

[文章编号] 1004- 0609(2000)03- 0330- 04

分级时效和冷热循环对 2024 铝合金微塑变抗力的影响^①

邵 华¹, 刘兆晶¹, 刘 君¹, 李凤珍¹, 武高辉², 杨 峰²

(1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150001)

[摘 要] 用正交试验方法研究了 2024 铝合金的分级时效工艺, 优选出了一种能获得均匀、弥散分布的沉淀强化相以改善铝合金的常规力学性能的分级时效工艺: 100 ℃, 2 h+ 190 ℃, 2 h。通过将优化的分级时效工艺和冷热循环工艺相结合, 可提高 2024 铝合金的常规力学性能和微塑变抗力。通过 TEM 观察探讨了分级时效对冷热循环以后 2024 铝合金性能的影响机制。

[关键词] 分级时效; 冷热循环; 微屈服强度; 铝合金

[中图分类号] TG156.92

[文献标识码] A

精密仪表制造业对结构材料的尺寸稳定性要求极高。影响材料尺寸稳定性的因素很多, 如外加载荷的作用、材料的组织变化以及残余应力的松弛等。为提高材料尺寸稳定性, 国内外学者针对以上诸因素, 在选材、稳定化处理等方面做了大量的研究工作^[1], 但对分级时效对 2024 铝合金的微塑变抗力的影响机制研究较少^[2~6]。本文以 2024 铝合金为对象, 通过正交试验优选出了分级时效工艺, 获得了均匀、弥散分布的沉淀强化相, 改善了 2024 铝合金的常规力学性能, 同时将优化的分级时效工艺和冷热循环工艺相结合, 提高了 2024 铝合金的微塑变抗力。

1 试验方法

固溶处理在盐浴炉中进行, 工艺为 495 ℃, 30 min, 水淬。预时效在 PHO-30 型电热恒温箱中进行, 终时效在 GD65-1 型恒温箱中进行。冷热循环处理采用 190 ℃, 4 h~ -196 ℃, 2 h, 循环三次。

硬度试样的尺寸为 $d 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 在 Hv-120 维氏硬度计上测定试样的硬度值。板状拉伸试样的有效尺寸为 $21 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 在 INSTRON118 电子拉伸机上测试宏观抗拉强度和屈服强度。采用循环加-卸载法, 每次加载递增 100 N, 测试微屈服强度。TEM 试样经机械减薄后, 用 10%+90% 乙酸电解液电解减薄, 然后用双喷法制备成 TEM 试样, 在 H800 型电子显微镜上进行 TEM 观察。

2 结果及分析

2.1 分级时效对 2024 铝合金维氏硬度的影响

本文选用 $L_9(3^3)$ 正交设计试验方案, 如表 1 所示, 因素 A, B 和 C 分别为预时效温度、预时效时间和终时效时间, 分别取 3 个水平, 终时效温度取 190 ℃, 各种因素对维氏硬度的影响可以根据表 1 反映出来, 表 1 中 R 为极差, 反映各因素对性能的影响大小。由表 1 可以看出, 各因素对 2024 铝合金维氏硬度的影响重要性次序为: $B > A > C$ 。各因素中不同水平的优劣顺序为:

A: $II_A > III_A > I_A$

表 1 正交试验方案及试验结果

Table 1 Orthogonal test design and results

No.	A Pre ageing treatment temperature/ ℃	B Pre ageing treatment time/ h	C Final ageing treatment time/ h	HV
1	80	2	2	116.33
2	80	4	4	107.94
3	80	6	6	98.37
4	100	2	2	116.45
5	100	4	4	109.58
6	100	6	6	110.54
7	120	2	2	113.49
8	120	4	4	105.17
9	120	6	6	109.84
I_j	346.64	346.27	331.71	
II_j	336.57	322.69	331.01	
III_j	323.50	313.52	319.99	
R_j	13.93	32.52	11.72	

① [收稿日期] 1999- 07- 05; [修订日期] 1999- 11- 10

[作者简介] 邵 华(1974-), 男, 博士研究生。

$B: I_B > II_B > III_B$

$C: I_C > II_C > III_C$

综合考虑各因素的重要性及各因素中不同水平的优劣,初步确定最佳工艺为: $II_A I_B I_C$, 即: 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h。为了对试验的可靠性进行验证,进行了以下4种工艺的试验:

工艺 1: 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h

工艺 2: 100 °C, 2h+ 190 °C, 6h

工艺 3: 190 °C, 6h

工艺 4: 190 °C, 20h

试验结果见图 1。可以看出分级时效工艺 1 的维氏硬度值为最高,这一结果和正交试验得出的结果完全吻合。所以确定最佳分级时效工艺为: 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h。

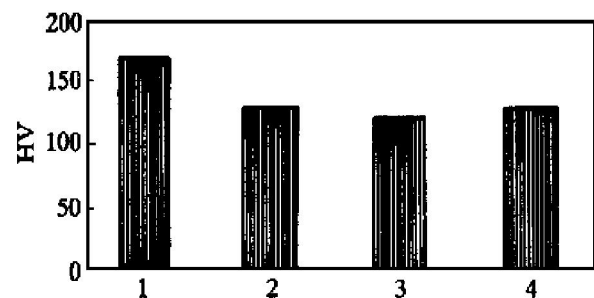


图 1 正交试验验证性试验结果

Fig. 1 Verification result of orthogonal test design

2.2 分级时效对 2024 铝合金微塑变抗力的影响

为了比较各工艺对 2024 铝合金的 σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 的影响,对经各工艺处理后的试样进行了宏观拉伸性能测试,并对各工艺后经冷热循环处理(分别为工艺 1a, 2a, 3a, 4a)的试样,测试其微屈服强度 σ_{mys} ,其结果分别见图 2 和图 3。从图中可见,工艺 1 的宏观拉伸性能和经过 3 次冷热循环后(工艺 1a)的微屈服强度值明显高于其它 3 种工艺,可见分级时效和冷热循环能够同时提高 2024 铝合金的宏观拉

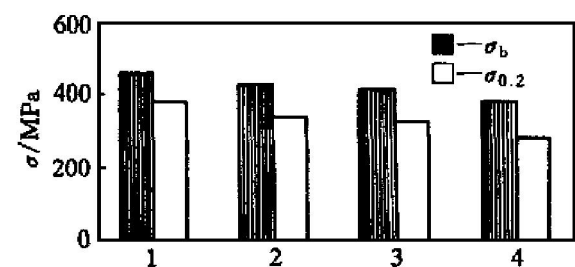


图 2 经不同工艺处理后材料的宏观拉伸性能

Fig. 2 Macroscopic tensile properties of material after different ageing treatments

1—100 °C, 2h+ 190 °C, 2h; 2—100 °C, 2h+ 190 °C, 6h;
3—190 °C, 6h; 4—190 °C, 20h

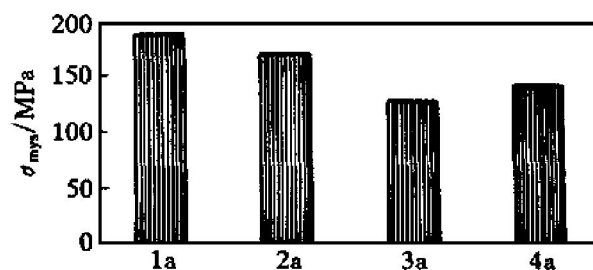


图 3 经不同工艺处理后材料的微屈服强度值

Fig. 3 Micro-yield strength of material treated with thermal cooling cycling after different ageing treatment

1a—Ageing of 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h, and thermal cooling cycling for 3 times; 2a—Ageing of 100 °C, 2h+ 190 °C, 6h, and thermal cooling cycling for 3 times; 3a—Ageing of 190 °C, 6h+ thermal cooling cycling for 3 times; 4a—Ageing of 190 °C, 20h+ thermal cooling cycling for 3 times

伸性能和微塑变抗力。

2.3 分级时效后 2024 铝合金的微观组织观察和分析

2024 铝合金经自然时效后原始态组织中有少量由空位崩塌形成的位错环和蜷线位错以及不规则分布的夹杂相(如图 4(a)所示),组织中没有 θ' 和 S' 沉淀相。经 190 °C, 6h 单级时效处理后的组织中观察到有 θ' 相和 S' 相优先沿位错析出,且分布不均匀,如图 4(b)所示。而经优化工艺 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h 处理后的组织中有较 190 °C, 6h 单级时效明显细化的 S' 相,且 S' 相均匀弥散地分布在晶内,如图 4(c)所示。由此可以看出,预时效能够在 2024 铝合金中形成弥散分布的 G. P 区,从而作为下一级时效时 S' 沉淀相形核和长大的核心,最终使 2024 铝合金经分级时效后形成细小弥散分布的 S' 沉淀相。对 2024 铝合金不同时效工艺的宏观性能测试结果(见图 1 和图 2)表明,2024 铝合金经优化工艺 100 °C, 2h+ 190 °C, 2h 处理后的性能明显高于自然时效和单级时效。综上所述,2024 铝合金经优化工艺处理后组织中析出了均匀弥散分布的 S' 沉淀相,提高了第二相的强化相作用。

2.4 分级时效和冷热循环后 2024 铝合金微观组织观察和分析

从图 5(a)可以看出,经 190 °C, 6h 单级时效后再经冷热循环处理的显微组织中,位错密度略有增加,位错组态趋于稳定, θ' 相和 S' 相在位错线上进一步析出。从图 5(b)中可以观察到在经 100 °C, 2h+ 190 °C, 6h 分级时效再经冷热循环处理的显微组

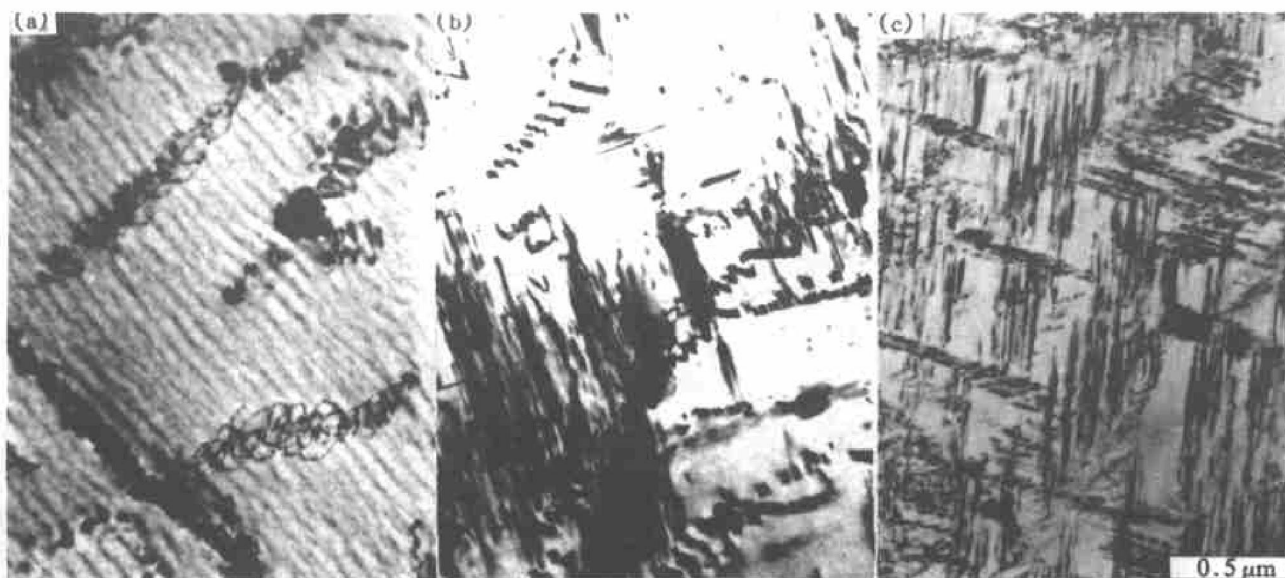


图 4 经不同工艺处理后试样的 TEM 照片

Fig. 4 TEM photographs of 2024 Al alloys after different ageing treatments

(a) —Original state; (b) —190 °C, 6 h; (c) —100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h

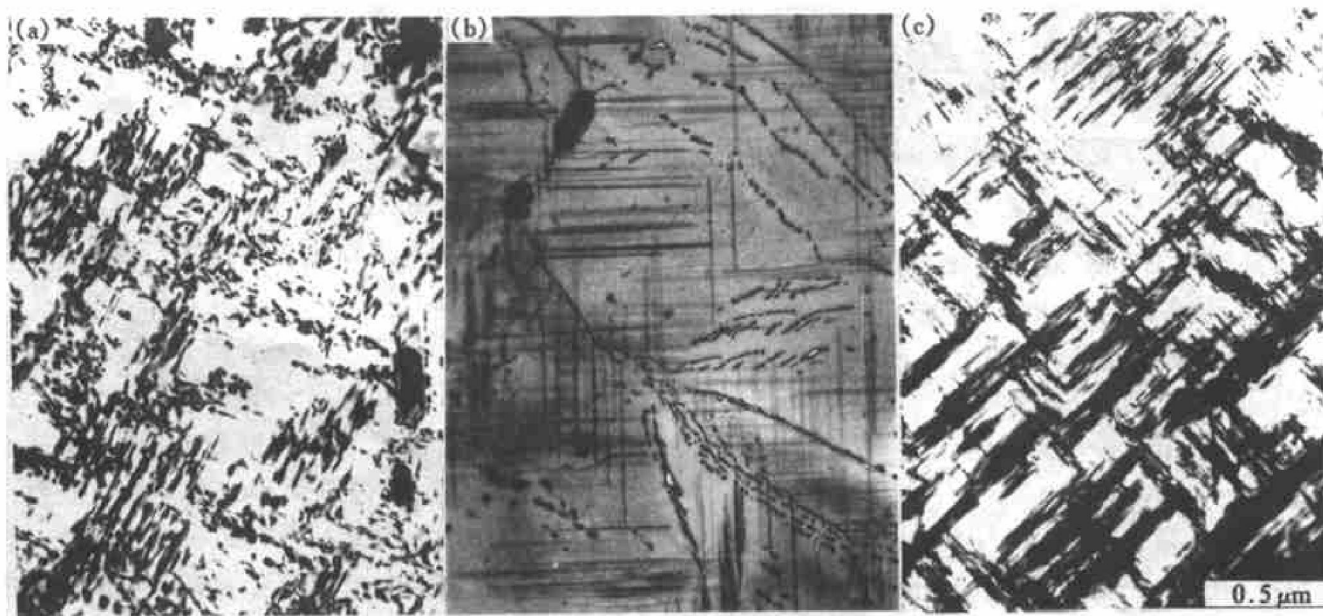


图 5 经不同工艺处理后试样的 TEM 照片

Fig. 5 TEM photographs of 2024 Al alloys after different ageings and thermal-cooling cyclings

(a) —190 °C, 6 h+ thermal-cooling cycling three times;
(b) —100 °C, 2 h+ 190 °C, 6 h+ thermal-cooling cycling three times;
(c) —100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h+ thermal-cooling cycling three times

织中, 位错增殖, 缠结成网状结构, 沉淀相在位错线上进一步长大, 此时 S' 相在晶内仍均匀、弥散分布。而在经100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h分级时效后再经冷热循环处理的合金显微组织中, S' 相较经100 °C, 2 h+ 190 °C, 6 h预处理后再冷热循环处理的合金析出数量更多, 而位错结构没有太大的变化, 如图5(c)所示。在冷热循环以后的合金显微组

织中, 析出相的形态、大小以及分布与时效后没有明显的变化, 由此可见预处理过程对沉淀相的分布、数量及大小起着主要作用。通过冷热循环处理, 位错密度略有上升, 位错缠结加强, 位错滑移阻力提高, 因而冷热循环有利于提高材料的宏观性能及微屈服强度。用优化的分级时效工艺作为冷热循环的预处理, 不仅可以提高材料的宏观拉伸性

能, 而且能够提高其微屈服强度(如图 4 所示)。

3 结论

1) 通过正交试验, 优选出 2024 铝合金的最佳分级时效工艺为: 100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h。经这一工艺处理后, 2024 铝合金的维氏硬度较经单级时效处理的有明显提高。

2) 分级时效与单级时效相比, 经前者处理的铝合金显微组织中的沉淀相较经后者处理的更为弥散、均匀。

3) 对经 100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h 分级时效处理的 2024 铝合金再经 190 °C, 4 h~ - 196 °C, 2 h 三次冷热循环处理, 材料的微屈服强度明显高于以单级时效为预处理后再冷热循环处理的铝合金微屈服强度。

[REFERENCES]

[1] Marschall C W and Maringer R. Dimensional Instability

[M]. New York: Pergamon Press, 1977.

[2] ZHANG Fan(张 帆) and JIN Cheng(金 城). 2024 铝合金微屈服行为[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1998, 8(Suppl. 1): 136- 140.

[3] ZHANG Li-ning(张力宁), ZHU Ping(朱 平) and ZHOU Jin-yin(周锦银). 金属微应变抗力及其影响因素分析[J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1990, 26(3): B208- B212.

[4] ZHU Ping(朱 平) and ZHANG Li-ning(张力宁). 1Cr18Ni9Ti 微塑性变形行为的研究[J]. Acta Metallurgica Sinica(金属学报), 1989, 25(6): B410- B413.

[5] LI Zhi-lin(李至林), LIU Wei(刘 伟) and YAO Zhong-kai(姚忠凯). SiC_w/Al 复合材料的尺寸稳定性及其尺寸稳定化处理工艺[J]. Technology of Hot Working(热加工工艺), 1997, 6: 5- 7.

[6] LI Ren-shun(李仁顺), CHEN Xiang-ping(陈想平) and HE Jun(何 军). 分级时效对 Al-Li 合金抗应力腐蚀性能的影响[J]. Acta Aersp(宇航学报), 1992, 4: 27 - 33.

Influence of ageing and thermal-cooling cycling treatments on microplastic deformation resistance of 2024 Al alloy

SHAO Hua¹, LIU Zhao-jing¹, LIU Jun¹, LI Feng-zhen¹, WU Gao-hui², YANG Feng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, P. R. China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China)

[Abstract] The step-stage ageing processes of 2024 Al alloy were investigated by means of orthogonal test methods. A better double-stage ageing procedure of 100 °C, 2 h+ 190 °C, 2 h was chosen out of several methods. Following this route, the precipitates disperse homogeneously in the alloy, and the mechanical properties are obviously improved. The mechanical properties and the microyield strength of 2024 Al alloy are improved by thermal-cooling cycling treatment following double-stage ageing. The influence mechanism of double-stage ageing on the properties of 2024 Al alloy after thermal-cooling cycling treatment was observed by TEM.

[Key words] double-stage ageing treatment; thermal-cooling cycle; microyield strength; aluminum alloy

(编辑 袁赛前)