

搅拌头形状对 2024 铝合金接头组织及性能的影响

王希靖, 马晓飞, 张亮亮
(兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 采用不同形状搅拌头对 4 mm 厚的 2024 铝合金进行搅拌摩擦焊接, 对不同接头的宏观形貌、金相组织、力学性能及断口形貌进行了分析. 结果表明, 所有搅拌头均能形成良好接头, 其中三棱锥搅拌头形成接头横截面呈完整的“洋葱瓣”, 焊核区的晶粒尺寸最小为 5 ~ 11 μm ; XRD 分析表明, 三棱锥搅拌头形成接头焊核区微晶尺寸最小; 硬度在热力影响区与热影响区的交界处最小, 但三棱锥搅拌头形成的焊缝在此处的硬度值比其它搅拌头的高; 所有接头的抗拉强度都达到母材的 80% 以上, 但三棱锥搅拌头形成接头的抗拉强度最高, 达到了 394.74 MPa, 为母材的 87.72%, 断后伸长率为 15.38%. 拉伸断口形貌分析表明, 所有接头断裂方式均为塑性断裂.

关键词: 搅拌摩擦焊; 搅拌针形状; 力学性能; 晶粒尺寸

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20160410001

0 序 言

2024 铝合金为 Al-Cu-Mg 系硬质铝合金, 其综合力学性能和抗高温蠕变能力优良, 高温软化倾向小, 是国内外航空、机械工业中应用最广泛的铝合金之一^[1-2]. 搅拌摩擦焊 FSW (friction stir welding) 技术是英国焊接研究所于 1991 年发明的一项新型固相焊接技术^[3-4], 特别适合铝合金等有色金属的焊接, 与传统的熔焊相比, 克服了接头中气孔、热裂纹等焊接缺陷, 有焊接效率高、无合金元素烧损、焊接强度高、变形小等优点^[5-6]. 搅拌头是搅拌摩擦焊的核心^[7], Buffa 等人^[8] 基于 FEM 模型对搅拌头进行设计, 并指出搅拌针的几何形状对得到满意的焊缝和热影响区微观组织, 从而改善接头的性能起着至关重要的作用. 因此, 文中选用形状不同的搅拌头对 4 mm 厚的 2024 铝合金进行 FSW 试验, 研究搅拌针形状对接头组织和性能的影响.

1 试验方法

试验材料为 2024 铝合金板材, 尺寸为 200 mm $\times$ 100 mm $\times$ 4 mm, 化学成分如表 1 所示, 其抗拉强度为 450 MPa, 断后伸长率为 23%. 搅拌头材料为 $\text{W}_6\text{Mo}_5\text{Cr}_4\text{V}_2$ 高速工具钢, 搅拌头形状如图 1 所示, 分别为 1 号圆锥螺纹、2 号圆锥凸轮螺纹、3 号三棱锥和 4 号偏心圆锥螺纹四种搅拌头, 以上搅拌头轴

肩内凹, 直径均为 18 mm, 1 号圆锥螺纹搅拌针根部大径和端部大径分别为 5 mm 和 4 mm, 2 号圆锥凸轮螺纹搅拌针是在 1 号的基础上进行每隔 60° 进行一次切削得到的, 3 号三棱锥搅拌针是在 1 号的基础上切削为内接三棱锥得到的, 4 号偏心圆锥螺纹搅拌针是将 1 号针的轴线偏移 0.5 mm 得到的, 搅拌针长度均为 3.6 mm. 试验用的搅拌摩擦焊机为 FSW—3LM—015, 焊前铝合金板用砂纸打磨去除铝合金表面的氧化膜, 并用丙酮溶液擦洗试样, 然后放置在夹具上夹紧. 焊接工艺参数为转速 $n = 1\,000\text{ r/min}$, 焊接速度 $v = 80\text{ mm/min}$, 搅拌头倾角 2°, 下压量 0.2 mm.

表 1 2024 铝合金的化学成分						
Table 1 Chemical compositions of 2024 aluminum alloy						
Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Al
3.8 ~ 4.8	1.2 ~ 1.8	0.3 ~ 0.9	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.3	余量

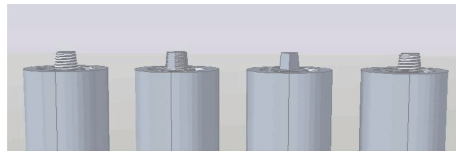


图 1 四种搅拌针形状
Fig. 1 Geometries of four kinds of tool pins

焊后在不存在焊接缺陷的焊件上切取制备金相试样, 用混合酸 1.0% HF + 1.5% HCl + 2.5% HNO₃ + 95% H₂O 在抛光后的试样表面进行腐蚀, 然后采

用 MEF-3 广视场万能金相显微镜(OM)观察焊接接头各区域的显微组织;利用 x 射线荧光仪分析焊核区微晶大小;利用线切割,按国家标准 GB/T228. 1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分室温试验方法》垂直于焊缝制备拉伸试样,如图 2 所示,采用 WDW-3100 微机控制电子万能试验拉伸机进行拉伸性能测试,拉伸速度 0.5 mm/min,并采用 JSM6700F 型扫描电镜观察分析接头拉伸断口形貌;利用 MH-3 型显微硬度计在焊缝横截面中间进行硬度测试。



图 2 拉伸试样的形状
Fig. 2 Shape of tensile specimen

2 试验结果及分析

2.1 焊缝的宏观形貌

搅拌摩擦焊接头可以分为母材区(BM),热影响区(HAZ),热力影响区(TMAZ)和焊核区(WZ)四大部分^[9]。“洋葱瓣”花纹是由于当搅拌头沿焊接方向运动时,塑化金属沿搅拌头的返回边被挤压向搅拌针后方,形成一个个半椭球区域叠加而成焊缝,沿横截面切割则呈现为“洋葱瓣”花纹,“洋葱瓣”花纹出现说明塑态金属流动性良好^[10]。不同形状搅拌头形成焊缝的横截面宏观形貌如图 3 所示。可以看出,焊缝均成形良好,未发现隧道、空洞等缺陷。另外,在不同形状搅拌头作用下,焊缝横截面形貌明显不同,1 号圆锥螺纹搅拌头形成的焊缝横截面如图 3a 所示,其主要靠搅拌针的摩擦挤压作用对材料进行搅拌,塑态材料的流动效果较差,因此,焊核区只在前进侧(AS)出现了不完整的“洋葱瓣”状花纹^[11];2 号圆锥凸轮搅拌头形成焊缝的横截面如图 3b 所示,2 号搅拌头在 1 号搅拌头的基础上多了“切边”特征,其对塑化金属的搅拌作用有所增强,使流动性改善,在焊核区有较完整“洋葱瓣”花纹形貌,但此时的“洋葱瓣”位于焊缝的下方,且在“洋葱瓣”的正上方出现了紊乱区;3 号三棱锥搅拌头形成焊缝的横截面宏观形貌如图 3c 所示,其对塑化金属的搅拌作用加强,塑态材料流动的更加充分,在焊缝的正下方有明显的完整的“洋葱瓣”。4 号搅拌针与 1 号一样,但其偏离搅拌头轴线 0.5 mm,在不考虑焊接方向的运动时,其以直径为 1 mm 的圆为轨迹做圆周运动,对材料的搅拌作用增强,塑态金属的流动性好,因此焊核区与 1 号相比范围扩大了 1 mm,且“洋葱瓣”状

花纹更加完整如图 3d 所示。从图 3 可以看出,从 1 号搅拌针到 3 号搅拌针,前进侧焊核区与热力影响区的界线越来越模糊,同时热力影响区的范围越来越大。1 号的搅拌针与材料的接触面积最大,摩擦产热最多,且热量较集中,同时其对材料的搅拌作用差,所以热力影响区面积小;2 号到 3 号搅拌针与材料接触的面积逐渐减小,摩擦产热减少,加之对材料的搅拌作用增强,热量更加分散,因此焊核区与热力影响区的界线变得模糊,热力影响区的范围变大。4 号搅拌头的搅拌作用增加,因此热力影响区面积增大,但同时因其做圆周运动,摩擦产热增加,前进侧热力影响区与焊核区的界线明显。

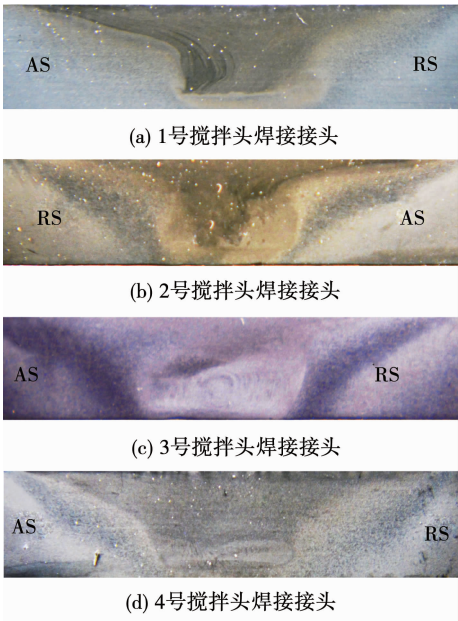


图 3 不同形状搅拌头焊接接头的横截面宏观形貌
Fig. 3 Cross-sectional images of weld zone fabricated with different tool pin profiles

2.2 焊缝的微观组织

不同搅拌头焊接形成接头焊核区的显微组织如图 4 所示,该区由于受到搅拌针强烈的搅拌作用,经历了较高温度的热循环,组织发生动态再结晶,由母材原始的板条状组织转变为细小的等轴再结晶组织。图 4a 为 1 号圆锥螺纹搅拌头形成的接头焊核区的金相组织,其晶粒大小约为 9 ~ 16 μm。图 4b 为 2 号圆锥凸轮螺纹搅拌头形成接头焊核区的金相组织,与 1 号圆锥螺纹搅拌头焊接接头相比,由于搅拌针的摩擦面积减小,产热减小,晶粒变得细小,直径为 7 ~ 13 μm。图 4c 为 3 号三棱锥搅拌头焊接接头的金相组织,搅拌针的表面积比 2 号圆锥凸轮搅拌针的更小,摩擦产热更少,再结晶晶粒尺寸更小,为

5 ~ 11 μm ,而且切除的部分减少了对塑化金属流动的阻碍,使金属的流动性更好. 图 4d 为 4 号偏心圆锥螺纹搅拌头形成接头焊核区金相图,其晶粒大小与 1 号圆锥螺纹搅拌头的相似,为 9 ~ 16 μm ,与 1 号搅拌头相比 4 号搅拌头的搅拌针的表面积没有变化,但在不考虑前进运动的情况下,1 号搅拌头做原地旋转运动,转动一周,搅拌针中心的位置不变,其

与铝合金的摩擦面积是搅拌针的表面积,4 号搅拌头做圆周运动,转动一周,搅拌针中心走过的路径为一个直径 1 mm 的圆,与铝合金的接触面积仍为搅拌针的表面积,但因其轴线行走路程增加,与搅拌针摩擦的金属的面积增加,使热输入量增加,但偏心搅拌针旋转的路径使焊核区面积增加,因此焊核区单位面积上的热输入量并没有增加,晶粒大小相同.

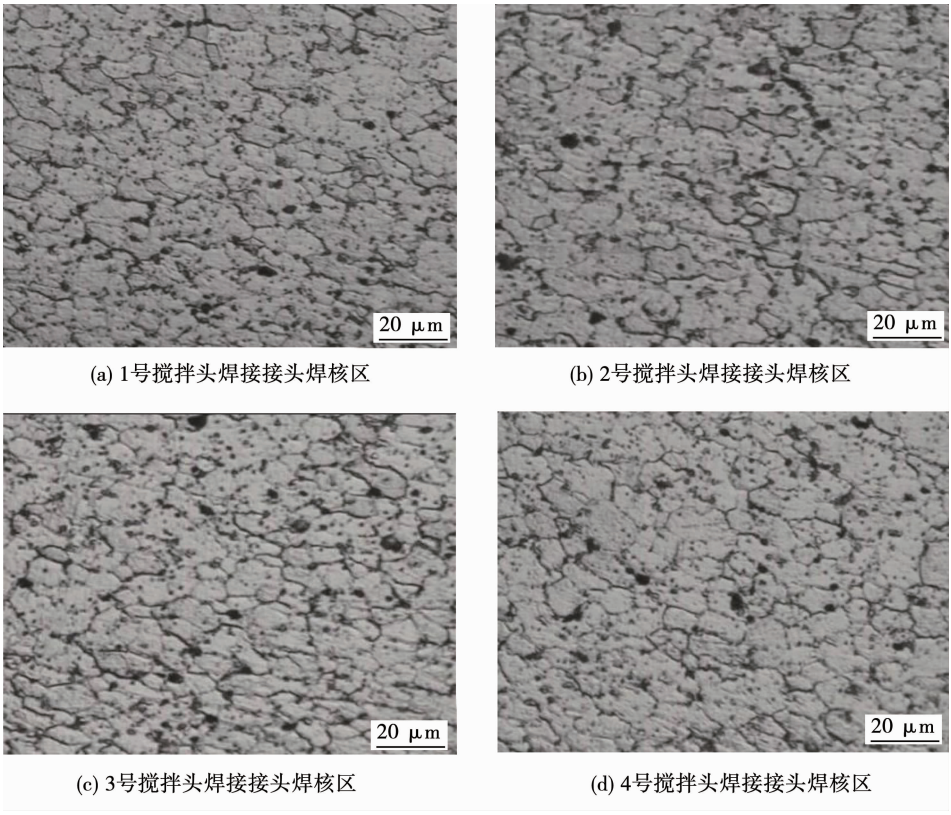


图 4 不同搅拌针焊接接头焊核区显微组织
Fig. 4 OM morphology of NZs obtained by different tool pin profiles

2.3 XRD 分析

图 5 为 2024 铝合金用不同搅拌头形成接头焊核区的 XRD 图谱,各搅拌头焊接接头的焊核区的衍射峰与母材区相似,说明焊接前后焊核区相的种类没有发生变化,即没有新的金属间化合物生成,金属间化合物具有高的硬度和脆性,如果它们被大量发现,会降低接头的抗拉强度. 通过 XRD 可以测得衍射峰的半高宽,根据德拜-谢乐法可以算出微晶的尺寸,表 2 为母材与不同搅拌头焊接形成接头焊核区的微晶尺寸,其中焊核区的尺寸都比母材区小,且 3 号搅拌头焊接接头的焊核区微晶尺寸最小,1 号和 4 号的尺寸近似相等.

2.4 焊缝的硬度

四种搅拌头形成接头横截面的硬度曲线如图 6

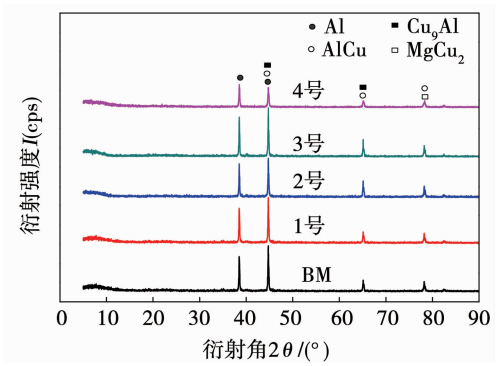


图 5 母材和不同搅拌头焊接接头焊核区的 XRD 图谱
Fig. 5 XRD patterns of BM and NZs obtained by different tool pin profiles

所示,呈现典型的“W”形^[9]. 焊核区与母材硬度值

表 2 母材和不同搅拌头焊接接头焊核区微晶尺寸
Table 2 XRD data of NZs obtained by different tool pin profiles compared with BM

材料	微晶尺寸 D/nm
母材	86.85
1 号	82.98
2 号	77.76
3 号	71.24
4 号	81.67

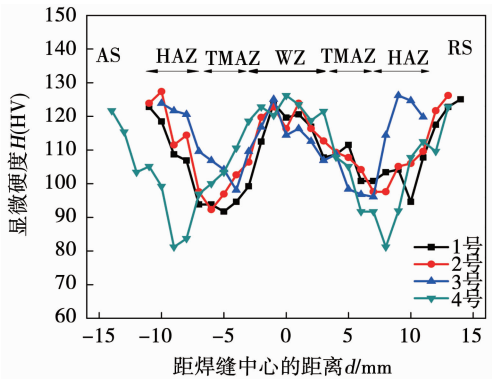


图 6 不同搅拌针焊接接头焊缝区显微硬度
Fig. 6 Micro-hardness of joints welded by different tool pin profiles

相当,约为 125 HV,热力影响区与热影响区的硬度都有所下降,其中硬度的最小值出现在前进侧的热影响区与热力影响区的交界处. 焊核区组织经历了焊接过程较高温度的焊接热循环,并在搅拌针的作用下发生剧烈的塑性变形,组织为再结晶晶粒,晶粒非常细小,显微硬度值较高. 热力影响区在热和机械力的共同作用下,产生粗糙、发生回复的变形晶粒,离焊核区距离越远,晶粒越大,硬度越小. 热影响区仅仅受焊接热循环的作用,晶粒粗大,越靠近焊核区晶粒越大,且部分强化相在热的作用下溶解于铝基体中,硬度越低. 与 1 号相比,2 号、3 号搅拌头形成接头的硬度值有所提高,最低硬度也升高,且 3 号搅拌头形成接头的最低硬度值最高,为 96.1 HV; 4 号搅拌头形成接头的硬度值有所下降,焊核区、热影响区和热力影响区都增大,且热力影响区的硬度值最小. 在 1 号、2 号和 3 号搅拌头中,3 号搅拌头的搅拌针面积最小,摩擦产热最小,对热力影响区的影响也最小,因此硬度下降也小. 4 号搅拌头的摩擦面积与 1 号相同,但每旋转一周走过一个半径为 0.5 mm 的圆形路径,与铝合金的摩擦面积增加,热输入量增加,热影响区和热力影响区受热循环的作用大,合金中的第二相溶解多,硬度下降程度大.

2.5 接头的力学性能

表 3 为不同搅拌头焊接 2024 铝合金形成接头的拉伸性能测试结果,可以看出 1 号、2 号和 3 号搅拌头焊接接头强度均在母材的 80% 以上,且强度呈上升趋势,即 3 号搅拌头的强度最高为 394.74 MPa,为母材的 87.72%,4 号搅拌头接头强度最低,为母材的 71.66%. 接头的断后伸长率随强度的升高而增加,3 号搅拌头接头的断后伸长率最大,为 15.38%,4 号的最小为 10.23%. 拉伸试样均在前进侧的热力影响区处呈 45°剪切断裂. 1 号、2 号和 3 号搅拌头搅拌针表面积依次减小,热输入量减小,热力影响区的第二相固溶量较少,对强度的减弱小,4 号搅拌头因实际摩擦面积增加,热输入量增加,热力影响区受热循环的作用大,合金中的第二相溶解多,对强度的削弱也大.

表 3 不同搅拌头焊接接头的抗拉强度及断后伸长率
Table 3 Results of tensile test of joints welded by different tool pin profiles

接头编号	抗拉强度 R_{eL}/MPa	强度系数 $A_{\xi}(\%)$	断后伸长率 $A(\%)$
1 号搅拌头接头	360.53	80.12	11.21
2 号搅拌头接头	371.58	82.57	11.96
3 号搅拌头接头	394.74	87.72	15.38
4 号搅拌头接头	322.49	71.66	10.23

2.6 断口形貌

观察不同形状搅拌头形成接头的断口形貌时发现,所有接头都在前进侧的焊核区与热力影响区的交界处断裂. 图 7 为各搅拌头焊接接头的断口形貌,可以看出有大小不等的韧窝,韧窝壁光滑,是典型的塑性断裂. 每个韧窝的底部有一个第二相粒子,较大颗粒的第二相粒子形成大的韧窝,非常细小的、弥散的第二相粒子形成等轴细小韧窝. 由于第二相粒子与基体的弹塑性的差异和结合的牢固程度不同,所以在塑性变形过程中沿第二相粒子的边界容易形成微孔裂纹的核心. 在应力作用下,这些微孔裂纹的核心逐渐长大,并伴随着塑性变形的增加,显微孔坑之间的连接部分逐渐变薄,直至最后断裂. 图 7a,b,c 分别为 1,2,3 号搅拌头焊接形成接头的断口形貌,均为等轴韧窝,且韧窝深度也依次加深,这与拉伸试验中的断后伸长率依次增加相符. 图 7d 是 4 号搅拌头焊接接头的断口形貌,其形成很大的韧窝,在韧窝底部有少量的大颗粒第二相粒子,其对变形的抗力最小,强度最低,但塑性较好.

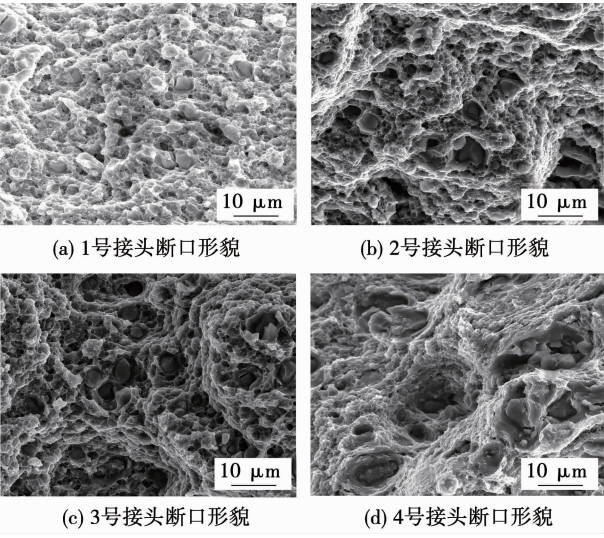


图 7 接头断口形貌
Fig. 7 Fracture morphology of FSW joints

3 结 论

- (1) 通过分析不同搅拌头形成的接头,发现所有接头成形良好,无任何焊接缺陷,焊核区均为细小的等轴晶,其中三棱锥搅拌头形成接头的焊核区晶粒尺寸最小为 5 ~ 11 μm.
- (2) 不同搅拌头形成接头的硬度呈“W”形,硬度最小值均位于热力影响区与热影响区的交界处且三棱锥搅拌头形成接头的最小值最高,为 96.1 HV.
- (3) 不同搅拌头焊接形成接头的断后伸长率均大于 10%. 三棱锥搅拌头焊接形成的焊缝抗拉强度最高,达到了 394.74 MPa,占母材的 87.72%. 接头的断裂方式为塑性断裂.
- (4) 三棱锥搅拌头焊接形成接头的性能最好.

参考文献:

[1] 张作贵,董晓明,田青超,等. N80 ERW 套管调质前后焊缝组织演变的 EBSD 研究[J]. 电子显微学报, 2010(1): 759 - 764.
Zhang Zuogui, Dong Xiaoming, Tian Qingchao, *et al.* EBSD study on microstructure evolution of N80 ERW casing before and after Q & T heat treatment[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2010(1): 759 - 764.

[2] 王 蕾,吴光英. 2024、7075 铝合金热处理的工艺及设备[J]. 热处理技术与装备, 2010(6): 51 - 55.
Wang Lei, Wu Guangying. Heat treatment technology and equipment of 2024、7075 aluminum alloy[J]. Heat Treatment Technology Equipment, 2010(6): 51 - 55.

[3] Dawsc J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloy[J]. Welding Journal, 1996, 75(3): 41 - 45

[4] 张 华,张三宝,吴 林,等. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 91 - 96.
Zhang Hua, Zhang Sanbao, Wu Ling, *et al.* Transactions of the China Welding Institution[J]. 2003, 24(3): 91 - 96.

[5] Xue P, Ni D R, Wang D, *et al.* Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13 - 14): 4683 - 4689.

[6] 刘雪梅,姚君山,邹增大,等. 铝合金搅拌摩擦焊与熔化极氩弧焊接头组织性能比较[J]. 热加工工艺, 2009(3): 93 - 94.
Liu Xuemei, Yao Junshan, Zou Zengda, *et al.* Comparison of microstructure and properties of FSW and MIG joint for aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2009(3): 93 - 94.

[7] 何建军,刘明宇,杨宗辉. 搅拌头—搅拌摩擦焊的心脏[J]. 电焊机, 2004(1): 24 - 26 + 59.
He Jianjun, Liu Mingyu, Yang Zonghui. Stirring head—the heart of friction stir welding[J]. Electric Welding Machine, 2004(1): 24 - 26 + 59.

[8] Buffa G, Hua J, Shivpuri R, *et al.* Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 419: 381 - 388.

[9] 傅志红,贺地球,周鹏展,等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊缝的组织分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 65 - 69.
Fu Zhihong, He Diqui, Zhou Zhanpeng, *et al.* Structure investigation of friction stir welding of 7A52 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(5): 65 - 69.

[10] Krishnan K N. On the formation of onion rings in friction stir welds[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A327: 246 - 251.

[11] 柯黎明,潘际銮,邢 丽,等. 焊缝金属厚度方向的流动与洋葱瓣花纹的形成[J]. 焊接学报, 2008, 29(7): 39 - 42.
Ke Liming, Pan Jiluan, Xing Li, *et al.* The flowing behavior of weld metal in thickness of the plate and the formation mechanism of the onion ring[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(7): 39 - 42.

作者简介: 王希靖,男,1956 年出生,教授,博士研究生导师. 主要从事焊接设备及其自动化、搅拌摩擦焊技术及焊接质量控制方面的研究工作. 发表论文 120 余篇. Email: wangxj@lut.cn