文章编号: 1004-0609(2009)02-0247-05

Zr对 2E12 铝合金显微组织和力学性能的影响

王剑钊¹, 王少华¹, 房灿峰¹, 杨守杰², 戴圣龙², 孟令刚¹, 张兴国¹

(1. 大连理工大学 铸造中心,大连 116024;2. 北京航空材料研究院,北京 100095)

摘 要:研究 Zr 元素对 2E12 铝合金 T4 态显微组织及力学性能的影响。结果表明:添加质量分数 0.3%的 Zr 元 素可以细化合金的铸态组织,使晶粒平均尺寸从 42 μm 降低至 30 μm 左右,并促使晶粒等轴化;锻造过程中 Zr 可以抑制合金的再结晶,防止晶粒长大,改善 2E12-T4 态的显微组织,提高合金的力学性能,其抗拉强度、屈服 强度、伸长率和断面收缩率分别提高 5.4%、11.3%、9.7%和 12.6%;合金的强化机理主要包括晶粒细化、颗粒弥 散强化及形变强化。

关键词: 2E12 铝合金; 锆; 电磁连铸; 显微组织; 力学性能 中图分类号: TG 146.2 文献标识码: A

Effects of Zr on microstructures and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy

WANG Jian-zhao¹, WANG Shao-hua¹, FANG Can-feng¹, YANG Shou-jie², DAI Sheng-long², MENG Ling-gang¹, ZHANG Xing-guo¹

(1. Research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Effects of Zr on microstructures and mechanical properties of 2E12 aluminum alloy were studied. The results show that compared with 2E12 alloy the as-cast microstructures of alloy with 0.3% (mass fraction) Zr can be refined of grain sizes decreasing from 42 µm to 30 µm and characterized with equiaxed grains. Moreover, recrystallization during the forging process can be inhibited. $\sigma_{\rm b}$, $\sigma_{0.2}$, δ and ψ are improved with increasing Zr content, and the improving amplitudes reach 5.4%, 11.3%, 9.7% and 12.6%, respectively. Combined with the microstructures of alloys, the strengthening mechanism are mainly grain-refine, particles dispersion strengthening and improvement of deformation strengthening.

Key words: 2E12 aluminum alloy; Zr; electromagnetic continuous casting; microstructure; mechanical properties

铝合金具有密度小、比强度高、耐蚀性和成型性 好、成本低等一系列优点,在航空、航天、船舶、核 工业及兵器工业等领域都有着广阔的应用前景及不可 替代的地位,因而,铝合金技术被列为国防科技关键 技术及重点发展的基础技术^[1-3]。2E12 铝合金为高纯 Al-Cu-Mg 系合金,是在 2A12(2024)合金的基础上通 过降低 Fe 和 Si 等杂质元素的含量以改善合金的断裂 韧性、疲劳和抗应力腐蚀性能的新型铝合金^[4-6],该合 金首先在波音 777 飞机上获得应用^[7-8],最近又被应用 于 A380 大型客机上,被认为是目前最理想的飞机蒙 皮材料。随着我国航空事业的迅速发展,开发并研制 出具有优良使用性能的飞机蒙皮材料具有重要的经济

基金项目: 国家重点基础研究计划资助项目(2005CB623705); 国家自然科学基金资助项目(50475157)

收稿日期: 2008-05-23; 修订日期: 2008-10-23

通讯作者: 张兴国, 教授; 电话: 0411-84706183; E-mail: zxgwj@dlut.edu.cn

和社会意义。2E12 铝合金的主要强化相是 S(Al₂CuMg) 相和 θ(Al₂Cu)相,该合金主要用于 100 ℃以下的工作 环境,否则,合金性能会因强化相的显著粗化而下 降^[9-10]。因此,仅通过热处理来提高其强度具有很大 局限性,目前,微合金化方法已成为提高 2E12 铝合 金性能的另一个主要方法。1956 年,前苏联学者 Frindlyander 首次在铝合金中添加 Zr 元素。此后,国 内外针对 Zr 在 Al-Zn-Mg-Cu 系合金中的存在形式及 对其组织、性能的影响进行了许多研究。结果表明, 微量 Zr 元素具有细化组织、提高强度和再结晶温度的 作用^[11]。

目前,国内外针对电磁连铸条件下在 2E12 合金 中添加 Zr 元素的研究还很少,而对于其锻件 T4 态的 研究更是未见相关报道。为此,本文作者研究了电磁 连铸条件下 Zr 对 2E12 铝合金铸态组织的细化作用, 并分析 Zr 对 2E12 铝合金锻件 T4 态显微组织及力学 性能的影响。

1 实验

以高纯 Al(99.99%,质量分数)、纯 Mg(99.9%), 及 Al-50%Cu、Al-10%Mn和Al-4%Zr中间合金为原料, 在电磁连铸条件下制备 2E12 及 2E12+0.3Zr 铝合金铸 锭,合金成分列于表 1。

合金在中频感应炉熔化后转移至保温炉中,用氩 气精炼,利用电磁连续铸造技术制备 *d*120 mm×1 000 mm 的铸锭。电磁连铸参数如下:磁场频率 2.5 kHz, 功率 7.5 kW,浇注温度 710~730 ℃,冷却水流量 1.8 m³/h, 拉坯速度 3×10⁻³ m/s。

| 表1 | 实验合金的化学成分 |
|----|-----------|
|----|-----------|

| Table 1 | Chemical | composition | of alloys | (mass fraction, | %) |
|----------|----------|-------------|-----------|-----------------|-----|
| I abit I | Chemical | composition | of alloys | (mass machon, | /0) |

| Alloy | Cu | Mg | Mn | Zr | Fe | Si | Al |
|------------|------|------|------|------|--------|--------|------|
| 2E12 | 4.10 | 1.45 | 0.55 | - | < 0.06 | < 0.06 | Bal. |
| 2E12+0.3Zr | 4.08 | 1.47 | 0.54 | 0.30 | < 0.06 | < 0.06 | Bal. |

1) Al-4Cu-1.4Mg-0.6Mn; 2) Al-4Cu-1.4Mg-0.6Mn-0.3Zr

在铸锭同一部位取尺寸为 d110 mm×150 mm 的 样品,进行均匀化处理(于 490 ℃保温 10 h),经过自 由锻后得到的尺寸为 380 mm×150 mm×25 mm 的锻 件(锻造前 450 ℃保温 4 h)。自由锻过程示意图如图 1 所示。将所得锻件进行热处理,固溶处理后(495 ℃, 保温 60 min)水淬(转移时间小于 15 s),自然时效 96 h, 得到 T4 状态的合金。

将铸态和 T4 态的 2 种合金分别进行磨制、抛光、腐蚀制成金相试样,腐蚀剂为凯氏溶液(95% H₂O、 1.5% HCl、1.0% HF 和 2.5% HNO₃),在 MEFS 型多功 能金相显微镜下观察显微组织。使用 HV-10A 型轻负 荷硬度计测量合金在时效过程中不同时间的硬度,载 荷为 1 MN,加载时间为 30 s。将 T4 态合金制成直径 为 10 mm,标距长为 50 mm 的拉伸试样,在 WDW-100KN 微机控制电子万能机上测试其纵向室 温力学性能。试样拉断后的显微断口分析在 JSM-5600LN 扫描镜上进行。



图1 自由锻加工流程示意图

2 结果及分析

2.1 合金的铸态显微组织

2E12 及 2E12+0.3Zr 合金的典型铸态显微组织如 图 2 所示。其中,图 2(a)所示为 2E12 铝合金的铸态组 织,由于连铸过程中电磁场的电磁搅拌作用,晶粒从 边缘到铸坯中心均匀分布,平均尺寸约为 40 μm,存 在较为明显的枝晶组织。扫描电镜能谱分析显示,在 晶界处富集了主要强化相 *S*(Al₂CuMg)相和 θ(Al₂Cu)

相。添加 0.3%Zr 元素之后,晶粒平均尺寸细化为 30 µm,且合金的铸态组织为均匀的等轴晶,基本消除了 枝晶组织,结果如图 2(b)所示。这表明添加微量的 Zr 元素可以促使铸态晶粒等轴化,消除枝晶偏析,并且 可显著细化合金的铸态晶粒组织。

2.2 合金 T4 态的显微组织

图 3 所示为 2E12 及 2E12+0.3Zr 合金锻件热处理 前后各自的纵向显微组织。铸锭经过锻造加工后,铸 态组织已经全部消失,并具有明显的沿纵向的组织方 向性,如图 3(a)和 3(c)所示。锻件通过热处理得到 T4



图 2 2E12 及 2E12+0.3Zr 合金典型铸态显微组织

Fig.2 Typical as-cast microstructures of 2E12 and 2E12+0.3Zr alloys: (a) Typical as-cast microstructure of 2E12 alloy; (b) Typical as-cast microstructure of 2E12+0.3Zr alloy



图 3 2E12 及 2E12+0.3Zr 合金锻件热处理前后纵向显微组织

Fig.3 Longitudinal microstructures of 2E12 and 2E12+0.3Zr alloys before and after heat treatment: (a) 2E12 alloy after forging; (b) 2E12 alloy under T4 condition; (c) 2E12+0.3Zr alloy after forging; (d) 2E12+0.3Zr alloy under T4 condition

态合金。由图 3(b)和 3(d)可以看出,未添加 Zr 元素的 合金晶粒比较粗大,发生再结晶,添加微量 Zr 元素的 合金纵向组织更加细长、均匀,没有明显的长大倾向, 原因是在均匀化处理和热加工过程中析出 Al₃Zr 粒子, 而 Al₃Zr 能抑制再结晶^[12],保持合金在高温下的稳 定性。

2.3 合金的时效硬化曲线

2E12 及 2E12+0.3Zr 合金在 0~96 h 内的时效硬 化曲线如图 4 所示。由图可以看出,2 种合金都具有 明显的时效硬化特性,时效后硬度分别提高 30%和 34%。此外,2 种合金时效硬化曲线的变化趋势基本 一致,Zr 并没有显著影响合金自然时效过程的硬度, 可见,Zr 对 2E12 合金的自然时效过程没有明显的促 进或延缓作用。





Fig.4 Ageing-hardening curves of 2E12 alloys and 2E12+ 0.3Zr alloy

2.4 合金 T4 态的力学性能

合金的拉伸实验结果如表2所列。由表2可知: Zr 的加入提高材料的力学性能,其抗拉强度提高5.4%, 屈服强度提高11.3%,伸长率提高9.7%,断面收缩率 提高12.6%。Zr的加入细化了合金铸态组织,起到细晶 强化的作用。这里包括2个晶粒细化过程:合金熔炼浇 铸过程中合金铸件晶粒的细化^[13];合金锻压变形后发 生再结晶,由于Al₃Zr 颗粒的钉扎抑制作用而引起的 再结晶晶粒或亚晶的细化^[14]。

霍尔配奇公式为

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \tag{1}$$

式中 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。

由于强化相Al₃Zr在合金均匀化处理和热加工时 弥散析出,其显微硬度很高(>5 GPa),一旦析出,很 难再溶解或聚集,具有较大的弥散强化效果;另一方 面,合金热加工并经热处理后仍为非再结晶组织,变 形过程中产生的大量位错和纤维组织保存下来,具有 很大的形变强化效果。在这2方面的作用下,合金的强 度明显提高^[15]。

表 2 Zr 元素对 2E12 铝合金拉伸性能的影响

| Table 2 Effect of Zr on mechanical properties of 2E12 | 2 alloy |
|---|---------|
|---|---------|

| Alloy | $\sigma_{\rm b}/{ m MPa}$ | $\sigma_{0.2}/\mathrm{MPa}$ | δ /% | ψ /% |
|------------|---------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|
| 2E12 | 445 | 282 | 20.6 | 27.7 |
| 2E12+0.3Zr | 469 | 314 | 22.6 | 31.2 |

在拉伸实验中,从拉伸到最后的断裂整个过程可 以概括为微孔成核、微孔长大和微孔聚合3个阶段, 首先在第二相与基体的交界处形成微孔,微孔由于位 错运动和变形的不协调性逐渐长大,通过"几何软化" 或者微孔与裂纹尖端、或微孔与微孔之间局部滑移的 模式而聚合,直到最后断裂^[16]。图5所示为合金在扫 描电镜下的拉伸断口形貌。由图5可知,2E12合金的 断口韧窝尺寸相对较大,韧窝中有断裂的第二相;相 比之下,添加了微量 Zr 元素的合金断口韧窝分布较均 匀,且尺寸比较细小,数量较多,显示出明显的韧性 断裂特征。



图 5 2E12 及 2E12+0.3Zr 合金 T4 态拉伸断口形貌 Fig.5 Fractural morphologies of 2E12 alloy and 2E12+0.3Zr alloy under T4 condition: (a) 2E12 alloy; (b) 2E12+0.3Zr alloy

3 结论

1) 2E12 合金中添加质量分数为 0.3%的 Zr 元素可 以明显细化其铸态显微组织,使晶粒平均尺寸从 42 μm 降低至 30 μm 左右,并促使铸态晶粒等轴化。

2) Zr 可以提高 2E12 合金的再结晶温度,使得锻 后热处理的合金组织更加细长均匀。

3) 微量 Zr 的加入改善 2E12 合金 T4 态的力学性 能,其中,抗拉强度提高 5.4%,屈服强度提高 11.3%, 伸长率提高 9.7%,断面收缩率提高 12.6%。

REFERENCES

- HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, MOLDENHAUER S, BENEDICTUS R, MILLER W S. Recent development in aluminum alloys for aerospace application[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 280(1): 102–107.
- [2] Staley James T, Liu John, Hunt Warren H Jr. Aluminum alloys for aerostructures[J]. Advanced Materials & Processes, 1997, 10: 17–20.
- [3] 宋 旼, 袁铁锤, 张福勤, 黄伯云, 陈康华. Al-Cu-Mg合金的 断裂韧性与拉伸延性模拟[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1034-1040.
 SONG Min, YUAN Tie-chui, ZHANG Fu-qin, HUANG Bai-yun, CHEN Kang-hua. Modeling on fracture toughness and tensile ductility of Al-Cu-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of
- [4] CASSADA W, LIU J, TALEY J. Aluminum alloys for aircraft structure[J]. Advanced Materials & Processes, 2002, 160(12): 27–29.

Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1034-1040.

- [5] IAU J, KULAK M. A new paradigm in the design of aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science Forum, 2000, 331/337: 127–140.
- [6] ASTMG34 1985. Standard test method for exfoliation corrosion susceptibility in 2xxx and 7xxx series aluminum alloys (EXCO test)[S].
- [7] NAKAI M, ETO T. New aspects of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 285(1): 62–68.
- [8] STARKE E A, STALEYT J T. Application of modern aluminum alloys to aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 1996, 32(2/3): 131–172.
- [9] 张 坤, 戴圣龙, 黄 敏, 杨守杰, 颜鸣皋. 高纯Al-Cu-Mg-Ag 合金的时效析出行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(3):

417-421.

ZHANG Kun, DAI Sheng-long, HUANG Min, YANG Shou-jie, YAN Ming-gao. Ageing precipitation behavior of high purity Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(3): 417–421.

- [10] POLMEAR I J, COUPER M J. Design and development of an experimental wrought aluminum alloy for use at elevated temperatures[J]. Metall Mater Trans A, 1988, 19(4): 1027–1035.
- [11] 孙立明,于化顺,闵光辉,张 静. Zr对Al-Zn-Mg-Cu合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2007,27(5):380-381.
 SUN Li-ming, YU Hua-shun, MIN Guang-hui, ZHANG Jing.

Effects of Zr on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(5): 380–381.

- [12] 谢优华,杨守杰,戴圣龙,卢政.含锆超高强铝合金的研究及发展概况[J].材料导报,2002,16(5):8-10.
 XIE You-hua, YANG Shou-jie, DAI Sheng-long, LU Zheng. Research and development of ultra-high strength aluminum alloys containing zirconium[J]. Materials Review, 2002, 16(5): 8-10.
- [13] 谢优华,杨守杰,戴圣龙,陆 政. 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, LU Zheng. 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.

[14] 杨守杰,谢优华,朱 娜,戴圣龙,陆 政,苏 彬,阎鸣皋. 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, DAI Sheng-long, LU Zheng, SU Bin, YAN Ming-gao. Effects of element zirconium on microstructures of high-strength aluminum alloys forges[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(S1): 152–155.

- [15] 谢优华,杨守杰,戴圣龙,卢政.锴元素在铝合金中的应用
 [J]. 航空材料学报, 2002, 22(4): 56-61.
 XIE You-hua, YANG Shou-jie, DAI Shen-long, LU Zheng.
 Application of element Zr in aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2002, 22(4): 56-61.
- [16] 潘志军,黎文献. 高强铝合金断裂韧性的研究及展望[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 14-17.
 PAN Zhi-jun, LI Wen-xian. Current status and future trends of research on fracture toughness of high strength aluminum alloys[J]. Materials Review, 2002, 16(7): 14-17.

(编辑 龙怀中)