

文章编号: 1004-0609(2003)05-1192-04

含锆铝合金的力学性能和强化机理^①

谢优华, 杨守杰, 戴圣龙, 陆 政

(北京航空材料研究院 二室, 北京 100095)

摘 要: 研究了高强铝合金的力学性能与 Zr 含量的关系, 计算了合金的各种强化因素值。研究发现: 合金的抗拉强度 σ_b 和屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 均随 Zr 含量的增加而增大, 增幅分别达到 11.8% 和 12.6%; 合金延伸率 δ 在 Zr 添加量不高时随 Zr 含量的增加而增大, 在 Zr 含量为 0.06% 时出现峰值, 随后合金延伸率 δ 逐渐稳定在 8% 左右。结合合金显微特征, 合金强化机理主要包括晶粒细化、颗粒弥散强化及形变强化, 在 Zr 含量为 0.16% 的合金中相应的强化值分别为 21, 35 和 14 MPa。

关键词: 锆; 高强铝合金; 力学性能; 强化机理

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

20 世纪 50 年代, 通过添加锆元素研制出了超高强度的 B96 II 合金, 引起了科研工作者的普遍关注。到 70 年代, 有关锆元素的研究成果不断涌现, Ryum 等^[1, 2]、Nes 等^[3, 4] 对 Al-Zr 二元合金, Yoshida 等^[5]、Mukhopadhyay 等^[6, 7] 及 Starke 等^[8] 对 Al-Zr-Mg 及 Al-Zr-Mg-Cu 合金中的锆元素进行广泛的研究。我国在这方面的基础研究起步较晚, 北京航空材料研究院铝镁合金室从 20 世纪 90 年代开始对该领域进行了大量有效的研究^[9-12]。在此, 本文作者研究了锆元素对合金力学性能的影响规律, 并结合合金的显微特征分析了其相应的强化机理。

1 实验

共制备了 8 种合金, 合金成分(质量分数, %)为 Al-8.8Zr-2.8Mg-2.4Cu-0.05Ti-xZr ($w(\text{Fe}) < 0.05\%$, $w(\text{Si}) < 0.05\%$), 其中 Zr 含量是逐渐变化的, 如表 1 所示。

表 1 实验合金成分中的 Zr 含量

Table 1 Zr content in alloys

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$w(\text{Zr})/\%$	0	0.02	0.05	0.06	0.10	0.12	0.14	0.16

在电阻炉中按配料比依次加入中间合金, 充分熔化精炼后水冷模浇铸。经均匀化处理模锻, 锻压温度为 400~420 °C。于 470 °C 固溶 2 h, 快速水

淬, 随后立即在空气循环炉中时效, 温度为 135 °C。

在 Philips CM12 上进行透射电镜观察。拉伸试验按照 GB 5143-96, 在 INSTRON-4507 实验机上进行。

2 合金力学性能

各合金室温力学性能与合金 Zr 含量的关系曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出: 合金力学性能随

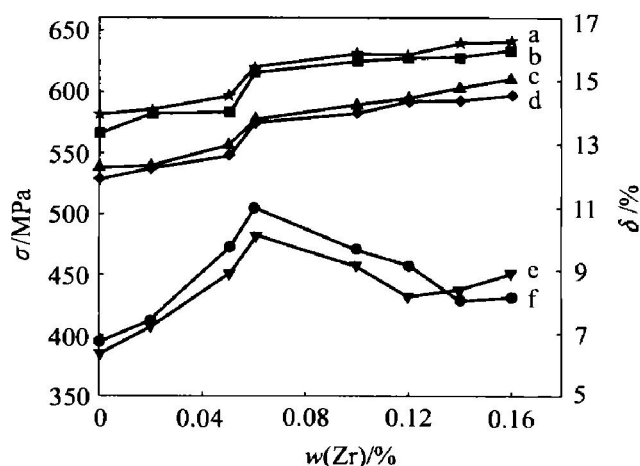


图 1 合金力学性能与合金 Zr 含量的关系

Fig. 1 Relationship between mechanical properties and Zr content of zirconium in alloys

a—Chordal σ_b ; b—Axial σ_b ; c—Chordal $\sigma_{0.2}$; d—Axial $\sigma_{0.2}$; e—Axial δ ; f—Chordal δ

① 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064907-4)

收稿日期: 2002-08-23; 修订日期: 2002-10-22

作者简介: 谢优华(1977-), 男, 助理工程师, 硕士。

通讯联系人: 谢优华, 北京市 81 号信箱 2 分箱, 北京 100095

Zr 含量变化明显; 抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 均随 Zr 含量的增加而增大, 其中含 0.16% Zr 的合金的 σ_b 比未含 Zr 合金的 σ_b 提高 66.6 MPa, 增幅达 11.8%; 合金的 $\sigma_{0.2}$ 也相对提高 66.7 MPa, 增幅为 12.6%。在 Zr 含量为 0.06% 时出现一个台阶, 强度有较大的提高; 合金的 δ 在 Zr 添加量不高的情况下, 随着 Zr 含量的增加而相应地增大, 在 Zr 含量为 0.06% 时出现峰值, 随后有降低的趋势, 但在 Zr 含量为 0.12% 后合金的 δ 逐渐稳定在 8% 左右。

合金弦向试样的强度都高于轴向试样的强度, 这显然是因为弦向试样变形量大, 形变硬化效应更明显, 同时弦向试样的延伸率也普遍比轴向的要高。

3 含 Zr 铝合金的强化机理

力学合金的强度性能之差 ($\Delta\sigma_{0.2}$, $\Delta\sigma_b$), 即为合金中添加 Zr 元素后各强化因素引起合金强度的总增量。结合合金显微结构^[10-12]可知, 主要包括以下一些强化因素。

3.1 晶粒细化

根据霍尔-配奇公式

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot d^{-1/2} \quad (1)$$

合金晶粒尺寸越小, 则合金的屈服强度越高。式 (1) 中: σ 为合金材料的屈服强度; σ_0 为常数, 相当于单晶体的屈服强度; d 为多晶体各晶粒的平均直径; K 为表征晶界对强度影响程度的常数。

这里包括两个晶粒细化过程: 合金熔炼铸造过程中合金铸件晶粒的细化^[12]; 合金锻压变形后发生再结晶, 由于 Al_3Zr 颗粒的钉扎抑制作用而引起的再结晶晶粒或亚晶的细化^[11]。合金晶粒尺寸变化曲线如图 2 所示。

3.2 Al_3Zr 颗粒的弥散强化

运动中的位错在滑移面上受到 Al_3Zr 颗粒的阻碍时, 位错线将以 Orowan 机制绕过 Al_3Zr 颗粒。位错线弯曲需要做功, 而且每个位错通过颗粒后还要留下一个位错环。这些环对位错源产生反向应力, 使后续位错前进的阻力增大, 流变应力提高, 于是合金得到强化。

由于位错会自发缩短和变直, 要使位错线保持弯曲状态, 外力 F 必须与回复力 T 平衡:

$$F = T/r = \alpha_1 \cdot G \cdot b^2/r$$

$$F = \tau \cdot b$$

$$\text{故 } \tau = \alpha_1 \cdot G \cdot b/r = 2\alpha_1 \cdot G \cdot b/d \quad (2)$$

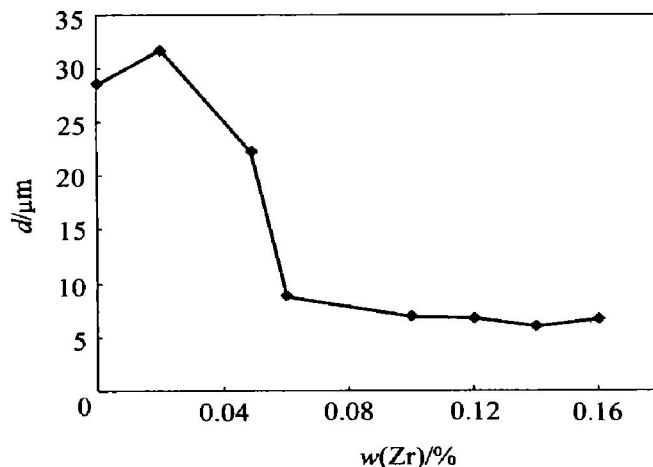


图 2 合金晶粒尺寸 d 与 Zr 含量的关系曲线

Fig. 2 Curve of grain diameter vs Zr content in alloys

式中 r 为位错通过颗粒时弯成的最小平均曲率半径; G 为合金的剪切模量; b 为位错的强度; τ 为剪切应力; α_1 与位错线几何形状有关, 只要根据 Al_3Zr 颗粒密度来求出 d 的值, 就能够估算 Al_3Zr 颗粒引起的弥散强化效应。

3.3 形变强化因素

虽然各合金的变形程度一致, 但由于含 Zr 合金中 Al_3Zr 颗粒对位错、晶界等晶体缺陷的钉扎作用, 使合金中位错密度明显增加, 运动时位错将彼此相遇并发生各种交互作用, 因而阻碍位错继续运动, 合金的形变强化效果显著增强。

Bailey-Hirsch 关系式为

$$\tau = \tau_0 + \alpha_2 \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (3)$$

式中 τ_0 相当于单晶体的屈服应力; α_2 为一常数, 其值约为 0.3~0.5; ρ 为位错密度, 随着 Al_3Zr 颗粒密度的增加而急剧增加, 这里假设位错密度与 Al_3Zr 颗粒密度呈线性关系。因此, 可以据此求出形变强化效果增强的程度。

下面以合金轴向屈服强度为例, 估算各强化因素的强度水平。

1) 对合金中 Al_3Zr 密度曲线(见图 3)进行拟合, 拟合方程为

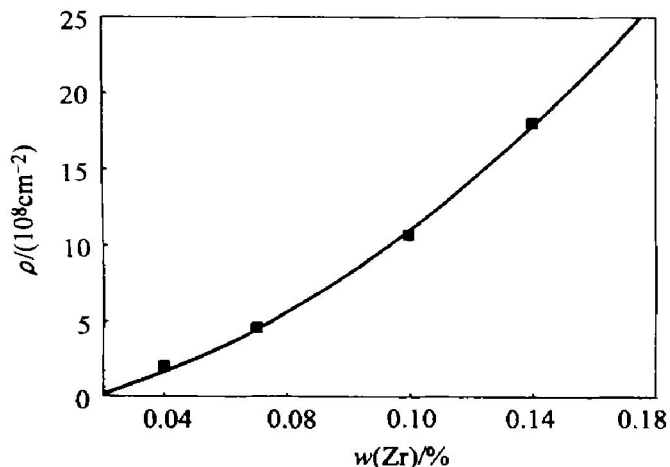
$$Y = 0.04291 + 95.65079X - 214.60217X^2 + 3200.47808X^3$$

2) 根据拟合后的曲线计算出 Al_3Zr 颗粒密度。再应用式 (2), 式中 α_1 取 0.5。对于 7A60 合金, G 约为 27 GPa。对于面心立方的 Al 基体, 最稳定的位错强度 b 为 0.28 nm。由 Al_3Zr 颗粒密度推出颗粒间距, 求得各合金的弥散强化值(见表 2)。

表 2 合金强化效果

Table 2 Strengthening effect of alloys

No.	Dispersion strength/ MPa	Harden strength/ MPa	Total strength/ MPa	Mean diameter of grains/ μm
1		τ_1		
2	9.68	3.87	9.7	12.728
3	16.05	6.40	17.7	10.886
4	17.87	7.20	45.0	7.136
5	25.00	10.00	53.0	6.412
6	28.60	11.40	63.4	6.488
7	31.90	12.76	63.4	6.228
8	35.30	14.10	66.7	6.324

图 3 Al_3Zr 颗粒密度 ρ 与 Zr 含量的关系曲线Fig. 3 Variation of Al_3Zr particles density with Zr content

3) 假定合金位错密度与 Al_3Zr 颗粒密度相当, 则根据式(3), 式中 α_2 值取 0.4。未含 Zr 合金的形变强化值为 τ_1 , 其它合金的强化值可分别计算得到 (见表 2)。

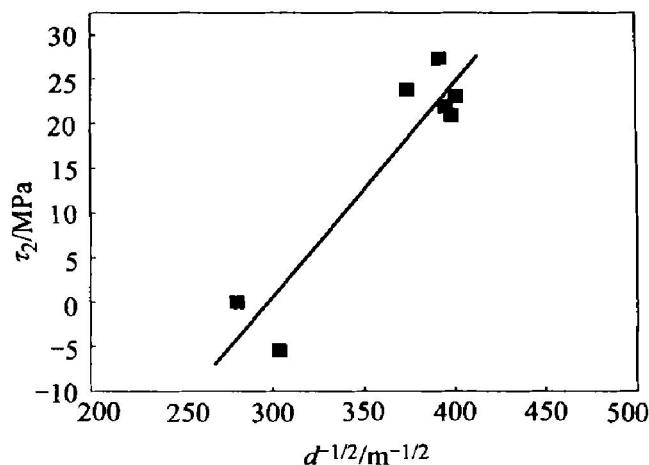
4) 将各含 Zr 合金的总强化值减去弥散强化值及形变强化值, 则余下的为合金晶粒细化引起的强化值。

合金的余下强化值 τ_2 与 $d^{-1/2}$ 的关系如图 4 所示。可见, τ_2 与 $d^{-1/2}$ 基本上呈线性关系, 证明上述分析计算是合理的。

可见, 弥散强化对合金的性能影响最大。对于含 Zr 为 0.16% 的合金, 其弥散强化值达到 35 MPa, 而形变强化值、晶粒细化强化值分别为 14 MPa 和 21 MPa。

4 结论

1) 合金抗拉强度 σ_b 、屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 均随 Zr 含量的增加而增大, 增幅分别达 11.8% 和 12.6%。合金延伸率 δ 在 Zr 添加量不高的情况下, 随着 Zr 含

图 4 合金余下的强化值 τ_2 与 $d^{-1/2}$ 的关系Fig. 4 Relationship between remaining strength τ_2 and $d^{-1/2}$

量的增加而相应地增大, 在 Zr 含量为 0.06% 时出现峰值, 随后逐渐稳定在 8% 左右。

2) 弥散强化因素对合金的性能影响最大。对于 Zr 含量为 0.16% 的合金, 其弥散强化值达到 35 MPa, 而形变强化值、晶粒细化强化值分别为 14 MPa 和 21 MPa。

REFERENCES

- [1] Ryum N. Precipitation and recrystallization in an Al-0.5% Zr alloy [J]. Acta Metallurgica, 1969, 17 (3): 269 - 278.
- [2] Rystad S, Ryum N. A metallographical investigation of the precipitation and recrystallization process in an Al-Zr alloy [J]. Aluminum, 1977, 53(3): 193 - 195.
- [3] Nes E. Precipitation of the metastable cubic Al_3Zr phase in subperitectic Al-Zr alloys [J]. Acta Metallurgica, 1972, 20(4): 499 - 506.
- [4] Nes E. Hot deformation behavior of particle-stabilized structure in Zr-bearing Al alloys [J]. Metal Science, 1979(3/4): 211 - 215.

- [5] Yoshida H, Baba Y. The role of zirconium to improve strength and stress-corrosion resistance of Al-Zr-Mg and Al-Zr-Mg-Cu alloys [J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1982, 23(10): 620-630.
- [6] Mukhopadhyay A K, Yang Q B. The influence of zirconium on the early stages of aging of a ternary Al-Zr-Mg alloy [J]. Acta Metall Mater, 1994, 43(9): 3083-3091.
- [7] Mukhopadhyay A K, Shiflet G J. Role of vacancies on the precipitation process in Zr modified aluminum based alloys [J]. Scripta Metall et Materialia, 1990, 24(1): 307-312.
- [8] Hornbogen E, Starkejr E A. Theory assisted design of high strength low alloy aluminum [J]. Acta Metall mater, 1993, 41(1): 1-16.
- [9] 杨守杰, 谢优华, 朱娜, 等. Zr 对 Al-Zr-Mg-Cu 系超高强铝合金力学性能的影响[J]. 材料研究学报, 2002, 16(4): 406-412.
- YANG Shou-jie, XIE You-hua, ZHU Na, et al. Effects of zirconium on the mechanical properties of a super-high strength aluminum alloy [J]. Chinese Journal of materials research, 2002, 16(4): 406-412.
- [10] 杨守杰, 谢优华, 陆政, 等. Zr 对超高强铝合金时效过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(2): 226-230.
- YANG Shou-jie, XIE You-hua, LU Zhen, et al. Influence of zirconium on aging process in super-high strength aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(2): 226-230.
- [11] 杨守杰, 谢优华, 朱娜, 等. Zr 对高强铝合金锻压组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 152-155.
- YANG Shou-jie, XIE You-hua, ZHU Na, et al. Effects of element zirconium on microstructures of high-strength aluminum alloys forged [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 152-155.
- [12] 谢优华, 杨守杰, 戴圣龙, 等. Zr 对超高强铝合金铸态组织及晶粒度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(S1): 131-135.
- XIE You-hua, YANG Shou-jie, DAI Sheng-long, et al. Influences of element zirconium on cast microstructure and granularity of ultra-high strength aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 131-135.

Mechanical properties and strengthening mechanism of aluminum alloys containing zirconium

XIE You-hua, YANG Shou-jie, DAI Sheng-long, LU Zheng

(The second department, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: The relationship between Zr content and mechanical properties of high strength aluminum alloys was examined, and the strengthening values of several factors were calculated. The values of σ_b and $\sigma_{0.2}$ are improved with increasing of Zr content, and the improving amplitude reach to 11.8% and 12.6% respectively. The elongation δ increases with increasing Zr content while Zr content is low, and reaches a peak at 0.06% Zr, then gradually stabilizes at about 8% Zr. Combined with microstructure of alloys, strengthening mechanism are mainly grain refine, particles dispersion strengthening and improvement of deformation strengthening. The strengthening values of 0.16% Zr alloy is 21, 35, and 14 MPa, respectively.

Key words: zirconium; high strength aluminum alloys; mechanical properties; strengthening mechanism

(编辑 李艳红)