

2A23 时效成形铝合金的时效研究

Investigation on Aging of 2A23 Alloy for Age forming

郭昀抒¹, 潘清林¹, 聂 波², 何振波², 尹志民¹

(1 中南大学 材料科学与工程学院,

长沙 410083; 2 东北轻合金有限责任公司, 哈尔滨 150060)

GUO Yun-shu¹, PAN Qing-lin¹, NIE Bo², HE Zhen-bo², YIN Zhi-min¹

(1 School of Materials Science and Engineering, Central South University,

Changsha 410083, China; 2 Northeast Light Alloy Co., Ltd., Harbin 150060, China)

摘要: 通过拉伸性能、维氏硬度测试和 TEM 分析研究了 2A23 时效成形铝合金的时效制度以及不同时效处理制度下该合金的显微组织和力学性能。结果表明: 合金适宜的时效温度为 170℃, 时效时间为 20h; S' 过渡相为合金的主要强化相; 时效前的预变形能促进 S' 相细小弥散析出, 显著提高合金的强度; 合金的强度随预变形量的增大而升高, 但过大的预变形量又会导致塑性下降; 合金最佳的预变形量为 2.5%~5%。

关键词: 2A23 铝合金; 预变形; 时效; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)01-0037-04

Abstract: Tensile test, Vickers hardness test and TEM analysis were used to study the aging treatments and the microstructures and mechanical properties under different aging treatments of 2A23 aluminum alloy for age forming. The results show that the suitable aging temperature is 170℃ and aging time is 20h. S' phase is the main strengthening phase of the alloy. The predeformation before aging can make S' (Al_2CuMg) precipitation distribute more dispersively and homogenously, thus can greatly improve tensile strength. The strength of the alloy improves with the increasing of predeformation, but over predeformation resulted in the decreasing of the plasticity of the alloy. The favorable predeformation is about 2.5%-5%.

Key words: 2A23 aluminum alloy; predeformation; aging; microstructure; mechanical property

时效成形是为了降低飞机制造成本并提高铝合金性能而开发的新型成形技术。该技术是将人工时效和加工成形相结合, 利用铝合金在弹性应力作用下于一定的人工时效温度时效时发生蠕变变形, 从而得到具有一定形状的结构件, 同时利用时效处理得到铝合金所需的性能^[1-3]。这一技术在航空曲面结构件的制造上具有很好的应用潜力, 主要用于飞机上形状较复杂的弧面板形结构件的制造, 如飞机机翼的上、下蒙皮等^[4,5]。与传统的冷滚弯以及铆接组装技术相比, 时效成形技术一方面明显简化了加工流程, 可以节省模具, 降低加工费用; 另一方面, 降低了合金发生加工裂纹的几率, 使机翼翼面的强度、耐疲劳及应力腐蚀能力有所提高^[6]。

目前, 商务飞机机翼下翼面主要采用耐损伤性能较好的 2024-T351 铝合金制造, 然而采用时效成形工艺制造, 在人工时效条件下, 将改变 2024 铝合金的微观组织结构, 恶化其耐损伤性^[7]。针对这一问题, 欧美

等国在 2xxx 系合金中展开了大量的研究, 设计了一系列适于时效成形的铝合金, 法国申请了一种适于制造大型商务机下翼面的 Al-Cu-Mg 系铝合金专利, 该合金具有良好的时效成形性^[8]。英国 Southampton 大学也设计了一系列含 Zr, Li, Sc 的 Al-Cu-Mg 系时效成形铝合金, 并研究了它们的时效工艺^[7]。国内在时效成形铝合金及其时效成形性方面的研究刚刚起步, 东北轻合金有限责任公司、东北大学和中南大学等共同设计了牌号为 2A23 含微量 Zr, Mn 的 Al-Cu-Mg 系时效成形铝合金。本工作即以 2A23 铝合金为对象, 重点研究了该合金的时效制度以及不同时效处理制度下合金的组织与性能, 为合金后续时效成形性的研究制定合理可行的预变形和时效工艺。

1 材料与实验方法

实验采用的 2A23 时效成形铝合金的成分为 Al-

2.24Cu-0.94Mg-0.58Mn-0.14Zr (质量分数/%)，该合金的冷轧板材由东北轻合金有限责任公司采用半连续铸造技术制备的铸锭经均匀化处理后热轧、冷轧而成，厚度为 2mm。力学性能测试沿轧向截取试样。试样在箱式电阻炉中加热到 490℃ 固溶处理 40min，水淬，然后进行冷轧变形，预轧变形量(ε) 分别为 1%，2.5%，5%，7%，在电热鼓风干燥箱中进行不同温度和时间时效处理。合金室温拉伸力学性能测试在 CSS-44100 电子万能试验机上进行，拉伸速度为 2mm/min。合金的硬度在 401MVDTM 数显显微维氏硬度计下测定，加载载荷为 0.2kg (1.96N)，加载时间为 10s。TEM 组织观察在 TECNAI G² 20 电镜上进行，加速电压为 200kV，透射电镜样品采用电解双喷减薄，电解液为硝酸与甲醇混合液(体积比为 1:3)，温度为-30℃。

2 实验结果

2.1 合金的时效硬化特征

图 1 为合金在 490℃/40min 固溶处理，经 2.5% 的预轧变形后，不同时效状态的硬化曲线。由图 1 可以看出，合金具有明显的时效硬化效应。在时效初期，合金硬度升高；随着时效时间的延长，达到峰值后开始下降。不同温度下时效，合金表现出不同的时效动力学特性：150℃ 时效，20h 之前合金硬度上升非常缓慢；20h 之后硬度上升较快，并在 24h 达到峰值(127HV)；

170℃ 时效，硬度随时间的延长而逐渐升高，20h 达到峰值(131HV)，随后缓慢下降；190℃ 时效，合金硬度达到峰值的时间提前到 12h，其硬度值为 124HV，低于 170℃ 和 150℃ 时效的峰值硬度。对比不同温度下的时效硬化曲线可以看出，合金在 170℃ 时效 20h 获得最大的硬度，合金适宜的时效制度为 170℃ 时效 20h。

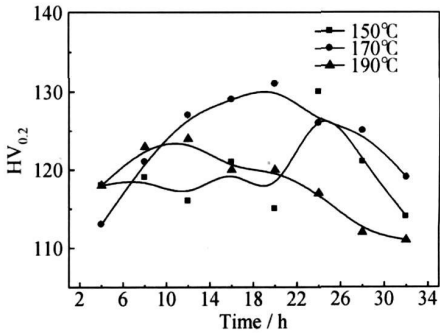


图 1 合金不同时效处理下的硬度曲线

Fig. 1 Aging hardness curves of the alloy under different aging treatment

2.2 时效过程中合金的微观组织

图 2 为合金经 490℃/40min 固溶、冷水淬火及 2.5% 预变形后，于不同时效制度时效后的 TEM 显微组织。由图 2 可以看出，合金经 150℃ 时效 20h，晶内除少量均匀化处理和热轧加热过程中析出的粗大短棒状 T (Al₂₀Cu₂Mn₃) 相外^[9]，只有极少量的强化相析出(图 2a)；合金在 170℃ 时效 4h，除 T 相外晶内比较干

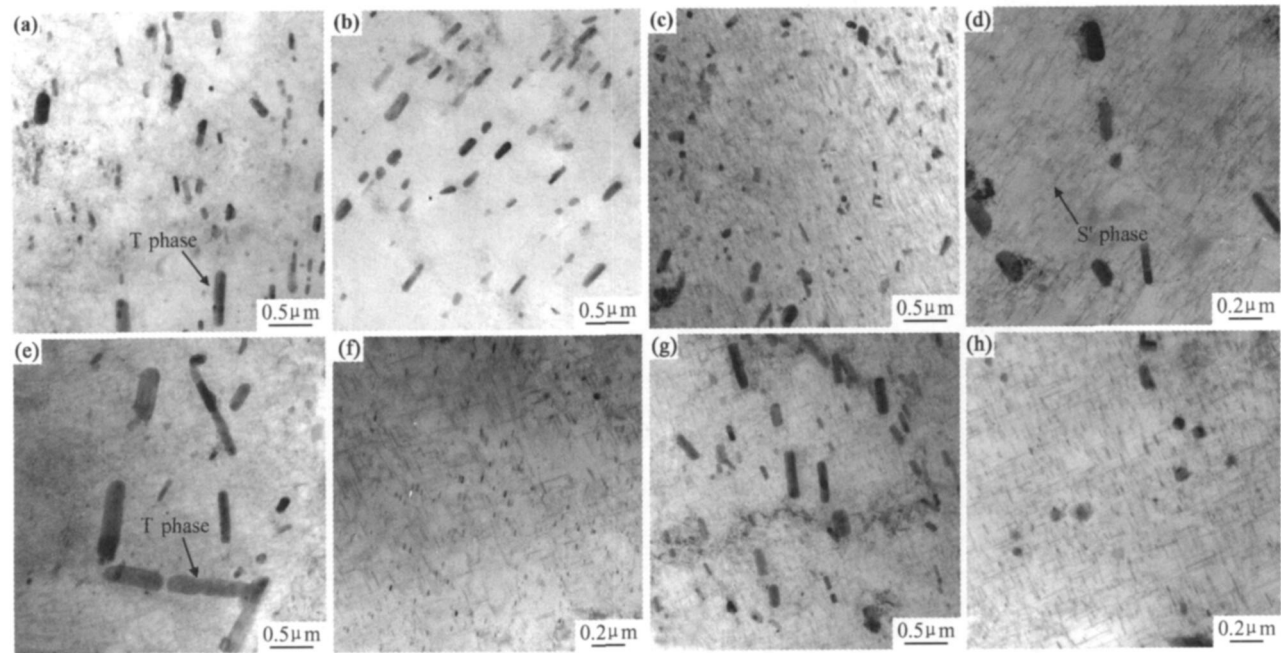


图 2 2A23 合金经不同时效处理的 TEM 显微组织

(a) 150℃/20h; (b) 170℃/4h; (c), (d) 170℃/20h; (e), (f) 170℃/32h; (g), (h) 190℃/20h

Fig. 2 TEM images of 2A23 alloy under different aging treatment

(a) 150℃/20h; (b) 170℃/4h; (c), (d) 170℃/20h; (e), (f) 170℃/32h; (g), (h) 190℃/20h

净,无强化相析出(图 2b);合金在 170 ℃时效 20h 时,在一定的惯习面上析出了大量针状的 S' (Al_2CuMg) 相^[9],呈均匀弥散分布(图 2c, d);当时效时间延长到 32h 时,棒状的 T 相发生明显粗化,部分细小针状的 S' 相也转变为较粗大的平衡相,表明已经进入过时效阶段(图 2e, f)。当合金在 190 ℃时效 20h 时,部分 T 相长大,合金晶内析出细小弥散的 S' 相也长大粗化(图 2g, h)。

2 3 预变形对合金拉伸性能的影响

图 3 是 2A 23 合金于 490 ℃/40min 固溶后水淬,然后经不同预变形后,在 170 ℃时效 20h 的拉伸力学性能与变形量的关系曲线。由图 3 可以看出,时效前进行预变形可以显著增加合金的强度。随着变形量的增加,合金的抗拉强度逐渐提高,合金的屈服强度在 2.5% 预变形之前上升较快。与未预变形合金相比,经 2.5% 预变形后,合金抗拉强度和屈服强度分别提高了 38MPa 和 81MPa;经 5% 预变形后,合金的抗拉强度和屈服强度分别提高了 50MPa 和 94MPa;但是当预变形量超过 5% 以后,合金的强度变化趋于平缓,延伸率下降较大。综合考虑合金的强度与塑性,合金适宜的预变形应控制在 2.5%~5% 范围内。

2 4 预变形对合金显微组织的影响

图 4 为合金经不同预变形量后时效(形变时效)的

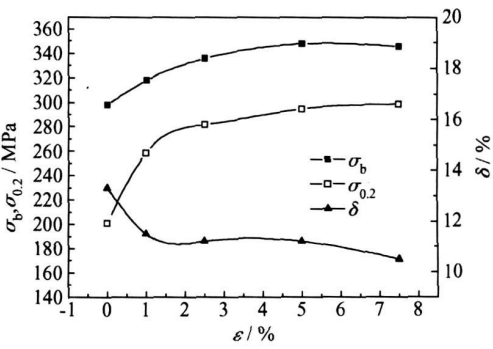


图 3 2A23 合金室温拉伸性能与预变形量的关系
Fig. 3 Relationship between mechanical property at room temperature and pre deformation of the 2A23 alloy

TEM 显微组织。由图 4 可以看出,合金形变时效后的主要强化相仍为细小的针状 S' 相。未预变形的合金晶内针状的 S' 相数量较少,并且分布不均匀,部分聚集成链状分布,周围还存在一些点状的析出物,可能是 S'' 过渡相^[10](图 4a)。而在 1% 预变形时效下,针状的 S' 相分布均匀,尺寸较大,数量也较少(图 4b)。当预变形量达到 2.5% 时,合金晶内的 S' 相呈大量均匀弥散分布,并且尺寸比 1% 预变形的析出相小很多, S'' 相也向 S' 相转变并且数量减少(图 4c)。当预变形量达到 7.5% 时,晶内的析出相更加弥散,但部分 S' 相开始长大粗化(图 4d)。

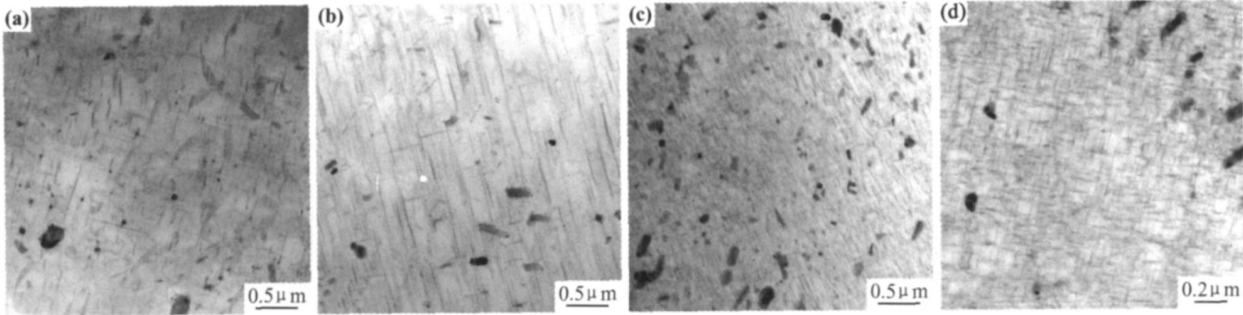


图 4 合金经不同变形量后在 170℃/20h 时效的 TEM 组织 (a) 0%; (b) 1%; (c) 2.5%; (d) 7%
Fig. 4 TEM microstructures of the alloy with different rolling reductions and aged at 170℃ for 20h
(a) 0%; (b) 1%; (c) 2.5%; (d) 7%

3 讨论

3 1 合金的时效析出强化

实验合金的 Cu: Mg 原子比接近于 1,在 Al-Cu-Mg 三元相图中处于 $\alpha + S$ 相区, Bagaryatsky 提出了如下的脱溶序列^[11]: $SSS \rightarrow GP_B \text{ 区} \rightarrow S''/GP_{B2} \rightarrow S' \rightarrow S$ (Al_2CuMg) (SSS 代表过饱和固溶体)。

通过图 1 可以看出,合金的时效过程有典型的三个阶段,即欠时效、峰时效和过时效。欠时效时主要是

GP_B 区的析出,曲线前段的上升是由于合金中主要的强化相 S' 相析出,而后段下降是由于 S' 相发生了长大粗化并部分转化为稳定的 S 平衡相。

时效初期合金组织的变化主要是 GP 区的回溶和过渡相的析出长大,在时效过程中,大量小于临界尺寸的 GP_B 区发生回溶,少量大于临界尺寸的 GP 区转变成成为 S' 过渡相。随着时效时间的延长, S' 相进一步长大,数量增多,呈弥散分布(图 2c, d),由于 S' 相与基体保持半共格,造成的晶格畸变较大,内应变量阻碍位错

运动的作用也增大,使强化值增加,在 170℃时效 20h 时达到最佳的强化效果。继续延长时效时间,过渡相 S' 相慢慢地长大粗化,随后转变为平衡的 S 相,与基体失去了共格关系,硬度开始下降。

由图 1 可以看出,时效温度对于该合金过饱和固溶体的分解析出具有很大的影响^[12]。当时效温度为 150℃时,由于温度较低,原子扩散速率较慢, S' 过渡相的长大受到抑制,数量也较少。而当时效温度为 190℃时,由于温度高,溶质原子的扩散系数大,合金过饱和固溶体分解速度越快,第二相的析出速度和长大速度越快,硬度较早达到峰值,但同时也较早地转变为平衡相,这些第二相不能有效地阻碍位错运动,所以该温度下合金的硬度较低。当时效温度为 170℃时,合金中析出大量细小弥散的 S' 相,对合金具有最好的强化效果。

3.2 时效前预变形的作用

实验结果表明,时效前的预变形对合金的时效析出具有很大影响。在时效处理过程中,时效析出相 S' 相一般是在位错处形核,时效前的预变形引入的位错给 S' 相提供更多有效的形核位置,从而使 S' 相的形核数目增加。淬火后合金组织位错密度较低,时效时针状 S' 相将同时在位错线上和基体中形核和长大^[11]。由于位错为原子扩散提供有利的管道^[13],位错线上形成的 S' 相长大速度快于其他区域,所以时效组织不均匀, S' 相粗细不一(图 4a)。而淬火后经过预变形处理,位错密度增大,非均匀形核率增加,时效析出的 S' 相细小均匀,数量也增多,这种析出相对位错的运动起钉扎、阻滞作用,同时大量位错形成的缠绕也有效地阻碍了位错运动。因此,随着预变形量的增大,合金强度显著提高。当预变形量增加到 2.5%~5%时(图 4c),析出的 S' 相细小弥散,合金的抗拉强度和屈服强度呈最佳配合。进一步增加预变形量($>5\%$),基体内的位错密度增加,位错上析出的 S 平衡相的数量也增加,出现了弱化作用,导致抗拉强度变化缓慢,屈服强度下降。

4 结论

(1) 2A23 铝合金在 150、170℃和 190℃下时效均具有明显的时效硬化特性,合金适宜的时效制度为 170℃时效 20h。

(2) 合金中主要的强化相为 S' 相。欠时效时,合金中只有极少量的 S' 相析出;峰时效时(170℃/20h), S' 相数量增多,细小均匀,呈弥散分布;过时效时, S' 相

部分转变成平衡的 S 相。

(3) 时效前的预变形可以显著提高合金的强度。随预变形量的增加,合金强度逐渐上升;在 2.5%~5%的预变形量下,合金具有较好的强度和塑性。

(4) 时效前的预变形可促进 S' 相的析出,预变形量越大,析出的 S' 相越细小弥散,但预变形量过大, S' 相发生粗化,并且有平衡的 S 相析出。

参考文献

- [1] JEUNECHAMPS P P, HO K C, LIN J, et al. A closed form technique to predict springback in creep age forming[J]. *Int J Mach Sci*, 2006, 48: 621– 629.
- [2] 李劲风, 郑子樵, 李世晨, 等. 铝合金时效成形和时效成形铝合金[J]. *材料导报*, 2006, 20(5): 101– 103.
- [3] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets[J]. *Int J Plast*, 2004, 20(4– 5): 733– 751.
- [4] ADACHI T, KIMURA S, NAGAYAMA T, et al. Age forming technology for aircraft wing skin[J]. *Mater Forum*, 2004, 28: 202– 207.
- [5] KAMP N, STARINK M J, SINCLAIR I, et al. Development of Al-Cu-Mg-Li(Mn, Zr, Sc) alloys for age forming[J]. *Mater Forum*, 2004, 28: 369– 375.
- [6] STARINK M J, GAO N, KAMP N, et al. Relations between microstructure, precipitation, age formability and damage tolerance of Al-Cu-Mg-Li(Mn, Zr, Sc) alloys for age forming[J]. *Mater Sci Eng A*, 2005, 418(1– 2): 241– 249.
- [7] STARINK M J, SINCLAIR I, GAO N, et al. Development of new damage tolerant alloy for age forming[J]. *Mater Sci Forum*, 2002, 396– 402: 601– 606.
- [8] WARNER T, LASSINCE P, LEQUEU P. Aircraft structure element made of an Al-Cu-Mg alloy[P]. US Patent: 6692589 B2, 2004-01-17.
- [9] WANG S C, STARINK M J. Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg(Li) based alloys[J]. *Int Mater Rev*, 2005, 50(4): 193– 215.
- [10] 李晗. 2024 铝合金薄板的热处理工艺与性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [11] WANG S C, STARINK M J. Precipitation hardening in Al-Cu-Mg alloy revisited[J]. *Scripta Mater*, 2006, 54(2): 287– 291.
- [12] 胡康祥, 前苗根. 金属学[M]. 上海: 上海科技出版社, 1985.
- [13] ALLEN R M, VANDER SANDE J B. The oriented growth of precipitates on dislocations in Al-Zr-Mg, part II: a model[J]. *Acta Metal*, 1980, 28(9): 1197– 1202.

收稿日期: 2008-07-14; 修订日期: 2008-10-06

作者简介: 郭昀抒(1984—), 女, 硕士研究生, 主要从事高性能铝合金的研究, 联系地址: 湖南长沙中南大学材料科学与工程学院(410083), E-mail: guoyunshu@gmail.com