

文章编号: 1004- 0609(1999)04- 0709- 05

微量 Sc 和 Zr 对 2618 铝合金再结晶行为的影响^①

余 琨 李松瑞 黎文献 肖于德

(中南工业大学 材料科学与工程系, 长沙, 410083)

摘 要: 配制了 2618 及 2618+ Sc+ Zr 两种不同成分的合金, 采用硬度测试初步研究了微量 Sc 和 Zr 对 2618 合金冷轧板材退火后再结晶行为的影响, 并采用金相显微镜和透射电镜观察了合金不同状态下的显微组织结构。结果表明: 加入 Sc 和 Zr 后生成的 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点细小弥散, 与基体共格, 可钉扎位错, 稳定亚结构, 阻碍亚晶长大及晶界的迁移, 从而抑制合金的再结晶, 使含 Sc 和 Zr 的合金再结晶温度比参比的 2618 合金的再结晶温度提高约 200 °C; 亚晶聚合机制对合金的再结晶发挥了作用。

关键词: Al-Cu-Mg-Fe-Ni 合金; 再结晶; 钪; 锆

中图分类号: TG111.7

文献标识码: A

合金中元素的性质和浓度, 对合金的再结晶温度有显著的影响。在铝合金中, 添加少量过渡族元素能提高其再结晶温度^[1]例如, 根据文献[2, 3]的报道, 过渡族元素中的 Sc 能将铝及铝合金的再结晶温度提高 100 °C 以上。但有关 Sc 对铝合金再结晶影响的研究, 主要集中在 Al-Sc 二元合金系^[2]。对于较复杂的铝合金系, 只有少量评述性文献报道^[3], 而实验工作报告极少。另外, 另一过渡族元素 Zr 与 Sc 的物理、化学性质相近, 它代替 Al_3Sc 化合物晶格中部分 Sc 原子后形成的 $Al_3(Sc, Zr)$ 化合物保持了 Al_3Sc 化合物的全部有益性能, 并且其热稳定性更高^[4]。因此, 本实验针对以 Al-Cu-Mg-Fe-Ni 为基的 2618 铝合金, 添加微量的 Sc 和 Zr, 研究它们对该合金再结晶行为的影响, 从而探讨合金再结晶与耐热性之间的关系, 为进一步提高 2618 合金耐热性能, 开发新一代耐热变形铝合金作初步的探索。

一般再结晶开始温度 t_r^S 不是一个物理常数, 许多因素如变形程度、退火时间等都对其有显著影响, 本实验采用大的变形程度 ($\geq 50\%$) 和 1 h 退火的工艺来确定出一个再结晶

开始温度 t_s , 以区别于其他的 t_r^S 值。

1 实验方法

配制了两种成分的合金, 具体成分见表 1, 其中合金 A 为 2618 合金原始成分。

表 1 实验用合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of alloys (mass fraction, %)

Alloys	Cu	Mg	Fe	Ni	Sc	Zr	Al
A	2.21	1.20	0.98	1.19	—	—	Bal.
B	2.23	1.21	0.93	1.18	0.3	0.3	Bal.

合金铸锭 500 °C 均匀化退火后热轧至 4 mm 厚, 然后分别冷轧成 2 mm 和 1 mm 厚板材, 获得较大的冷变形量(50% 和 75%)。板材样品在马弗炉中不同温度下退火 1 h, 温度范围为 150~ 500 °C。采用 HVA-10A 型轻负荷维氏硬度计测量硬度。采用 Nephoto-2 型金相显微镜和 H-800 透射电镜观察合金显微组织。金相样品用 Kellor 试剂腐蚀, 电镜样品经砂纸减

① 收稿日期: 1998- 08- 024; 修回日期: 1998- 11- 06

余 琨(1974-), 男, 博士研究生

薄至小于0.1 mm后用 25% 硝酸+ 75% 甲醇溶液双喷减薄。

2 实验结果

2.1 实验合金退火时硬度的变化

图 1 是冷变形后的板材样品在 150~500 °C 间不同温度下经 1 h 退火后硬度随温度变化的曲线。由图可知: 合金 A, B 在室温~200 °C 范围内硬度值变化不大。随温度继续升高, 合金 A 的硬度开始急剧下降, 至 350 °C 时, 硬度几乎降到最低值。结合显微组织观察 (图 3), 基本可确定合金 A 再结晶开始温度 t_s 为 200 °C, 终了温度为 350 °C。而加入了 Sc, Zr 的合金 B 无硬度剧烈下降阶段。根据文献 [1], 采用硬度示差法, 测出合金 B 经 50% 变形的板材样品硬度—退火温度关系曲线 (图 1), 并与经 75% 变形的曲线进行比较, 可知变形量大的样品由于冷变形时储能高, 再结晶驱动力大, 因此硬度下降的幅度大。做出二者硬度差值曲线 (图 2), 可认为 ΔH_v 曲线开始弯曲时的温度即为合金 B 的 t_s (400~450 °C)。

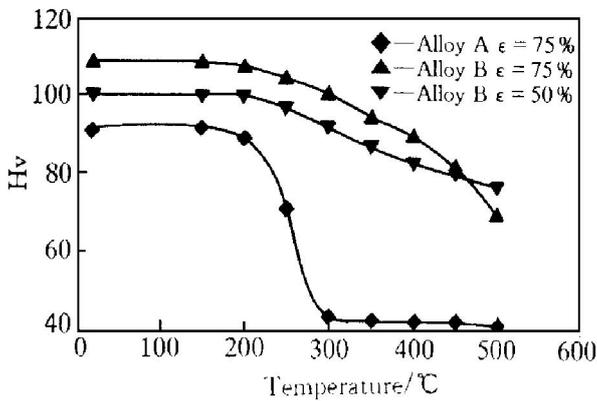


图 1 合金硬度—温度关系曲线

Fig. 1 Hardness-temperature curves of alloys

2.2 实验合金退火时显微组织的变化

观察合金 A, B 在几个主要退火温度下的金相组织 (图 3) 可知, 室温下, 合金具有典型的变形组织形貌, 晶粒及第二相化合物均沿变形方向形成纤维状。200 °C 下, 合金 A 中化合物聚集较多处已有再结晶晶粒出现, 但整体上

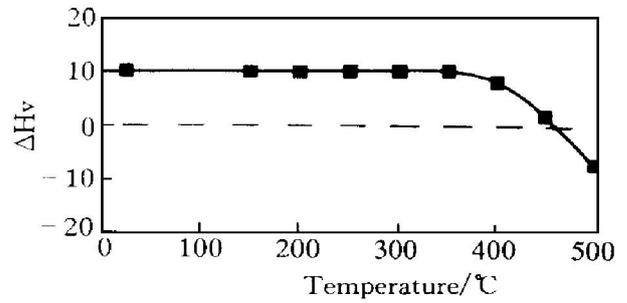


图 2 合金 B 不同变形量硬度差值曲线

Fig. 2 Hardness difference curve of alloy B with different deformations

$$\Delta H_v = H_{v75\%} - H_{v50\%}$$

合金仍显出加工态组织形貌。温度为 350 °C 时, 合金 A 中晶粒已全部转变为等轴晶, 而且有些晶粒已开始长大, 说明此时再结晶已完成, 反映到硬度曲线上在 350 °C 以后硬度值基本保持在最低值。合金 B 在高温下组织变化不如合金 A 明显, 即使在 200 °C 和 450 °C 下, 也难见到有明显再结晶晶粒, 这与硬度测量的结果是吻合的。

进一步采用 TEM 观察发现, 在含 Sc 和 Zr 的合金中有细小弥散的豆瓣状粒子存在 (图 4 (d)), 表明该粒子与基体完全共格, 尺寸约为 20~30 nm, 结合有关文献 [3~5] 分析, 在含 Sc/Zr 的 Al-Cu-Mg 基合金中只有 $Al_3(Sc, Zr)$ 相与基体完全共格。它很可能在合金均匀化或热加工过程中形成, 由于它细小且分布均匀, 冷变形后与位错缠结在一起较难分辨 (图 4 (a)), 而在较高温度下能有效钉扎位错、亚晶界等 (图 4 (c)), 因此 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点的存在对合金的再结晶有抑制作用。

3 讨论

3.1 合金中第二相对再结晶的影响

2618 合金中有尺寸较大的稳定相 Al_9FeNi 存在, 它是在合金凝固时形成、经变形后被破碎分布于晶粒内部和晶界上的, 其作用是对高温下合金的变形起阻碍作用, 从而提高合金的耐热性能。加入 Sc 和 Zr 后, 合金中有细小弥散的 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点存在。这两种相都会对合

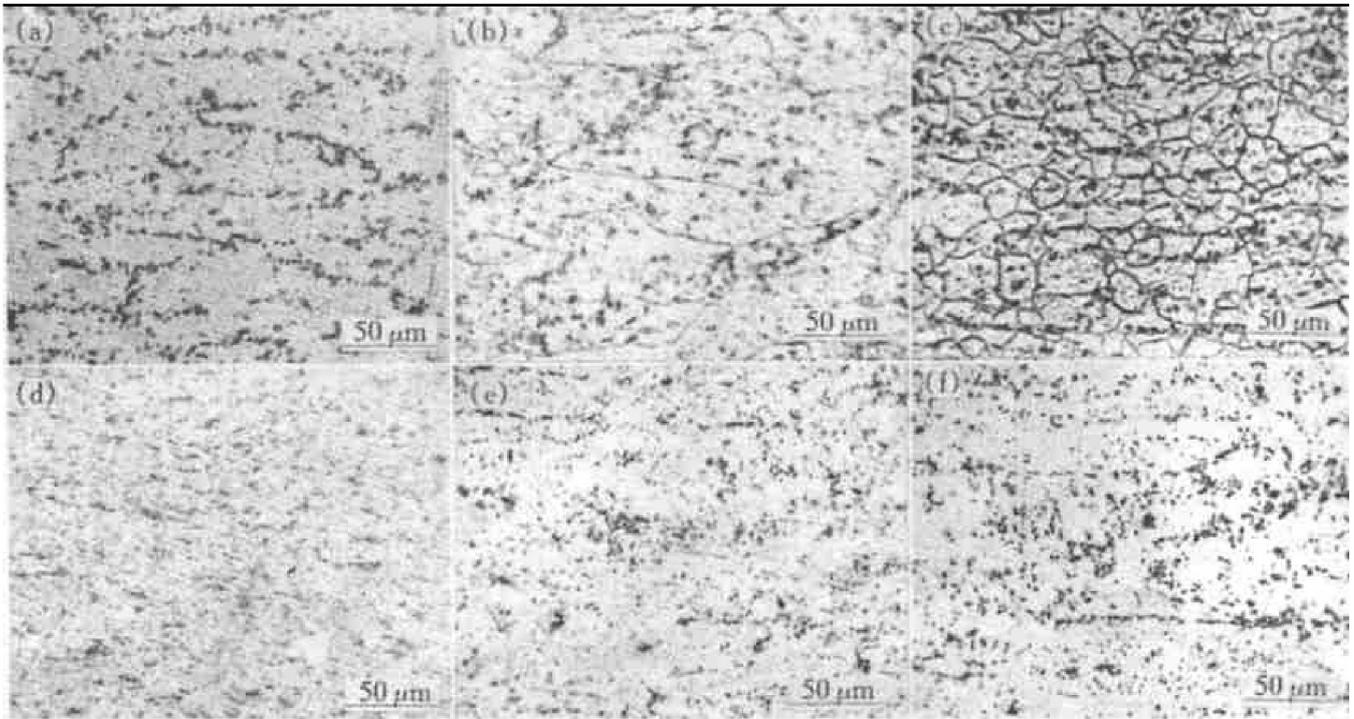


图3 各温度下合金的金相组织

Fig. 3 Optical morphologies of alloys at different temperatures

Alloy A: (a) —cold rolling; (b) —200 °C, 1 h; (c) —350 °C, 1 h

Alloy B: (d) —cold rolling; (e) —200 °C, 1 h; (f) —450 °C, 1 h

金的再结晶有影响。再结晶过程与其他许多固态相变过程相同,也是通过形核和长大来进行的。粗大的第二相颗粒存在于基体中时,经冷变形后在二者的分界面上会产生局部点阵畸变很严重的区域,为再结晶形核提供更多的能量,促使再结晶形核率增大,从而成为再结晶形核的有利场所。因此 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相有利于合金再结晶的形核。而弥散的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点,尺寸小,密集度高,对位错具有很强的钉扎作用,可以稳定变形组织的亚结构,阻碍加热时位错重新排列成亚晶界及随后发展成大角度晶界的过程,从而阻碍了再结晶的形核。如图4(b)和(c)所示,合金A在200 °C退火,位错已大大减少,可认为位错胞状组织已转化为亚晶粒。而合金B则由于有 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点对位错的钉扎,使回复过程中位错运动受阻,保持了较高的位错密度,延缓了再结晶形核的开始。

在再结晶核心形成后长大的过程中, $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点又起到了阻碍作用,因为晶粒长大过程是一个晶界迁移的过程,根据单位面积

上晶界所受阻力的公式^[6]: $F/A = 3f\gamma_b/2r$ (其中, f 为单位体积金属中第二相颗粒的体积分数, γ_b 为单位面积晶界能, r 为圆球状第二相颗粒半径),可知,第二相颗粒体积分数越大,颗粒越细小, f/r 值就越大,该粒子对晶界迁移所施加的阻力就越大。 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点完全满足阻碍晶界迁移的条件(粒子间距 $\lambda < 1\mu\text{m}$, 粒子直径 $d < 0.3\mu\text{m}$),因此它可阻碍大角度晶界的迁移而抑制再结晶核心的生长,使再结晶受阻。从图4(d)中就可见 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 质点对晶界的钉扎,阻碍再结晶晶粒的长大。

3.2 再结晶形核机制

相邻亚晶粒边界上的位错,可通过滑移或攀移转移到晶界或角度较大的亚晶界上,导致中间亚晶界消失,使多个亚晶粒合并成一个大的亚晶粒,大的亚晶粒边界上可吸收更多的位错,使相邻亚晶粒位相增大,逐渐转化为大角度晶界,其迁移率很大,最终构成再结晶核心。图5可见亚晶界正在离解,可认为这是亚晶聚合机制在起作用。

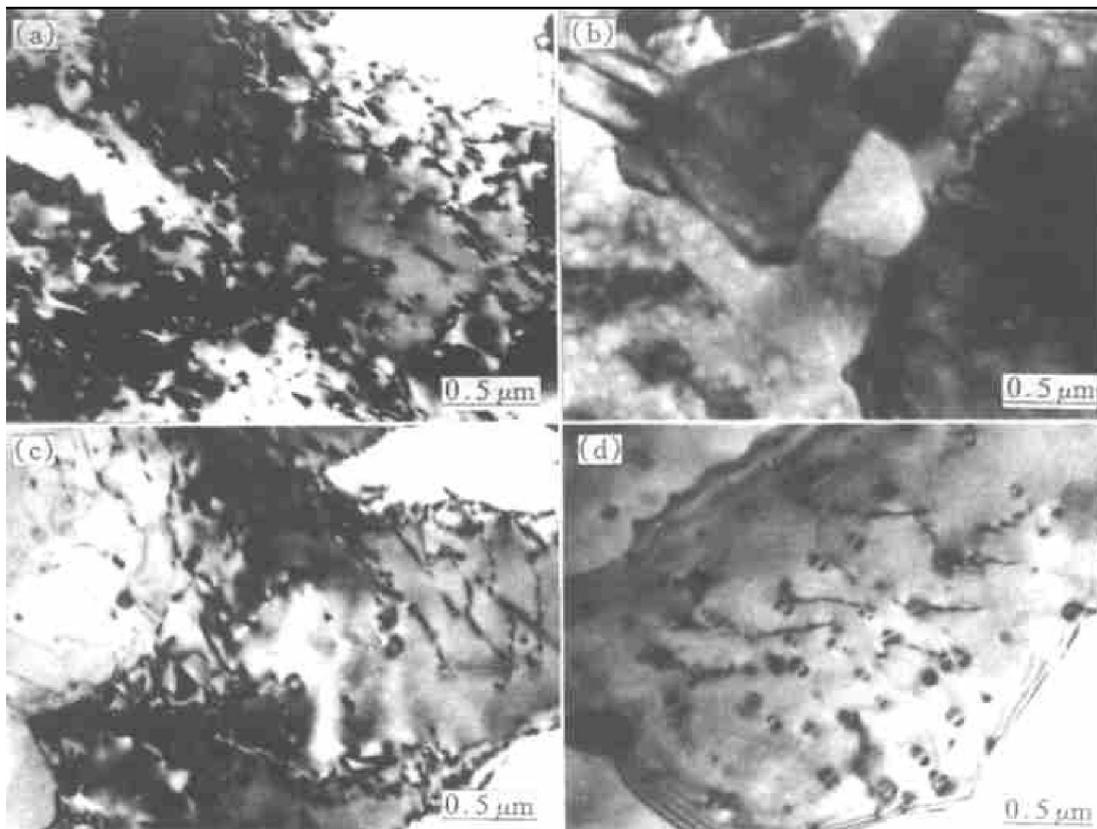


图 4 各温度下合金 TEM 显微组织

Fig. 4 TEM morphologies of alloys at different temperatures

(a) —Alloy B, cold-rolling; (b) —Alloy A, 200 °C; (c) —Alloy B, 200 °C; (d) —Alloy B, 450 °C

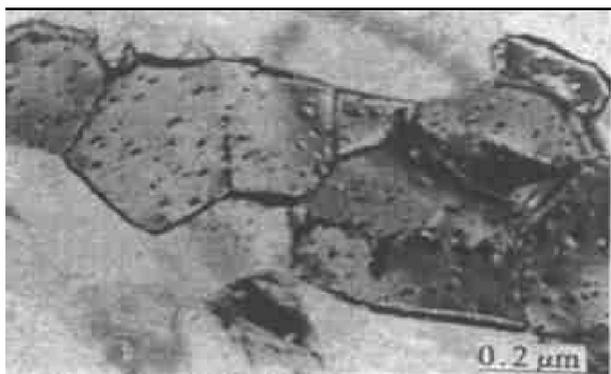


图 5 合金 B 500 °C 退火

Fig. 5 Alloy B annealed at 500 °C

3.3 再结晶与合金耐热性能的关系

加入 Sc 和 Zr 后形成的 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点能有效地钉扎住位错，对变形组织中的亚结构具有强烈的稳定化作用。合金中亚结构的存在，会成为位错移动的重要障碍，从而保证在高温下，材料中仍保持有较高密度的位错，因此高温下合金的强度可提高。另外，高温下原子沿晶界的扩散速率比晶粒内部快得多，这使高温

时晶界具有近似流体的粘滞性质，对变形的阻力大为减弱。合金发生再结晶后，从原变形组织中产生了无畸变的新晶粒，晶界的强度远低于晶内的强度，使材料的力学性能很快下降。而 $Al_3(Sc, Zr)$ 质点既阻碍了这种无畸变再结晶晶粒的产生，又有效地限制了晶界的滑动，从而降低了材料的再结晶软化作用。从一个侧面体现出材料耐热性能的提高，也体现出微量 Sc 和 Zr 对 2618 合金耐热性能的有益影响。

4 结论

(1) 加入 Sc 和 Zr 后的实验合金 B 再结晶开始温度 t_s 为 400 °C，比参比合金 A 的 t_s 提高了近 200 °C。

(2) $Al_3(Sc, Zr)$ 质点可有效稳定合金亚结构，钉扎位错、亚晶界等，且该粒子热稳定性高，很难粗化。因此，它可通过对再结晶晶粒的形核和长大两个过程的阻碍起到抑制合金再结晶的作用。

(3) 合金再结晶形核为亚晶聚合机制。

(4) $Al_3(Sc, Zr)$ 质点在合金中可起弥散强化和亚结构强化作用。因此, 含 Sc 和 Zr 的合金在同样的变形量下有更高的硬度。

REFERENCES

- Gorelik S S. Recrystallization in Metals and Alloys. Moscow: MIR Publishers, 1981.
- Zhang Yinhui(张迎晖), Xiao Yunzhen(孝云祯) and Ma Hongsheng(马宏声). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(1): 85.
- ЕЛАГИН В И等著, Xie Xiekui(谢燮揆译). Light Metals(轻金属), 1993(3): 54.
- Lin Zhaoqi(林肇琦). Materials Review(材料导报), 1992(3): 10.
- Black N and Hopkins M A. J Mater Sci, 1985, 20: 2861.
- Porter D A and Easterling K E. Phase Transformations in Metals and Alloys. Oxford: Alden Press, 1981.
- Toropova L S and Kamardinkin A N. Phys Met Metall, 1990, 170: 106.
- Su Beihua(苏北华) and Shen Yunqi(沈韵琪). Light Alloy Fabrication Technology(轻合金加工技术), 1997, 25(6): 35.
- Zhang Yinhui(张迎晖), Ma Hongsheng(马宏声) and Xiao Yunzhen(孝云祯). J of Northeast University of Technology(东北工学院学报), 1993, 14(6): 576.
- Yin Zhimin(尹志民), Gao Yongzheng(高拥政) and Pan Qinglin(潘青林). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(4): 75.

Effect of trace Sc and Zr on recrystallization behavior of 2618 alloy

Yu Kun, Li Songrui, Li Wenxian, Xiao Yude

Department of Materials Science and Engineering

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

Abstract: The influence of trace Sc and Zr addition on the recrystallization behavior of cold-rolled 2618 alloy has been investigated by Vicker's hardness measurement. The microstructures of the alloys were observed by using optical microscope and transmission electron microscopy (TEM). The results show that the dispersed $Al_3(Sc, Zr)$ phase can strongly pin dislocations, stabilize substructures and impede the movement of boundaries. So the recrystallization of the alloys is retarded and the temperature of recrystallization of 2618+ Sc+ Zr alloy is about 200 °C higher than that of controlled 2618 alloy. The subgrain coalescence nucleation mechanism is involved in the recrystallization process.

Key words: Al-Cu-Mg-Fe-Ni alloy; recrystallization; scandium; zirconium

(编辑 朱忠国)