 mm侧应力集中更为严重,促使裂纹在B1500HS-1.4 mm侧软化热影响区萌生。B1500-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头失效样件见图7b,焊核从塑性极低的DC06侧热影响区拔出,随后延伸至母材,直至点焊接头从母材完全脱开,因此,该失效模式为先纽扣断裂,而后延伸至母材撕裂。

3 结论

文中研究了汽车A柱区域的典型“强-强-弱”三层板电阻点焊接头,以B1500HS-1.4 mm, B1500HS-1.6 mm和DC06-0.8 mm这3种材料形成热成形高强钢-热成形高强钢-深冲软钢差强差厚三层焊接头。主要研究结论如下。

1) 三层板焊接时,当三层板上下两侧板材强度相差很大时,不同界面对点焊接头剪切强度峰值载荷和断裂能量有很大影响。在耐撞设计中应尽量通过承载设计,将碰撞结构力传导至强强界面,避免弱板受到结构力影响,导致强弱界面焊点开裂失效。

2) 三层板熔核区不同板材侧马氏体含量不同,且马氏体含量对接头力学性能有一定的影响,马氏体含量越高,力学性能越好。通过点焊接头界面熔核尺寸测试,验证了界面熔核尺寸和点焊接头强度有关,界面熔核尺寸越大,点焊接头强度越高。

3) B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm三层板电阻点焊接头熔核区显微硬度最高,靠近B1500HS-1.4 mm侧热影响区的原始全马氏体组织产生了软化,DC06侧热影响区的原始铁素体组织则由于产生过热区魏氏组织而出现强化。

4) B1500HS-1.4 mm/B1500HS-1.6 mm界面点焊接头剪切拉伸断裂模式为热影响区萌生的纽扣断裂, B1500HS-1.6 mm/DC06-0.8 mm界面点焊接头剪切拉伸断裂模式为纽扣断裂延伸至母材撕裂。

参考文献:

[1] 许瑞麟,朱品朝,于成哉,等. 汽车车身焊接技术现状

及发展趋势[J]. 电焊机, 2010(5): 1—18.

XU Rui-lin, ZHU Pin-chao, YU Cheng-zai, et al. Present Situation and Development Trends of Welding Technologies for B.I.W[J]. Electric Welding Machine, 2010(5): 1—18.

[2] 黄治军, 刘吉斌, 王靓. 汽车工业点焊的发展[J]. 钢铁研究, 2012, 40(5): 60—62.

HUANG Zhi-jun, LIU Ji-bin, WANG Liang. Development of Spot Resistance Welding Technology of Automobile Steel Sheet[J]. Research on Iron & Steel, 2012, 40(5): 60—62.

[3] 袁少波, 童彦刚. 点焊技术在汽车工业中的应用[J]. 电焊机, 2005(2): 26—30.

YUAN Shao-bo, TONG Yan-gang. Application of Spot Welding in Automobile Industry[J]. Electric Welding Machine, 2005(2): 26—30.

[4] 张健, 严思杰. 汽车用DP590双相高强钢板电阻点焊性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(5): 231—233.

ZHANG Jian, YAN Si-jie. Study on Resistance Spot Welding Properties of High Strength Dual Phase DP590 Steel Plate for Automobile[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(5): 231—233.

[5] CHABOK A, AA E V D, HOSSON J T M D, et al. Mechanical Behavior and Failure Mechanism of Resistance Spot Welded DP1000 Dual Phase Steel[J]. Materials & Design, 2017, 124: 171—182.

[6] RAZMPOOSH M H, SHAMANIAN M, ESMAI-LZADEH M. The Microstructural Evolution and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded Fe-31Mn-3Al-3Si TWIP Steel[J]. Materials and Design, 2015, 67: 571—576.

[7] 杜汉斌, 刘成杰, 王武荣, 等. 热成形B1500HS硼钢与DP780双相钢点焊焊接性及仿真分析[J]. 上海金属, 2017(1): 20—26.

DU Han-bin, LIU Cheng-jie, WANG Wu-rong, et al. Weldability and Numerical Study of the Resistance Spot Weld of Hot-formed B1500HS Boron Steel and DP780 Dual-phase Steel[J]. Shanghai Metals, 2017(1): 20—26.

[8] 白韶军, 王超, 陈树君, 等. 热冲压22MnB5硼钢中频电阻点焊接头组织及力学性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2013(5): 666—670.

BAI Shao-jun, WANG Chao, CHEN Shu-jun, et al. Mechanical Properties and Microstructure of IF Resistance Spot Welded Joint of Hot Stamping 22MnB5 Boron Steel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013(5): 666—670.

[9] 徐松, 黄治军, 孙宜强, 等. 超高强热成型钢板的点焊工艺性能研究[J]. 钢铁研究, 2012(2): 36—40.

XU Song, HUANG Zhi-jun, SUN Yi-qiang, et al. Resistance Spot Welding Teston Ultra-high Strength Hot Stamping

- Steel[J]. Research on Iron & Steel, 2012(2): 36—40.
- [10] CHUNG Kwansoo, NOH Wooram, YANG Xin, et al. Practical Failure Analysis of Resistance Spot Welded Advanced High-strength Steel Sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2016: 1—26.
- [11] ZHANGH Q, QIU X M, XING F, et al. Failure Analysis of Dissimilar Thickness Resistance Spot Welded Joints in Dual-phase Steels during Tensile Shear Test[J]. Materials and Design, 2014, 55: 366—372.
- [12] 沈洁, 林浩磊, 张延松, 等. 差强差厚三层板电阻点焊熔核尺寸的控制方法[J]. 焊接学报, 2012(1): 33—36.
SHEN Jie, LIN Hao-lei, ZHANG Yan-song, et al. Control Method of Nugget Size for Resistance Spot Welding with Different Thickness and Strength[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012(1): 33—36.
- [13] POURANVARI M, MARASHI S P H. Weld Nugget Formation and Mechanical Properties of Three-sheet Resistance Spot Welded Low Carbon Steel[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2012, 51(1): 105—110.
- [14] 颜福裕, 李洋, 罗震, 等. 三层板 6061 铝合金点焊接头形式对其力学性能的影响[J]. 焊接学报, 2016(4): 81—84.
YAN Fu-yu, LI Yang, LUO Zhen, et al. Effect of Joint Types on the Mechanical Properties of Three-layer 6061 Aluminum Alloy Spot Welds[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016(4): 81—84.
- [15] POURANVARI M, MARASHI S P H. Failure Behavior of Three-Steel Sheets Resistance Spot Welds: Effect of Joint Design[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21: 1669—1675.