

5005 铝合金与 1Cr18Ni9Ti 的真空钎焊分析

张丽霞, 孟德强, 郑文龙, 冯吉才

(哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用 Al-Si-Mg 钎料成功实现了 5005 铝合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的真空钎焊, 借助扫描电镜、能谱分析仪和 X 射线衍射仪对焊后接头界面组织进行分析, 对接头抗剪强度进行测试。结果表明, 焊后接头界面结构从 1Cr18Ni9Ti 不锈钢侧到 5005 铝合金侧的界面组织依次为 FeAl, FeAl₃, Fe_mAl_n + αAl。随着钎焊温度的升高或保温时间的延长, 接头抗剪强度均呈现先升高后降低的变化趋势。当钎焊温度为 580 ℃, 保温时间为 15 min 时, 接头抗剪强度达到最大值 49 MPa。接头断裂形式受钎焊温度的影响, 当钎焊温度较低时, 接头断裂于铝合金侧氧化膜层及 Fe_mAl_n + αAl 反应层; 温度升高至 580 ℃时, 接头断裂于 Fe_mAl_n + αAl 反应层中, 接头抗剪强度最高。

关键词: 5005 铝合金; 1Cr18Ni9Ti 不锈钢; 真空钎焊; 界面组织; 抗剪强度

中图分类号: TG 454 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2017)01-0107-05

0 序 言

随着航空、航天、汽车、机械制造以及化学工业的发展, 5005 铝合金因其密度小、热导率和电导率高等优点, 成为应用最广泛的有色金属材料之一。但由于 5005 铝合金熔点和强度较低, 且在碱性环境中的耐腐蚀性较差的问题, 使其应用受到一定的限制。1Cr18Ni9Ti 不锈钢具有较好的耐腐蚀性, 较高的熔点和强度, 优良的塑韧性和冷热加工性能。因此实现 5005 铝合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的连接, 可使连接后的构件兼具上述两种材料的优点, 扩展它们的应用领域。

众所周知, Al 和 Fe 在晶体结构、物化性质等方面相差较大, 因此铝合金和不锈钢的连接也存在一定的困难, 特别是铝合金表面存在氧化膜以及两母材线膨胀系数的差异, 也增加了连接难度。目前铝-钢异种金属连接方法主要包括熔化焊、摩擦焊、钎焊等。当采用熔化焊时, 接头残余应力较大、焊缝成分不均匀, 界面存在裂纹、夹渣等缺陷^[1], 上述情况的发生对接头性能产生不利影响。摩擦焊对工件的形状要求严格, 装配要求也比较高, 接头的韧性差, 易于发生开裂^[2,3]。当采用钎焊方法对铝合金和不锈钢进行连接时, 尽管界面处有大量金属间化合物生成, 影响接头强度, 但通过控制钎料成分和工艺条件, 可以获得性能良好的接头^[4,5]。文中采用 Al-Si-

Mg 钎料对 5005 铝合金和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行钎焊, 随后分析接头界面结构及形成机理, 分析工艺参数对接头界面结构和抗剪强度的影响规律。

1 试验方法

试验所用母材为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 5005 铝合金, 它们的化学成分分别见表 1 和表 2 所示。试验前, 利用线切割方法将 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 5005 铝合金分别加工成 30 mm × 10 mm × 1.5 mm 和 7 mm × 7 mm × 5 mm 的试样。试验使用的钎料为 150 μm 厚的 Al-Si-Mg 箔状钎料, 其化学成分见表 3 所示。

表 1 5005 铝合金的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of 5005 aluminum alloy

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
0.3	0.7	0.2	0.2	0.5~1.1	0.1	6.25	余量

表 2 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

Table 2 Chemical compositions of 1Cr18Ni9Ti stainless

C	Cr	Ni	Mn	P	S	Fe
<0.15	17~19	8~10	<2.00	<0.03	<0.03	余量

表 3 Al-Si-Mg 钎料的化学成分(质量分数, %)

Table 3 Chemical compositions of Al-Si-Mg

Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Al
11~13	0.8	0.25	0.1	0.2	余量

收稿日期: 2015-01-24

基金项目: 清华大学先进成形制造教育部重点实验室开放基金资助项目(2010007)

钎焊前,使用砂纸对待焊母材表面进行逐级打磨,并使用丙酮溶液对母材进行超声清洗. 为去除铝合金表面氧化膜,在 40 ℃ 条件下,用 NaOH 稀溶液进行超声碱洗,再用稀 HNO_3 溶液进行酸洗. 文中采用 Cnetorr6-1650-15T 真空扩散焊机进行钎焊试验,钎焊温度为 560 ~ 590 ℃,保温时间为 5 ~ 25 min. 焊后采用扫描电镜 (SEM, S-4007) 观察界面组织及断口形貌;用旋转阳极 X-射线衍射仪 (XRD, D/max-rb) 对界面产物进行物相分析,确定反应产物;采用 INSTRON MODEL 5569 电子万能试验机进行压剪测试.

2 试验结果与分析

2.1 钎焊接头的界面分析

图 1 为钎焊温度 580 ℃,保温时间 15 min 时接头的微观组织形貌. 从图 1 中可知,不锈钢、5005 铝合金与钎料连接紧密且反应充分,界面主要分成 I, II, III 三个反应层. 对界面各反应层进行能谱分析,结果如表 4 所示,发现接头各反应层均主要由 Fe, Al 两种元素构成.

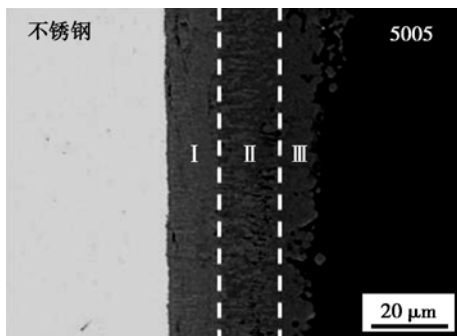


图 1 钎焊温度 580 ℃、保温时间 15 min 时接头的显微组织
Fig. 1 Microstructures of joints brazed at 580 ℃/15 min

表 4 接头各区主要元素成分及生成的可能相 (原子分数, %)
Table 4 Chemical compositions of elements and possible phases for joints

区域	Mg	Al	Si	Fe	可能相
I	2.2	47.5	3.0	35.0	FeAl
II	1.4	65.8	2.1	22.2	FeAl_3
III	1.4	72.1	3.4	17.1	$\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$

从图 1 可知, I 反应层呈浅灰色. 由表 4 可知, Fe, Al 原子比接近 1:1, 结合 Fe-Al 二元相图, 推断该区成分为 FeAl 化合物. II 反应层颜色相对 I 反应层颜色加深. 由表 4 可知, Fe, Al 原子比接近 1:3, 推断该反应层可能为 FeAl_3 化合物. 靠近 5005 铝合金的

III 反应层中, 由于 Al 元素含量较多, 因此钎缝中主要为析出的 Al 基固溶体 αAl ; 由于该反应层中还含有少量的 Fe, 因此该反应层可能有 Fe-Al 金属间化合物生产. 综上所述, 接头界面处 I, II, III 三个反应层的主要成分是由溶解和扩散的部分铁、铝及原始钎料组成, 因此接头的冶金结合主要是靠 Fe-Al 之间形成的金属间化合物来实现的.

为进一步确定接头界面反应产物, 对接头断口进行了 XRD 检测. 结果如图 2 所示, 表明界面有 FeAl 和 FeAl_3 化合物生成, 这与能谱分析结果一致, 证明接头界面主要由 Fe-Al 金属间化合物组成.

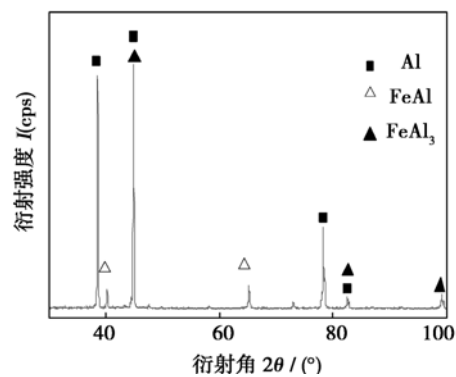
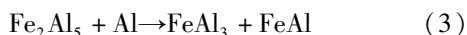


图 2 接头处的 XRD 谱
Fig. 2 XRD pattern of zones for joints

查阅相关文献得知, 在钎焊加热的初始阶段, Al-Si-Mg 钎料中的 Mg 能够以蒸汽的形式渗入铝合金表层与扩散进入铝合金表层的 Si 形成低熔点的 Al-Si-Mg 液相, 液相形成破坏了氧化膜与铝合金的结合, 达到了去除氧化膜的目的^[6], 保证钎料在铝合金表明有较好的润湿性.

随着加热温度的逐渐升高, 液态钎料中的 Al 元素与不锈钢中的 Fe 元素相互扩散, 形成富铝相 FeAl_3 (式(1)), 该反应会释放大量的热^[7], 造成反应区局部温度升高, 当温度高于共晶温度 655 ℃ 时, FeAl_3 与 Al 形成共晶液相 L (式(2)). 随着反应进行, 不锈钢中 Fe 元素不断溶解, 在界面处聚集并向远离界面处不断扩散, 使得液态钎料中 Fe 元素含量逐渐增加^[8], 根据 Fe-Al 二元相图可知, 随着温度的升高, Fe 元素在 Al 元素中的溶解度不断升高, 会使得界面处有 Fe_2Al_5 金属间化合物生产, 但由于 Fe_2Al_5 不稳定, 会与 Al 继续反应生成 FeAl 和 FeAl_3 (式(3)). 但当钎焊温度较低或保温时间较短时, 在钎缝中可以观察到残留的、尚未来得及反应的黑色 Fe_2Al_5 相 (图 3 和图 5).



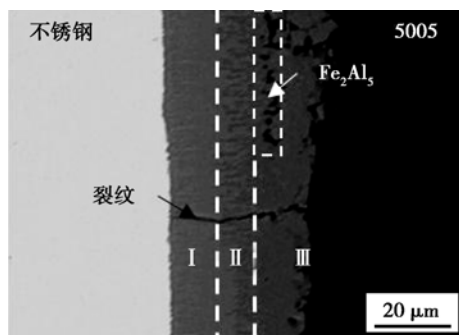


伴随着上述反应的进行,铝合金侧的母材会熔解进入钎缝,在钎焊冷却过程中形成 αAl 固溶体。

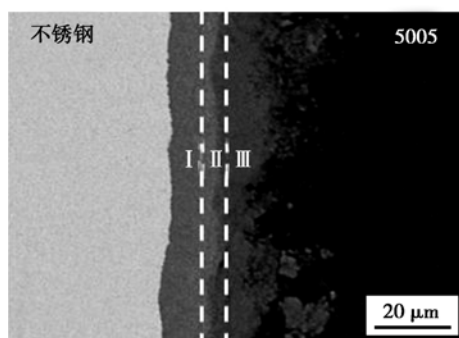
综上所述,焊后接头形成的界面结构为1Cr18Ni9Ti 不锈钢/ FeAl / FeAl_3 / $\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$ /5005 铝合金。

2.2 工艺参数对接头组织的影响

钎焊温度是钎焊的重要工艺参数,对接头界面结构具有重要的影响。文中固定保温时间为15 min,分析钎焊温度对接头界面组织的影响,结果如图3所示。



(a) 钎焊温度 570 °C, 保温时间 15 min 时接头显微组织



(b) 钎焊温度 590 °C, 保温时间 15 min 时接头显微组织

图3 不同钎焊温度时接头的显微组织

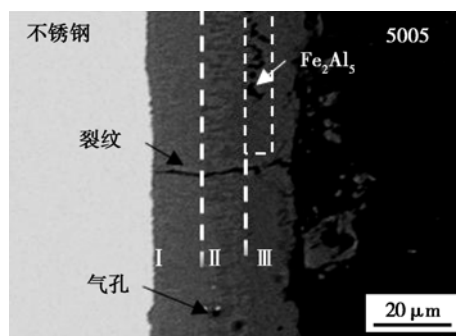
Fig. 3 Microstructures of joints brazed at different brazing temperature

由图1可知,钎焊温度为580 °C时,不锈钢、5005 铝合金与钎料之间连接紧密、反应充分,焊缝成形平整致密。但当钎焊温度为570 °C时,接头中会出现裂纹缺陷(图3a),这是由于Mg元素的去膜作用未充分发挥,钎料去除5005 铝合金表面氧化膜的效果不明显。当钎焊温度为590 °C时,由于热输入量增大,铝合金溶解量相对较大,Ⅲ反应层厚度明显增加(图3b)。

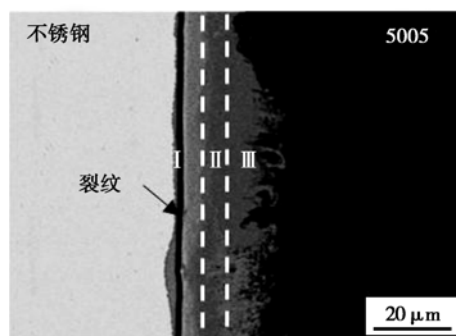
为了分析保温时间对接头界面结构的影响,文

中固定钎焊温度590 °C,分析保温时间分别为5 min,15 min,25 min时接头的界面组织形貌。

如图4a所示,当保温时间为5 min时,界面反应不充分,焊缝中产生了裂纹缺陷。随着保温时间的延长,钎料与两侧母材反应充分,焊缝成形得到改善,如图3b所示。而当保温时间达到25 min时,如图4b所示,由于反应过于剧烈,接头残余应力增大,在不锈钢侧出现了贯穿性裂纹。



(a) 钎焊温度 590 °C, 保温时间 5 min 时接头显微组织



(b) 钎焊温度 590 °C, 保温时间 25 min 时接头显微组织

图4 不同保温时间时接头的显微组织

Fig. 4 Microstructures of joints brazed at different holding time

2.3 工艺参数对接头性能的影响

图5a所示为保温时间15 min,钎焊温度对接头抗剪强度的影响。随着钎焊温度的升高,接头抗剪强度呈现先升高后降低的变化趋势。当钎焊温度为580 °C时,钎料反应适当,焊缝无缺陷,接头抗剪强度达到最大值为49 MPa。

图5b所示为钎焊温度590 °C时,保温时间对接头抗剪强度的影响。可以看出,保温时间对接头抗剪强度的影响与钎焊温度对接头抗剪强度的影响类似,随着保温时间的延长,钎料充分熔化,与两侧母材的反应程度增加,接头抗剪强度逐渐升高,但当保温时间过长时,接头残余应力增大,界面处产生了贯穿性裂纹,接头抗剪强度降低。

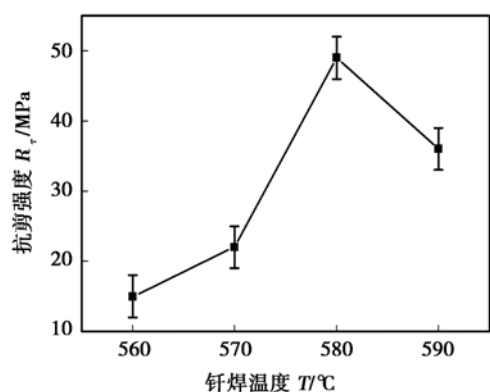
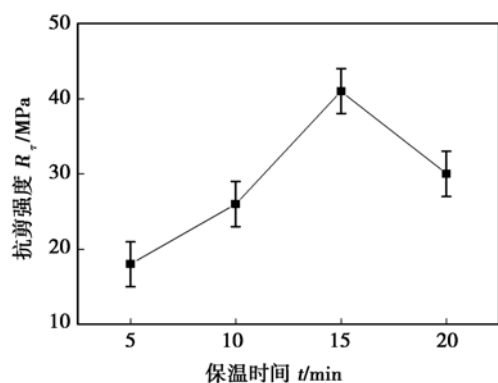
(a) 钎焊温度对接头抗剪强度的影响 ($t=15\text{ min}$)(b) 保温时间对接头抗剪强度的影响 ($T=590\text{ }^\circ\text{C}$)

图 5 工艺参数对接头抗剪强度的影响

Fig. 5 Effect of the process parameters on shear strength

钎焊温度对接头的断裂方式和断裂形貌具有明显的影响. 采用光学显微镜对不同钎焊温度的压剪断口试样进行观察, 结果如图 6 所示, 其中图 6a 和图 6b 所示为保温时间 15 min, 钎焊温度为 570 $^\circ\text{C}$, 580 $^\circ\text{C}$ 的试样断口形貌.

由图 6a 可知, 当钎焊温度为 570 $^\circ\text{C}$ 时, 由于钎料的去氧化膜效果不够充分, 母材表面的氧化膜仍有较多的残留, 接头主要断在 $\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$ 反应层和铝合金侧氧化膜层. 当钎焊温度升高到 580 $^\circ\text{C}$ 时, 接头断裂位置发生变化, 断裂只发生在 $\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$ 反应层处, 此时接头抗剪强度达到最大值.

3 结 论

(1) 采用 Al-Si-Mg 钎料钎焊 5005 铝合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 当钎焊温度为 580 $^\circ\text{C}$, 保温时间为 15 min 时, 接头界面结构为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢/ $\text{FeAl}/\text{FeAl}_3/\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}/5005$ 铝合金.

(2) 当钎焊工艺参数较低时, 5005 铝合金表面存在残余氧化膜, 因此焊缝中有明显裂纹或气孔缺陷出现; 当钎焊温度升高至 580 $^\circ\text{C}$, 焊接缺陷消失,

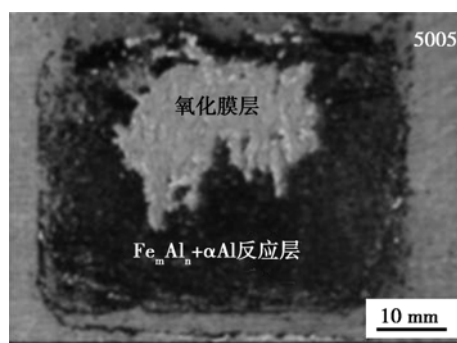
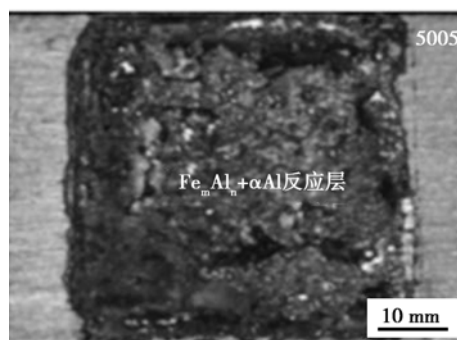
(a) 接头的断口形貌 (570 $^\circ\text{C}/15\text{ min}$)(b) 接头的断口形貌 (570 $^\circ\text{C}/15\text{ min}$)

图 6 接头断口形貌

Fig. 6 Structure of joint brazed at different process parameters

焊缝成形良好; 当钎焊工艺参数进一步增加, 由于焊接热输入量过大, 界面反应过分, 接头存在较高残余应力, 焊缝产生了明显裂纹.

(3) 随着钎焊温度的升高或保温时间的延长, 接头抗剪强度呈现先升高后降低的变化趋势. 当钎焊温度为 580 $^\circ\text{C}$, 保温时间为 15 min 时, 接头获得最大抗剪强度 49 MPa.

(4) 钎焊温度对接头断裂位置具有明显影响. 当钎焊温度较低时, 接头断裂发生在 $\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$ 反应层和铝合金侧氧化膜层处; 当钎焊温度升高到 580 $^\circ\text{C}$ 时, 断裂发生在 $\text{Fe}_m\text{Al}_n + \alpha\text{Al}$ 反应层处.

参考文献:

- [1] Rathod M J, Kutsuna M. Joining of aluminium alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding[J]. Welding Journal, 2004, 83 (1): 16-26.
- [2] 王希靖, 申志康, 张忠科. 铝和镀锌钢板的搅拌摩擦焊搭接分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(12): 97-100.
Wang Xijing, Shen Zhikang, Zhang Zhongke. Study of friction-stir-welded lap joint of aluminum and zinc-coated steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(12): 97-100.

- [3] 傅 莉,毛信孚,史学芳. LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 9-14.
Fu Li, Mao Xinfu, Shi Xuefang. Friction welding of LF6 anti-rust aluminum and HR-2 anti-hydrogen stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 9-14.
- [4] 钱乙余,董占贵,石素勤,等. 铝接触钎焊的成缝行为[J]. 焊接学报, 2001, 22(5): 13-16.
Qian Yiyu, Dong Zhanguai, Shi Suqin, *et al.* behavior of aluminum contact reactive brazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001, 22(5): 13-16.
- [5] 吴铭方,司乃潮,陈 健. 铝/镀银层/钢的扩散钎焊及界面化合物的生长行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(6): 1209-1213.
Wu Mingfang, Si Naichao, Chen Jian. Diffusion brazing of Al/Ag plating layer/steel and growth behavior of interface compound[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(6): 1209-1213.
- [6] 马海军,李亚江,王 娟. Al/Cu 异种有色金属的真空钎焊工艺[J]. 焊接技术, 2007, 36(1): 36-38.
Ma Haijun, Li Yajiang, Wang Juan. Study on Al/Cu dissimilar nonferrous metals vacuum brazing technology[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 36(1): 36-38.
- [7] Rabin B H, Wright R N. Reaction processing of iron aluminides[J]. Materials Science and Engineering A, 1992, 153(1): 706-711.
- [8] 王兴庆. 反应烧结制取铁铝系金属间化合物的分析[D]. 长沙:中南大学, 2002.

作者简介: 张丽霞,女,1977 年出生,博士,教授,博士研究生导师. 主要从事新材料及异种材料的钎焊及扩散焊接技术及应用基础研究. 发表论文 60 余篇. Email: zhanglxia@hit.edu.cn

通讯作者: 冯吉才,男,博士,教授,博士研究生导师. Email: fengjc@ hit.edu.cn

[上接第 16 页]

于焊缝的截面上观察,熔池内部易出现逆时针环流. 通过对比试验结果与计算结果发现,计算所得穿孔时间和焊接各时刻穿孔深度与试验结果吻合良好.

参考文献:

- [1] 董春林,吴 林,邵亦陈. 穿孔等离子弧焊发展历史与现状[J]. 中国机械工程, 2000, 11(5): 577-581.
Dong Chunlin, Wu Lin, Shao Yichen. Development history and status of K-PAW[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(5): 577-581.
- [2] Keanini R G, Rubinsky B. Three dimensional simulation of the plasma arc welding process[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1993, 36(13): 3283-3298.
- [3] Fan H G, Kovacevic R. Keyhole formation and collapse in plasma arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 32(22): 2902-2909.
- [4] 张 涛,武传松,陈茂爱. 穿孔等离子弧焊接熔池流动和传热过程的数值模拟[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1025-1032.
Zhang Tao, Wu Chuansong, Chen Maoai. K-PAW of numerical simulation of fluid flow and heat transfer process of molten pool[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(9): 1025-1032.
- [5] Li T Q, Wu C S, Feng Y H. Modeling of the thermal fluid flow and keyhole shape in stationary plasma arc welding[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, 34(1): 117-125.
- [6] Li Yan, Feng Yanhui, Zhang Xinxin, *et al.* Energy propagation in plasma arc welding with keyhole tracking[J]. Energy, 2014, 64(1): 1044-1056.
- [7] 郑 伟. 离子弧热-力作用随穿孔过程的实时调整[D]. 济南:山东大学, 2013.
- [8] Hu Q X, Wu C S, Zhang Y M. Experimental determination of the weld penetration evolution in keyhole plasma arc welding[J]. China Welding, 2007, 16(1): 6-8.

作者简介: 胡庆贤,男,1976 年出生,博士,副教授. 主要从事焊接数值模拟与仿真方面的科研和教学工作. 发表论文 20 余篇. Email: huqingxian@126.com