

文章编号:1673-9981(2007)03-0187-04

## 累积叠轧 1060 纯铝组织与性能的研究

吕 爽, 王快社, 张 兵, 刘漫博

(西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 采用累积叠轧技术在室温条件下加工 1060 工业纯铝, 对其塑性变形前后的金相组织与力学性能进行了研究。实验结果表明, 随着累积叠轧道次的增加, 材料的组织细化逐渐均匀, 但层界面结合越来越差; 经 7 道次的轧制, 材料的抗拉强度提高到 220 MPa, 约是母材的 2.5 倍; 经 8 道次的轧制, 材料的显微硬度 HV 提高到 83, 约是母材的 2.4 倍; 随着轧制道次的增加, 材料的延伸率明显降低; 经 5 道次的轧制, 材料的综合力学性能最好。

**关键词:** 累积叠轧 (ARB); 金相组织; 力学性能; 延伸率

**中图分类号:** TG335.14; TG146.2

**文献标识码:** A

近年来, 采用剧烈塑性变形 (SPD, Severe Plastic Deformation) 的方法, 获得晶粒尺寸小于  $1\mu\text{m}$  的块体超细晶材料引起了人们的广泛关注。超细晶结构的金属材料比传统的金属材料在室温下具有高的强度和韧性, 在高温下具有高变形速率、超塑性等特性<sup>[1-2]</sup>。目前, SPD 法包括超声喷丸法 USP<sup>[3]</sup>、等通道角挤压法 (ECAP, Equal channel angular pressing)<sup>[4-5]</sup>、累积轧制法 (ARB, accumulative roll-bonding)<sup>[1,6]</sup>、多次锻造法 (MF, Multiple Forging)<sup>[7]</sup> 和往复挤压法 (CEC, Cyclic Extrusion Compression or Reciprocal Extrusion)<sup>[8]</sup> 等方法。这些方法中由日本科学家 Satito 等人研究发明的累积叠轧技术最有望应用于工业化生产, 也是唯一可用于加工生产连续大块薄板类超细晶材料的方法, 对超细晶材料在日后工业上的应用具有十分重要的现实意义。

累积叠轧 (ARB) 技术的原理<sup>[1,9]</sup> 如图 1 所示。首先将金属薄板切割成尺寸相同的两块, 然后将两块薄板的表面进行打磨、脱脂等处理, 在薄板轧制的前端打眼, 并铆接固定, 有时为了便于轧机的咬入还需打坡口。轧制过程中一定要保持轧辊干燥, 在强大的轧制力和晶粒间内摩擦力的作用下使两块金属薄板复合在一起, 通过对板带材料反复叠合轧制, 提高

了材料的力学性能, 也使板材获得很大的累积变形, 从而获得超细晶材料。

本文在室温下对 1060 纯铝进行了 8 道次累积轧制, 对轧制后的材料进行了力学性能测试, 并研究了 ARB 塑性变形方式对 1060 纯铝力学性能的影响。

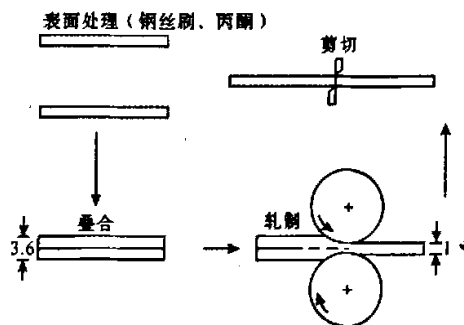


图 1 ARB 技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ARB technical principle

### 1 实验方法

实验选用材料为 1060 工业纯铝, 其化学成分:

收稿日期: 2007-07-11

作者简介: 吕爽 (1981-), 男, 黑龙江富锦人, 硕士研究生。

$w(\text{Al})=99.6\%$ , Fe, Si 和 Cu 的质量分数不大于 0.4%。实验前先将纯铝经  $400^\circ\text{C} \times 1\text{h}$  退火处理, 纯铝板材的尺寸为  $1.8\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。实验所用轧机为 LG-3006 型二辊冷轧机, 工作辊直径  $D=170\text{mm}$ , 辊身长  $l=300\text{mm}$ , 辊速  $0.04\text{m/s}$ ; 切割机为 Q11-6-3 $\times$ 2000 型剪板机。

材料表面经处理后叠合并固定在一起, 在室温无润滑的条件下进行轧制。为保证材料的复合, 控制轧制每道次的压下量为 50%, 即每道次的真应变为 0.8, 总变形量为  $\epsilon=0.8n^{[10]}$ , 轧制后的薄板在空气中冷却后切成两块叠加, 重复上述过程, 共进行 8 个道次实验。在轧制过程中由于板材边缘容易发生裂纹, 故在每道次轧制前对边缘的裂纹进行剪裁, 尤其是要保证轧制的咬入端平整, 否则材料会出现轧制扭曲和拉裂。常温下拉伸试验, 每道次做 3 根拉伸试样, 加载速度为  $1\text{mm/min}$ , 最大载荷为  $10\text{kN}$ 。

将试样表面粗磨-电解抛光, 用腐蚀剂(侵蚀液为 Kaller 试剂)对样品表面进行腐蚀, 用 OLYMPUS-GX41 型金相显微镜进行光学金相分析; 用 WDW100-10t 型电子拉伸机对试样进行常温下的拉伸实验, 研究试样拉伸性能的变化规律; 用沃伯特 401MVD 型数显显微维氏硬度计测量经塑性变形后 1060 纯铝表面和侧面的硬度, 研究显微硬度的变化规律。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 金相组织

从图 2 和图 3 可以看到, 轧制前纯铝的组织为等轴状的再结晶晶粒, 晶粒尺寸约  $42\mu\text{m}$ 。在累积轧制过程中, 晶粒沿轧制方向被拉长, 随着道次的增加, 晶粒变得越来越细小, 纤维状板条组织越来越细, 在光镜下已很难辨认。这表明在室温下累积轧制时材料组织没有发生再结晶, 且随着轧制道次的增加, 材料的组织细化较均匀。

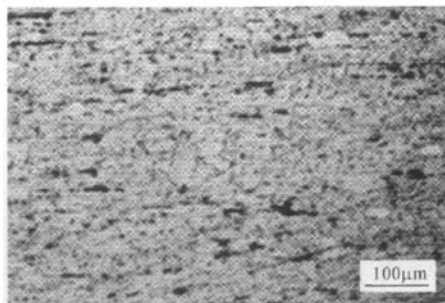


图 2 1060 工业纯铝退火后的金相组织  
Fig. 2 Microstructure of 1060 industry pure aluminum after annealing

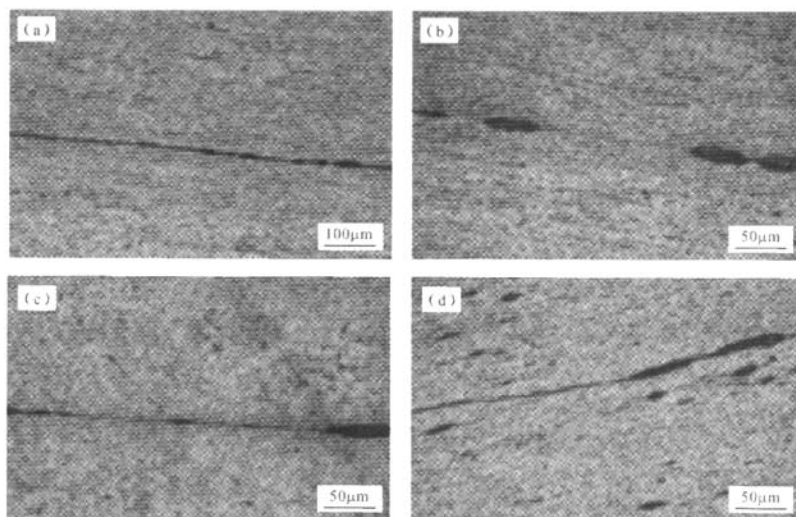


图 3 1060 铝 ARB 变形后的金相组织  
(a)1 道次; (b)2 道次; (c)5 道次; (d)7 道次  
Fig. 3 Microstructure of 1060 aluminum after ARB  
(a)1 cycle; (b)2 cycles; (c)5 cycles; (d)7 cycles

从图3中可以看出:经1道次轧制后,材料组织中间有一条明显的黑带(图3(a)),这是轧制的结合面,随着轧制道次的增加,材料组织除了有一条明显的累积轧制的结合面外,其余的结合面都模糊不连续,经7道次轧制后表现的更为明显.这表明随着轧制道次的增加,结合面的结合能力越来越差.其原因可能为:表面打磨时间过久,使表面硬化,且出现过厚的氧化皮;表面清洗不净,残留油脂或夹杂物颗粒;轧制道次的增加,累积变形量越来越大,加工硬化严重等都会影响材料结合面的结合程度.

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 显微硬度

图4为材料表面显微硬度和轧制道次之间的关系曲线.从图4可以看出,随着轧制道次的增加,材料表面显微硬度呈上升趋势.经1道次轧制后材料的硬度迅速上升,由原来的HV 37提高到HV 72.5,随着轧制道次的增加,硬度值缓慢增大,8道次时硬度最大达到HV 83,约是母材的2.4倍.

由于在前几道次的加工过程中,材料的晶粒尺寸较大,变形的机制是晶内的位错运动,材料内部位错不断增加,位错密度、空位密度明显升高,大量的胞状结构及多晶界使得材料继续塑性变形的抗力增加,因此,出现了加工硬化,硬度明显上升.但随着道次的增加,变形的机制逐渐由晶内位错运动转变为细小的晶界滑移,这必然导致位错密度增加变慢,其结果是晶粒细化变慢,硬度上升平稳.

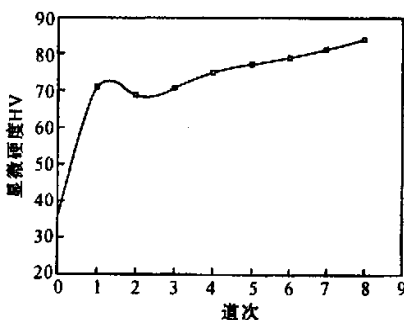


图4 表面显微硬度曲线

Fig. 4 The curve of microhardness

为了分析在ARB加工过程中材料侧面硬度的变化,在试样中间确定一点,在其两侧均匀打相同的点,观察侧面硬度的变化情况.图5为纯铝经剧烈塑性变形后侧面的显微硬度曲线.

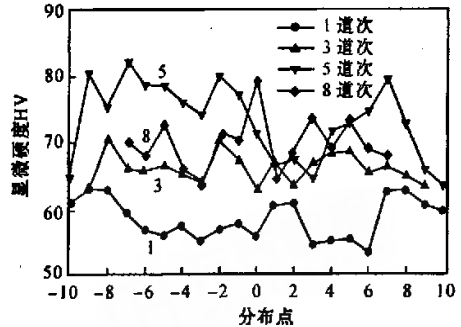


图5 侧面硬度曲线

Fig. 5 The curve of microhardness on the side face

从图5可以看出:1,3道次曲线变化平稳均匀,表明轧制力均匀地作用在材料表面,层界面复合紧密;5,8道次因为层界面增多,打在界面间缝隙上的点会影响硬度值,硬度曲线变化的基本趋势是从两侧到中间的硬度值缓慢下降.这是由于轧制作用力从边部到内部逐渐降低,累积变形逐渐减小,加工硬化减弱,但细晶强化在一定程度上弥补了硬度的降低,所以硬度下降缓慢.

### 2.2.2 拉伸性能

图6为室温下累积叠轧1060纯铝各道次的拉伸性能曲线.从图6可以看出:母材的抗拉强度为87 MPa,经1道次轧制后增幅最大,提高了60 MPa,而延伸率急剧下降,由变形前的46.03%下降到6.42%;经2道次轧制后,随道次的增加,材料的抗拉强度平稳上升,延伸率变化平缓;在经7道次轧制后,材料的抗拉强度达到峰值220 MPa,约是母材的2.5倍,延伸率为7.78%.从抗拉强度和延伸率的数据来看,经5道次轧制后材料的力学性能较好.

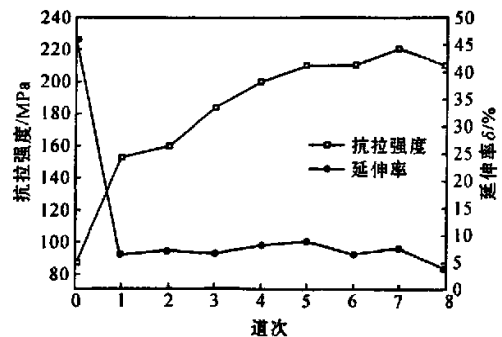


图6 抗拉强度及延伸率与道次的关系

Fig. 6 Relation of tensile strength, elongation and passes

随着轧制道次的增加,材料的细晶强化引起抗拉强度提高,但由于加工硬化,1道次后材料的延伸率急剧下降,在随后的轧制中,在加工硬化和细晶强化的共同作用下延伸率基本保持不变,此外,经过剧烈塑性变形后,材料的微观组织和结构会发生明显的变化,位错缠结、密度增加,并出现各种形变的亚结构,这也是材料抗拉强度上升,延伸率下降的原因。在实验过程中,进行多道次表面处理,层界面间的加工硬化,夹杂物、氧化物等出现,也影响材料的拉伸性能。

### 3 结 论

(1)在室温条件下应用累积叠轧技术可以较成功地将多层 1060 纯铝结合在一起,随着轧制道次的增加,材料晶粒变得越来越细小,显微组织细化均匀。

(2)经 7 道次累积叠轧后,材料的抗拉强度约是母材的 2.5 倍;经 8 道次轧制材料的显微硬度约是母材的 2.4 倍。ARB 技术能使材料的强度大幅度地增加,但延伸率急剧下降,经 5 道次轧制后材料的力学性能最好。

#### 参考文献:

- [1] TSUJI N, SAITO Y, LEE S H, et al. ARB (accumulative roll-bonding) and other new techniques to produce bulk ultrafine grained materials[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2003, 5(5): 338-344.
- [2] TSUJI N, OKUNO S, MATSUURA T, et al. Mechanical properties as a function of grain size in ultrafine grained aluminum and iron fabricated by ARB and annealing process [J]. *Materials Science Forum*, 2003, 426-432(3): 2667-2672.
- [3] GUO F A, TRANNOY N, LU J. Analysis of thermal properties by scanning thermal microscopy in nanocrystallized iron surface induced by ultrasonic shot peening[J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, A369: 36-42.
- [4] SEGAL V M. Materials processing by simple shear[J]. *Materials Science and Engineering*, 1995, A197: 157-164.
- [5] MATSUBARA K, MIYAHARA Y, HORITA Z, et al. Developing superplasticity in a magnesium alloy through a combination of extrusion and ECAP[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 3073-3084.
- [6] SAITO Y, TSUJI N, UTAUNAMIYA H, et al. Ultrafine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding (ARB) process [J]. *Scripta Materialia*, 1998, 39(9): 1221-1227.
- [7] SALISHCHEV G A, GALEYEV R M, MALYSHEVA S P, et al. Structure and density of sub-microcrystalline titanium produced by severe plastic denformation[J]. *Nanostructured Materials*, 1999, 11(3): 407-414.
- [8] YEH J W, YUAN S Y, PENG C H. A reciprocating extrusion process for producing hypereutectic Al-20wt% Si wrought alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 1998, 252: 212-221.
- [9] TSUJI N, ITO Y, SATIO Y, et al. Strength and ductility of ultrafine-grained aluminum and iron produced by ARB and annealing[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47: 893-899.
- [10] SAITO Y, UTSUNOMIYA H, TSUJI N, et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials development of the accumulative roll-bonding process[J]. *Acta Mater*, 1999, 47(2): 579-583.

## Study on the microstructure and mechanical property of ARB 1060 pure aluminum

LV Shuang, WANG Kuai-she, ZHANG Bing, LIU Man-bo

(School of Metallurgy Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The accumulative roll-bonding technique was adopted to process 1060 industry pure aluminum under room temperature, the microhardness and mechanical property before and after plastic deformation was studied. The experimental result showed that the tensile strength was enhanced to 220MP after a total of 7 passes of rolling, which is about 2.5 of parent material; the microhardness was enhanced to 83(HV) after a total of 8 passes of rolling, which is about 2.4 of parent material; the elongation percentage was dropped sharply along with the rolling passes increased; The best mechanical property was achieved after a total of 5 passes of rolling.

**Key words:** accumulative roll bonding (ARB); microhardness; elongation percentage; mechanical property