薄板铝铜搭接搅拌摩擦焊工艺

张骁，王敏，张会杰，朱智，于涛，吴振强
（中国科学院沈阳自动化研究所，沈阳 110016）

摘要：目的 研究铝铜异种材料的搅拌摩擦焊搭接工艺，揭示搭接接头界面行为演变的基本规律。**方法** 对 1 mm 的 6061 铝合金与 1 mm 的紫铜薄板进行搅拌摩擦焊搭接焊接，测试焊缝的力学性能，对焊缝组织进行分析。**结果** 焊缝表面成形良好，焊缝内部无缺陷。接头的最高拉伸强度达到 1447 N，观察拉伸接头断口形貌，发现断裂均发生在上层铝合金的热影响区。**结论** 接头连接界面区域生成钩状“自锁紧”结构，这种钩状“自锁紧”结构增加了铝铜之间的有效接触面积，有利于提高焊缝连接强度。

关键词：搅拌摩擦焊；薄板；铝铜；搭接；自锁紧
DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.029
中图分类号：TG453^{+}.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)05-0187-05

Friction Stir Welding Process for Lap Joint of Aluminum Copper Sheet

ZHANG Xiao, *WANG Min*, *ZHANG Hui-jie*, *ZHU Zhi*, *YU Tao*, *WU Zhen-qiang*
(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the friction stir welding process for lap joint of aluminum-copper sheet and reveal the basic law in interfacial behavior evolution of lap joint. Friction stir welding was carried out on 1 mm of 6061 aluminum-copper sheet to test mechanical properties of the weld and analyze weld microstructure. The weld surface looked well and there was no defect inside the weld. The maximum tensile strength of the joint reached 1447 N. By observing the tensile fracture morphology, fracture was found to occur in the heat affected zone of upper aluminum alloy. Self-locking structure is formed in the connection interface area of joint. Such structure increases the effective contact area between aluminum and copper and improves the strength of weld joint.

KEY WORDS: friction stir welding; sheet; Al-Cu; lap joint; self-locking

铜合金的导电性能优良，在众多金属中仅次于银，这使其在电力行业中得到了广泛的应用[1]；除了优良的导电性，铜合金还具备良好的导热性能，非常适于制造现代化工工业中结构错综复杂、散热管交叉布置的热交换器[2]；同时，铜合金耐磨性好、化学稳定性高、抗腐蚀性好，而且还具备良好的机加工工艺性能，广泛应用于电机转子、定子、联接器等的制造[3]。铜在我国的储量比较有限，每年都要大量进口铜材，铜材价格高昂，这给国内相关工程领域带来了较高的成本支出[4]。铝合金的比强度高，电导率和热导率以及加工成形性能优越，且耐腐蚀性好，在某些场合铝可以代替铜作为结构件[5—6]；但由于铝合金的导电性比紫铜差很多，在一些特定的工程应用中无法完全取代紫铜，这样，在这些工程应用中需要结合铝合金和紫铜的性能，制成一种特定的铝-铜结合件以满足应用，所以说铝-铜复合接头的应用前景十分广阔[7]。铝铜复合件的应用必然涉及到异种金属的焊接，但是，由于异种材料之间的化学、

收稿日期：2017-06-29
基金项目：国家自然科学基金（51505471）
作者简介：张骁（1985—），男，助理研究员，主要研究方向为搅拌摩擦焊接工艺。

机械、热性能存在较大的差异，利用传统熔焊的方式连接异种材料存在很大的困难[8]。搅拌摩擦焊(FSW)是由英国焊接协会于 1991 年发明的一种焊接技术，与其他焊接工艺相比，该方法的焊接变形较小且连接强度较高，该方法使用一种非消耗性的旋转工具，在焊接区产生摩擦热和变形，从而形成一个焊接区域，在焊接过程中材料仍然处于固相状态。在焊接区域处，材料在摩擦和热的作用下，很容易塑化。最近，一些学者尝试用搅拌摩擦焊焊接异种材料，如不同系列的铝合金、铝-钢、铝-镁及铝-铜等。因其所具有的特殊优势，搅拌摩擦焊在异种金属的焊接研究及应用方面提供了新的思路和方向，成为了研究热点[9]。

1 试验

为了获得合格的焊前装配精度，先用砂纸打磨被焊板材的四周，去除毛刺，再用丙酮清洗焊板的表面，去除表面污垢。为了找出薄板铝铜的最佳焊接工艺，利用响应面法设计出一组试验参数，按照设计的试验参数进行试验。为了研究不同焊速下焊接接头的焊接质量，进行了 200~700 mm/min 下不同焊速的焊接试验。

利用 OLYMPUS 金相显微镜和体式显微镜对焊缝微观组织进行分析。利用时代 MV-TEST1100 联动型维式图像显微硬度计对试样截面进行硬度分析。

2 结果与分析

2.1 金相分析

在前期的焊接试验中发现，如果焊接参数选择不当，铝铜界面会出现孔洞等焊缝缺陷，见图 1，焊缝缺陷会使铝铜连接效果减弱。经过分析，造成这种缺陷的原因有两点：一是当焊接压深过大时，上层铝板会形成较大飞边，且铝板会过分减薄，致使搭接面积减小，降低焊缝的抗剪切强度；二是当搅拌头旋转速度过快时，会造成焊缝温度过高，从而影响成形。经过工艺优化和大量的工艺试验，最终得到了合适的焊接参数以及成形较好的焊缝，见图 2。

图 1 焊缝截面缺陷
Fig.1 Defects of weld

a 焊缝正面

b 焊缝背面

图 2 焊缝表面
Fig.2 Weld surface

焊接参数优化后的铝铜搭接接头金相组织见图 3。在接头焊接过程中，搅拌头的轴肩直接与上层铝板接触，轴肩的“搅拌-挤压”共同作用，使铝板产生塑性变形，焊接接头区域分为焊核区、热机影响区和热影响区，其中，焊核区受到的搅拌作用最为充分[10—11]。在搅拌头摩擦和向下挤压的复合作用下，大量的热量由此产生，这些热量传导到下面的铜板中，使铜板出现受热软化，软化后的铜板材料再被插入的搅拌针搅动。与此同时，上层铝发生强烈的塑性变形，在内凹轴肩摩擦力与压力共同作用下，铝板上层前进侧的材料向下侧和后退侧运动[12]。在搅拌针的搅拌作用下，下层铜迁移进入铝基体，被搅拌针搅动的铜慢慢填充了铝迁移留下的的“瞬时空腔”，形成一种独特的“钩状自锁紧”结构[13]。从图 3 还可以看出，这种“钩状自锁紧”结构使铝和铜之间形成良好的结合，当铝基体中迁移入了铜材料后，铝铜之间的有效接触面积得到增加，铝铜界面的机械结合得到增强。迁移的铜材料被这种钩状的条带结构锁入铝基体之中，使铝和铜之间结合得更加牢固，而且钩状条带结构还具有自锁紧作用，从而大大提高了铝铜结合面的连接力。

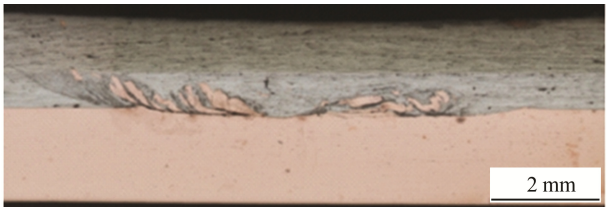


图 3 焊缝截面金相
Fig.3 Metallographic images of weld

搅拌摩擦焊是一种非稳态、非对称的物理作用过程，在搅拌摩擦焊具与被焊材料直接作用产生热量的同时[14]，被焊材料自身的塑性变形也能产生大量变形热，这 2 种热量的共同作用使铝-铜结合面的材料达到了塑性状态，当材料的屈服切应力小于摩擦切应力时，被焊材料会产生剧烈的塑性变形，与此同时，铝

-铜之间的结合面还会发生互相扩散，在上述这些作用共同影响下，形成了良好的铝铜接头。

2.2　截面分析

铝铜搭接接头拉伸示意见图 4，铝铜搭接接头的抗剪切强度由钩状自锁紧结构的高度和上层铝板的抗剪切厚度共同决定。钩状结构的高度太低，会降低铝板和铜板的连接面积；钩状结构的高度太高，又会降低铝板的有效抗剪切厚度，所以需要调整焊接参数，从而在两者之间找到平衡点，实现焊缝性能的最优化。

在 2000 r/min 的转速下，变换不同焊速得到的焊缝截面金相组织形貌见图 5，可以发现，随着焊速的增加，铜板上的钩状自锁紧结构有增大的趋势。

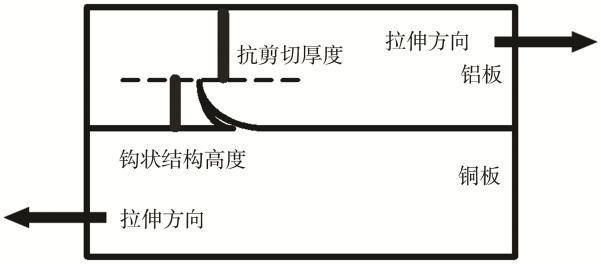
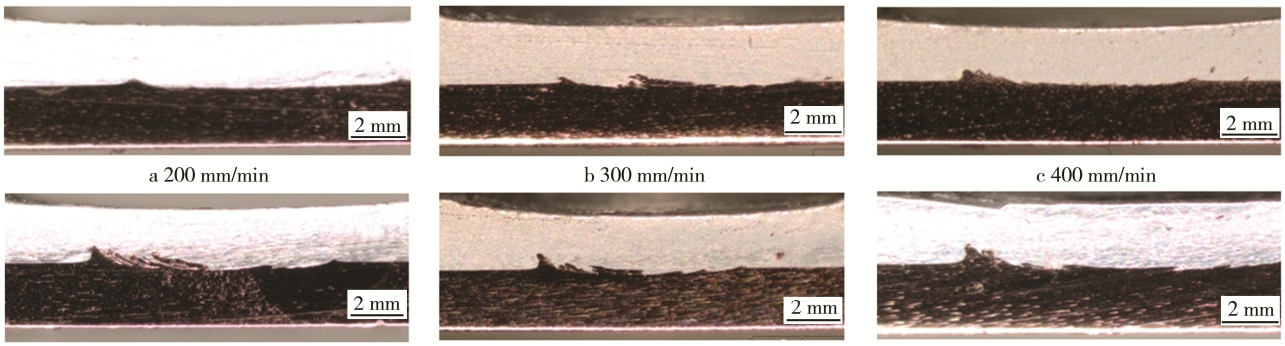


图 4　铝铜搭接接头拉伸示意
Fig.4 Al-Cu lap joint tensile sketch



a 200 mm/min　b 300 mm/min　c 400 mm/min
d 500 mm/min　e 600 mm/min　f 700 mm/min

图 5　不同焊速下的焊缝金相图片
Fig.5 Weld metallographic images under different welding speed

2.3　力学性能分析

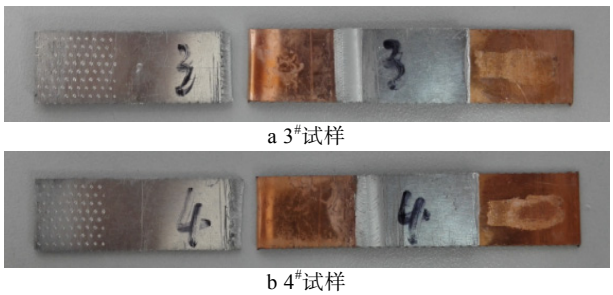
在 CRIMS-DDL300 万能试验机上对试样进行拉伸测试，拉伸速度为 2 mm/min，断裂敏感度为 20%，拉伸结果见表 1。可以发现，铝铜焊缝抗拉强度最高的 2 组为 14#和 15#。这 2 组的转速均为 1750 r/min，焊接速度均为 450 mm/min，预热温度均为 125 ℃，这也是通过 BBD 方式优化出的最优参数。

表 1　因素水平表
Tab.1 An example for table

序号	因素编码值			工艺参数			抗拉强度/N
	β_1	β_2	β_3	转速/(r·min^{-1})	焊接速度/(mm·min^{-1})	预热温度/℃	
1	−1	−1	0	1500	200	125	717.00
2	1	−1	0	2000	200	125	850.50
3	−1	1	0	1500	700	125	667.20
4	1	1	0	2000	700	125	387.00
5	−1	0	−1	1500	450	100	763.80
6	1	0	−1	2000	450	100	950.70
7	−1	0	1	1500	450	150	850.50
8	1	0	1	2000	450	150	500.00
9	0	−1	−1	1750	200	100	860.70
10	0	1	−1	1750	700	100	1007.40
11	0	−1	1	1750	200	150	737.10
12	0	1	1	1750	700	150	1197.60
13	0	0	0	1750	450	125	747.00
14	0	0	0	1750	450	125	1447.80
15	0	0	0	1750	450	125	1200.00

2.4　断口分析

铝铜焊缝拉伸试样拉断后的宏观形貌见图 6，从断后试样可以看出，断口均表现为上层铝板断裂，且断口都出现在上层铝板返回侧的热影响区，断口有少许的颈缩，且宏观形貌呈纤维状，这证明焊缝在断裂前产生了塑性变形。由此可以判断，铝和铜之间结合得非常牢固，界面之间的连接力大于铝板断裂的横向切应力，在拉伸试验中，随着拉伸力逐渐施加，铝板上横向切应力持续升高，在热影响区发生应力扩展，最后，在拉伸力的不断加载下，接头断裂在热影响区。



a 3#试样
b 4#试样

图 6　拉断试样
Fig.6 Broken tension test specimen

2.5 断口物相分析

在搅拌摩擦焊焊接过程中，焊具与铝板不断摩擦生热，材料在机械作用下发生塑性变形产热，这些热量保证焊缝区的温度一直较高，这样，在焊缝区很容易形成铜铝金属间化合物[15]。Al-Cu 二元相图见图 7，可以看出，在不同的成分配比及相应的温度下，铝和铜之间可以生成一系列不同的金属间化合物。

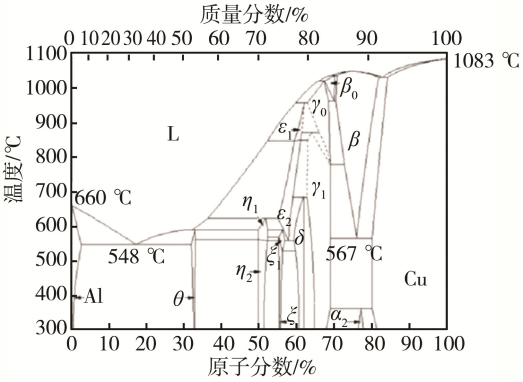
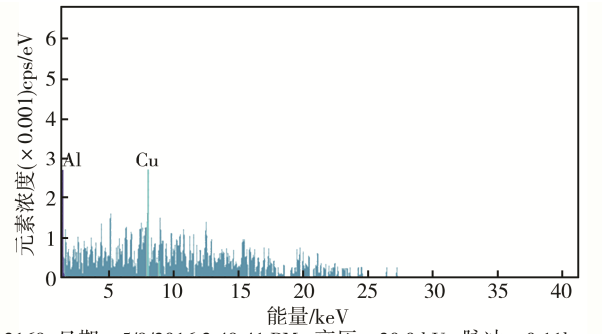


图 7 Al-Cu 相图

Fig.7 Al-Cu phase diagram

对焊缝组织进行的能谱分析见图 8，发现某些部位 Cu 和 Al 的原子比例为 1∶2，可以推断，组织中有金属间化合物 $CuAl_2$ 存在。需要指出的是，铝-铜界面区域大范围的金属间化合物会减弱接头的力学性能[16—17]，因此需要避免金属间化合物的大范围出现。



2169 日期：5/9/2016 2:49:41 PM 高压：30.0 kV 脉冲：0.11kcps

El AN Series norm.c Atom.c

			质量分数/%	原子分数/%
Cu	29	K-series	53.75	33.04
Al	13	K-series	46.25	66.96

图 8 断口能谱分析

Fig.8 Energy spectrum analysis

2.6 显微硬度分析

对试样进行硬度分析，测试点的分布见图 9。在铝铜界面的上端和下端 0.1 mm 处进行硬度测试，每隔 0.3 mm 打一个点，测试结果见图 10。上层铝合金显微硬度分布见图 10a，可以看出，硬度值较高的点主要分布在焊核区，原因是在搅拌摩擦过程中，铝

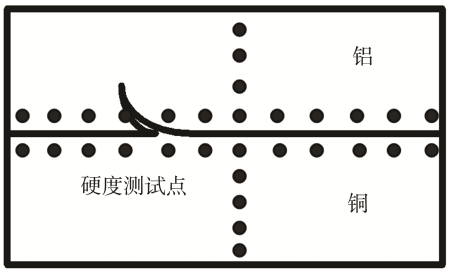


图 9 硬度测试点分布

Fig.9 Hardness test point distribution

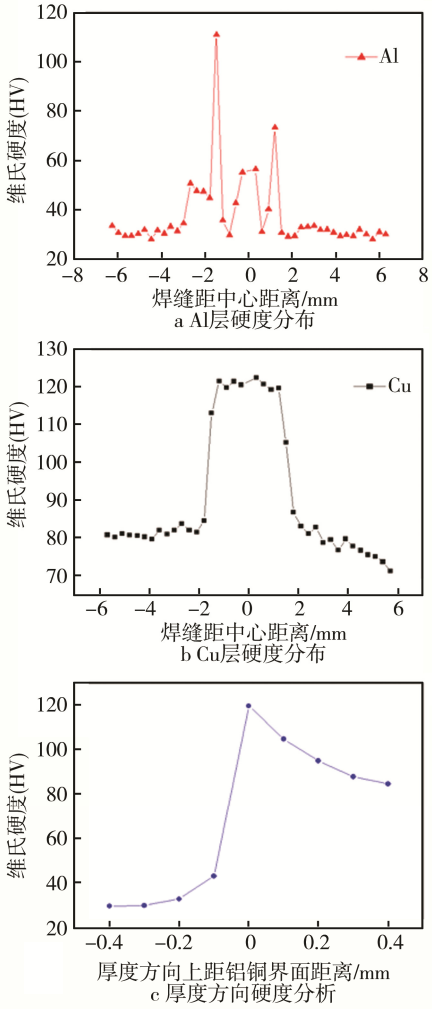


图 10 硬度检测结果

Fig.10 Hardness test result

合金发生了动态再结晶，该过程使铝合金组织的晶粒发生了细化[18—19]。在焊核区内，有些硬度值达到了紫铜的硬度，这是因为在搅拌摩擦焊具强烈的搅拌-挤压共同作用下，在上层铝合金焊核区的“洋葱环”内，迁移入了下层小颗粒或者小片状的铜材料[20]，而硬度测试时，测头刚好打在了铜上，从而使硬度值异常升高。

搭接焊缝下层紫铜的显微硬度曲线见图 10b，与母材、热机影响区和热影响区相比，焊缝焊核区的硬度要高出很多，但是焊核区的宽度不是很宽；焊核区

以外，热机影响区和热影响区的显微硬度变化不大。

铝铜焊缝截面垂直方向上，从上层铜到下层铝的显微硬度分布见图 10c，在铝板侧的硬度值较低，在铜板侧的硬度值较高，且在界面处存在一些硬度值极高的点，结合 EDS 能谱分析可知，在铝铜结合面上生成了脆性的金属间化合物 $CuAl_2$，这些硬度值极高的点就是这些金属间化合物。

3　结论

1) 在铝铜搭接搅拌摩擦焊焊缝的界面处存在钩状结构，在 200~700 mm/min 的焊速范围内，随着焊速的增加，钩状结构有增大的趋势。

2) 钩状结构的高度和材料的抗剪切厚度共同决定了焊缝的强度。

3) 焊缝组织中存在金属间化合物，这些金属间化合物的存在会降低焊缝的连接强度。

参考文献：

[1] GALVAO I, OLIVEIRA J C, LOUREIRO A, et al. Formation and Distribution of Brittle Structures in Friction Stir Welding of Aluminium and Copper: Influence of Shoulder Geometry[J]. Intermetallics, 2012, 22(3): 122—128.

[2] SHEN J, LI Y, ZHANG T, et al. Preheating Friction Stir Spot Welding of Mg/Al Alloys in Various Lap Configurations[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20: 1—10.

[3] YAMAGISHI H, SUMIOKA J, KAKIUCHI S, et al. Forge Welding of Magnesium Alloy to Aluminum Alloy Using a Cu, Ni, or Ti Interlayer[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46: 3601—3611.

[4] LI X, REN Z M. Effects on High Magnetic Fields on the Microstructure of Al-Al2Cu Eutectic[J]. Materials Letters, 2010, 64(23): 2597—2600.

[5] PATEL V, CHEN D L, BHOLE S D. Dissimilar Ultrasonic Spot Welding of Mg-Al and Mg-high Strength Low Alloy Steel[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2014, 4: 410051—410058.

[6] FIROUZDOR V, KOU S. Al-to-Cu Friction Stir Lap Welding[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 43(1): 303—315.

[7] SIVARAJ P, KANAGARAJAN D, BALASUBRAMANIAN V. Effect of Post Weld Heat Treatment on Tensile Properties and Microstructure Characteristics of Friction Stir Welded Armor Grade AA7075-T651 Aluminum Alloy[J]. Defense Technology, 2014, 10(1): 1—8.

[8] BISADI H, TAVAKOLI A, TOUR S M, et al. The Influences of Rotational and Welding Speeds on Microstructuresand Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al5083 and Commercially Pure Copper Sheets Lap Joints[J]. Materials and Design, 2012(43): 80—88.

[9] LIU Z Y, XIAO B L, WANG W G, et al. Singly Dispersed Carbon Nanotube/Aluminum Composites Fabricated by Powder Metallurgy Combined with Friction Stir Processing[J]. Carbon, 2012, 50(5): 1843—1852.

[10] LI J, LIU H. Effects of the Reversely Rotating Assisted Shoulder on Microstructures during the Reverse Dual-rotation Friction Stir Welding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 31(4): 375—383.

[11] MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, MOSTAFAEI A, et al. Friction Stir Welding Joint of Dissimilar Materials between AZ31B Magnesium and 6061 Aluminum Alloys: Microstructure Studies and Mechanical Characterizations[J]. Materials Characterization, 2015, 101: 189—207.

[12] JI S, MENG X, LIU J, et al. Formation and Mechanical Properties of Stationary Shoulder Friction Stir Welded 6005A-T6 Aluminum Alloy[J]. Materials & Design, 2014 (62): 113—117.

[13] BUFFA G, CAMPANELLA D, FRATINI L. On Tool Stirring Action in Friction Stir Welding of Work Hardenable Aluminum Alloys[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2013, 18(2): 161—168.

[14] JI S, LI Z, ZHANG L, et al. Effect of Lap Configuration on Magnesium to Aluminum Friction Stir Lap Welding Assisted by External Stationary Shoulder[J]. Materials & Design, 2016, 103(5): 160—170.

[15] WU H, CHEN Y, STRONG D, et al. Stationary Shoulder FSW for Joining High Strength Aluminum Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 221: 187—196.

[16] LI J, LIU H. Effects of Tool Rotation Speed on Microstructures and Mechanical Properties of AA2219-T6 Welded by the External Non-rotational Shoulder Assisted Friction Stir Welding[J]. Materials & Design, 2013, 43: 299—306.

[17] FEREIDUNI E, MOVAHEDI M, KOKABI A H. Aluminum Steel Joints Made by an Alternative Friction Stir Spot Welding Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 224: 1—10.

[18] CHEN Y C, GHOLINIA A, PRANGNELL P B. Interface Structure and Bonding in Abrasion Circle Friction Stir Spot Welding: A Novel Approach for Rapid Welding Aluminum Alloy to Steel Automotive Sheet[J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 134(1): 459—463.

[19] LIUX, LANS H, NI J. Analysis of Process Parameters Effects on Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloy to Advanced High Strength Steel[J]. Materials & Design, 2014, 59: 50—62.

[20] KUNDU S, ROYD, BHOLA R, et al. Microstructure and Tensile Strength of Friction Stir Welded Joints between Interstitial Free Steel and Commercially Pure Aluminum[J]. Materials & Design, 2013, 50: 370—375.