

微量 Sc 和 Zr 对 Al-Zn-Mg 合金组织与性能的影响

Effects of Minor Sc and Zr on Microstructure and Properties of Al-Zn-Mg Alloy

杨磊¹, 潘青林², 尹志民², 吴建生¹

(1 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200030;

2 中南工业大学材料科学与工程学院, 长沙 410083)

YANG Lei¹, PAN Qing-lin², YIN Zhi-min², WU Jian-sheng¹

(1 Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2 Central South University of Technology, Changsha 410083, China)

摘要: 采用铸锭冶金法制备了 Al-6.2Zn-2.0Mg-0.25Sc-0.12Zr 和 Al-6.2Zn-2.0Mg 合金, 测试不同处理态的拉伸力学性能, 利用金相显微镜和透射电子显微镜研究其不同处理态的显微组织。结果表明: 添加微量 Sc 和 Zr 可明显细化合金的铸态晶粒, 并显著提高 Al-Zn-Mg 合金的力学性能, 其作用机理主要为 Al₃(Sc, Zr) 造成的细晶强化、亚结构强化和弥散强化。

关键词: Al-Zn-Mg 合金; 钪; 锆; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG113; TG146 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2001) 07-0029-04

Abstract: The Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy was prepared by ingot-metallurgy processing. The tensile mechanical properties of the studied alloys at different treatments were tested and the microstructure and mechanical properties of the alloy was studied by using optical microscope and transmission microscope. The results show that the minor Sc and Zr can greatly fine the grain size of the Al-Zn-Mg alloy ingots. Minor Sc and Zr can remarkably improve the properties of the Al-Zn-Mg alloys. The strengthening mechanisms are considered as fine grain strengthening, substructure strengthening, and dispersion strengthening.

Key words: Al-Zn-Mg alloy; Sc; Zr; microstructure; mechanical properties

含 Sc 铝合金具有高的强度和韧性、良好的耐蚀性和可焊性^[1], 是航空航天、核能和舰船等领域用新型铝合金结构材料。微量 Sc 和 Zr 复合添加不仅可以提高和改善 Al-Mg 基合金的性能^[2], 同时还可降低含 Sc 合金生产成本, 微量 Sc 和 Zr 的复合添加已成为发展和研究含 Sc 铝合金的一大趋势^[1,4]。这给把中强 Al-Zn-Mg 合金提升为超高强合金的研究提供了基本思路和途径。国内外对此进行了大量研究, 但从研究结果来看, 还未对复合添加 Sc 和 Zr 对合金组织和性能影响做深入探讨。为此, 采用力学性能测试、透射电镜和金相显微镜等实验手段研究了 Sc 和 Zr 对一种 Al-Zn-Mg 合金力学性能与显微组织的影响。

1 材料与实验方法

以纯铝 (99.98%)、纯镁 (99.92%)、纯锌

(99.9%)、Al-3Sc 和 Al-4Zr 中间合金为原料, 采用铸锭冶金法制备出实验用 Al-6.2Zn-2.0Mg 和 Al-6.2Zn-2.0Mg-0.25Sc-0.12Zr 合金。460 均匀化处理 12h 后经热轧、冷轧制成 2mm 厚度薄板, 总变形量达 92%。之后沿轧向截取拉伸试样。经 465 固溶, 水淬, 在 120 时效处理 (0~24h) 后进行拉伸实验。晶粒观察用金相样品经氟硼酸水溶液电解抛光复膜后, 在 POLYVER-MET 光学显微镜下用偏光观察; 结晶核心观察用金相样品采用混合酸腐蚀后, 直接在光学显微镜下观察。透射电镜样品经机械减薄后双喷穿孔而成, 电解液为 4% 高氯酸酒精溶液, 温度为 -25℃, 显微组织观察 H-800 透射电镜上进行。

2 实验结果

2.1 合金的力学性能

Al-Zn-Mg 合金与 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金在不同处理态的力学性能列于表 1

表 1 结果表明: 热轧态时, 添加 Sc 和 Zr 的合金

表 1 研究两种 Al-Zn-Mg 合金的力学性能

Table 1 The mechanical properties of two studied Al-Zn-Mg alloys

合金状态	Al-Zn-Mg			Al-Zn-Mg-Sc-Zr		
力学性能	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ / %	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ / %
热轧态	357	254	15.2	387	294	12.9
465 / 30min, 水淬	332	170	26.0	445	299	17.4
465 / 30min+ 120 / 3h	416	357	15.0	490	447	13.0
465 / 30min+ 120 / 12h	439	376	13.0	494	458	10.7
465 / 30min+ 120 / 24h	450	405	10.0	543	509	10.6

(2[#]) σ_b 比未添加的合金 (1[#]) 大 30MPa, 而 $\sigma_{0.2}$ 大 40MPa; 在经 465 固溶 30min 后, 2[#] 合金 σ_b 达到 445MPa, $\sigma_{0.2}$ 达到 299MPa, 而 1[#] 合金 σ_b 下降到 332MPa, $\sigma_{0.2}$ 为 170MPa, 两者相差 113~129MPa; 经 120 时效后, 两种合金随着时效时间的延长, 强度都增大, 表明两者都有明显的时效硬化行为, 添加 Sc 和 Zr 的合金时效 24h 后抗拉强度增加到 543MPa, 屈服强度达 509MPa, 延伸率为 10.6%, 而未添加 Sc 和 Zr 的抗拉强度增加到 450MPa, 屈服强度为 405MPa, 延伸率为 10%。总之, 添加微量 Sc、Zr 可大幅度提高 Al-Zn-Mg 合金的强度, 约为 100MPa, 且保持较高的延伸率。

2.2 合金金相显微组织

Al-Zn-Mg 合金与 Al-Zn-Mg-Sc-Zr 合金不同处理态的金相组织照片示于图 1。

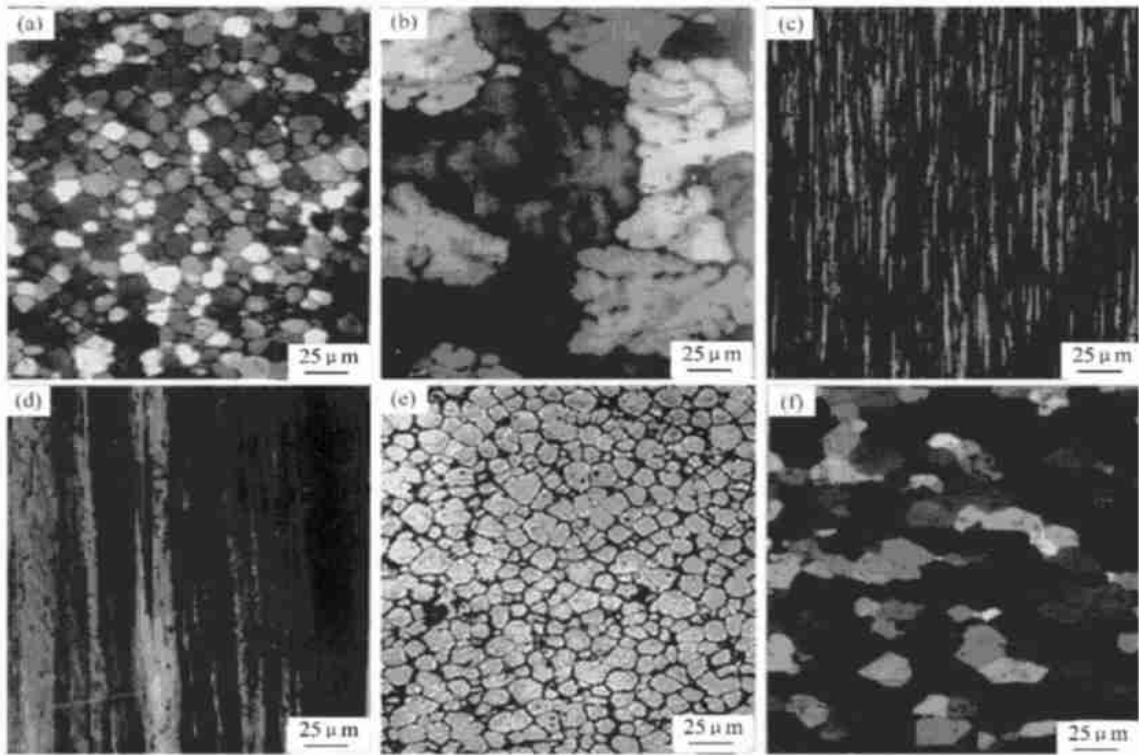


图 1 两种合金在不同处理态的金相组织相片 (a) 2[#] 铸态组织; (b) 1[#] 铸态组织; (c) 2[#] 热轧组织; (d) 1[#] 热轧组织; (e) 2[#] 铸态组织 (混合酸腐蚀); (f) 1[#] 465 / 30min+ 120 / 0h 组织

Fig. 1 Optical microstructures of two studied alloys (a) 2[#] as-cast microstructure; (b) 1[#] as-cast microstructure; (c) 2[#] as-hot rolled microstructure; (d) 1[#] as-hot rolled microstructure; (e) 2[#] particles within some grains; (f) 1[#] 465 / 30min+ 120 / 0h

从图 1a, b 对比表明, Al-Zn-Mg 合金中复合添加 Sc 和 Zr 可显著细化合金的铸态晶粒组织; 两种合金热轧态组织均为未再结晶的纤维状组织, 只是由于 2[#] 合金铸态晶粒小使经加工变形得到的纤维状略显细小些 (图 1c, d); 在经 465 固溶 30min 后, 2[#] 合金

的金相组织仍为纤维状组织, 而 1[#] 合金已发生完全再结晶 (图 1f), 金相组织为等轴再结晶晶粒; 120 时效 24h 后 2[#] 合金仍为纤维状组织, 1[#] 合金为等轴再结晶晶粒; 图 1e 为 2[#] 合金混和酸腐蚀的铸态金相组织, 从中可看到在晶粒中析出许多细小的方块状或三

角状的第二相粒子, 据文献报道^[2,3], 该相粒子为 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 复合粒子。

2.3 合金透射电镜显微组织

图 2 为两种合金在不同处理态的透射电镜照片。

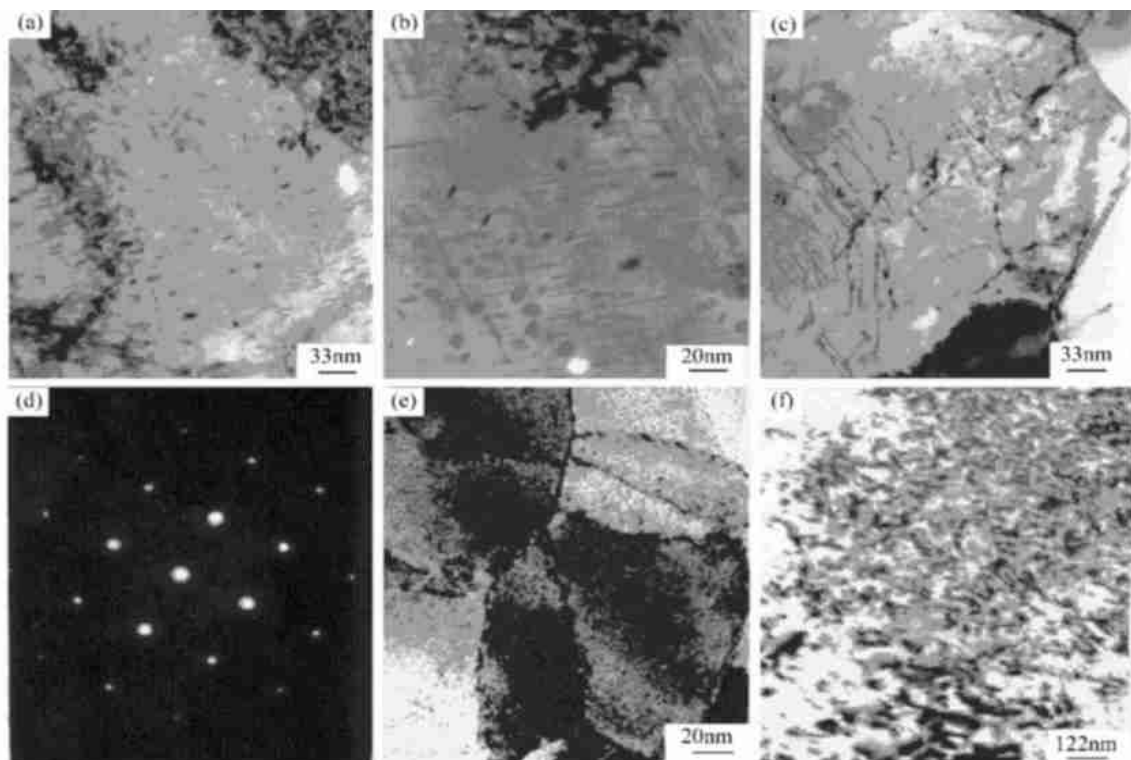


图 2 两种合金的透射电镜照片 (a) 2# 热轧态组织; (b) 1# 热轧态组织; (c) 2# 465 固溶态组织; (d) $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子 EDP 谱; (e) 2# 465 /30min+120 /24h 组织; (f) 1# 460 /30min+120 /24h 组织

Fig. 2 TEM microstructure of two studied alloys

(a) 2# TEM microstructure of as-hot rolled; (b) 1# TEM microstructure of as-hot rolled;

(c) 2# 465 TEM microstructure of solid state; (d) EDP of $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ particle;

(e) 2# TEM microstructure of 465 /30min+120 /24h; (f) 1# TEM microstructure of 465 /30min+120 /24h

通过对比图 2 中的两种合金可知, 在热轧态时, 两种合金都会有细小呈针状或棒状的第二相析出, 沿晶界, 晶内均匀弥散分布 (图 2a, b), 是 Al-Zn-Mg 合金中的主要强化相 η 和 η' 相, 而且在 2# 合金中还存在一些呈马蹄状, 且与基体共格的粒子; 在固溶态时, 2# 和 1# 合金热轧态时析出的针状或棒状的 η 和 η' 相消失, 晶界和晶内比较干净, 而 2# 合金中仍存在马蹄状且与基体共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 该相粒子热稳定性好在此温度下不回溶, 结合文献 [2, 3], 可知该相粒子即为均匀化处理或热加工过程中析出的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 对位错和亚晶界起到钉扎作用, 阻碍晶界迁移和位错的运动 (图 2c, d); 在 120 °C 时效过程中, 在两种合金晶界和晶内又析出 η 和 η' 相, 随着时效时间的延长, η 和 η' 相的析出逐渐增多和粗化, 更加弥散, 而因 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子在此温度下的分解孕育期较长, 可以认为在时效过程中无再次析出, 所以 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子在时效过程中无明显变化, 仍然细

小、弥散, 且与基体共格, 对合金基体造成了一定的弥散强化作用 (图 2e, f)。

3 分析与讨论

研究表明, 微量 Sc、Zr 在 Al-Zn-Mg 合金中除少量固溶在 $\alpha(\text{Al})$ 中外, 大部分以 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 中间化合物的形式存在, 主要以两种方式析出: 一种是合金在凝固过程中析出的一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 较粗大, 呈方块状; 另一种为合金均匀化处理后大量析出的二次 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子, 细小、弥散, 呈马蹄状, 且与基体共格。其中, 一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子晶格类型为面心立方, 与基体 $\alpha(\text{Al})$ 相同, 点阵常数与基体也极为相近, 且与基体 $\alpha(\text{Al})$ 完全共格, 错配度仅为 1%~2%, 另外, 一次 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 粒子在合金凝固时优先析出, 具有熔点高, 稳定性好, 分布均匀的特点, 这正好满足在铸态合金中的变质机理 (以不溶性质点存在于金属液中起非均质晶核作用) 对非均质晶

核的要求^[5], 该粒子大大细化合金的铸态晶粒组织, 造成细晶强化, 提高了合金的强度; 而随后均匀化处理析出大量的二次 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子^[2,3], 细小均匀, 弥散, 且与基体共格, 强烈钉扎亚晶界和位错, 阻碍晶界迁移和位错的运动, 一方面起到了弥散强化作用, 另一方面, 从图 1a 可以看到, 它还抑制合金再结晶, 对变形组织中的亚结构具有强烈的稳定化作用, 从图 1f 看到, 添加 Sc 和 Zr 的合金在固溶时效处理后依然保持加工态的纤维组织, 使合金获得亚结构强化, 提高了合金的强度, 而未添加 Sc 和 Zr 的合金固溶处理后已发生完全再结晶。总之, 正是因为添加微量 Sc 和 Zr 对合金额外造成了细晶强化、亚结构强化和弥散强化, 才使得合金的强度得到了很大的提高, 约达 100MPa。另外, Sc 和 Zr 添加对 Al-Zn-Mg 合金中主要强化相 $MgZn_2$ 和 $Al_2Zn_3Mg_3$ 在时效过程中的析出以及对强化作用是否造成影响, 还有待进一步的研究。

4 结论

(1) 微量 Sc 和 Zr 添加到 Al-Zn-Mg 合金中, 除少量固溶于 $\alpha(Al)$ 外, 大部分以 $Al_3(Sc, Zr)$ 中间化合物的形式存在, 主要分两种方式析出: 一种为合金凝固过程中析出的一次 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子, 为粗大的方块状粒子, 起非均质晶核的作用, 可强烈细化合金的铸态晶粒组织, 对合金造成细晶强化作用; 另一种为均匀化处理过程中大量析出的二次 $Al_3(Sc, Zr)$ 粒子, 细小、弥散分布且与基体共格, 为马蹄状, 它强烈钉扎晶界和位错, 阻碍晶界迁移和位错运动, 抑制合金再结晶, 稳定亚结构, 使该合金获得亚结构强化和弥散强化。

(2) 在 Al-Zn-Mg 合金中复合添加微量 Sc 和 Zr 可大幅度提高合金的强度, 约达 100MPa 左右, 且保持较高的延伸率, 使合金具有优良的综合性能。

参考文献

- [1] 林肇琦. 新一代铝合金——铝钎合金的发展概况 [J]. 材料导报, 1992, (3): 10-15.
- [2] 潘青林, 高拥政, 尹志民. Sc 对 Al-Mg 合金组织与性能的影响 [J]. 材料科学与工艺, 1997, 5 (4): 9-13.
- [3] Zhimin Yin, Qinglin Pan, Yonghong Zhang, Feng Jiang. Effect of minor Sc and Zr on the microstructure properties of Al-Mg based alloys [J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280: 151-155.
- [4] В. И. ЕЛАГИН, В. В. ВАХАРОВ 等. 谢燮揆译. 用钎合金化的铝合金 [J]. 轻金属, 1993, (3), 54-58.
- [5] 邦达列夫, 那帕尔科夫, 塔拉雷什金著. 王永海, 张新明, 高革译. 变形铝合金的细化处理 [M]. 北京: 冶金工业出版社.

1988, 8.

收稿日期: 2001-03-26

作者简介: 杨磊 (1975-) 男, 博士, 贵州贵阳人, 现就读于上海交通大学材料科学与工程学院, 主要研究方向为超强铝合金和热电材料的研制与开发, 联系方式: 上海交通大学 A 0005021 (200030)

* * * * *

(上接第 44 页)

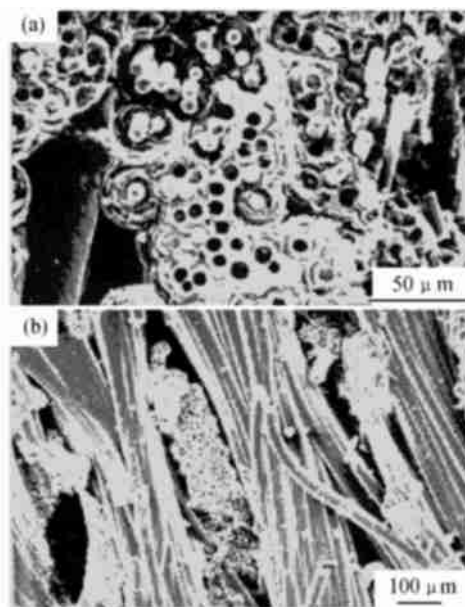


图 4 D 型盘的断口 (a) 垂直盘面; (b) 平行盘面

Fig. 4 Fractograph of D type brake discs

(a) perpendicular face; (b) parallel face

体, 这类刹车盘的基体以 CVD 炭为主, 但预制体的结构有差异, C 型刹车盘是乱纤维网胎层与连续纤维无纬布铺层叠加, D 型刹车盘为连续纤维无纬布铺层叠加后针刺, 针刺厚度 2~3 层, 而 E 型盘的针刺厚度则为盘件厚度。

参考文献

- [1] S Awasthi, J L Word. Ceram Eng Sci Proc, 1988, 9: 553.
- [2] R Fisherand, I L Stimson, Phil Trans R Soc Lond, 1980, A 294: 583.
- [3] G Savage. Carbon-Carbon Composites, C hadman & Hall, 1993, 9: 322.
- [4] C R THOMAS. Essential of Carbon-Carbon Composites, The Toyal Society of Chemisty, 1993, 3: 68.

收稿日期: 2001-04-04

作者简介: 谈竟霜 (1965-), 女, 工程师。联系地址: 北京市 81 信箱 26 分箱 (100095)