

7075 铝合金搅拌摩擦焊接头断裂机理

赵熠朋^{1,2}, 朱 浩^{1,2}, 姜 月^{1,2}, 刘家伦^{1,2}, 王 军³

(1. 河北省交通工程材料重点实验室, 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050043; 3. 河北科技大学 材料科学与工程学院, 石家庄 050018)

摘 要: 使用 MTS 拉伸试验机和扫描电镜加载台分别对 7075 铝合金 FSW 接头进行拉伸卸载和原位拉伸试验, 并借助 Olympus 金相显微镜对卸载后接头损伤行为进行观察, 使用有限元软件 ABAQUS 对接头在拉伸过程中的应力状态进行分析. 结果表明, 7075 铝合金 FSW 接头在拉伸过程中微裂纹分别在前进侧热影响区 (HAZ) 与热力影响区 (TMAZ) 交界处和焊核区 (WNZ) 底部形核, 最终前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处裂纹发展成主裂纹, 主裂纹沿 HAZ 与 TMAZ 交界扩展导致接头断裂. 原位拉伸试验接头同样在该区域发生断裂. 该处由于三向应力度较高、显微硬度较低、过渡组织不连续以及沉淀相 MgZn₂ 取向分布而成为整个 7075 铝合金 FSW 接头的最薄弱环节.

关键词: 7075 铝合金; 搅拌摩擦焊; 断裂机理; 有限元分析; 沉淀相

中图分类号: TG 457.14 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20160105005

0 序 言

Al-Zn-Mg-Cu 系超硬铝合金 7075 具有良好的塑性、较高的比强度、比刚度, 被广泛应用于航空航天以及载运工具制造等领域. 进行熔化焊接时易产生气孔、热裂纹及 HAZ 软化等问题^[1]. 搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 是英国焊接研究所 (the welding institute) 于 1991 年发明的一种固相连接技术, 是铝合金最具潜力的焊接技术之一^[2]. 近年来, 国内外学者对 FSW 开展了大量研究工作, 主要集中在 FSW 接头形成机理^[3]、温度场应力场和流场的数值模拟^[4-5]、焊接工艺参数^[6]、微观组织和力学性能^[7-9]、以及接头中析出相^[10-11] 等几个方面. 然而, 目前对铝合金 FSW 接头变形、损伤行为的研究较少, 而该研究对于优化 FSW 焊接工艺、提高接头力学性能以及保证焊接结构的安全性、可靠性具有极其重要的意义. 因此, 选用高速列车车体用厚度为 6 mm 的 7075 铝合金平板进行 FSW 对接试验, 并对接头进行拉伸卸载试验及原位拉伸试验, 借助金相显微镜、体视显微镜和扫描电镜对接头损伤行为进行观察、研究, 从而找出 7075 铝合金 FSW 接头的薄弱环节.

1 试验方法

试验材料是厚度为 6 mm 的 7075 高强铝合金平

板 (供货状态: T6), 其化学成分见表 1. 焊件尺寸为 300 mm × 150 mm, 采用平板对焊的焊接方式. 搅拌针根部直径为 5.92 mm、端部直径 3.48 mm、长度为 5.54 mm, 轴肩直径为 15 mm. 利用 MTS810-23 型液压伺服试验机和 KYKY2800B 型扫描电子显微镜自带加载台分别进行拉伸卸载试验和原位拉伸试验. 截取卸载后的试样制作金相试样. 原位拉伸试样损伤行为研究采用加载同时用扫描电镜进行观测, 原位拉伸试样尺寸如图 1 所示. 拉伸卸载及原位拉伸

表 1 7075 铝合金化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy						
Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Cr	Al
5.1 ~ 6.1	2.1 ~ 2.9	1.2 ~ 2.0	0.5	0.3	0.18 ~ 0.28	余量

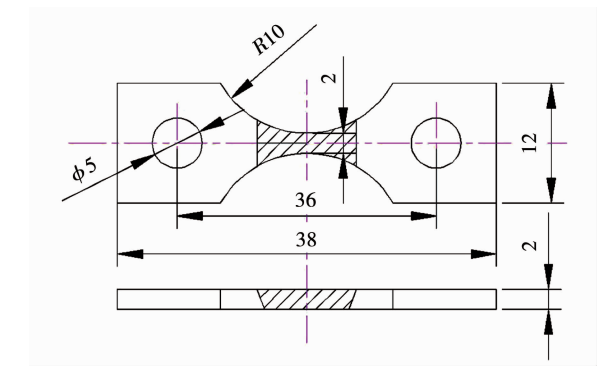


图 1 原位拉伸试样尺寸 (mm)
Fig. 1 Size of in situ tensile test sample

试样用 4 mL HF + 6 mL HCl + 10 mL HNO₃ + 190 mL H₂O 进行腐蚀,时间为 30 s. 利用 GX51 型 Olympus 显微镜和 Stemi 2000-C 型体式显微镜对 FSW 接头的损伤行为进行观察.

2 接头损伤观察结果与分析

2.1 拉伸卸载试验

拉伸卸载后 FSW 接头在厚度方向上的微观形貌如图 2 所示,箭头所指示的方向为拉伸方向. 由图 2 可以看出,裂纹主要在形核的两个区域:WNZ 底部以及前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处.

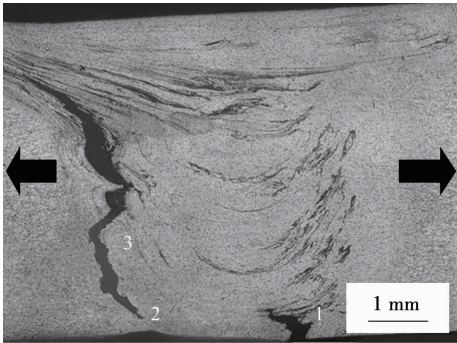


图 2 拉伸过后接头微观形貌

Fig. 2 Micro-structure of joints after tensile

WNZ 底部裂纹即为图 2 中的裂纹 1. 裂纹 1 在拉伸过程中首先形核,这是由于搅拌针长度不够使 FSW 焊缝产生的弱连接造成^[7]. 随着外加载荷的增大,沿着与加载成 45°方向裂纹 1 发生扩展;当裂纹扩展至 WNZ 停止扩展. 主要是因为 WNZ 的晶粒极其细小,细晶强化作用明显,止裂性能良好. 因此,裂纹 1 未能发展成为主裂纹.

图 2 中的裂纹 2 是前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处裂纹. 随着外加载荷进一步增大,裂纹 2 在该区域产生. 裂纹 2 的产生主要受四方面作用的影响:应力状态、显微硬度、微观组织以及沉淀相的分布.

2.1.1 应力状态的影响

用有限元软件计算出的 7075 铝合金 FSW 接头在拉伸过程中的三向应力度分布曲线如图 3 所示.

三向应力度 Tr 计算见式(1). 三向应力度越大,则正应力相对较大,在拉伸过程中试样越容易发生脆性断裂;反之,三向应力度越小,剪应力相对较大,试样越容易发生塑性变形而不易发生突然脆断^[12]. HAZ 和 TMAZ 交界处的三向应力度发生突变,所以该区域在外载荷作用下产生裂纹 2.

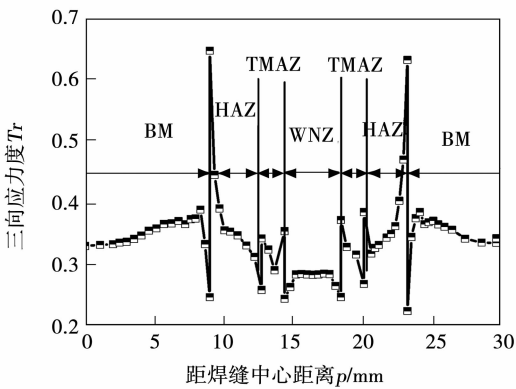


图 3 FSW 接头三向应力度分布

Fig. 3 Distribution of stress triaxiality of FSW joints

$$Tr = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}} \quad (1)$$

式中: σ_m 为静水压力,代表正应力; σ_e 为等效应力,反映切应力; σ_1, σ_2 和 σ_3 分别表示第一主应力、第二主应力以及第三主应力.

2.1.2 显微硬度的影响

7075 铝合金 FSW 接头显微硬度分布如图 4 所示. 从图 4 可以看出,7075 铝合金 FSW 接头的硬度分布极不均匀,大致呈不对称的“W”形曲线. 显微硬度最低值出现在 HAZ 与 TMAZ 的交界处,并且前进侧比后退侧低 1 ~ 2 HV. 故前进侧 HAZ 和 TMAZ 交界处是整个接头硬度最低的部位,因而在外加载荷作用下容易产生裂纹 2.

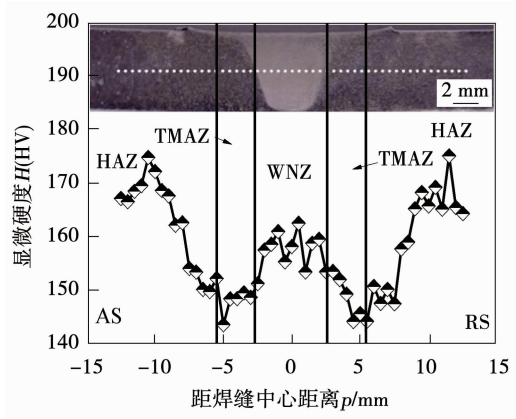


图 4 FSW 接头显微硬度分布

Fig. 4 Distribution of micro-hardness of FSW joints

2.1.3 微观组织的影响

7075 铝合金 FSW 接头组织形貌如图 5 所示.

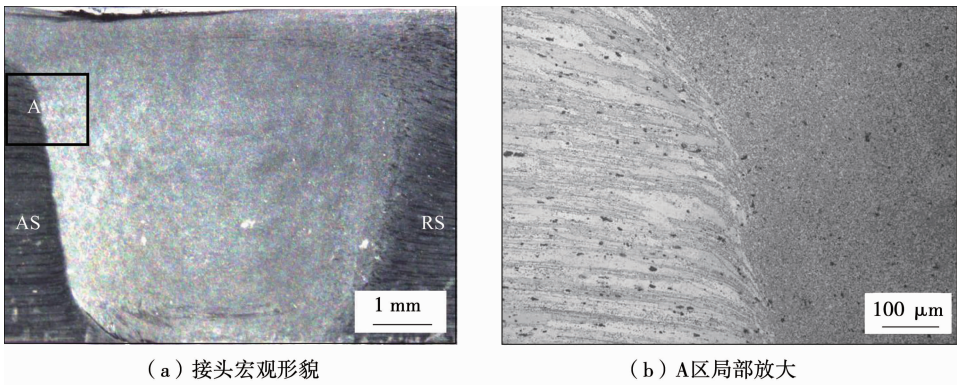


图 5 7075 铝合金 FSW 接头组织形貌
Fig. 5 Micro-structure of 7075 FSW joint

TMAZ 中晶粒受到 FSW 过程中的机械搅拌作用,在长度方向上被拉长,并发生了一定的取向变化;而 HAZ 组织则仍然保持母材长条状晶粒,但发生一定的粗化. TMAZ 与 HAZ 由于界面处组织明显差异,造成了该区域过渡组织的不连续,变形不协调,因此交界处为接头较薄弱区域. 前进侧交界处的晶粒尺寸及取向变化比后退侧更加明显,成为整个接头的薄弱区. 在外加载荷作用下裂纹容易形核和扩展^[13].

裂纹 2 沿着 HAZ 与 TMAZ 交界处扩展. 当裂纹 2 扩展到位置 3 时发生偏转. 这主要是因为遇到了强度较高的析出相,阻碍了裂纹沿着原来方向继续扩展,而裂纹扩展能量又不足以切过析出相,从而沿着另一个方向继续向前扩展. 裂纹扩展一段距离到达 WNZ,由于 WNZ 止裂性好,裂纹又发生偏转,重新沿着 HAZ 与 TMAZ 交界处继续向前扩展.

2.1.4 沉淀相分布的影响

7075 铝合金 FSW 接头 HAZ 与 TMAZ 交界处沉淀相分布如图 6 所示. 该处微观组织中出现大量棒状 $MgZn_2$ 相,且具有明显的取向性. 在拉伸过程中,这种明显取向分布的棒状沉淀相会使接头这部分变

形协调性变差,在外加载荷作用下容易产生微裂纹形核、扩展,最终导致接头断裂.

2.2 原位拉伸试验

同样的试验结果也发生在原位拉伸试验过程中. 原位拉伸过程中裂纹形貌及扩展过程如图 7 所示,箭头所指的方向为拉伸方向. 从图 7 可以看出,当位移加载至 1. 724 mm 时,在前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处产生裂纹 1 和裂纹 2,如图 7a 所示. 这是因为该区域为两区域交界处,过渡组织不连续,并且拉伸方向与其界面垂直,故在外加载荷作用下首先产生微裂纹. 加载至 2. 441 mm 时,裂纹 2 向前扩展,与此同时,又产生微裂纹 3,如图 7b 所示. 当加载至 2. 496 mm 时,微裂纹 3 发生扩展,此时微裂纹 1 沿厚度方向发生一定的扩展,如图 7c 所示. 当加载至 2. 701 mm 时,又产生了裂纹 4,裂纹 4 将裂纹 1 和裂纹 3 连在一块,如图 7d 所示. 当加载至 2. 83 mm 时,产生裂纹 5,至此裂纹贯穿试样的上表面,裂纹宽度也有所增加,如图 7e 所示. 当加载至 2. 897 mm 时,整个试样发生断裂,如图 7f 所示.

从原位拉伸试验结果可以证实,7075 铝合金 FSW 接头在拉伸过程中,微裂纹形核、扩展也发生于前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处,这与拉伸卸载试验结果相吻合. 在图 7d 中,裂纹 4 没有在前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处形核,而是稍微向 TMAZ 偏移了 0. 1 mm 左右,这是因为该处微裂纹并未在试样表面、而是在试样底部形核.

综上所述,拉伸卸载试验及原位拉伸试验主裂纹形核、扩展均沿前进侧 HAZ 与 TMAZ 的交界处发生,该处由于过渡组织的不连续、显微硬度较低、三向应力度较高以及 $MgZn_2$ 相的取向分布而成为整个 7075 铝合金 FSW 接头的最薄弱环节.

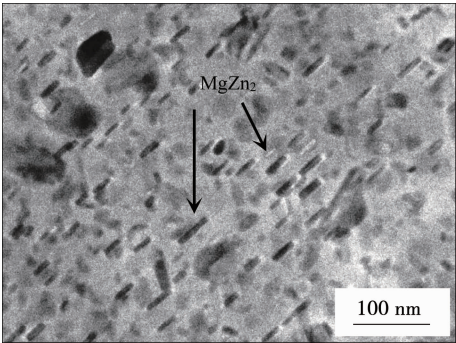


Fig. 6 Distribution and morphology of precipitated phase

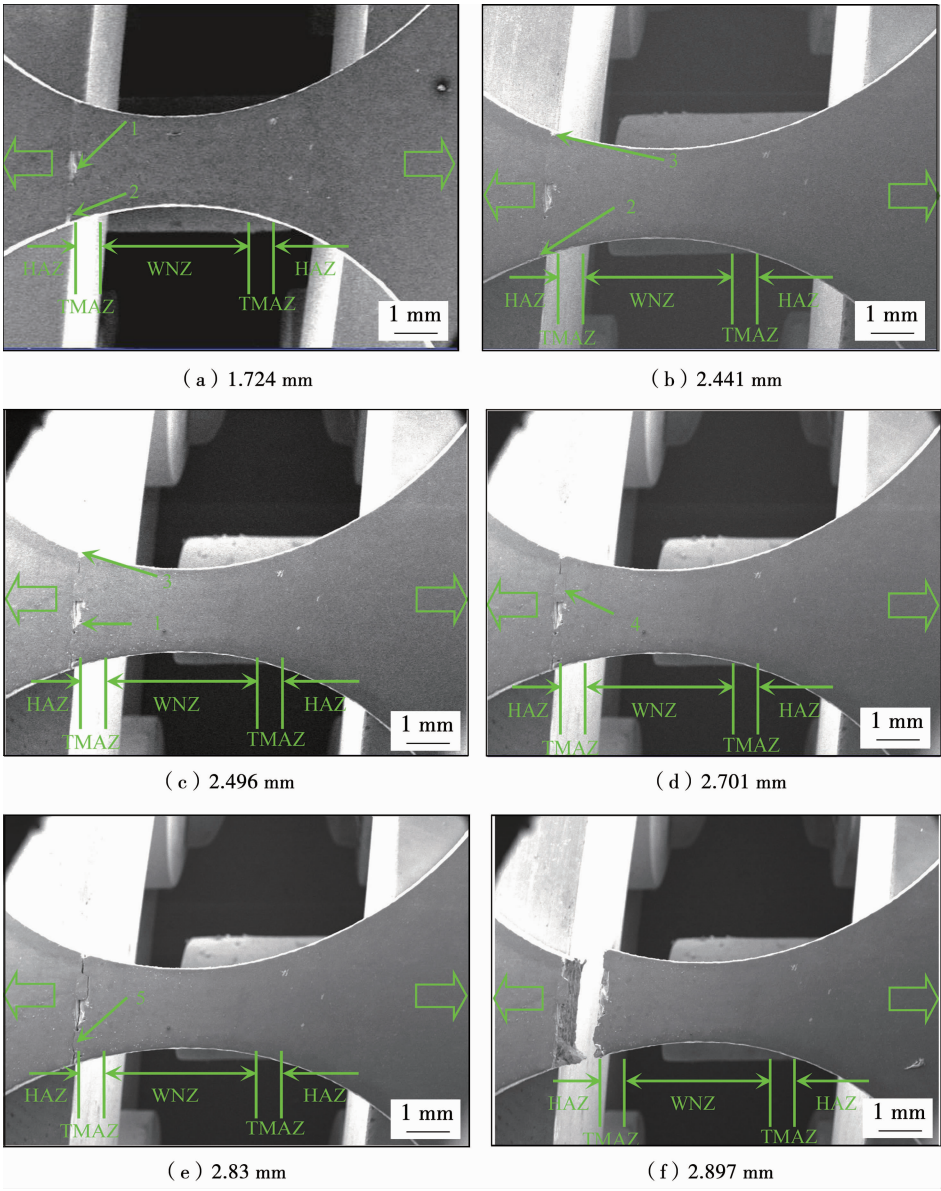


图 7 原位拉伸结果
Fig. 7 Result of in situ tensile test

3 结 论

(1) 7075 铝合金 FSW 接头在拉伸过程中,在试样的厚度与宽度方向上,微裂纹均萌生于前进侧 HAZ 与 TMAZ 交界处. 裂纹形核与扩展受到交界处的应力状态、显微硬度、微观组织及沉淀相分布的影响.

(2) 7075 铝合金 FSW 焊接接头在拉伸过程中,试样中应力状态分布不均匀,三向应力度在 WNZ 和 TMAZ 交界处与 TMAZ 和 HAZ 交界处存在突变,从而加速裂纹形核与扩展,导致试样断裂.

(3) 前进侧 HAZ 与 TMAZ 的交界处是整个 FSW 接头的最薄弱环节.

参考文献:

[1] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[2] 王国庆,赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.

[3] 张成聪,常保华,陶 军,等. 2024 铝合金搅拌摩擦焊过程组织演化分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 57-60.
Zhang Chengcong, Chang Baohua, Tao Jun, *et al.* Microstructure evolution during friction stir welding of 2024 aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34 (3): 57-60.

[4] 周明智,雷党刚,梁 宁,等. 搅拌摩擦焊三维粘塑性热力耦合有限元数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 5-9.
Zhou Mingzhi, Lei Danggang, Liang Ning, *et al.* 3D coupled

thermo-mechanical visco-plastic finite element simulation of friction stir welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 5-9.

[5] Zhang Peng, Guo Ning, Chen Gang, *et al.* Plastic deformation behavior of the friction stir welded AA2024 aluminum alloy[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014(29): 1-7.

[6] 严 铿, 刘 俊, 史 超. 喷射成形 7055 铝合金 FSW 焊工艺与性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 51-54.
Yan Keng, Liu Jun, Shi Chao. Study on process and property of FSW of spray formed 7055 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 51-54.

[7] 李继忠, 孙占国, 高 崇, 等. 根部未焊透对搅拌摩擦焊接接头力学性能的影响[J]. 电焊机, 2014, 44(4): 18-22.
Li Jizhong, Sun Zhanguo, Gao Chong, *et al.* Influence the lack of penetration on the mechanical properties of friction stir welded joints[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(4): 18-22.

[8] 崔少朋, 朱 浩, 郭 柱, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头变形及失效行为[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 27-30.
Cui Shaopeng, Zhu Hao, Guo Zhu, *et al.* Deformation and failure behavior of friction stir weld joint of 7075 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 27-30.

[9] Lee K, Kwon E. Microstructure of stir zone in dissimilar friction stir welds of AA6061-T6 and AZ31 alloy sheets[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(24): 2374-2379.

[10] Srinivasa R T, Madhusudhan R G, Koteswara S R. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075-T651 aluminum alloy thick plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015(25): 1770-1778.

[11] Bayazid M S, Farhangi H, Asgharzadeh H, *et al.* Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2016(649): 293-300.

[12] 朱 浩, 郭 柱, 崔少朋, 等. 焊缝强度匹配对铝合金焊接接头三向应力度分布的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 84-88.
Zhu Hao, Guo Zhu, Cui Shaopeng, *et al.* Influence of weld strength match on distribution of stress triaxiality for aluminum alloy welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 84-88.

[13] 董继红, 董春林, 孟 强, 等. 铝合金浮动式双轴肩 FSW 接头组织性能分析[J]. 焊接学报, 2013, 34(10): 43-46.
Dong Jihong, Dong Chunlin, Meng Qiang, *et al.* Microstructure and mechanical properties of floating bobbin friction stir welded joints in aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(10): 43-46.

作者简介: 赵熠朋,男,1992 年出生,硕士研究生. 主要从事先进材料连接及有限元模拟等方面的工作. 已发表论文 7 篇. Email: 1521207904@qq.com

通讯作者: 朱 浩,男,博士,教授. Email: zhuhao@stdu.edu

[上接第 50 页]

[10] 胡绳荪, 庾宇鲲, 申俊琦, 等. 基于 B 样条空间等距线的机器人轨迹优化算法[J]. 天津大学学报, 2015, 48(8): 723-727.
Hu Shengsun, Tuo Yukun, Shen Junqi, *et al.* Robot trajectory optimization algorithm based on spatial offset B-Spline[J]. Jour-

nal of Tianjin University, 2015, 48(8): 723-727.

作者简介: 刘 杰,男,1993 年出生,硕士研究生. 主要从事焊接领域自动化方面的研究. Email: liujievc@163.com

通讯作者: 申俊琦,男,博士,讲师. Email: shenjunqi@tju.edu.cn