

[文章编号] 1004- 0609(2000)06- 0819- 04

7075 和 2024 铝合金的固溶组织与力学性能^①

陈康华, 刘允中, 刘红卫

(中南工业大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

[摘 要] 研究了升温固溶处理对提高 7075 和 2024 铝合金的结晶相固溶程度和力学性能的影响。升温固溶可使最终固溶温度超过多相共晶温度而不产生过烧组织, 提高结晶相固溶程度。7075 合金的结晶相较 2024 合金的易于固溶。两种合金的力学性能与固溶程度密切相关。强化固溶的 7075 合金强度提高约 20%, 断裂和屈服强度可达 660 MPa 和 606 MPa, 其性能提高的幅度大于强化固溶的 2024 合金。

[关键词] 铝合金; 热处理; 固溶; 力学性能; 第二相

[中图分类号] TG 249. 9

[文献标识码] A

航空、航天等高科技领域的发展要求铝合金具有更高强度、韧性、耐蚀性、抗疲劳性等综合性能。近年来, 调整合金成分、提高纯度、发展新的热处理规范、精确调控合金的组织结构, 成为发展高性能铝合金的重要方向^[1, 2]。

高强铝合金的组织特征为固溶体基体上分布着不同尺度的第二相颗粒, 其中有结晶形成的尺度在微米级以上的粗大化合物颗粒, 凝固后高温沉淀的尺度在微米以下的化合物颗粒和时效析出的尺度在 0.1 μm 以下的化合物微粒^[3]。细小的时效析出相对铝合金基体的强化起主要作用, 而粗大脆性第二相颗粒对基体无强化作用且是应力集中和裂纹萌生之处, 对铝合金的断裂韧性、疲劳性能和应力腐蚀开裂均有显著影响^[3, 4]。如何减少粗大结晶相颗粒是发展高性能铝合金首先需要解决的问题。合金元素和杂质元素含量超过在铝中的极限固溶度即导致粗大的化合物结晶颗粒。因此, 合金成分和纯度对其性能的影响一直为人们所关注, 已累积了大量研究工作^[1, 3, 4]。事实上, 粗大化合物结晶相的形成还与凝固过程有关。通常合金凝固呈现非平衡特征, 即使在平衡状态下处于单相区的固溶体合金, 也因非平衡凝固在最终凝固区域(即晶界处)出现粗大的化合物结晶相^[5, 6]。这类粗大结晶相原则上可通过热处理固溶进入基体。显然, 通过强化固溶过程, 将这类非平衡凝固形成的多相组织尽可能彻底转变为固溶体组织, 充分发挥合金元素的有益作用, 无疑是提高合金力学性能的有效途径。目前人们对热

处理工艺的研究与发展主要集中在时效方面^[2, 7~10], 对固溶过程的研究还很少^[5, 11, 12]。铝合金的固溶应避免过渡液相出现所导致的晶界弱化等组织过烧现象。因此, 在固溶温度有特定限制的情况下, 对不同体系合金如何提高固溶程度和固溶速度是值得深入研究的问题。

作者通过 7075 和 2024 两类合金固溶处理的研究, 初步揭示了固溶程度对合金力学性能的影响并提出了强化固溶的途径。

1 实验方法

1.1 合金的熔炼与铸造

7075 合金按名义成分 Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr(质量分数, %)配料, 2024 合金按名义成分 Al-4.4Cu-1.5Mg-0.6Mn(质量分数, %)配料。其中合金元素 Cu, Mn, Cr 以中间合金形式加入。7075 合金的熔炼温度控制在 700~740 $^{\circ}\text{C}$, 2024 合金的熔炼温度控制在 700~740 $^{\circ}\text{C}$ 。采用 0.2%~0.4% 六氯乙烷(C_2Cl_6)精炼, 静置 10~15 min 后浇入直径 45 mm 的铁模中。

1.2 铸锭的均匀化处理

在传统的常规均匀化工艺基础上, 采用强化均匀化。对于 7075 合金, 先在 462 $^{\circ}\text{C}$ 保温 24 h, 再以 0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的升温速度升至 470 $^{\circ}\text{C}$, 然后空冷。对于 2024 合金, 则先在 485 $^{\circ}\text{C}$ 保温 12 h, 再以 0.66 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的升温速度升到 495 $^{\circ}\text{C}$, 然后空冷。

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划项目(G1999064900); 高等学校骨干教师资助项目

[收稿日期] 2000- 02- 15; [修订日期] 2000- 07- 24

[作者简介] 陈康华(1962-), 男, 教授, 博士。

1.3 热挤压

挤压变形在 500 t 压机上进行, 挤压前铸锭预热温度为 400~430 °C, 挤压模直径为 45 mm, 挤压嘴直径为 15 mm, 变形系数为 9, 适当控制挤压速度以保证变形组织的均匀性。

1.4 挤压变形组织的强化固溶及时效处理

分别采用常规固溶和强化固溶两种处理制度。对于 7075 合金, 常规固溶: 466 °C 保温 2 h; 强化固溶: 466 °C 保温 2 h 后, 再以 4 °C/h 升温至 476 °C, 室温水淬。淬火后立即进行 T6 人工时效, 即 120 °C 保温 24 h。对于 2024 合金, 常规固溶: 493 °C 保温 2 h; 强化固溶处理: 先在 493 °C 保温 2 h, 然后以 6 °C/h 升温至 506 °C, 室温水淬, 再立即进行 T6 人工时效, 即 191 °C 保温 12 h。

1.5 组织观察与力学性能测试

用光学显微镜观察铸锭均匀化前后以及挤压态固溶后再时效的显微组织特征, 并用 Instron 8032 万能电子拉伸仪检测合金的强度和延伸率。

2 实验结果

2.1 7075 合金固溶组织特征及对力学性能的影响

如图 1(a) 所示, 铸态 7075 合金的晶内、晶界处均存在较多的粗大第二相, 尤其是沿晶界处连续分布着共晶组织。共晶化合物相为 S (CuMgAl_2) 和

$T(\text{AlZnMgCu})$ ^[6]。这种共晶相严重影响合金的强度和塑性。经过高温长时间强化均匀化处理, 第二相的数量、尺寸有所减少, 但共晶相仍只能部分溶入基体(见图 1(b))。均匀化处理后的铸坯经热挤压变形后, 采用 7075 合金常规的固溶条件处理, 仍保留了部分粗大第二相粒子, 如图 1(c) 所示。这说明常规条件下 7075 合金的均匀化和固溶处理是不彻底的。在常规固溶处理的基础上, 逐步升温固溶, 直至超过多相共晶温度(475 °C)^[13]。从图 1(d) 可见, 升温固溶的合金中绝大部分粗大的第二相已溶入 $\alpha(\text{Al})$ 基体, 且无形成过渡液相和过烧组织的迹象。这说明传统的固溶温度极限——多相共晶点是可以突破的, 这为提高铝合金共晶相的固溶程度提供了简易方法。

从表 1 可见, 采用强化均匀化和强化固溶处理后, 7075 合金的断裂强度和屈服强度均有较大幅度的提高, 同时仍能保持延伸率基本不变。通过比较可知, 固溶程度的提高和固溶组织的改善是提高力学性能的根本原因。

2.2 2024 合金固溶组织特征及对力学性能的影响

如图 2(a) 所示, 由于非平衡凝固, 2024 合金铸态组织中有大量的共晶沿晶界分布, 其中共晶化合物相分别为 S 相和 θ 相^[6]。要提高该合金的力学性能, 必须尽可能地将 S 相和 θ 相溶入 $\alpha(\text{Al})$ 基体中。从图 2(b) 可见, 经过常规均匀化处理, 晶界和晶

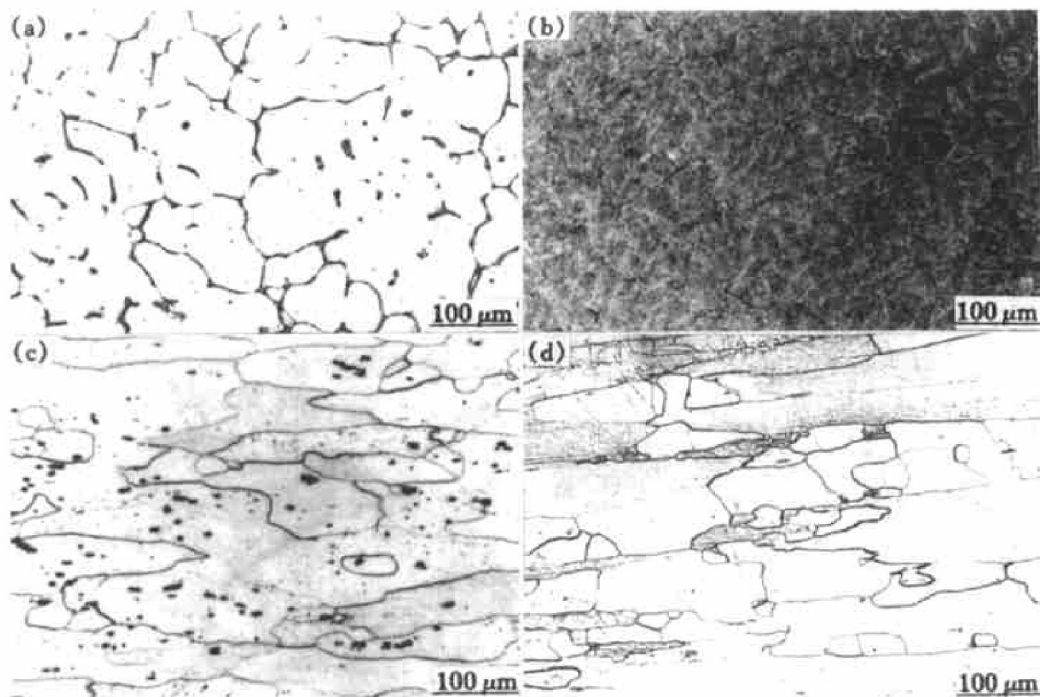


图 1 7075 合金的显微组织

Fig. 1 Microstructures of 7075 alloys

(a) —As-cast; (b) —Enhanced homogenization treated;

(c) —General solution and T6 age treated; (d) —Enhanced solution and T6 age treated

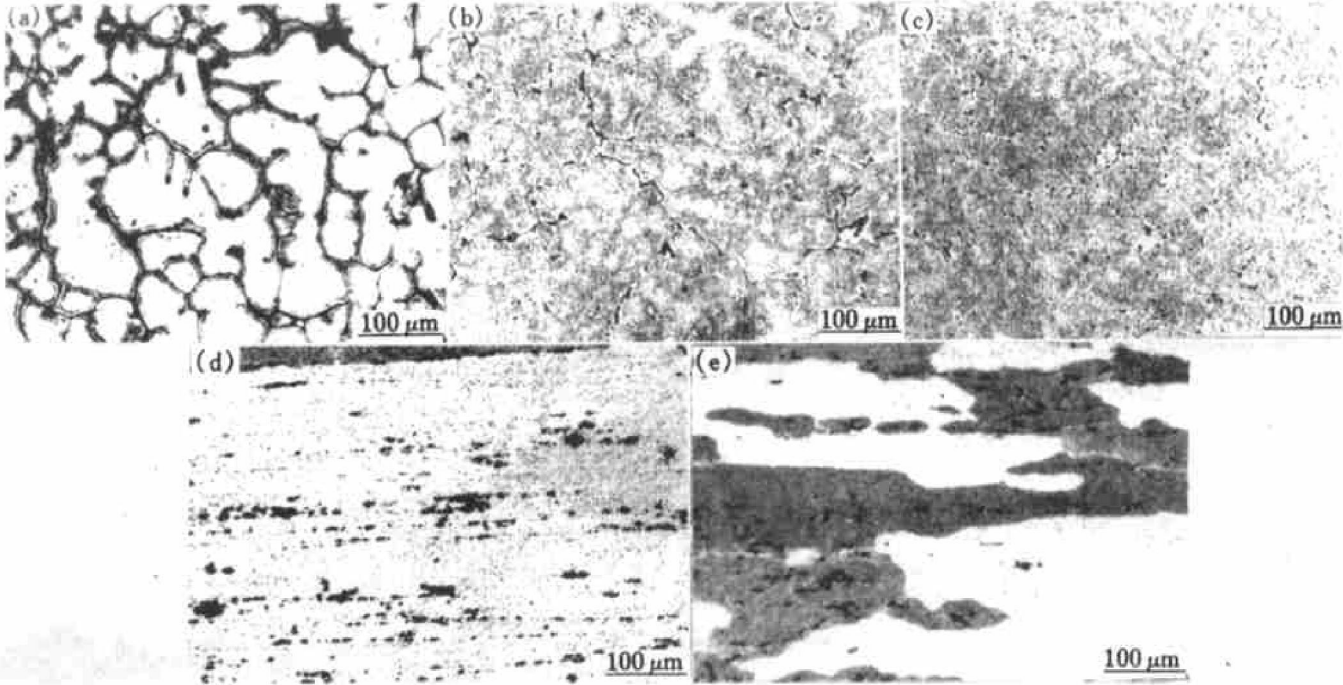


图 2 2024 合金的显微组织

Fig. 2 Microstructures of 2024 alloys

(a) —As cast; (b) —General homogenization treated; (c) —Enhanced homogenization treated;
(d) —General solution and T6 age treated; (e) —Enhanced solution and T6 age treated

表 1 强化固溶对 7075 合金力学性能的影响

Table 1 Effect of enhanced solution heat treatment on mechanical properties of 7075 alloy			
Solution heat treatment	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
General solution	605	523	13.6
Enhanced solution	669	606	10.1
General solution (US standard ^[14])	572	503	11

内仍有大量粗大的第二相。而经强化均匀化处理的组织中第二相尺寸有所减小,但数量仍很多(见图2(c))。对热挤压棒作不同程度的固溶处理,通过比较可见,强化固溶相对于常规固溶,其显微组织中粗大的第二相尺寸减小,数量也有所减少,如图2(d)和图2(e)所示,但仍有部分粗大的第二相未溶入。与7075合金相比,2024合金中第二相的固溶不易完全。与此相对应,经强化固溶处理的2024合金的力学性能比常规处理有所改善,但提高的幅度较小,如表2所示。

表 2 强化固溶对 2024 合金力学性能的影响

Table 2 Effect of strengthening solution on mechanical properties of 2024 alloy			
Solution heat treatment	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
General solution	422	331	10.3
Enhanced solution	436	347	10.1

3 分析与讨论

将7075合金固溶组织与力学性能相对照,可见该合金的力学性能与固溶程度密切相关。粗大的第二相颗粒完全溶入基体中,既消除了大尺度的断裂源,同时也增加了析出强化相的数量,这必然导致合金力学性能的显著提高。经强化固溶处理的2024合金组织与常规固溶相比,虽然粗大第二相的数量有所减少,但仍未能完全固溶,即这类大尺度的断裂源并未消除,以致强化固溶后2024合金的性能改善幅度较7075合金小。因此,强化粗大第二相的固溶使之完全溶解是优化合金性能的方向。

如前所述,由于非平衡凝固,铝合金的铸态组织大多在晶界处存在共晶。从相图^[13]可见,7075合金在共晶温度时处于单相固溶区内,其成分远离极限溶解度曲面,因此非平衡凝固过程形成的共晶数量较少。此外,由于7075合金的平衡初熔温度远高于共晶温度,在逐步升温强化固溶过程中 T 相先溶入基体^[5, 6],从而使得最终固溶温度可明显超过多相共晶温度。从相图^[6]可见,2024合金成分接近极限溶解度曲面,非平衡凝固所形成的低熔共晶相($\alpha(\text{Al}) + \theta$)共晶和($\alpha(\text{Al}) + \theta + S$)共晶数量较多,并且平衡初熔温度接近四相共晶温度,固溶温度不能明显超过多相共晶温度。此外, θ 相因含较多的铜,比 S 相和 T 相难溶^[5]。这两方面因素决定

了 7075 合金较 2024 合金易完成固溶处理。根据以上的分析, 为强化固溶过程, 对 7075 合金可采用高温固溶制度, 而对 2024 合金宜采用延时固溶制度。

[REFERENCES]

- [1] Imamura T. Current status and trend of applicable material technology for aerospace structure [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1999, 49(7): 302–309.
- [2] Lukasak D A and Hart R M. Strong aluminum alloy shaves airframe weight [J]. Advanced Materials & Processes, 1991, 10: 46.
- [3] Hahn G T and Rosenfield A R. Metallurgical factors affecting fracture toughness of aluminum alloys [J]. Metall Trans A, 1975, 6A: 653.
- [4] Nakai M and Etoh T. Effect of the morphology of constituents and dispersoids on fracture toughness and fatigue crack propagation rate in 2024 aluminum alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1995, 45: 677.
- [5] Zwickau E C and Freiberg U T. Possibilities for the calculation heat treatment diagrams for industrial AlZnMg (Cu) alloys [J]. Aluminium, 1999, 75: 90–96.
- [6] Metallographic Photos Editing Group(金相图谱编写组). Metallographic Photos of Plastic Deformed Aluminum Alloys(变形铝合金金相图谱) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1975. 90–175.
- [7] Shih H C, Ho N J and Huang J C. Precipitation behaviors in Al-Cu-Mg and 2024 aluminum alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27A: 2479–2493.
- [8] Smith G W. Precipitation kinetics in solutionized aluminum alloy 2124: Determination by scanning and isothermal calorimetry [J]. Thermochemica Acta, 1998, 317: 7–23.
- [9] Park J K and Ardell A J. Effect of retrogression and reaging treatments on the microstructure of Al-7075-T651 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15A: 1531–1543.
- [10] Ohnishi T, Hamamoto T, Tsbakino H, et al. Stress corrosion cracking of RRA-treated 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1993, 43: 308–313.
- [11] ZENG Sirmin(曾苏民). 影响铝合金固溶保温时间的多因素相关规律 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(1): 79.
- [12] Uchida H and Yoshida H. Heat treatment of aluminum alloys [J]. Sumitomo Light Metal Technical Reports, 1997, 38: 177.
- [13] HU De-ling(胡德林) and ZHANG Fan(张帆). Phase Diagrams of Ternary Alloys(三元合金相图) [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. 98–178.
- [14] WU Gong(武恭), YAO Liang-jun(姚良均), LI Zhe-r-xia(李震夏), et al. Handbook of Aluminum and Aluminum Alloys(铝及铝合金材料手册) [M]. Beijing: Science Press, 1994. 256.

Microstructure and mechanical properties of enhanced solution treated 7075 and 2024 aluminum alloys

CHEN Kang-hua, LIU Yun-zhong, LIU Hong-wei

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The effects of enhanced solution of second phases on the microstructure and mechanical properties of alloys 7075 and 2024 were studied. The results show that the temperature-incremental solution treatment can make the final solution temperature higher than the multi-phase eutectic temperature without the formation of overheated microstructure, and improve the second phase solution. In contrast to alloy 2024, the second phases in alloy 7075 can dissolve more completely. The mechanical properties of these two alloys depend considerably on the second phase solution. By incremental solution treatment, the ultimate tensile strength and yield strength of 7075 alloys can be raised about 20%, to 660 MPa and 606 MPa respectively.

[Key words] aluminum alloy; heat treatment; enhanced solution; mechanical properties; second phases

(编辑 袁赛前)