

湿度对铝合金接头裂纹敏感性的影响规律及机理

阮 野¹, 苏金龙¹, 乔建毅², 邱小明¹, 邢 飞¹

(1. 吉林大学 材料科学与工程学院, 长春 130025; 2. 中广核研究院有限公司, 深圳 518031)

摘 要: 采用能谱、扫描电镜和 X 射线衍射等测试方法, 研究了湿度对铝合金接头裂纹敏感性的影响规律及机理。结果表明, 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 改良的铝合金鱼骨试件接头表面可见结晶裂纹和液化裂纹; 随着湿度的增大, 接头裂纹敏感性逐渐提高, 其中结晶裂纹的敏感性逐渐降低, 液化裂纹的敏感性逐渐提高; 湿度增大, 铝合金焊缝晶粒逐渐细化, 裂纹扩展阻力升高, 焊缝组织细化导致结晶裂纹敏感性降低; 同时提高湿度, 电弧温度降低, 焊接热输入量减少, 液态金属越发不易在晶界处形成连续的网状薄膜结构, 也导致结晶裂纹敏感性降低。

关键词: 相对湿度; 铝合金; 接头; 裂纹敏感性

中图分类号: TG 442

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.2019400018

0 序 言

铝合金具有密度低、强度高和塑性好等优点, 被广泛地应用于制造高速列车车体, 例如枕梁、牵引梁和车钩座等关键部件^[1-3]。铝合金是比较难焊的金属, 熔化温度低, 导热性好, 热膨胀系数大, 焊后接头易存在裂纹缺陷。裂纹缺陷极大地降低了铝合金构件接头的力学性能, 是重大的安全隐患, 轻则造成构件报废, 重则导致列车运行时发生解体。湿度是焊接过程中影响铝合金接头裂纹敏感性的重要因素^[4-6]。高速列车车体焊接工艺文件规定, 当相对湿度达到 50% 时, 操作者焊接前必须进行试焊, 焊接工程师根据试焊试件的焊接质量, 确定操作者是否可以焊接铝合金构件; 当相对湿度超过 60% 时, 不允许进行焊接。鉴于裂纹缺陷的重大危害, 许多焊接工作者已经开展了铝合金裂纹缺陷的研究。张健等人^[7]利用热塑性试验研究了 6005A 铝合金的热裂纹敏感性, 分析了激光-MIG 复合热源焊接 6005A 铝合金型材的焊接热裂纹问题, 更改坡口导致的焊缝金属母材稀释率增大是热裂纹产生的原因。Alatorre 等人^[8]研究了改进的间接电弧焊和熔化极气体保护焊 7075-T651 铝合金接头疲劳裂纹的生长。Wang 等人^[9]采用统计分析的方法, 开展了铝合金光纤激光焊焊接接头热裂纹敏感性的研究,

该方法能够在焊接参数范围内对热裂纹率进行充分的预测, 可实现无裂纹焊接。

上述研究极大的丰富了铝合金焊接理论, 促进了铝合金在各个制造领域的应用。但关于铝合金裂纹的影响因素以及机理仍有待进一步的研究。研究湿度对铝合金接头裂纹敏感性的影响规律及机理具有重要的理论和现实意义。

1 试验方法

试验采用的铝合金材料牌号为 6082-T6, 焊丝是 ER5087。6082-T6 铝合金与 ER5087 焊丝化学成分见表 1。铝合金焊接热裂敏感性采用改良型鱼骨状试验方法进行评价, 试件具体规格尺寸见图 1; 焊丝直径是 1.2 mm。焊接方法采用熔化极惰性气体保护焊 (MIG), 焊机是奥地利生产的福尼斯焊接设备, 型号是 TransPuls Synergic 4000; 机器人是日本安川生产的 Motoman-Up20 型机器人。焊接工艺是堆焊, 背面使用陶瓷垫板; 焊接电流为 195 A, 焊接电压为 20 V, 焊接速度为 60 cm/min。

焊接接头横截面采用标准流程进行处理, 包括打磨、抛光和腐蚀等。试件先经水磨砂纸打磨至 2000 号, 再用抛光膏抛光, 超声波清洗后, 在室温条件下采用 Keller(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O) 溶液进行腐蚀。采用日立 S-3400N 扫描电镜分析接头的微观组织形貌; 利用 PV9900-H8010 型能谱仪和 X Pert3 Powder X 射线衍射仪研

表 1 6082-T6 铝合金与 ER5087 焊丝的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of 6082-T6 Al alloy and ER5087 wire

材料	Si	Mg	Cu	Zn	Cr	Fe	Mn	Ti	V	Zr	Al
6082-T6	0.91	0.42	0.03	0.04	0.01	0.16	0.54	0.02	0.02	—	余量
ER5087	0.06	4.73	—	—	0.10	0.16	0.81	0.07	—	0.10	余量

究接头的化学成分和物相结构;采用工具显微镜测量裂纹长度.

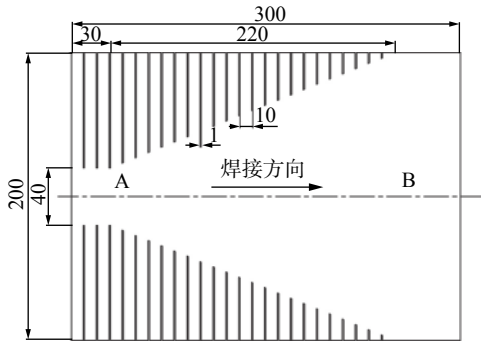


图 1 改良的鱼骨试样尺寸示意图 (mm)

Fig.1 Shape and size of modified herringbone specimen

裂纹敏感系数 K 被用于评价铝合金接头热裂纹倾向, K 值越大说明铝合金接头裂纹敏感性越大, 其中 $K=K_1+K_2$. K_1 和 K_2 大小可用式 (1) 和式 (2) 计算.

$$K_1 = \frac{\sum L_1}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{\sum L_2}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L_1 为结晶裂纹的长度; L_2 为液化裂纹的长度; L_0 为焊道总长度.

2 试验结果和讨论

2.1 湿度对铝合金接头裂纹敏感性的影响

图 2 是 40%, 60% 和 80% 湿度条件下, 铝合金鱼骨状试件焊缝表面形貌. 由图 2 可知, 接头表面可以观察到裂纹缺陷. 裂纹位于焊缝中部以及热影响区, 中间部位的裂纹是结晶裂纹, 热影响区的裂纹是液化裂纹; 结晶裂纹的平均长度分别为 92.50, 74.12 和 64.12 mm, 液化裂纹的平均长度分别为 0, 48.72 和 103.34 mm, 裂纹敏感系数分别为 30.83%, 40.95% 和 55.82%, 如图 3 所示. 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 铝合金接头的裂纹敏感性随湿度

的增加逐渐提高. 部分学者认为^[10-11], 铝合金的焊接热裂纹敏感性和 Mg 元素含量有关. 根据固溶体的生长规律, 溶质在凝固过程中将发生再分配, 溶质元素的局部富集将降低焊道中心合金的固相线温度. 6082-T6 铝合金焊缝金属在凝固后期, 在胞状枝晶间隙形成低熔点的 Al(Mg) 液膜, 使焊缝金属具有更低的凝固终了温度, 因此热裂敏感系数更大; Mg 含量在 0%~6.00% 条件下, 随着 Mg 元素含量的增加, 铝合金焊接热裂纹的敏感性先升高再降低, 当 Mg 元素含量达到 1.5% 左右时, Mg 对铝合金的焊接热裂纹敏感性的影响达到最大值.

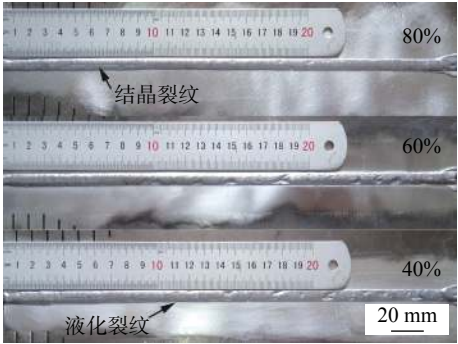


图 2 湿度对接头表面形貌的影响

Fig.2 Effect of humidity on morphology

能谱扫描结果表明, 在 40%~80% 相对湿度的条件下, Mg 元素含量分别是 2.43%, 2.65% 和 2.86%, Mg 元素含量逐渐增加. 水蒸气的导热系数大于空气的导热系数, MIG 焊焊接铝合金鱼骨状试件时, 随着相对湿度的增大, 焊接区域内水蒸气的含量提高, 电弧对附近的水蒸气传导的热量增多, 电弧温度降低, 电弧对焊缝金属中 Mg 元素的烧损量逐渐减少, Mg 元素过渡到焊缝中的含量提高. 因此, 焊缝金属中 Mg 元素的含量提高, 接头中结晶裂纹长度逐渐缩短. 同时随着相对湿度的增大, 电弧温度逐渐降低, 焊接热输入量降低, 热影响区金属高温停留的时间变短, 当焊接热源远离时, 热影响区重熔金属填充晶界的时间缩短, 液化裂纹敏感性提高, 长度变长.

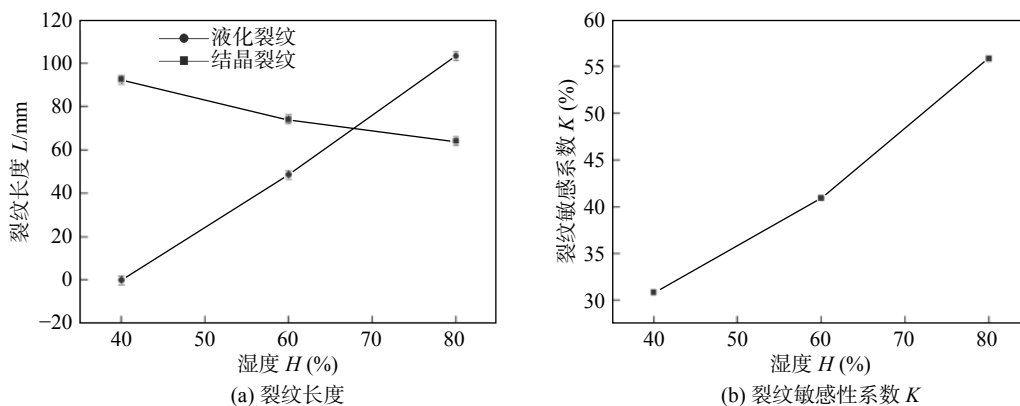


图 3 湿度对接头裂纹敏感性的影响

Fig. 3 Effect of humidity on crack sensitivity

2.2 湿度对焊缝组织与成分的影响

图 4 是 40%、60% 和 80% 条件下, 铝合金焊缝微观组织形貌. 结合图 5 焊缝 XRD 衍射分析可知, 焊缝区由灰色的 α -Al 基体相和黑色的 β -SiMg₂ 析出物组成, β -SiMg₂ 金属间化合物呈短棒状分布在灰色基体上; 焊缝区由柱状晶和等轴晶组成; 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 随着湿度增大, 组织逐渐细化. 有的学者认为^[12-13], 在外力的作用下, 合金在固液两相区内变形方式主要为晶粒调整滑移与

晶粒弯曲变形. 晶粒调整滑移变形抗力较小, 晶粒弯曲变形抗力较大. 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 随着湿度增大, 组织逐渐细化, 晶粒尺寸变小, 晶界总面积增大, 应变变量变小, 裂纹进一步扩展时的阻力升高, 热裂纹敏感性降低. 6082-T6 铝合金焊接时, 随着湿度的增加, 电弧温度降低, 焊缝的热输入量减少, 焊缝中心区域组织细化, 细小的组织容易实现晶粒的转动和晶间滑动. 因此, 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 随着湿度的增大, 结晶裂纹敏感性降低.

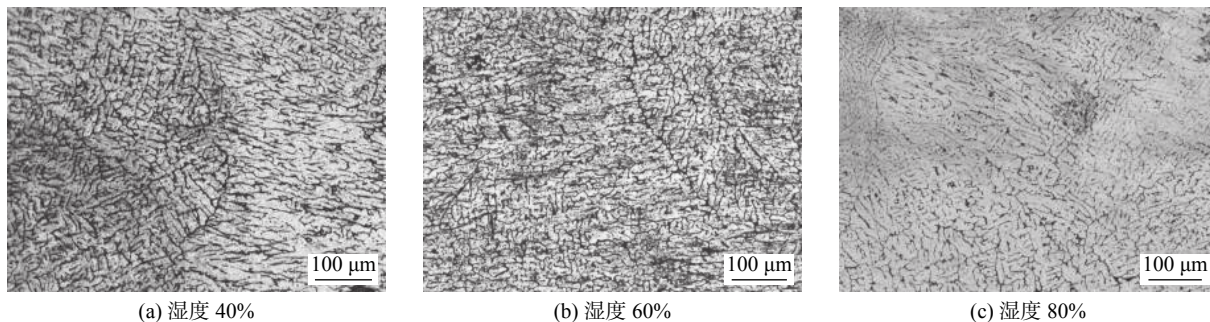


图 4 湿度对焊缝组织的影响

Fig. 4 Effect of humidity on microstructures of welds

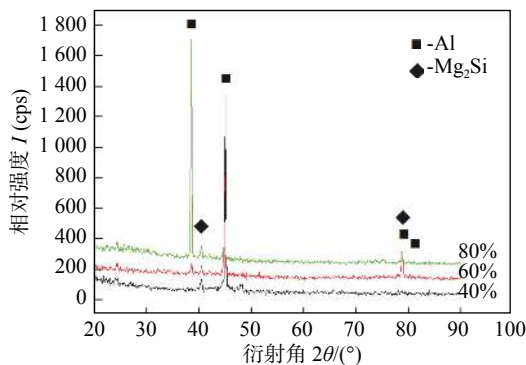


图 5 湿度对焊缝组成的影响

Fig. 5 Effect of humidity on composition of welds

2.3 湿度对断口形貌的影响

图 6 是铝合金裂纹截面形貌. 由图 6 可知, 裂纹沿板厚方向扩展近似垂直于焊缝表面, 裂纹具有沿晶开裂的特点. 6082-T6 铝合金焊接时, 焊缝晶界处形成低熔点共晶薄膜, 低熔点共晶薄膜在焊接应力的作用下, 发生开裂形成热裂纹. 图 7 是 40%、60% 和 80% 条件下, 铝合金裂纹断面形貌. 结合图 8 断口 XRD 衍射分析可知, 结晶裂纹断口表面由凹凸不平的卵石状结构组成, 卵石表面可见小褶皱; 在 40%~80% 相对湿度的条件下, 随着湿度增大, 凹凸不平卵石状结构的连续性变差, 深度变深.

在 40%~80% 相对湿度的条件下, 随着湿度增大, 焊接热输入量降低, 焊缝金属在凝固过程中, 液态金属与固态金属表面张力变大, 润湿角变大, 液态

金属不易在晶界处形成连续的 $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-SiMg}_2$ 低熔点共晶网状薄膜结构. 因此, 结晶裂纹倾向降低, 卵石状结构的连续性变差, 深度变深.

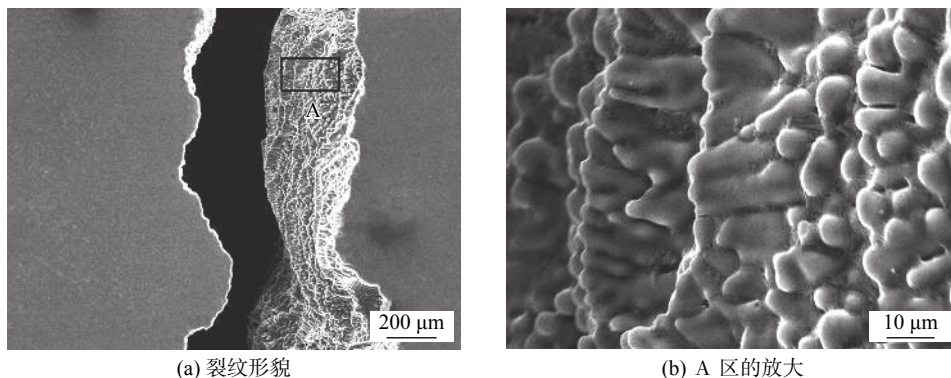


图 6 结晶裂纹截面形貌

Fig. 6 Solidification crack morphology

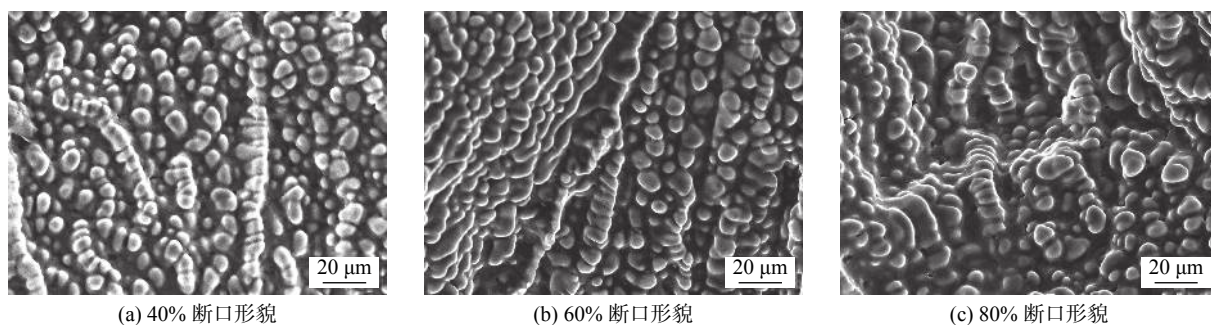


图 7 湿度对断口形貌的影响

Fig. 7 Effect of humidity on fracture surfaces

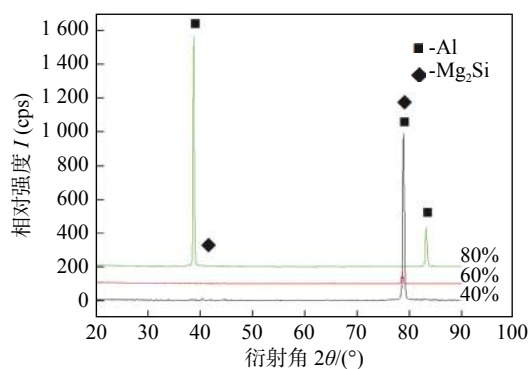


图 8 湿度对断口 XRD 的影响

Fig. 8 Effect of humidity on XRD pattern of fractures

3 结 论

(1) 随湿度的增大铝合金接头裂纹敏感性逐渐提高, 其中结晶裂纹的敏感性逐渐降低, 液化裂纹的敏感性升高.

(2) 随着湿度的增大, 焊接输入量减少, 液态金

属高温停留时间缩短, 来不及填充晶界, 液化裂纹敏感性升高.

(3) 随着湿度的增大, 焊缝区组织逐渐细化, 组织逐渐细化是结晶裂纹敏感性降低的重要原因.

(4) 随着湿度的增大, 液态金属在晶界越发不易形成连续的网状薄膜结构, 低熔点共晶网状薄膜结构连续性变差, 降低了结晶裂纹敏感性.

参考文献:

- [1] Ghiaasiaan R, Amirkhiz S B, Shankar S. Quantitative metallography of precipitating and secondary phases after strengthening treatment of net shaped casting of Al-Zn-Mg-Cu (7000) alloys[J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 698: 206–217.
- [2] Chen A, Zhang L, Wu G H, *et al.* Influences of Mn content on the microstructures and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.2Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 715: 421–431.

- [3] Engler O, Marioara C D, Hentschel T, *et al.* Influence of copper additions on materials properties and corrosion behaviour of Al-Mg alloy sheet[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 710: 650 – 662.
- [4] Li Y X, Qiu S F, Zhu Z T, *et al.* Intergranular crack during fatigue in Al-Mg-Si aluminum alloy thin extrusions[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 100: 105 – 112.
- [5] Wen K, Fan Y Q, Wang G J, *et al.* Aging behavior and fatigue crack propagation of high Zn-containing Al-Zn-Mg-Cu alloys with zinc variation[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, 27: 217 – 227.
- [6] Song L S, Rui B, Ting Z, *et al.* A link-up resulted fatigue crack branching in Al-Cu-Mg alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 92: 459 – 469.
- [7] 张 健, 雷 振, 王旭友. 高速列车 6005A 铝合金型材焊接热裂纹分析[J]. *焊接学报*, 2012, 33(8): 60 – 64.
Zhang Jian, Lei Zhen, Wang Xuyou. Weld hot crack analysis of 6005A aluminum alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(8): 60 – 64.
- [8] Alatorre N, Ambriz R R, Amrouche A, *et al.* Fatigue crack growth in Al-Zn-Mg (7075-T651) welds obtained by modified indirect and gas metal arc welding techniques[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 248: 207 – 217.
- [9] Wang J, Huang H P, Wang X J, *et al.* Statistical analysis of process parameters to eliminate hot cracking of fiber laser welded aluminum alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66: 15 – 21.
- [10] 周万盛, 姚君山. 铝及铝合金的焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [11] 王炎金. 铝合金车体焊接工艺[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [12] 杨福宝, 刘恩客, 徐 骏, 等. Sc, Zr 和 Er 微合金化 Al-5Mg 填充合金的焊接热裂纹敏感性[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 19(4): 620 – 624.
Yang Fubao, Liu Enke, Xu Jun, *et al.* Hot-cracking susceptibility of (Sc, Zr, Er)-microalloyed Al-5Mg filler metals[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 19(4): 620 – 624.
- [13] Liu J W, Kou X D. Susceptibility of ternary aluminum alloys to cracking during solidification[J]. *Acta Materialia*, 2017, 125: 513 – 523.

第一作者简介: 阮 野, 男, 1978 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事新材料连接方面的研究。发表论文 13 篇。Email: ruanye@jlu.edu.cn

通信作者简介: 邢 飞, 女, 1987 年出生, 博士后, 讲师。Email: xingfei@jlu.edu.cn

[上接第 4 页]

- [5] 杨中宇. 稳压式变极性焊接电源电流换向控制及电弧稳定性研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- [6] 夏铸亮, 朱志明, 陈俊杰. 移相控制全桥零压零流软开关功率变换器谐振过程分析和参数设计方法[J]. *电焊机*, 2013, 43(1): 9 – 14.
Xia Zhuliang, Zhu Zhiming, Chen Junjie. Resonant procedure analysis and parameters design approach for phase-shift controlled fullbridge power converter with zero-voltage and zero-current softswitching[J]. *Electric Welding Machine*, 2013, 43(1): 9 – 14.
- [7] 朱志明, 杨中宇, 汤莹莹, 等. 软开关逆变器谐振过程解耦分析与参数设计[J]. *焊接学报*, 2015, 36(3): 5 – 8, 13.
Zhu Zhiming, Yang Zhongyu, Tang Yingying, *et al.* Decoupled analysis of resonant process and parameters design for soft-switching inverter[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(3): 5 – 8, 13.
- [8] 陈 杰. 数字化变极性 TIG/MIG 焊接电源系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [9] Yang Zhongyu, Zhu Zhiming, Liu Bo. Reverse voltage generating circuit for rapid commutation of output current polarity in variable polarity arc welding power supply[J]. *IET Power Electronics*, 2017, 10(12): 1609 – 1616.
- [10] 丁 坤, 姚清, 范兴辉, 等. 变极性 TIG 焊电弧负载特性及换向控制策略[J]. *焊接学报*, 2008, 29(9): 31 – 34.
Ding Kun, Yao Heqing, Fan Xinghui, *et al.* Welding arc load characteristics of variable polarity TIG welding and its control strategy at commutation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(9): 31 – 34.
- [11] 杨中宇, 朱志明, 汤莹莹, 等. 稳压式变极性焊接电源二次逆变拓扑及控制策略[J]. *焊接学报*, 2017, 38(9): 23 – 27.
Yang Zhongyu, Zhu Zhiming, Tang Yingying, *et al.* Topology of secondary inverter and its control strategy of variable polarity welding power supply for generating stabilized reverse voltage[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(9): 23 – 27.

第一作者简介: 刘 博, 男, 1992 年出生, 硕士研究生。主要从事变极性焊接电源控制研究。Email: liubo578579734@126.com

通信作者简介: 朱志明, 男, 博士, 教授, 博士研究生导师。Email: zzmdme@mail.tsinghua.edu.cn