

异种钢电阻塞焊飞溅缺陷的产生机理

岑耀东¹, 陈芙蓉², 陈 林¹

(1. 内蒙古科技大学 包头 014010; 2. 内蒙古工业大学 呼和浩特 010051)

摘 要: 文中采用电阻塞焊对等厚的异种钢板进行焊接, 利用正交试验和极差法优化分析了影响飞溅缺陷的关键焊接参数, 然后对接头进行冲击试验, 从熔池形成、焊接时序、电阻分布规律、电极力、热量变化等方面研究了飞溅缺陷的产生机理。结果表明, 发生飞溅的接头冲击吸收能量大大降低; 电阻塞焊的接触电阻变化过程包括填充物受热、压平及熔核形核三个阶段, 随着焊接过程的进行及填充物形状的变化, 接触电阻呈增大—减小—再增大的趋势; 在压平阶段填充物受热结束时瞬时热量突增是造成焊点外侧边缘飞溅的主要原因; 在压平过程中两种钢接触面间隙太大是造成结合面飞溅的主要原因。

关键词: 异种钢; 电阻塞焊; 飞溅; 冲击吸收能量

中图分类号: TG405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400323

0 序 言

近年来, 一种新型复合焊接方法——电阻塞焊(resistance plug welding, RPW)引起世界范围内的高度重视^[1-3]。笔者首次将这一工艺应用于汽车结构中异种钢(TRIP980 高强钢/SPCC 低碳钢)的焊接, 研究了焊接机理, 获得的接头拉剪失效载荷比同等条件下的电阻点焊接头高 20% 以上^[4-8], 然而, 在实际电阻塞焊接过程中经常会出现飞溅现象。飞溅作为电阻焊最常见的现象之一, 对接头的质量影响较大, 很容易造成熔核缩孔缺陷^[9-10], 使接头的横截面减小, 影响接头的力学性能。目前, 已有一些电阻点焊飞溅缺陷的研究, 如贺优优等人^[11]研究了高强塑积富 B-Al 合金材料的电阻点焊飞溅缺陷的主要工况因素, 并通过建立点焊熔核飞溅边界曲线, 从而有效地预测该材料点焊飞溅概率; 吕苏华等人^[12]从白车身电阻点焊飞溅统计、设备稳定性控制、参数制定、焊点调试、质量验证等方面给出了焊装生产中降低飞溅的优化方法; 张建优等人^[13]设计了一种具有防止飞溅和减少翘曲变形的复合电极。但电阻塞焊与电阻点焊飞溅缺陷的产生机理有很大不同。因此, 研究电阻塞焊接过程飞溅缺陷

的产生原因及规律, 探索减少飞溅缺陷的对策技术, 对提高异种钢电阻塞焊质量有重要意义。

文中工作在前期研究基础上, 首次从焊接工艺出发, 结合电阻塞焊过程的电阻及热量变化特点, 揭示异种钢电阻塞焊飞溅缺陷的产生机理, 丰富和完善电阻塞焊理论体系, 为汽车用高强异种钢板的电阻塞焊应用奠定理论与实践基础。

1 试验方法

试验材料为冷轧 TRIP980 高强钢和冷轧 SPCC 低碳钢, 试样尺寸为 100 mm × 28 mm × 1.5 mm。按照同种材质较易焊接的原则, 填充物选用 SPCC 低碳钢圆柱体, 综合考虑电极头大小、熔核扩展空间, 选用填充物尺寸 $\phi 5.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。焊接原理及过程如图 1 所示, 焊前先在待焊接处钻一圆通孔, 然后置入一种焊接性较好的填充物, 通孔直径与填充物直径完全匹配, 然后再进行电阻点焊, 使两种母材之间、母材与填充物之间均发生熔合。

考虑对焊接热输入有直接影响的参数: 焊接电流 (I)、焊接时间 (t) 和电极力 (P)。参考课题组前期工作^[4-8]及相关文献^[14]对厚度为 1.5 mm 的 TRIP 高强钢优化工艺参数范围, 试验选用焊接电流为 8 ~ 9 kA, 焊接时间 25 ~ 35 cycle, 电极力 3 ~ 4 kN。采用正交试验表 $L_9(3^4)$ 安排试验, 表 1 为正交试验因素与水平表。为了研究飞溅缺陷的

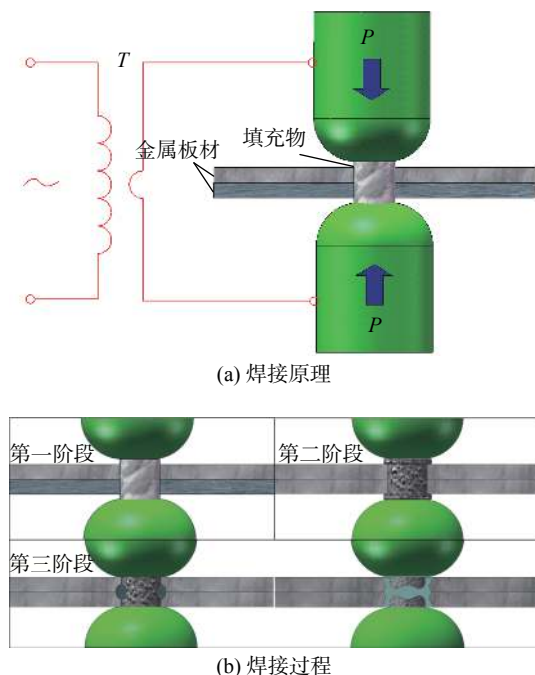


图 1 电阻塞焊示意图

Fig. 1 Diagram of resistance plug welding

产生机理,采用秒表记录整个焊接状态的变化(时间单位最终统一折算成 cycle),电阻变化及焊接过程如图 1b 所示.根据秒表记录的时间,得到各个阶段的发生时间,电阻塞焊的电阻变化过程大体可分为 3 个阶段:(1)填充物受热阶段.填充物外观形状没有变化,但焊接电流通过填充物使填充物温度升高,电阻增大;(2)压平阶段.当填充物温度上升到一定程度,填充物的屈服强度下降,在电极力作用下,填充物高出母材部分发生塑性变形,长度变短,两端形成铆钉帽;(3)熔核形成阶段.圆柱形填充物与两种母材的接触处(三种材料交界处)首先熔化,形成 2 个环形熔化区,同时,在焊接热循环的作用下,压平的铆钉帽与母材也发生熔合,随后 2 个环形熔化区向内外扩大,并最终汇合形成熔核.

表 1 正交试验因素与水平
Table 1 Factors and Levels of Orthogonal Test

因素水平	焊接电流 I/kA	焊接时间 t/cycle	电极力 P/kN	误差 e
1	8	25	3	1
2	9	30	3.5	2
3	10	35	4	3

注: 1 cycle = 0.02 s

采用 NI300 金属摆锤冲击试验机对不同因素水平下的电阻塞焊接头进行冲断试验,测定各组接

头的冲击吸收能量.

2 结果与讨论

2.1 极差分析

表 2 为根据正交试验设计得到的不同因素及水平搭配下对应的电阻塞焊接头剪切拉伸载荷的结果.其中, $k_n (n = 1 \sim 3)$ 分别为焊接电流 (I)、焊接时间 (t) 和电极力 (P) 的第 n 水平所在的试验中对应的剪切拉伸载荷的均值.极差 R 代表同一因素不同水平时 $k_n (n = 1 \sim 3)$ 中的最大值与最小值之差.

以电阻塞焊接头的剪切拉伸载荷为评价指标,比较表 2 中各列中的 k 值,以及极差 R 大小,数值大小代表该因素对剪切拉伸载荷的影响程度,表 2 中的各因素极差 $R_I = 0.51$, $R_t = 0.47$, $R_P = 0.18$,由极差 R 的数值大小可以看出,影响电阻塞焊接头剪切拉伸载荷的主、次因素依次为:焊接电流 (I)、焊接时间 (t)、电极力 (P).同时,可以看出,7 号试样发生了外侧边缘飞溅(焊接电流是 10 kA,在试验中属于硬规范),9 号试样发生了结合面飞溅,发生飞溅的接头冲击吸收能量 (A_k) 和剪切拉伸载荷 (F) 较低.

2.2 接头冲击吸收能量

由表 2 可以看出,经过正交试验优化,9 组试验结果中力学性能最好的接头剪切拉伸载荷达 10.7 kN,冲击吸收能量达 42.4 J,而出现飞溅缺陷的接头冲击吸收能量大大降低,最高仅为 38.7 J.由此可知,电阻塞焊接头的冲击吸收能量对飞溅缺陷的变化非常敏感,当出现飞溅缺陷时,接头的冲击断裂韧性损失极大,这对接头的使用可靠性带来严重威胁.

2.3 飞溅缺陷分析

重点对前面出现飞溅缺陷的 7 号、9 号试样接头进行分析,飞溅现象发生在焊点外侧边缘处和结合面如图 2 所示.凡是出现飞溅的接头,虽然焊点外侧表面直径较大,但实际熔核直径会减小,而且形状不规则,结合面面积会小于正常焊接的面积.

图 3 是出现飞溅现象的 TRIP980 高强钢/SPCC 低碳钢的异种钢板电阻塞焊接头组织形貌,熔核为长圆形,熔核中有明显的缩孔缺陷.这是由于在电阻塞焊接过程中,随着熔核的长大,熔池边缘的高温固态金属迅速液化,在电极力的作用下发生塑性

表 2 正交试验结果及极差分析表
Table 2 Orthogonal test results and range analysis table

序号	焊接电流 I/kA	焊接时间 $t(\text{cycle})$	电极力 P/kN	拉伸载荷 F/kN	冲击吸收能量 A_k/J	飞溅情况		
						位置	开始时间 $t_0(\text{cycle})$	持续时间 $t_1(\text{cycle})$
1	8	25	3	9.1	26.9			
2	8	30	3.5	9.8	39.3			
3	8	35	4	10.1	39.7			
4	9	25	3.5	10.1	40.3			
5	9	30	4	9.7	35.1			
6	9	35	3	10.7	42.4			
7	10	25	4	9.7	38.7	外侧边缘飞溅	10	8
8	10	30	3	10.3	41.2			
9	10	35	3.5	9.6	33.5	结合面飞溅	15	10
载荷均值 k_1	9.6	9.6	10					
载荷均值 k_2	10.1	9.9	9.8					
载荷均值 k_3	9.9	10.1	9.8					
极差 R	0.51	0.47	0.18					

变形和强烈再结晶而形成塑性环. 塑性环在整个通电加热阶段始终处于“产生—扩展—液化”这一动态变化过程, 即熔池先于熔核形成且始终伴随熔核一起变大, 它的作用是确保熔核循序渐进的长大和束缚液态金属防止沿板缝被挤出形成飞溅. 如果加热过急, 接触处温度上升太快, 而周围塑性环尚未

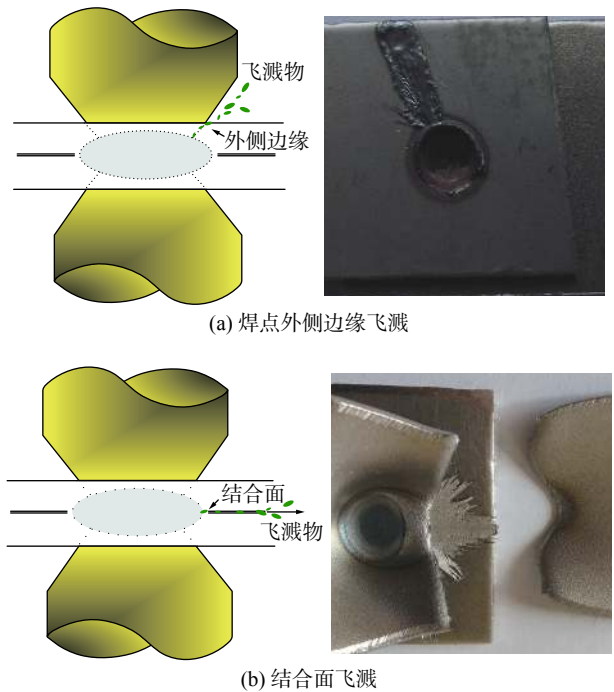


图 2 飞溅缺陷
Fig. 2 Spatter defect

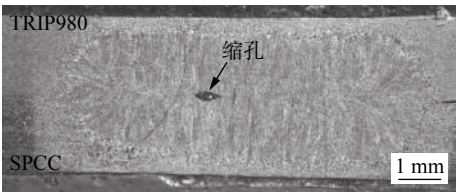


图 3 缩孔缺陷
Fig. 3 Shrinkage defect

形成, 接触处的液态金属便以飞溅的形式向板间缝隙喷射, 成为前期飞溅. 当初始熔核正常形成后, 继续加热, 熔核和塑性环同时向外扩展, 但是如果熔核的扩展速度快于塑性环扩展速度, 就会产生后期飞溅. 如果熔池扩展过程中受电极力的挤压而被压溃, 液态金属也可能冲破塑性环向外喷射而形成飞溅. 因此, 在整个焊接过程中, 塑性环的稳定性和完整性对焊接质量起到至关重要的作用, 而产生飞溅的根本原因就是由于塑性环破裂或不完整, 使之失去了对熔池金属的包容作用. 飞溅会造成焊接过程中熔核金属损失, 当焊接热输入结束后, 熔池从外向内开始冷却, 体积收缩而没有金属补充, 会产生缩孔缺陷, 从而使结合面变小, 影响接头力学性能.

2.4 飞溅缺陷的时序分析

根据前面的正交试验结果, 确定了试验出现飞溅的时间和位置. 为了进一步研究飞溅缺陷的

产生机理,对焊接过程及发生飞溅时序进行重点分析.图4是DN50-B工频点焊机工作时序图(图中的时序间距不代表时间长短),由图可知,脚踏开关启动后,气阀随后启动,电极头与试件接触完成预压阶段和加压阶段,当常规焊接条件下(无预热、回火条件,即 $t_4 = t_8 = 0$),在 t_5 结束后,焊接电流开始,电极力产生后,一直伴随着焊接结束.由表2可知,对于外侧边缘飞溅(7号试样),焊接时间25 cycle,发生飞溅的开始时间在第10 cycle,此时,填充物几乎压平,飞溅持续时间8 cycle;对于结合面飞溅(9号试样),焊接时间35 cycle,发生飞溅的开始时间在第15 cycle,此时,填充物已压平,飞溅持续时间10 cycle.由此可知,外侧边缘飞溅和结合面飞溅的发生时间和形式不同.

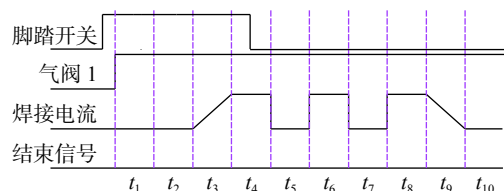


图4 点焊机工作时序图

Fig. 4 Working sequence diagram of spot welding machine

2.5 焊接电阻变化分析

由前面的正交试验分析可知,对于电阻焊,当焊接回路中的电阻固定时,焊接电流、焊接时间是决定焊接热量变化的决定因素,对接头力学性能影响较大,但是,电阻塞焊的电阻分布不同于电阻点焊,而且不同的焊接阶段电阻也不同,图5为电阻塞焊的填充物压平前和压平后的电阻分布.由前面的图1可知,电阻塞焊过程中,电极力一开始并不是作用在两种母材上,而是作用在填充物上,随着填充物被压平后,电极力才开始作用在母材上,因此,在整个焊接过程中其电阻会发生如图6所示变化:在A—B阶段,通电后,随着热输入的增加,填充物受热,电阻逐渐增加;B—C阶段,填充物在电极力的作用下,发生塑性变形,高度变小,横截面变大,填充物压平,电阻逐渐减小;C—D阶段,三种材料交界面开始形核,同时母材温度上升,逐渐熔化,形成焊核,电阻略有增加.

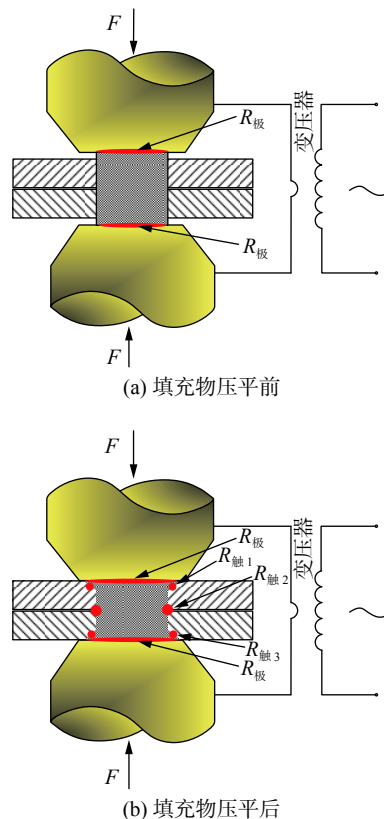


图5 电阻塞焊电阻分布图

Fig. 5 Resistance distribution of resistance plug welding

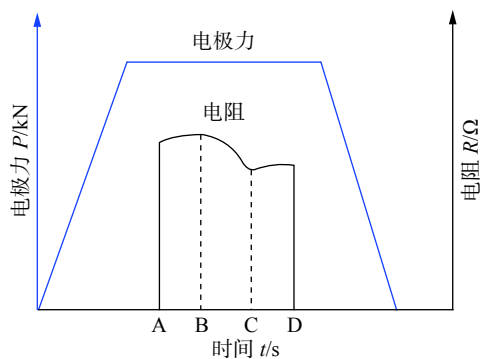


图6 焊接电阻随焊接时间的变化规律

Fig. 6 Variation of welding resistance with welding time

假设焊接电流恒定的情况下,由公式 $Q = I^2 R t$ 可知,在焊接过程中热输入曲线与电阻变化曲线一样,如图7所示.

图8为电阻塞焊接头焊前横截面示意图,对于a位置,从焊接过程中的B点—C点时间段(填充物压平阶段),母材一直受到填充物的侧向挤压,间隙逐渐减小,接触电阻减小,热输入急剧增加,当采用硬规范时极易顺着间隙发生焊点外侧边缘飞溅现象;对于b位置,其受电极力曲线如图9中虚线所示,在填充物发生塑性变形之前,母材不受电极力作用,当填充物受压变形

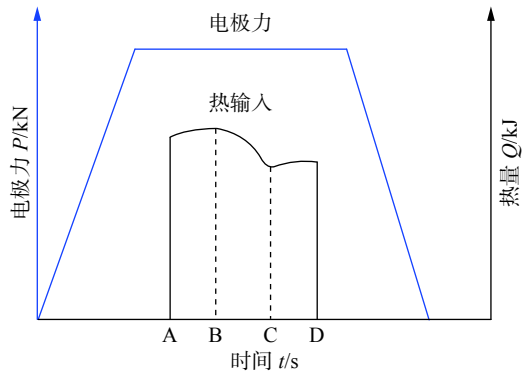


图 7 焊接热输入随焊接时间的变化规律

Fig. 7 Variation of welding heat input with welding time

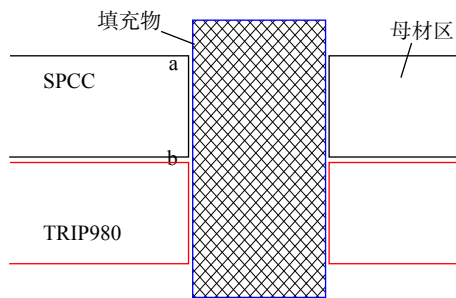


图 8 电阻塞焊结构示意图

Fig. 8 Drawing of resistance plug welding structure

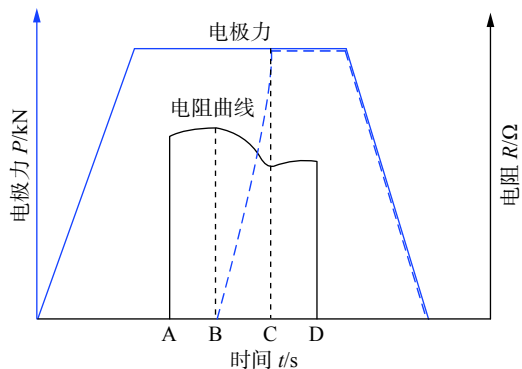


图 9 b 点受力曲线

Fig. 9 Pressure curve of point b

的同时, b 位置才受填充物和两种母材的挤压发生变形, 因此, 如果焊前 SPCC 钢和 TRIP980 钢之间的间隙过大时, b 位置会有很大的孔隙, 在焊接过程中的 C 点时刻会在该区域发生结合面飞溅现象。

综上所述, 鉴于以上对飞溅缺陷的机理分析, 接触电阻的波动对飞溅影响非常大, 因此, 为了避免外侧边缘飞溅的发生, 电阻塞焊适合于采用软规范进行焊接, 而不适合于采用硬规范, 同时, 为了避免结合面飞溅缺陷的出现, 两种板材的预制通孔与填充物直径的匹配精度至关重要。

3 结 论

(1) 影响电阻塞焊接头力学性能的焊接参数从大到小依次是焊接电流、焊接时间、电极力, 其中焊接电流对飞溅缺陷的影响最大, 出现飞溅缺陷的接头剪切拉伸载荷和冲击吸收功大大降低。

(2) 电阻塞焊过程包括填充物受热阶段、填充物压平阶段和熔核形核阶段, 随着焊接过程的进行及填充物形状的变化, 接头的电阻呈先增大后减小再增大的趋势。外侧边缘飞溅发生在填充物几乎压平时, 结合面飞溅发生在填充物压平后。

(3) 在压平阶段当采用硬规范时易发生焊点外侧边缘飞溅现象; 焊前 SPCC 钢和 TRIP980 钢之间的间隙太大易造成结合面飞溅现象。

参考文献:

- [1] Feng Y Q, Luo Z, Li Y. A novel method for resistance plug welding of 7075 aluminum alloy[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(16): 2077 – 2083.
- [2] 冯悦桥, 罗震, 李洋, 等. 新型电阻塞焊连接方法分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(8): 51 – 54.
Feng Yueqiao, Luo Zhen, Li Yang, *et al.* Investigation on a novel resistance plug welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(8): 51 – 54.
- [3] 冯悦桥, 罗震, 罗宇, 等. 新型电阻塞焊连接方法研究[C]//中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集—S01 压力焊. 南昌, 2013: 90 – 94.
- [4] Cen Y D, Chen F R, Li C Z. Optimization of process parameters and microstructure of the resistance plug welding TRIP980 steel and SPCC steel[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(12): 2297 – 2306.
- [5] 岑耀东, 陈芙蓉. TRIP980 高强钢/SPCC 低碳钢的异种钢板电阻点焊接头组织及力学性能研究[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 216 – 224.
Cen Yaodong, Chen Furong. Microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of dissimilar steels of TRIP 980 high strength steel and SPCC low carbon steel[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2018, 32(3): 216 – 224.
- [6] 岑耀东, 陈芙蓉. 异种钢电阻塞焊工艺优化及接头性能分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(7): 109 – 114.
Cen Yaodong, Chen Furong. Process optimization and joint performance analysis of resistance plug welding of dissimilar steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(7): 109 – 114.
- [7] 岑耀东, 陈芙蓉. TRIP980 高强钢/SPCC 低碳钢的异种钢电阻

- 点焊工艺优化及接头性能分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 91-98.
- Cen Yaodong, Chen Furong. Properties and optimized process of TRIP980 high strength steel and SPCC low carbon steel resistance spot welding of dissimilar steel[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 91-98.
- [8] Li L H, Chen F R. Microstructure and mechanical properties of dissimilar steel plate resistance plug welding joints[J]. China Welding, 2017, 26(2): 43-51.
- [9] Zhang C Q, Guang M, Jin X, *et al.* Study of joining mechanism of ABS polymer and steel/aluminum by resistance spot welding[J]. China Welding, 2018, 27(2): 57-62.
- [10] 李永兵, 马运五, 楼 铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 44-48.
- Li Yongbing, Ma Yunwu, Lou Ming, *et al.* Light weighting of car body and its challenges to joining technologies[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 44-48.
- [11] 贺优优, 刘伟杰. 新型高强塑积富 B-Al 合金的电阻点焊熔核飞溅研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(8): 2404-2410.
- He Youyou, Liu Weijie. Nugget expulsion of resistance spot welding of new high-strength plasticity B-Al-rich alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(8): 2404-2410.
- [12] 吕苏华, 李友力, 朴金赫, 等. 轿车车身电阻点焊飞溅流程研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(23): 222-223.
- Lü Suhua, Li Youli, Piao Jinhe, *et al.* Study on reducing spatter process for car body resistance spot welding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(23): 222-223.
- [13] 张建优, 程方杰, 肖 鑫, 等. 无飞溅电阻点焊用复合电极的研究[J]. 汽车技术, 2011(4): 50-52.
- Zhang Jianyou, Cheng Fangjie, Xiao Xin, *et al.* The study of non-splash resistance spot welding using composite electrode[J]. Automobile Technology, 2011(4): 50-52.
- [14] Emre H E, Kaçar R. Development of weld lobe for resistance spot-welded TRIP800 steel and evaluation of fracture mode of its weldment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9): 1737-1747.
-
- 第一作者简介:** 岑耀东, 男, 1982 年出生, 博士, 讲师. 主要从事异种钢焊接新技术、新工艺方面的科研工作. 发表论文 27 余篇. Email: cydtgyx@163.com
- 通信作者简介:** 陈林, 男, 教授. Email: chenlin39805@163.com

[上接第 114 页]

- [7] 张传臣, 黄继华, 张田仓, 等. 异质钛合金线性摩擦焊接头微观组织与显微硬度分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(4): 97-100.
- Zhang Chuanchen, Huang Jihua, Zhang Tiancang, *et al.* Investigation on microstructure and microhardness of linear friction welded joints of dissimilar titanium alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(4): 97-100.
- [8] 刘志成, 张利军, 张晨辉. 氧含量对 TC4 钛合金力学性能的影响[J]. 世界有色金属, 2016(16): 151-153.
- Liu Zhicheng, Zhang Lijun, Zhang Chenhui. Effect of oxygen content on the mechanical properties of TC4 titanium alloy[J]. World Nonferrous Metals, 2016(16): 151-153.
- [9] 吴清枝, 李佐臣, 王卫民. 氧对 Ti-75 合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 1995(1): 28-32.
- Wu Qingzhi, Li Zuochen, Wang Weimin. Effect of oxygen content on microstructure and properties of Ti-75 alloy[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 1995(1): 28-32.
- [10] Huang Yang, Ren Gao, Ren Qinglong. The element transfer behavior of gas pool coupled activating TIG welding[J]. China Welding, 2018, 27(4): 5-13.
- [11] 张传臣, 张田仓, 季亚娟, 等. 线性摩擦焊接头形成过程及机理[J]. 材料工程, 2015, 43(11): 39-43.
- Zhang Chuanchen, Zhang Tiancang, Ji Yajuan, *et al.* Formation process and mechanism of linear friction welding joint[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(11): 39-43.
- [12] Li W Y, Ma T, Li J. Numerical simulation of linear friction welding of titanium alloy: effects of processing parameters[J]. Materials & Design, 2010, 31(3): 1497-1507.
-
- 第一作者简介:** 常川川, 男, 1994 年出生, 硕士. 主要从事钛合金线性摩擦焊的研究工作. Email: 1137421580@qq.com
- 通信作者简介:** 张田仓, 男, 研究员. Email: bjtc@yahoo.com.cn