

# 柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金接头组织及力学性能

Microstructures and Mechanical Properties of Al-Li Alloy

Friction Stir Welds with a Cylinder-shape  
and Non-whorl Pin

王大勇, 冯吉才, 王攀峰

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

WANG Da-yong, FENG Ji-cai, WANG Pan-feng

(State Key Lab of Advanced Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**摘要:** 采用柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊接 5mm 厚的铝锂合金轧制板, 对接头组织和力学性能进行了分析。焊后接头形成了三个组织差异明显的区域: 焊核区, 热机影响区和热影响区。焊核区微观组织呈鱼鳞状; 热影响区组织在焊接热循环作用下, 发生回复反应, 形成棒状的回复晶粒; 前进侧和后退侧热机影响区内为颗粒较大的等轴晶晶粒, 且后退侧晶粒尺寸大于前进侧。力学性能测试结果表明, 焊接速度  $U = 40\text{mm/min}$  时, 接头获得最高拉伸强度 (296MPa); 焊接速度  $U = 80\text{mm/min}$  时, 接头获得最大延伸率 (8.6%)。硬度测试结果表明, 焊缝区发生了软化, 前进侧和后退侧材料的软化区间大致相同, 但后退侧软化程度高于前进侧。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 柱形光头搅拌针; 铝锂合金

中图分类号: TG453+.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2004) 03-0003-04

**Abstract:** Friction stir welded 5 mm thick, Al-Li alloy rolled sheet, metallurgical, hardness and tensile strength measurements were performed. The results demonstrate that there exist three distinct zones in the FSW joint: the weld nugget zone (WNZ), and the thermal-mechanically affected zone (TMAZ), and the heat-affected zone (HAZ). The microstructures in WNZ take on scale shape. Under the thermal cycle, the microstructures in HAZ occur recovery and generate the bar-shape recovery structure. The microstructures in TMAZ consist of the equiaxed grains, and the grain size of the microstructures at the retreating side is bigger than that at the advancing side. The tensile test results confirm that the highest tensile strength of Al-Li FSW joints welded with a cylinder-shape and non-thread pin is 296MPa (under the welding speed  $U = 40\text{mm/min}$ ), and the highest elongation percentage is 8.6% (under the welding speed  $U = 80\text{mm/min}$ ). The hardness measurements show that the weld is softened, and the softened scope of both the advancing and the retreating sides are almost the same. But the soften degree of the material at the retreating side is higher than that at the advancing side.

**Key words:** friction-stir welding; a cylinder-shape and non-whorl pin; Al-Li alloy

铝锂合金是一种低密度、高性能的新型结构材料, 用铝锂合金取代常规的铝合金可使结构质量减轻 10% ~ 15%, 刚度提高 15% ~ 20%。目前, 铝锂合金已广泛应用于航空、航天等领域。铝锂合金焊接接头质量的好坏是其在航空航天中应用的关键, 然而传统的铝锂合金焊接工艺焊后接头易形成气孔、热裂纹等焊接缺陷, 接头强度系数较低, 材料内锂元素烧损严重。

搅拌摩擦焊 (Friction-Stir Welding, 简称 FSW), 是英国焊接研究所研究出的一种新的连接方法, 其实

质是通过高速旋转的搅拌头与被焊材料表面间生成的摩擦热而实现的固相连接<sup>[1-5]</sup>。由于焊接温度较低, 材料没有发生熔化, 因而接头内不易形成气孔和热裂纹等缺陷, 焊后接头残余应力低, 变形小, 强度系数高<sup>[6-8]</sup>。搅拌头是搅拌摩擦焊的核心技术, 搅拌针的形状影响着焊接过程中搅拌针附近软化层的形成量、流动形式和接头软化区的宽度, 进而影响接头质量<sup>[9, 10]</sup>。D. J. Shindo 等人认为, 带螺纹的搅拌针在焊接初始阶段磨损较为严重, 当螺纹被完全磨损而消失时, 搅拌针的磨损过程基本结束, 并形成最优化搅

拌针; 没有螺纹的搅拌针的焊接性能高于带螺纹搅拌针, 因而没有必要在搅拌针的侧面上加工螺纹<sup>[11]</sup>。

基于上述分析, 本工作采用柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金, 并深入研究这种形貌的搅拌针对接头微观组织和力学性能的影响。

1 实验用材料及方法

本实验采用 5mm 厚的铝锂合金轧制板为研究对象, 其主要化学成分见表 1。

表 1 铝锂合金的主要化学成分  
Table 1 The main chemical composition of Al-Li alloy

Element	Cu	Li	Al
Mass fraction/ %	3. 97	1. 07	94

实验用搅拌头的整体形貌如图 1 所示, 该搅拌头的搅拌针呈柱形, 针侧面为光滑圆柱面。搅拌头主要参数如下: 轴肩直径  $D = 22\text{mm}$ ; 搅拌针直径  $d = 5\text{mm}$ ; 搅拌针长度  $L = 4. 8\text{mm}$ 。



图 1 搅拌头形貌  
Fig. 1 The rotational tool

所用设备为北京赛福斯特公司为哈尔滨工业大学研制的龙门式数控搅拌摩擦焊机, 型号为FSW -

3LM -003, 工作台规格为  $1500\text{mm} \times 920\text{mm}$ 。  
试件尺寸为  $150\text{mm} \times 100\text{mm} \times 5\text{mm}$ , 焊前用钢丝刷将与轴肩接触的母材表面及接合面处来回轻微擦拭, 以去除氧化膜, 然后用丙酮或乙醇将接头位置附近清理干净。用卡具将试件刚性固定在钢背板上后, 将搅拌头以  $300\text{r/min}$  的转速慢慢扎入接合面内, 搅拌头沿焊接方向的行走速度为  $20 \sim 80\text{mm/min}$ 。将焊后试样按 200 400 600 800 1000 1200 1500 的号码顺序用金相砂纸将接头横截面表面手工逐级研磨, 再用氧化镁溶液抛光。用硝酸+ 盐酸+ 氢氟酸+ 水溶液对抛光后的试样进行化学腐蚀, 然后置于光学显微镜下对接头组织形貌进行分析。在电子万能试验机 (Instron-1186) 上对接头进行拉伸测试。

2 实验结果及讨论

2. 1 接头组织分析

采用柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金接头形成组织明显不同的三个区域: 焊核区、热机影响区和热影响区, 如图 2 所示。由图 2 可见, 焊缝中部的焊核区为一核状物, 其形状和大小与柱形搅拌针相似。图 3 为焊核放大照片, 由该图可见, 焊核中部和焊核内临近焊缝表面处分别形成一个核心, 并在两个核心的周围形成一系列同心环, 这种特殊形貌反映了柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊接铝锂合金过程中塑性软化金属流动的复杂性。焊核区在焊接过程中经受高温热循环和搅拌头的强烈机械搅拌作用。热机影响区位于焊核区两侧, 该区也受到热循环和搅拌头的机械搅拌作用, 但作用程度较焊核区弱。热影响区在焊接过程中仅受到焊接热作用的影响。

焊缝两侧由于相对于搅拌头转速不同, 而分为前进侧 (Advancing side) 和后退侧 (Retreating side), 二者分别对应于旋转的搅拌头在焊缝方向的切线速度与搅拌头行进方向相同和相反的侧面。

采用柱形搅拌针焊后接头焊核区微观组织呈鱼鳞状, 如图 4b 所示, 这与目前普遍采用的锥形搅拌针

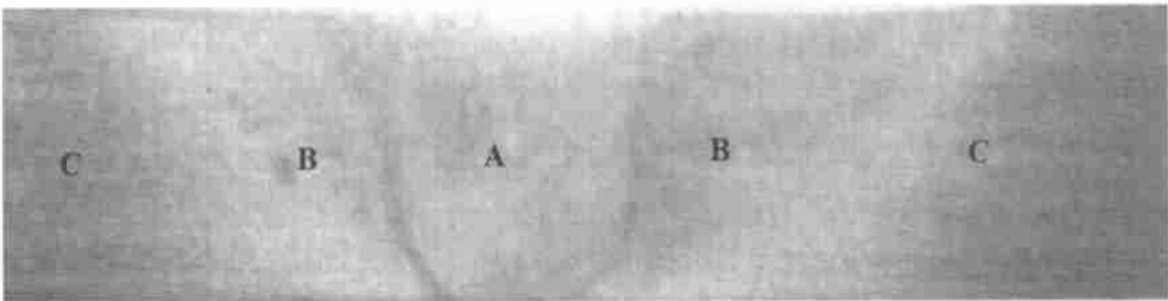


图 2 接头宏观形貌 (A- 焊核区; B- 热机影响区; C- 热影响区)  
Fig. 2 The macroscopic profile of the joint (A—WNZ; B—TMAZ; C—HAZ)

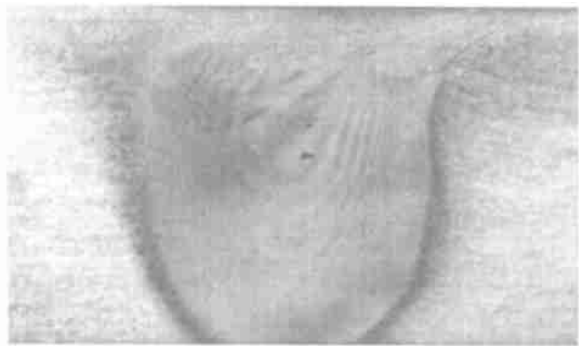


图3 焊核形貌

Fig. 3 The profile of the weld nugget

焊后接头焊核区微观组织差别较大(微观组织为等轴晶晶粒)。热影响区组织在焊接热循环作用下发生了回复反应,由初始的板条状组织转变成棒状的回复晶粒,但在总体上仍保留着板材轧制状态下呈现的板条状取向形貌,如图4c所示。

采用柱形光头搅拌针搅拌摩擦焊铝锂合金接头热机影响区的形貌也较为特殊,与目前常用的锥形搅

拌针焊后接头热机影响区组织形貌差异较大。从图4d, e可以发现,前进侧和后退侧热机影响区内为颗粒较大的等轴晶晶粒,而没有出现明显的变形组织,其中后退侧的晶粒尺寸较前进侧的大。这是由于柱形搅拌针前部的塑性软化层材料以挤压的方式从前进侧流动到后退侧,然后填充进搅拌针后部形成的空腔内。这种流动形式导致热机影响区与软化层界面处的材料受到的剪应力作用较弱,热机影响区板条组织变形小,但在焊接热循环作用下发生回复、再结晶和粗化,形成粗大的回复和再结晶晶粒。由于热机影响区临近焊核区,因而其受到的焊接热循环作用也较热影响区大,所形成的粗化晶粒也较热影响区的大。对比图4d和4e可以看出,后退侧热机影响区内的晶粒较前进侧热机影响区的大,即后退侧热机影响区受焊接热循环导致的弱化作用较前进侧的严重。这是由于搅拌针前部的软化材料随着搅拌针的高速旋转,从前进侧流动到后退侧,导致后退侧发生热量累积,从而使后退侧热机影响区经受的焊接高温作用时间大于前进侧热机影响区,因而粗化现象较为严重。

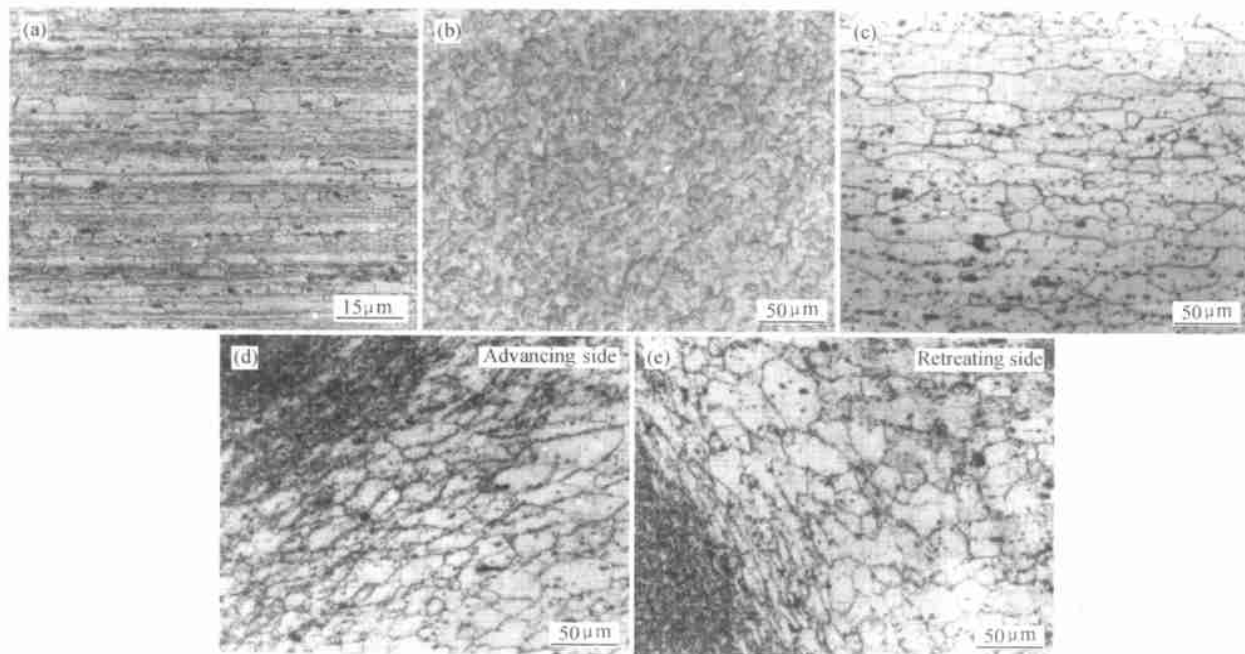


图4 接头微观组织 (a) 母材; (b) 焊核区; (c) 热影响区; (d) 前进侧热机影响区; (e) 后退侧热机影响区

Fig. 4 Joint microstructures (a) parent material; (b) WNZ; (c) HAZ;  
(d) TMAZ at the advancing side; (e) TMAZ at the retreating side

## 2.2 接头力学性能

接头力学性能测试结果如图5所示。由图5a可见,随着焊接速度的提高接头强度先上升,然后有微小的波动后迅速下降,并于焊接速度 $v=40\text{mm/min}$ 时,获得 $296\text{MPa}$ 的最大值。这是由于转速为定值且焊接速度较低时,焊接热输入较大,接头软化程度严

重,因而强度较低,如 $v=20\text{mm/min}$ 时,焊后接头强度为 $282\text{MPa}$ 。焊接速度提高,焊接热输入随之减少,接头软化程度也相应的降低,因而接头强度增大。但焊接速度的提高却弱化了塑性软化材料填充搅拌针行走所形成的空腔的能力,如果焊接速度过高,软化材料填充空腔能力不足,焊缝内易形成空洞缺陷,

导致接头强度大幅降低,如  $U=100\text{mm}/\text{min}$  时,前进侧焊核区和热机影响区的界面处形成孔洞缺陷,接头强度仅为  $270\text{MPa}$ 。

图 5b 为接头延伸率与焊接速度间的关系。由该

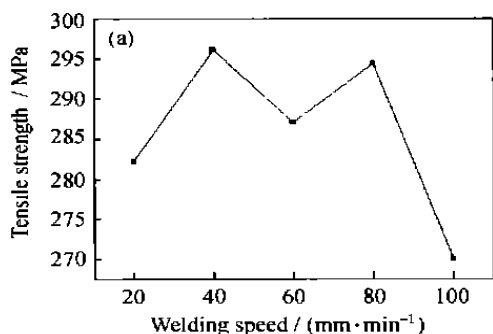


图 5 接头力学性能 ( $\omega=300\text{r}/\text{min}$ )

Fig. 5 Mechanical properties of the joints ( $\omega=300\text{r}/\text{min}$ )

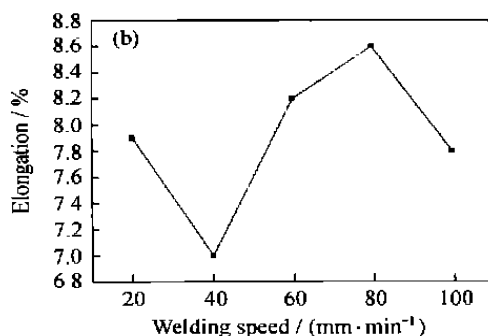


图 6 为接头横截面厚度方向中心位置的硬度分

布形貌。由该图可见,焊缝中部硬度值较低,前进侧和后退侧的软化区间大致相同,但后退侧的整体硬度值低于前进侧,这说明后退侧的软化程度高于前进侧。结合图 4 的组织分析,由于后退侧经受的焊接高温作用时间较前进侧长,因而该区溶解于基体内的沉淀相数量大,组织粗化程度也相应的较为严重,导致后退侧材料的软化程度较高。

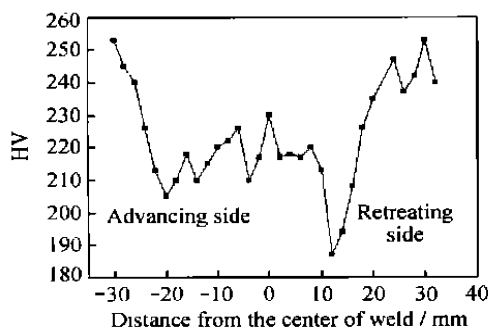


图 6 接头硬度分布形貌

Fig. 6 Hardness profile of the FSW joint

### 3 结论

(1) 焊核区微观组织呈鱼鳞状;热影响区组织在焊接热循环作用下,发生回复反应,形成棒状的回复晶粒;前进侧和后退侧热机影响区内为颗粒较大的等轴晶粒,且后退侧的晶粒尺寸较前进侧的大。

(2) 焊接速度  $U=40\text{mm}/\text{min}$  时,接头强度最高,为  $296\text{MPa}$ ;焊接速度  $U=80\text{mm}/\text{min}$  时,接头延伸率最大,为  $8.6\%$ 。

(3) 前进侧和后退侧材料的软化区间大致相同,但后退侧材料的软化程度高于前进侧。

### 参考文献

- [1] M A Sutton, B Yang, A P Reynolds, R Taylor. Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum [J]. Material Science and Engineering, 2002, A323 (1): 160—166.
- [2] K V Jata, S L Semiatin. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys [J]. Scripta Mater, 2000, 43 (8): 743—749.
- [3] R A Prado, L E Murr, D J Shindo, K F Soto. Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+ 20%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: a preliminary study [J]. Scripta Materialia, 2001, 45 (1): 75—80.
- [4] A P Reynolds, W D Lockwood, T U Seidel. Processing-property correlation in friction stir welds [J]. Materials Science Forum, 2000, 331—337 (4): 1719—1724.
- [5] S V Jata, K K Sankaran, J J Ruschau. Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31A (9): 2181—2192.
- [6] Kh A A Hassan, A F Norman, D A Price, P B Prangnell. Stability of nugget zone grain structures in high strength Al alloy friction stir welds during solution treatment [J]. Acta Materialia, 2003, 51 (8): 1923—1936.
- [7] G Oertelt, S S Babu, S A David, E A Kenik. Effect of thermal cycling on friction stir welds of 2195 aluminum alloy [J]. Welding journal, 2001, 80 (3): 71—79.
- [8] L Djapic Oosterkamp, P J Webster, P A Browne, G B M Vaughan, P J Withers. Residual stress field in a friction stir welded aluminum extrusion [J]. Materials Science Forum, 2000, 347—349 (9): 678—683.
- [9] M Guerra, C Schmidt, J C McClure, et al. Flow patterns during friction stir welding [J]. Materials Characterization, 2003, 49 (1): 95—101.
- [10] Ying Li, L E Murr, J C McClure. Flow visualization and resid-

(下转第 10 页)

但可以起到分散剂、稳定剂的作用,同时还起到助磨剂的作用。液体介质对粉体的形貌的影响并不十分明显。从粉体的形貌分析看,PEG的加入不但可以使SiC粉体颗粒尺寸和形状分布均匀,而且还起到分散、稳定及助磨的功效。

采用PEG 200 (5%,介质为乙醇)表面改性后的SiC粉体添加B、C等烧结助剂,干压成形后,在2100℃的温度下真空无压烧结得到碳化硅陶瓷制品,与未加入PEG改性相比,加入PEG后陶瓷素坯密度由 $1.65\text{ g/cm}^3$ 提高到 $1.76\text{ g/cm}^3$ ,制品体积密度由 $3.01\text{ g/cm}^3$ 提高到 $3.05\text{ g/cm}^3$ ,显气孔率由0.40%降到0.22%,陶瓷制品的烧结性能得到改善。

### 3 讨论

聚乙二醇是非离子表面活性剂,分子式为 $\text{HO}-(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n-\text{H}$ ,其中C—O、C—H和O—H具有很高的极性,形成的分子链在水溶液中呈蛇形,易与氢氧化物胶粒(Si—OH)表面建立较强的氢键,从而在胶粒表面形成一层大分子亲水膜,导致空间位阻效应<sup>[2]</sup>。

当PEG加入量太少,不但颗粒间的静电斥力不够强,而且也不能彻底遮蔽颗粒间的非架桥羟基和吸附水,无法达到良好的分散效果;若加入量过大,不但没有明显改善分散效果,并且有使颗粒粗大的趋势,会导致粉体流动性变差,这在试验中得到证实,且过多的加入量也将提高制品的成本。对于本次试验,PEG添加量在5%左右,粉体的流动特性较好,附着量较大。

液体介质对分散剂自身的分散及在颗粒上的吸附量有影响。当介质为水时,由于水的极性很大,而SiC粉体也是极性固体粉体,SiC容易与水润湿和吸附<sup>[3]</sup>,SiC在水中易得到很好分散,但由于SiC表面存在大量的吸附水、配位水、桥—OH基及非桥—OH基的作用会使SiC浆料中产生大的团聚体,在后续干燥过程中变成硬团聚<sup>[6]</sup>,加入少量的PEG不足以置换表面吸附的 $\text{H}_2\text{O}$ 、—OH,所以粉体的流动性不是很好。当介质为乙醇时,由于乙醇对聚乙二醇的溶解性较好,使聚乙二醇的链可充分伸展,分散均匀,而且乙醇的表面张力要小于水的表面张力,在低温(70℃)干燥时,颗粒因溶剂的表面张力小而团聚的可能就小了,粉体的流动特性较好,并都得到试验证明。

### 4 结论

(1) PEG加入量为1%,液体介质为乙醇时,SiC粉体的压缩度和休止角分别为13.25%和38.6°;改性粉体获得较好的流动特性。

(2) 随PEG加入量的增加,PEG在SiC粉体表面附着量增加,介质对附着量的影响较小,粉体表面吸附的PEG在144~500℃可以烧尽。

(3) SiC粉体表面存在PEG的C—O、C—H特征峰,而O—H特征峰得到强化,形成的空间位阻效应起到了表面改性的作用。

(4) 改性后SiC粉体的颗粒分散性好,尺寸较为均匀,主要分布在 $0.4\sim 1.0\mu\text{m}$ ,颗粒形状多为块状分布,介质对颗粒形貌的影响较小。

(5) 改性后碳化硅陶瓷制品的烧结性能得到改善。

### 参考文献

- [1] 金志浩,高积强.工程陶瓷材料[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [2] Q Liu, L Gao. Journal of the European Ceramic Society, 1997, (17): 581—585.
- [3] 郭小龙,陈沙鸥.纳米SiC水悬浮液稳定性的研究[J].青岛大学学报,2001,14(1): 29—33.
- [4] 候耀永,李理.高分散性高稳定 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和纳米SiC单相及混合水悬浮液的制备[J].硅酸盐学报,1998,26(2): 171—177.
- [5] 三轮茂雄,日高重助.粉体工程试验手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1987.36—37,133—141.
- [6] 徐明霞,方洞浦.PEG在 $\text{ZrO}_2$ 前驱体表面的吸附及改性[J].天津大学学报,1994,27(2): 172—178.

基金项目: 国家 863-704 青年基金资助项目 (No. 2002AA745100)

收稿日期: 2003-07-23; 修订日期: 2003-12-25

作者简介: 郭兴忠 (1974-),男,博士后,主要从事结构陶瓷制备技术的研究,联系地址: 浙江大学材化学院无机非金属材料研究所 (310027)。

\* \* \* \* \*

(上接第6页)

- ual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A271 (2): 213—223.
- [11] D J Shindo, A R Rivera, L E Murr. Shape Optimization for Tool Wear in the Friction-stir Welding of Cast Al 1359-20% SiC MMC [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37 (10): 4999—5005.

基金项目: 国家 863 计划 (2002AA724040)

收稿日期: 2003-07-27; 修订日期: 2003-12-20

作者简介: 王大勇 (1973-),男,黑龙江省伊春市人,现为哈尔滨工业大学博士研究生,从事专业: 材料加工工程,联系地址: 哈尔滨工业大学焊接系 (150001)。