

## 多向锻造道次对 5182 铝合金变形组织的影响

朱庆丰, 王 嘉, 左玉波, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用多向锻造实验的方法研究了末道次锻造温度为 340 ℃ 的条件下锻造道次对 5182 铝合金宏观组织的影响。研究表明: 多向锻造过程中随锻造道次由 3 增至 12, 心部细晶区的面积不断扩大, 锻造道次增至 12 次并未消除因累计变形量不同而导致的心部与边部的组织差异。锻造道次由 3 增至 12 的过程中, 试样锤头附近的组织不断破碎变细, 但未发生明显的再结晶。试样心部的变形组织在经 3 道次锻造后开始发生部分再结晶; 经 6 道次锻造后试样心部发生完全再结晶, 试样再经 9, 12 道次锻造后心部均发生完全再结晶, 且晶粒尺寸较锻 6 次试样略有增加。5182 铝合金试样心部再结晶晶粒尺寸随锻造道次的累计增加会达到一个细化极限值。

**关 键 词:** 多向锻造; 5182 铝合金; 大塑性变形; 再结晶

中图分类号: TG 335.58

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)11-1572-05

## Effects of Forging Pass on the Structure of 5182 Aluminum Alloy During Multi-direction Forging Process

ZHU Qing-feng, WANG Jia, ZUO Yu-bo, CUI Jian-zhong

(Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Qing-feng, E-mail: zhuqingfeng@epm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Macro- and micro-structure evolution of 5182 aluminum alloy was studied in multi-directional forging (MDF) with the final forging temperatures of 340 ℃. The results showed that the fine grain zone in the center of sample expands gradually with the increment of the forging passes from 3 to 12. But increasing the forging pass to 12 can not eliminate the structure difference between the center and peripheral area. The structure of area near the forging hammers is constantly destroyed (but no distinct recrystallization occurs in the structure) with the forging pass increases from 3 to 12. When the forging pass is 3, partial recrystallization occurs on the center area of the sample. When the forging pass reaches 6, a fully recrystallization occurs in the center area of the sample, and the finest recrystallization grains are observed. With the forging pass further increases to 9 and 12, the recrystallization grains are a little coarser than that forged by 6 passes. However, the grains in the center area of the samples forged by 9 and 12 passes show the almost same size. So there is a grain refinement limitation in the center of sample with the increment of the forging passes.

**Key words:** multi-directional forging; 5182 Al alloy; severe plastic deformation; recrystallization

大塑性变形的的方法 (SPD) 是制备块体细晶材料最有前途的方法<sup>[1]</sup>。多向锻造方法作为大塑性变形典型方法之一, 与其他几种大塑性变形方法如等径角挤压 (ECAP)<sup>[2-4]</sup>、高压扭转

(HTC)<sup>[5-6]</sup>、折叠轧制 (ARB)<sup>[7-8]</sup> 相比, 具有工艺简单、成本低、使用现有工业装备即可制备大块材料、易于实现工业化生产等优点<sup>[9-10]</sup>。

5182 铝合金以其中等强度以及优良的耐蚀

收稿日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51204053, 51374067); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N130409005, N130709001, N130209001)。

作者简介: 朱庆丰 (1979-), 男, 河北滦县人, 东北大学副教授; 崔建忠 (1950-), 男, 黑龙江双城人, 东北大学教授, 博士生导师。

性广泛应用于易拉罐盖、汽车车板、操纵盘、加强件、托架等零部件。作为典型的不可热处理强化铝合金,5182 铝合金强化主要通过加工硬化实现,而加工硬化程度与变形量、变形温度、变形速率等条件密切相关。本文利用多向锻造能获得大塑性变形的特点对 5182 铝合金进行不同工艺条件下的多向锻造,并分析多向锻造工艺对 5182 铝合金变形组织的影响。

## 1 实验过程

实验所用材料为山东南山铝业公司生产的横截面积为 1 650 mm×620 mm 的 5182 铝合金扁锭。用英国牛津仪器生产的全谱直读光谱仪 (FOUNDRY – MASTER PRO) 进行成分分析,铝合金的主要成分 (质量分数,%) 为 0.11 Si,0.26 Fe,0.31 Mn,4.3 Mg,0.02 Ti。先将 5182 铝合金

进行均匀化退火,退火温度为 465 ℃,保温时间为 24 h,退火后试样随炉冷却至室温。再将退火后的铸锭锯成 50 mm×50 mm×100 mm 的小块,将试样置于加热炉中加热至 460 ℃,保温 2 h 后在 300 t 油压机上进行多向锻造。锻造前将锻造锤头加热至设定温度。多向锻造过程如图 1 所示,先将试样沿长边 (Z) 方向压下,压至 50 mm 时将锤头抬起,将试样翻转 90°,沿新形成的长边 (Y) 方向压下,压至 50 mm 时将锤头抬起,再将试样翻转 90°,沿新形成的长边 (X) 方向压下,压至 50 mm,如此反复,实现在保持试样形状基本不变的条件下持续增加变形量。锻造过程中利用内卡钳控制各道次的压下量,用表面测温仪测量试样表面温度,利用调整锻造道次间隔控制试样的温度。锻造过程中锤头的压下速度控制在 5 mm/s。不同试样的工艺条件以及试样编号如表 1 所示。各个试样终锻温度均控制在 340 ℃左右,锻造道次分别为 3,6,9,12。

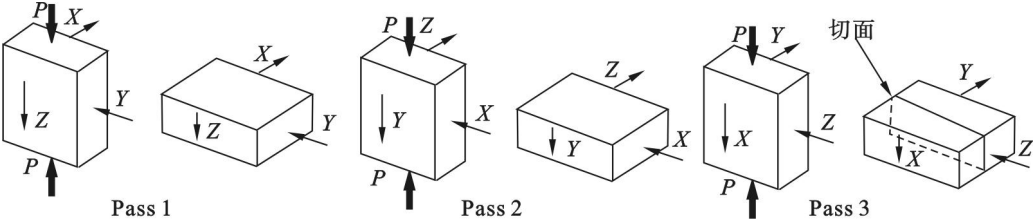


图 1 多向锻造过程示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the multi-directional forging

表 1 5182 铝合金多向锻造工艺条件  
Table 1 Experimental parameters of the 5182 aluminum alloy during multi-directional forging process

编号	开锻造温度/℃	锻造道次	终锻温度/℃	累计应变量
1	460	3	337	1.5
2	460	6	337	3
3	460	9	340	4.5
4	460	12	339	6

将试样沿末道次锤头接触面的短边中线切开 (如图 1 所示)。试样经磨光后,用王水对其进行宏观腐蚀,观察宏观形貌。取试样典型位置进行电解抛光及阳极覆膜,用偏光显微镜观察多向锻造试样的微观组织。

## 2 实验结果分析

### 2.1 退火后 5182 铝合金的微观组织

图 2 为 5182 铝合金铸锭经 465 ℃,24 h 退火后的偏光组织,由图可以看出 5182 铝合金铸锭经退火后的组织为典型的等轴晶组织,枝晶网格基

本消失,用截距法测得其平均晶粒尺寸约为 240 μm。

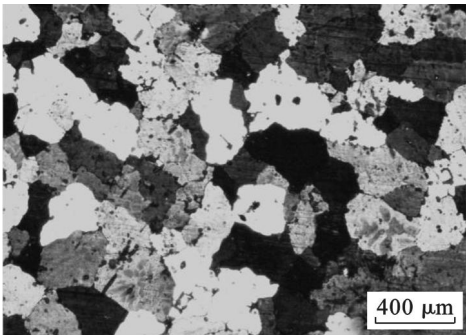


图 2 均火后 5182 铸锭的微观组织  
Fig. 2 Microstructures of initial ingot after homogenization

### 2.2 5182 铝合金多向锻后的宏观组织

5182 铝合金经 3,6,9,12 次多向锻造后沿竖直纵截面的宏观组织如图 3 所示。可以看出各试样的侧面出现了明显的单鼓形,这与单向自由锻过程中形成的单鼓形相似,经不同道次锻造的试样的外形基本一致,这表明通过控制压下各道次的变形量可以保持试样的形貌不变。各试样表面

及内部均无明显的裂纹等缺陷,表明 5182 铝合金这些锻造工艺条件具备较好的成形性. 由宏观组织照片还可以看出不同试样的心部与边部的晶粒尺寸存在一定的差异,但用肉眼难以辨别其大小.

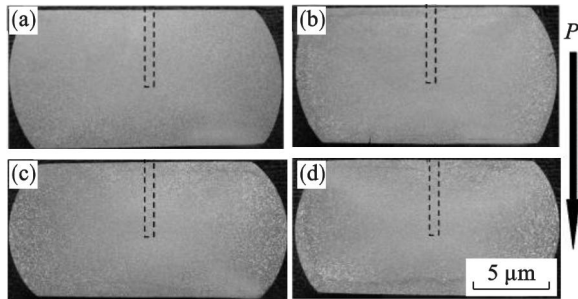


图 3 多向锻后 5182 铝合金的宏观组织

Fig. 3 Macrostructure of the 5182 aluminum alloy after multi-directional forging

(a)—3 道次; (b)—6 道次; (c)—9 道次; (d)—12 道次.

### 2.3 5182 铝合金多向锻后的微观组织

图 4 为各试样沿末道次压下方向由边部到心部的偏光照片拼接图,图 4 对应图 3 框图标注的区域. 由图 4a 可以看出,经不同道次锻造后 5182 铝合金试样的边部和心部的变形组织均存在较大的差异,试样中心附近的组织比较细小而锤头附近的组织比较粗大. 经 3 道次锻后试样边部与心部的组织差异较大. 随着锻造道次的增加,试样锤头附近的组织在持续变形作用下不断破碎变细,同时试样心部变形组织细小的区域不断扩大,如图 4 b ~ 图 4d 所示.

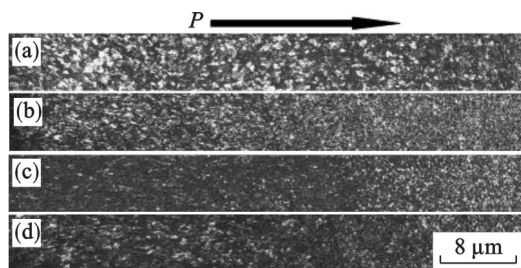


图 4 与图 3 相对应的虚线框部位的偏光组织照片

Fig. 4 Microstructures under the polarized light corresponded to the zone signed by the dotted line box in Fig. 3

(a)—3 道次; (b)—6 道次; (c)—9 道次; (d)—12 道次.

图 5 为锤头附近以及心部的偏光组织照片. 当锻造道次为 3 时,试样锤头附近的组织中还存在一些未发生明显变形的晶粒(部分保留着铸态组织),变形组织中未发现再结晶晶粒,见图 5a; 锻造道次增加到 6 次时,锤头附近的组织进一步破碎、拉长,原始晶粒的形貌已难以分辨,局部区域出现了白亮的再结晶晶粒,见图 5b;随着锻造

道次逐渐增至 9, 12, 变形组织进一步破碎拉长,偏光下已经很难辨别晶粒的形貌,仅能在局部再结晶的区域观察到少数小尺寸白色晶粒,见图 5c, 图 5d. 相同的锻造条件下试样心部的组织与边部明显的不同,锻造道次为 3 次,试样心部的原始铸态组织被完全破坏,可以清楚的看到与末道次锻造方向垂直的变形带,在变形组织中间存在大量白色的小尺寸再结晶晶粒,见图 5e; 锻造道次达到 6 时,试样心部为细小的再结晶晶粒,这些晶粒多沿与末道次锻造垂直方向被拉长,晶界弯曲,见图 5f; 当锻造道次增至 9 时,试样心部为仍为较细小的再结晶晶粒,这些晶粒晶界弯曲,晶粒较锻 6 次试样略有粗化,见图 5g; 当锻造道次进一步增至 12 道次,试样心部仍为较细小的再结晶晶粒,再结晶晶粒的尺寸与锻 9 道次试相近,但在较大尺寸再结晶晶粒之间存在一些晶粒未完全长大的块状区域,如图 5h 所示.

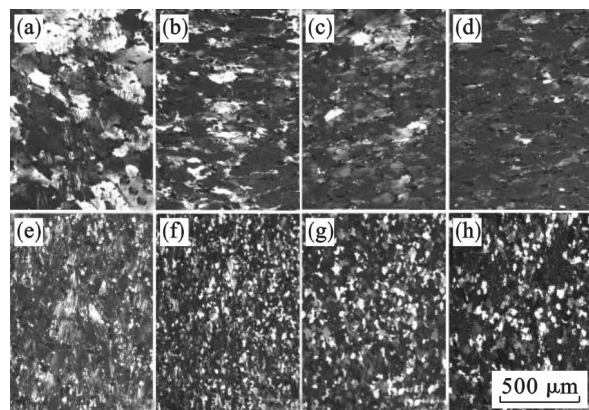


图 5 锻后试样不同位置的偏光组织照片

Fig. 5 Microstructures on different position of the sample under the polarized light

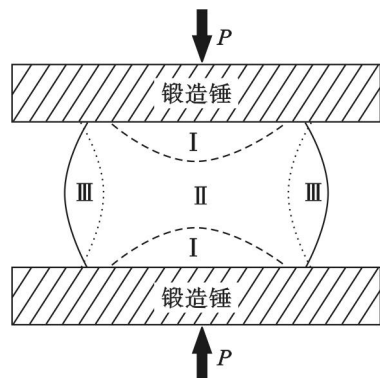
(a)—锤头附近 3 道次; (b)—锤头附近 6 道次; (c)—锤头附近 9 道次; (d)—锤头附近 12 道次; (e)—心部 3 道次; (f)—心部 6 道次; (g)—心部 9 道次; (h)—心部 12 道次.

### 2.4 分析与讨论

多向锻造的每次压下都是一次自由锻过程,在此过程中金属在上、下锤头压力作用下向水平方向流动,锤头与试样表面的摩擦阻碍了金属向水平方向移动,在试样侧面形成了一个“单鼓形”,如图 6 所示. 此时,在试样内部按变形量的不同可以分为 3 个区域,即心部变形量大的易变形区 II,上下锤头附近变形量小的难变形区 I,以及变形量居中的自由变形区 III. 随着锻造道次增加及压下方向改变,试样的难变形区与自由变形区发生交替变化,累积应变持续增加,但其应变增量增速远低于试样心部附近不随压下反向而改变



的易变形区的增速. 由于这种易变形区与周边自由变形区、难变形区累计变形量差异的存在, 致使锻后试样心部 X 型区域的变形组织与周边的组织存在很大的差异.



I 难变形区, II 易变形区, III 自由变形区  
图 6 自由锻过程中试样中 3 个不同变形区示意图  
Fig. 6 Sketch illustrate of three deformation zones in the free forging process

金属材料在多向锻造过程中, 随着累积应变量的增加, 其变形组织的演变过程经历原始组织破坏的加工硬化阶段, 位错消失的回复阶段, 以及新晶粒形核长大的再结晶阶段. 这 3 个阶段的组织演变进程与材料的属性、变形量、变形速度、变形温度以及变形方式等因素有关.

根据文献[11], 冷变形量为 71% 的 5182 铝合金的再结晶温度约为 288 °C, 本实验采用的末道次变形温度在 340 °C 高于再结晶温度. 由于锤头及自由变形区附近变形量小, 5182 铝合金锻 3 次后, 锤头附近组织还保留着部分原始组织; 当锻 6 次后, 锤头及自由变形区附近的累积应变量持续增加, 原始组织被破坏, 在局部区域出现了少量白亮的再结晶晶粒; 随着锻造道次继续增至 9, 12 次, 锤头附近的变形组织被进一步破坏, 变形组织变细, 但并未出现大量的再结晶晶粒. 与锤头及自由变形区附近变形方式不同, 心部易变形区的道次变形量大、且各道次间变形方向交替发生变化, 心部的组织也发生了与边部不同的变化; 当锻 3 次后, 试样心部的原始组织被完全破坏, 变形组织中出现了一定数量的再结晶晶粒; 当锻 6 次后, 试样心部再结晶晶粒大量形核长大, 并相互接触, 形成细小的再结晶晶粒; 随着锻造道次进一步增至 9, 12 道次, 试样心部的再结晶晶粒较锻 6 道次后略有粗化, 但差异不大. 这表明在一定的温度下多向锻造时, 当 5182 铝合金试样心部的累积应变量达到一定值时试样开始发生再结晶, 随着累计应变量的持续增加再结晶晶粒尺寸趋于一个极限

值, 晶粒不再细化, 这之前有关高纯铝多向锻造的结果相近<sup>[10]</sup>. 此外, 边部与心部的变形组织差异并未因道次的增加而消除, 表明仅增加道次难以消除多向锻造过程中的组织不均匀性.

再结晶的发生, 除了与累积应变量有关, 还与局部区域变形方式有关, 还可能与局部变形区各道次的应变状态的差异有关. 用有限元软件 (DEFORM-3D) 对锻造过程进行模拟的结果表明, 经 12 次锻造后试样边部的累积应变量 (为 5.24) 已经超过经 6 次多向锻造后试样心部的累计应变量 (为 4.95), 但锻 2 次后试样锤头附近的晶粒较 6 次锻造后试样心部晶粒粗大很多.

### 3 结 论

1) 5182 铝合金在多向锻造过程中, 锻造道次由 3 增至 12, 心部细晶区的面积随锻造道次的增加而扩大, 但无法消除因累计变形量不同而导致的心部与边部的组织差异.

2) 5182 铝合金多向锻造过程中, 锻造道次由 3 增至 12, 试样锤头附近的组织不断破碎成变形组织, 但未发生明显的再结晶.

3) 5182 多向锻造过程中, 试样心部的变形组织在 3 道次时开始发生再结晶, 在 6 道次时发生完全再结晶, 9 和 12 道次锻后试样心部的晶粒尺寸基本相同, 但略粗于 6 锻道次试样. 多向锻造过程中试样心部 5182 铝合金再结晶晶粒尺寸随累计应变量的增加会达到一个细化极限.

### 参考文献:

- [1] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation [J]. *Progress in Materials Science*, 2000, 45(6): 103-189.
- [2] Iwahashi Y, Horita Z, Nemoto M, et al. An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing [J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(5): 4733-4741.
- [3] Valiev R, Langdon T G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement [J]. *Progress in Materials Science*, 2006, 51(3): 881-981.
- [4] 郑立静, 邓江宁, 张焱, 等. 采用 ECAP 制备亚微晶铝合金及其力学性能 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2002, 23(7): 694-696.  
(Zheng Li-jing, Deng Jiang-ning, Zhang Yan, et al. Manufacture and mechanical properties of ultrafine grain aluminum alloy by ECAP [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2002, 23(7): 694-696.)

(下转第 1580 页)