

搅拌摩擦加工对铸态 7075 铝合金显微组织的影响 *

刘峰超 马宗义
(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要 采用搅拌摩擦加工对变形能力差的铸态 7075 铝合金进行改性加工, 探讨了加工工艺对加工区显微组织的影响. 加工工艺优化实验表明, 在同样的工具设计和加工参数下, 通过两道次重叠加工可在搅拌区获得均匀的细小等轴晶组织; 此外, 减小加工工具尺寸并提高旋转速度也可明显提高搅拌区显微组织的均匀性.

关键词 铸态铝合金, 搅拌摩擦加工, 显微组织, 改性

中图法分类号 TG146 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2008)03-0319-06

EFFECT OF FRICTION STIR PROCESSING ON THE MICROSTRUCTURE OF AS-CAST 7075 ALUMINUM ALLOY

LIU Fengchao, MA Zongyi
Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016
Correspondent: MA Zongyi, professor, Tel: (024)83978908, E-mail: zyma@imr.ac.cn
Supported by National Outstanding Young Scientist Foundation of China (No.50525103), Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences, and Shenyang Research Foundation for Technological Innovation and Exploitation
Manuscript received 2007-09-13, in revised form 2007-12-17

ABSTRACT Friction stir processing (FSP) was applied to process the as-cast 7075 aluminum alloy which is not easy to deform and obtain fine microstructure, and the effect of processing parameters on the microstructure of the stir zone was investigated. By optimizing tool design, processing parameters and overlapping the FSP passes, the homogeneous structure with fine equiaxed grains has been obtained in the stir zone. Furthermore, reducing the tool size and increasing the rotation rate resulted in a significant improvement in the microstructural homogeneity of the stir zone.

KEY WORDS as-cast aluminum alloy, friction stir processing, microstructure, modification

搅拌摩擦加工是 Mishra 等人^[1,2]在搅拌摩擦焊基础上发展的一种新的材料加工技术. 其原理是由轴肩和搅拌针组成的焊接工具(搅拌头)高速旋转将搅拌针挤入工件, 通过搅拌工具与工件表面摩擦将工件局部加热、软化、强塑性变形、再结晶, 从而在搅拌区内形成致密的细晶组织, 改善材料的力学性能.

采用搅拌摩擦加工已经成功地在 2024, 2219, 6061 和 7075 等铝合金中获得了细小、均匀的等轴晶组织, 并在此基础上扩展到多道次加工, 可以获得大尺寸细晶材料. 目前, 对 7075 铝合金的搅拌摩擦加工研究进行得最为广

泛. Mishra 等人^[3]最早通过搅拌摩擦加工在 7075 铝合金中获得了平均晶粒尺寸约为 3.3 μm 的细晶组织. 随后, Ma 等^[4,5]和 Dutta 等人^[6]通过改变搅拌摩擦加工参数在 7075 铝合金中获得了不同晶粒尺寸的细晶材料. 最近, Johannes 等人^[7]通过多道次搅拌摩擦加工, 获得了大尺寸 7075 细晶组织材料. 搅拌摩擦加工细晶制备技术有着广阔的工业应用前景, 比如, 利用搅拌摩擦加工局部化的特点, 只对需要成型的部位进行加工产生细晶结构, 从而诞生了选区超塑成形的概念^[8]. 另外, 搅拌摩擦加工并不改变工件的形状和厚度, 因而可以实现厚板(6—12 mm)的超塑性成形, 而传统热机械加工技术制备的超塑性板材厚度一般小于 3 mm.

尽管 7075 铝合金搅拌摩擦加工研究已取得很好的初步结果, 但以前的研究工作均是采用轧制板或挤压板作为搅拌摩擦加工的起始材料. 如果使用铸态铝合金直接进行搅拌摩擦加工, 把粗大的铸态组织转变成细晶结构, 就可

* 国家杰出青年科学基金 50525103、中国科学院百人计划及沈阳市技术创新开发研究基金资助
收到初稿日期: 2007-09-13, 收到修改稿日期: 2007-12-17
作者简介: 刘峰超, 男, 1982 年生, 博士生

以省去繁杂的轧制或挤压生产工序,明显缩短细晶材料的制备工艺流程、降低制造成本.对细晶超塑成型,可建立铸造+搅拌摩擦加工+超塑性成型这样一个简单的三段式制造工艺.此外,利用搅拌加工可局部进行的特点在铸件需要高性能的局部进行改性加工,把铸态结构转变成变形组织,可在不明显提高铸件制备成本的情况下,明显改善铸件的使用性能.

近年来,一些研究者^[9-12]对铸造 A356, 5083 和 Al-Zn-Mg-Sc 合金进行了搅拌摩擦加工,表明一步搅拌摩擦加工可以实现材料的细化、均匀化和致密化,增强材料的拉伸性能和超塑性性能,然而至今还没有铸态商用高强度铝合金搅拌摩擦加工的研究报道.7075 铝合金是一种广泛使用的商业高强铝合金,是航空、航天、兵器、交通运输等行业使用的重要的结构材料之一.因此,本文选择 7075 铸态铝合金作为起始材料,研究加工参数及工具设计对加工区微观组织的影响,以期建立简化的制备细晶 7075 铝合金的加工工艺.

1 实验方法

采用 7075 铝合金铸锭作为原材料,切割出 8 mm 厚的平整板材.7075 铝合金的名义成分(质量分数, %)为: Zn 5.6, Mg 2.5, Cu 1.6, Cr 0.23, Al 余量.采用 3 种工具进行搅拌摩擦加工,各工具的形状和尺寸见表 1.对每种加工工具均选取多组加工参数进行实验.加工前先用钢丝刷去除试件表面的氧化膜,然后用乙醇将表面擦洗干净,用卡具将试样固定在工作台上进行搅拌加工.加工过程中搅拌工具的倾角为 2.5°,搅拌头逆时针方向旋转.金相试样垂直于加工方向切取,机械抛光、腐蚀后进行金相观察.腐蚀剂是体积分数分别为 30%, 10% 和 10% 的盐酸、硝酸和氢氟酸的水溶液.用平均割线法(晶粒尺寸 = 1.78 × 平均割线长度)测算晶粒的平均尺寸.

表 1 搅拌摩擦加工工具的形状和尺寸
Table 1 Tool geometries for friction stir processing (FSP)

Tool No.	Shoulder diameter/mm	Pin diameter/mm	Pin length/mm	Description of the pin
1	22	8	6	Threaded cylindrical pin
2	22	8	7.8	Threaded cone-shaped pin
3	16	5	4.8	Threaded cone-shaped pin

2 实验结果与讨论

图 1 为 7075 铝合金铸锭的光学显微组织.可以看到,铸态组织晶粒粗大且大小不均匀,在晶界处残留大量的粗大第二相,在晶内隐约可见一些细小的第二相粒子.

2.1 22 mm 直径轴肩配合 8 mm 直径圆柱形搅拌针

选用 22 mm 直径轴肩、8 mm 直径圆柱形搅拌针进行加工,不同的加工参数下搅拌区的宏观形貌如图 2 所示.各搅拌区金属的分布均表现出类似于流体行为的特征:层带间混结构.这说明搅拌区金属在较高温度下被搅拌针带动高速旋转产生了类似于粘性液体的流动混合.当旋转速度 $\omega=400\text{ r/min}$ 、行进速度 $v=50\text{ mm/min}$ 和 $\omega=600\text{ r/min}$, $v=100\text{ mm/min}$ 时,搅拌区的宏观形貌具有相似特征:在搅拌区的中下部呈现一个不完整的洋葱环结构,搅拌区上部(靠近前进侧的微小区域除外)没有明显的腐蚀衬度(图 2a,c);当 $\omega=400\text{ r/min}$, $v=100\text{ mm/min}$ 和 $\omega=600\text{ r/min}$, $v=200\text{ mm/min}$ 时,搅拌区呈现两个上下叠加的不完整洋葱环结构(图 2b,d).Arbegast 等^[13]在实验的基础上,总结出一个虚拟热指数 ω^2/v 来描述焊接参数对热输入量的影响,即最高温度 t 与焊接参数之间可以用以下公式描述:

$$\frac{t}{t_m} = K\left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4}\right)^\alpha \tag{1}$$

其中,指数 α 的变化范围在 0.04—0.06 之间,系数 K 的范围是 0.65—0.75, t_m (°C) 是合金的熔点.公式 (1) 表明,当 ω^2/v 比值一定时,搅拌区最高温度不变.搅拌区的温度是影响其微观结构变化的重要因素之一,那么 ω 和 v 这两个加工参数是否对加工区微观组织的影响也具有相似的定量关系呢?图 2a, c 的 ω^2/v 值接近,搅拌区宏观形貌相似;图 2b, d 的 ω^2/v 值接近,搅拌区也具有相似的宏观形貌;但是样品 2c,2e 的 ω^2/v 值相同,搅拌区的宏观形貌差异却很明显.因此,不能简单地用 ω^2/v 来表征加工参数对微观组织的影响.

图 2c 中 A 区位于有较好腐蚀衬度的层带上,其显微组织如图 3a 所示,此区内分布有细小均匀的再结晶晶粒,平均晶粒尺寸约为 4.6 μm ;图 2c 中 B 区位于腐蚀

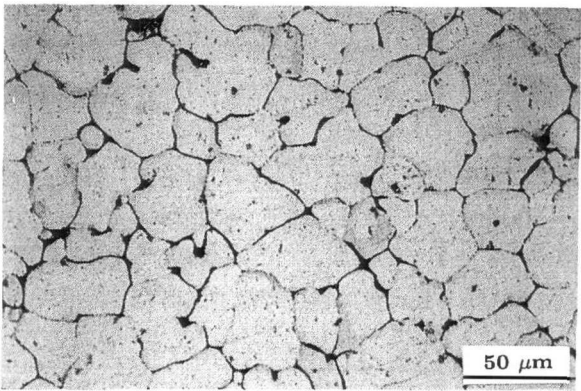


图 1 7075 铸态铝合金显微组织
Fig.1 Microstructure of as-cast 7075Al alloy, large second phase particles distributed along grain boundary

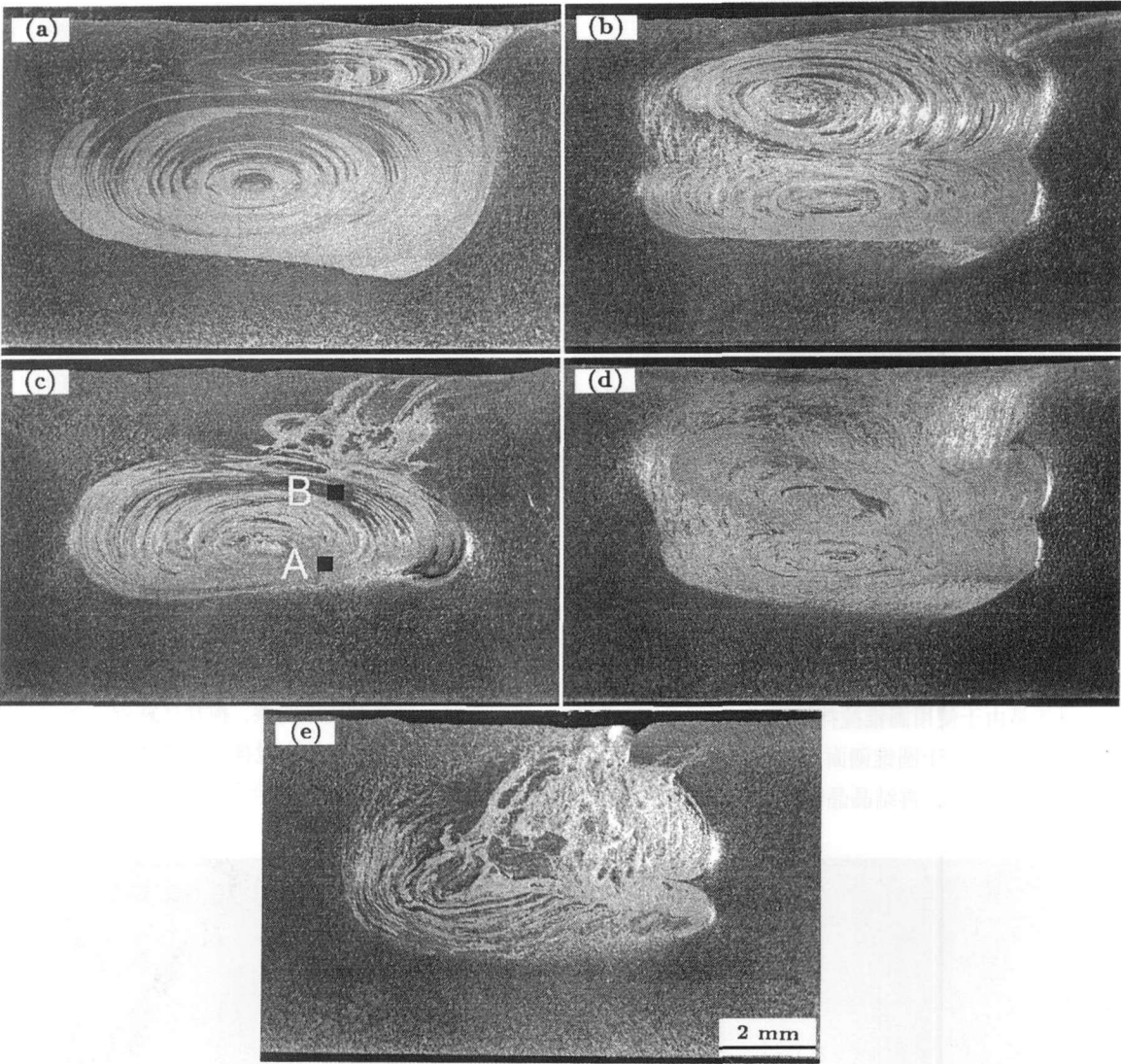


图 2 22 mm 直径轴肩配合 8 mm 直径圆柱形搅拌针加工的 7075 铝合金截面的宏观形貌

Fig.2 Cross-sectional macrographs of FSP 7075 samples processed by a tool with 22 mm-diameter shoulder and 8 mm-diameter pin at rotating velocities ω and moving velocities v respectively equal to 400 r/min and 50 mm/min (a), 400 r/min and 100 mm/min (b), 600 r/min and 100 mm/min (c), 600 r/min and 200 mm/min (d), 1200 r/min and 400 mm/min (e), (in Fig.2c A—deep corrosion area, B—light corrosion area)

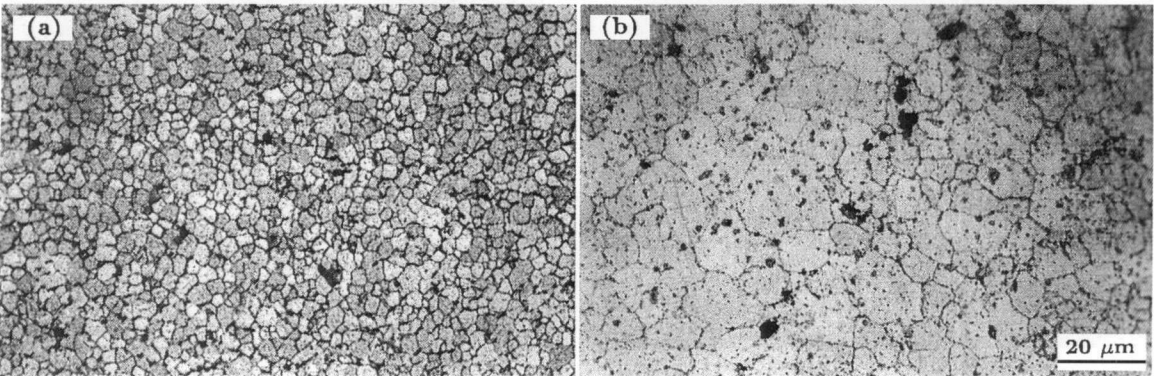


图 3 图 2c 中不同区域的显微组织

Fig.3 Microstructures of the areas A (a) and B (b) in Fig.2c

衬度相对比较弱的层带上,其微观组织如图 3b 所示,晶粒尺寸明显比图 3a 中粗大,并且晶粒大小不均匀,平均晶粒尺寸约为 $13.4\ \mu\text{m}$ 。在金相显微镜下观察不同条件下各搅拌区发现,腐蚀明显的层带均由细小均匀的等轴晶粒组成,腐蚀不明显的层带均由大小不均匀的粗晶粒组成,两种结构在各搅拌区内相间混合分布。使用 22 mm 轴肩配合 8 mm 的圆柱形搅拌针的加工工具时,选用 5 组范围比较广泛的加工参数都没能在搅拌区获得均匀的显微组织。主要原因是选用铸态 7075 超硬铝合金作为加工材料,粗大的晶粒以及晶间分布的粗大第二相增加了材料塑性变形阻力,显著降低了搅拌摩擦加工过程中加工区域材料的流动。在较宽的加工参数范围内仍然没有获得均匀的显微组织,表明使用大轴肩配合圆柱形搅拌针的加工工具很难在 7075 铸态铝合金搅拌区获得均匀的显微组织。

2.2 22 mm 直径轴肩配合 8 mm 直径圆锥形搅拌针

Zhao 等人^[14]在进行 2024 铝合金搅拌摩擦焊接时发现,使用圆锥形搅拌针,焊核区的晶粒和第二相粒子比使用圆柱形搅拌针更细小、均匀,接头的拉伸和弯曲强度也更高。这可能是由于使用圆锥搅拌针时,加工区金属除围绕搅拌针旋转外还会由于圆锥侧面的下压而上下翻滚,因而加工区金属变形充分,再结晶晶粒细小、均匀。因此,

保持搅拌头轴肩尺寸不变,选择圆锥形搅拌针代替圆柱形搅拌针。当 $\omega = 400\ \text{r/min}$ 、 $v = 100\ \text{mm/min}$ 时,搅拌区出现了由前进侧向后退侧伸出的条带结构(图 4a)。Ma 等人^[15]在研究 A356 铸态铝合金的搅拌摩擦加工时发现,在低 ω 值或高 v 值时搅拌区出现条带结构,当 ω 增加或 v 降低时条带消失,这说明条带结构容易在低热输入条件出现。显微观察表明,条带区晶粒细小均匀(图 5a),而非条带区域晶粒粗大不均匀(图 5b)。以前的研究表明,通过改变加工工具或加工参数增加材料的流动性后,材料的变形量增大,加工区的晶粒更细小、均匀^[16]。由于铸态组织的塑性变形能力差,当搅拌针转速较低时,低热输入不能保证金属充分流动,因而各个区域材料的变形量并不相同。在条带区域,晶粒细小均匀,表明条带区域经历了比较大的塑性变形;而其它区域的晶粒尺寸较大,表明这些区域的塑性变形量相对较小。

当行进速度 v 不变, $\omega = 650$ 和 $900\ \text{r/min}$ 时,热输入增加,材料流动性改善,搅拌区前进侧的条带消失,在搅拌区底部出现了近似椭圆的洋葱环结构,搅拌区上部结构紊乱。在显微镜下观察,搅拌区底部洋葱环区为细小均匀的等轴晶粒,但是在搅拌区上部为腐蚀明显的细晶区与腐蚀不明显的粗晶区混合分布。随 ω 值增加,腐蚀明显

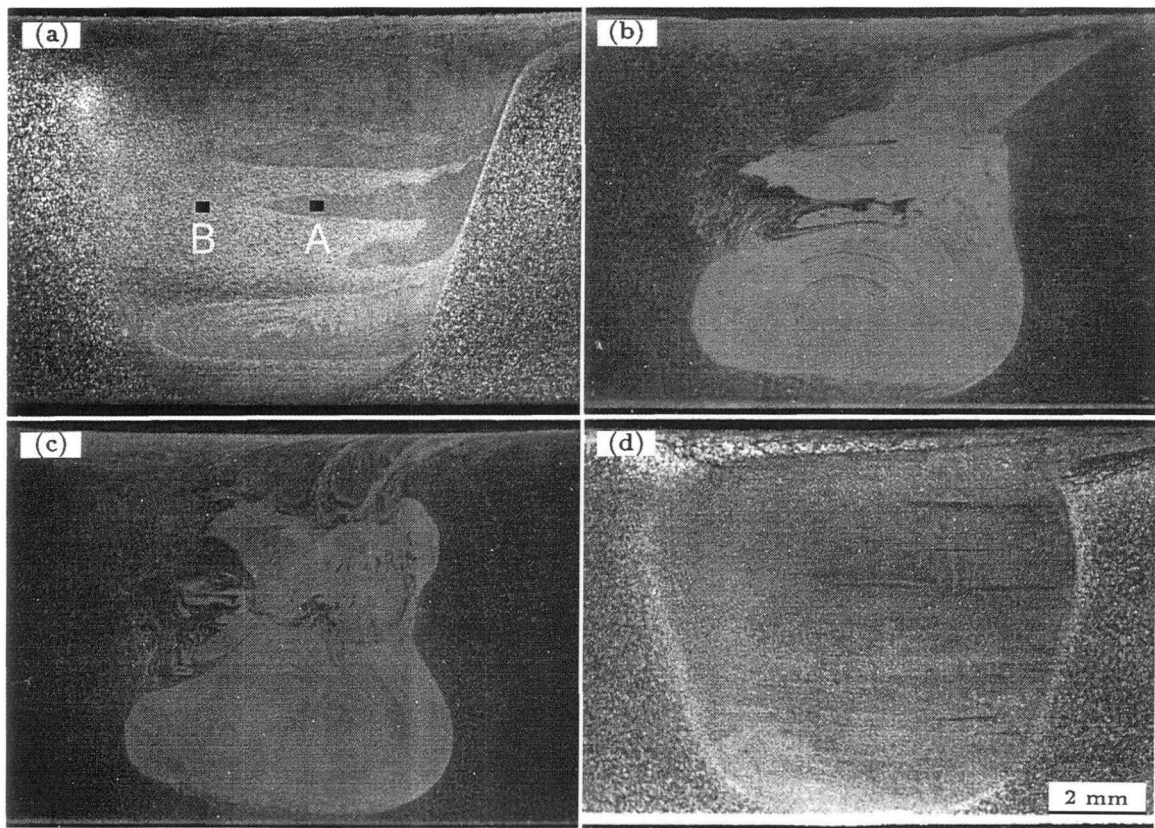


图 4 22 mm 直径轴肩配合 8 mm 直径圆锥形搅拌针加工的 7075 铝合金截面的宏观形貌

Fig.4 Cross-sectional macrographs of FSP 7075 samples processed by a tool with 22 mm-diameter shoulder and 8 mm-diameter cone-shaped pin at ω and v respectively equal to 400 r/min and 100 mm/min (a), 650 r/min and 100 mm/min (b), 900 r/min and 100 mm/min (c), and two passes: 400 r/min and 100 mm/min plus 600 r/min and 100 mm/min (d)

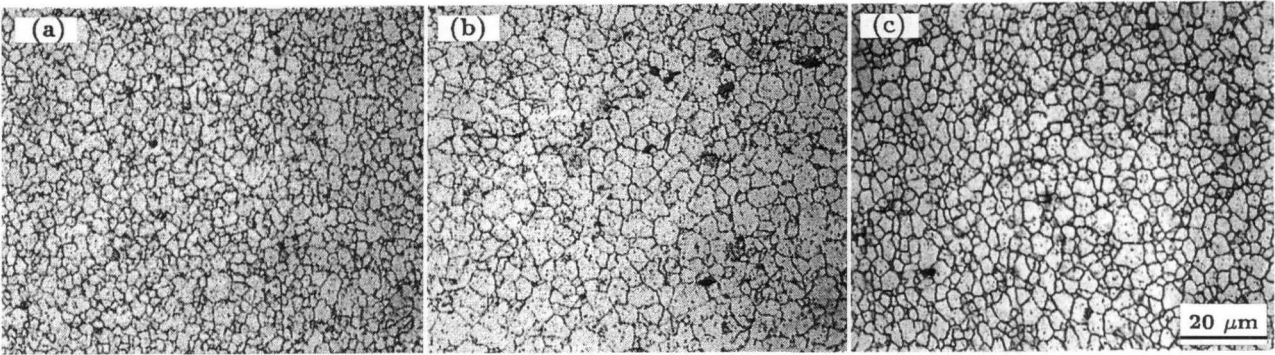


图 5 搅拌区中不同区域的显微组织
Fig.5 Microstructures of areas A (a) and B (b) in Fig.4a, and stir zone of Fig.4d (c)

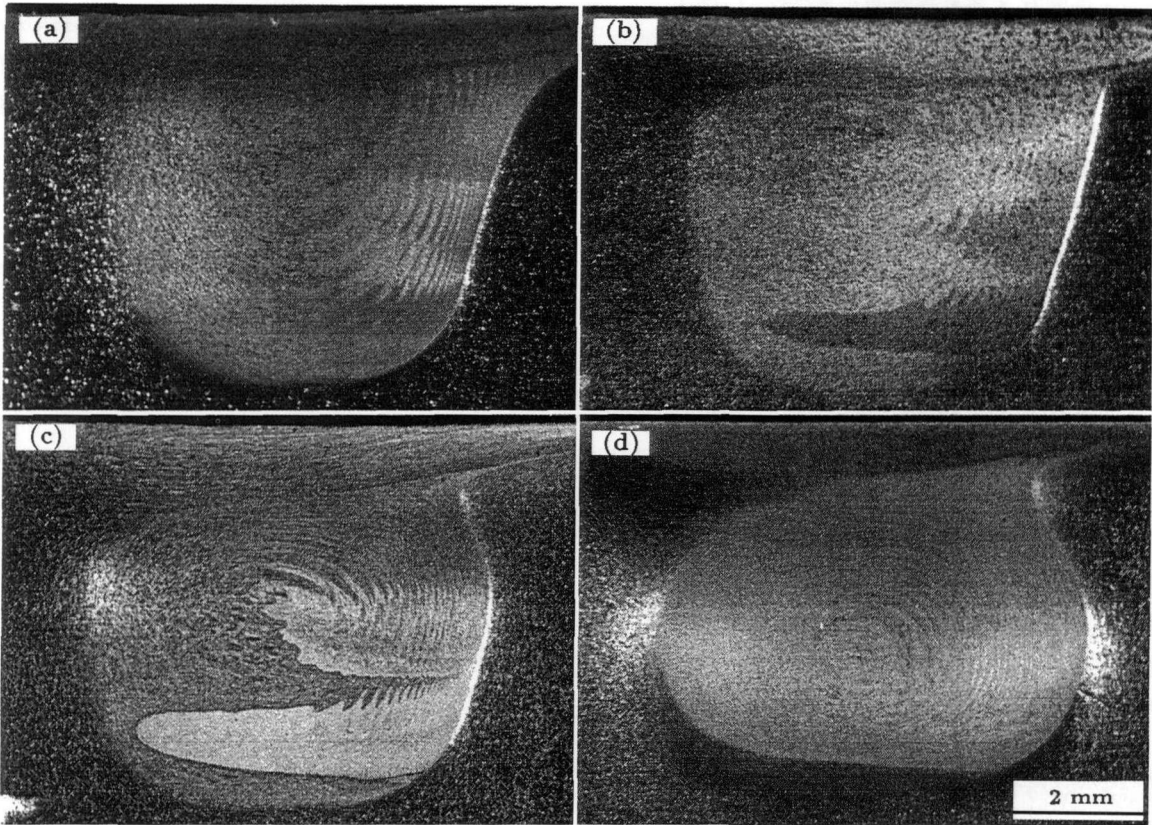


图 6 16 mm 直径轴肩配合 5 mm 直径圆锥形搅拌针加工的 7075 铝合金截面的宏观形貌

Fig.6 Cross-sectional macrographs of FSP 7075 samples processed by a tool with 16 mm-diameter shoulder and 5 mm-diameter cone-shaped pin at 400 r/min and 100 mm/min (a), 600 r/min and 100 mm/min (b), 800 r/min and 100 mm/min (c), and 1200 r/min and 100 mm/min (d)

的细晶粒区在搅拌区所占比率上升，晶粒尺寸增加。提高 ω 值，一方面可以提高加工时的热输入，另一方面提高搅拌针转速势必提高金属的变形速率。由于这两方面的原因，搅拌区的温度和塑性变形都增加，有利于发生再结晶，细晶区面积增加。但是 ω 值增加导致搅拌区温度升高，再结晶晶粒在高温下迅速长大^[17]，最终得到相对粗大的晶粒。因此，单纯依靠提高 ω 值虽然可以改善加工区微观组织的均匀性，但再结晶晶粒明显粗化。因此，虽然圆锥形搅拌针比圆柱形搅拌针更有利于加工区微观组织均匀性的改善，但

单纯依靠改变搅拌针形状很难在整个加工区获得均匀的细晶组织。

选用 $\omega = 400 \text{ r/min}$, $v = 100 \text{ mm/min}$ 的加工参数加工后，再用 $\omega = 600 \text{ r/min}$, $v = 100 \text{ mm/min}$ 的加工参数在原路径上沿原加工方向重叠加工，搅拌区呈现腐蚀均匀的苹果形状貌（图 4d）。金相显微观察表明，搅拌区由细小均匀的等轴晶组成（图 5c），平均晶粒尺寸约为 $4.8 \mu\text{m}$ 。这主要是由于进行第一道搅拌摩擦加工后，搅拌区发生了动态再结晶，粗大的第二相被破碎、溶解，铸态组

织已经被变形组织所代替;在此基础上再进行第二道搅拌摩擦加工,金属的流动性明显改善,搅拌区金属发生均匀的塑性流变,因而得到均匀的细晶组织.这表明,采用两道次低热输入重叠搅拌摩擦加工,可以获得均匀的细晶组织,为制备细晶铝合金提供了一种简单、有效的加工方法.

2.3 16 mm 直径轴肩配合 5 mm 直径圆锥形搅拌针

采用大尺寸加工工具进行搅拌摩擦加工时,由于工具轴肩与金属有较大的接触面积,通过提高工具转速来改善搅拌区变形均匀性的同时,所产生的摩擦热也随之明显升高,再结晶晶粒明显粗化.为能在提高工具转速的同时不明显增加摩擦热,选用了小尺寸工具进行搅拌摩擦加工实验,搅拌区形貌如图6所示.当 $\omega=400$ r/min 时,在搅拌区的前进侧有3条不连续的小条带结构(图6a).当 ω 提高到600 r/min 时,条带结构面积增大,特别是底部条带几乎贯穿整个搅拌区(图6b).当 ω 提高到800 r/min 时,条带结构面积进一步增大,3条细小条带被两条粗大的条带代替(图6c). $\omega=1200$ r/min 时,条带结构消失,搅拌区出现了一个完整的洋葱环结构(图6d).前面的实验已经证明,搅拌区的条带区域比其它区域经历了更严重的塑性变形.在选用小尺寸加工工具进行加工时,条带结构面积随着搅拌针转速的增加而增加,这是因为随着转速的提高,能够进行较大塑性变形的金属增多,表现为条带区域的面积增加.条带区域的面积随着转速的提高而增加,这也是能够证明增加搅拌针的转速可以提高搅拌区金属塑性变形程度的很好证据.旋转速度提高到1200 r/min 后,加工区域的金属在搅拌针的带动下围绕搅拌针高速旋转,经历了较大的塑性变形,在金相显微镜下,搅拌区金属的显微组织为均匀分布的细小等轴晶(图7),平均晶粒尺寸约为 $2\text{ }\mu\text{m}$.这说明选用小尺寸的搅拌工具进行搅拌摩擦加工,不但可以通过提高旋转速度促进搅拌区

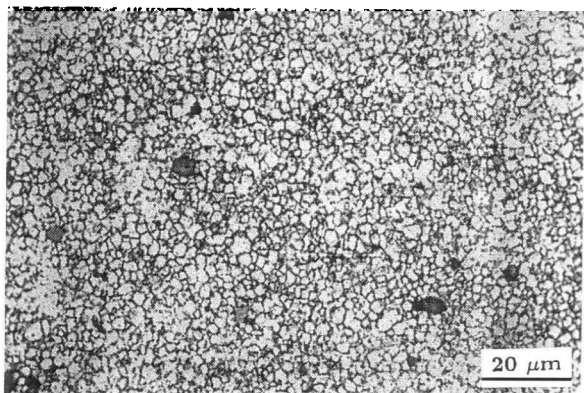


图7 图6d 搅拌区的显微组织

Fig.7 Microstructure of stir zone as shown in Fig.6d

金属产生均匀的强塑性变形,而且还可以避免使用大尺寸工具时搅拌区温度过高所引起的晶粒粗化.这样,只需经过一道次搅拌摩擦加工就可以直接在铸态铝合金中获得均匀细小的等轴晶组织,为直接从铸态铝合金中得到均匀的细晶结构提供了一种更简单、有效的加工方法.

3 结论

(1) 由于铸态组织塑性变形能力差,在选用大尺寸圆柱形带螺纹搅拌针进行加工时,在搅拌区得到了显微结构不均匀的层带间混结构.

(2) 在选用圆锥形带螺纹搅拌针进行加工时,在较低热输入条件下,搅拌区出现了明显的条带结构.条带区域晶粒细小均匀,其它区域的晶粒粗大不均匀.

(3) 本文提供了两种通过搅拌摩擦加工直接从铸态铝合金制备细小均匀等轴晶的方法:大尺寸加工工具在较低转速下两道次重叠搅拌摩擦加工,小尺寸加工工具在高转速下单道次搅拌摩擦加工.

参考文献

- [1] Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, Mara N A, Mukherjee A K. *Scr Mater*, 2000; 42: 163
- [2] Mishra R S, Mahoney M W. *Mater Sci Forum*, 2001; 357-359: 507
- [3] Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, Mara N A, Mukherjee A K. *Scr Mater*, 1999; 42: 163
- [4] Ma Z Y, Mishra R S, Mahoney M W. *Acta Mater*, 2002; 50: 4419
- [5] Ma Z Y, Mishra R S. *Acta Mater*, 2003; 51: 3551
- [6] Dutta A, Charit L, Johannes L B, Mishra R S. *Mater Sci Eng*, 2005; A395: 173
- [7] Johannes L B, Mishra R S. *Mater Sci Eng*, 2007; A464: 255
- [8] Mishra R S. *Adv Mater Processes*, 2004; 162: 45
- [9] Ma ZY, Mishra RS, Mahoney M W. *Scr Mater*, 2004; 50: 931
- [10] Charit I, Mishra R S. *Acta Mater*, 2005; 53: 4211
- [11] Johannes LB, Charit I, Mishra R S, Verma R. *Mater Sci Eng*, 2007; A464: 351
- [12] Ma Z Y, Sharma S R, Mishra R S. *Mater Sci Eng*, 2006; A433: 269
- [13] Arbogast W J, Hartley P J. In: *Proce Fifth Int Conf of Trends in Welding Research*, Pine Mounatain, GA, 1998: 541
- [14] Zhao Y H, Lin S B, Wu L, Qu F X. *Mater Lett*, 2005; 59: 2948
- [15] Ma Z Y, Sharma S R, Mishra R S. *Mater Sci Eng*, 2006; A433: 269
- [16] Elangovan K, Balasubramanian V. *Mater Design*, in press
- [17] Su J Q, Nelson T W, Sterling C J. *Mater Sci Eng*, 2005; A405: 277