

二次时效 7055-T7951 铝合金微观组织及力学性能

王 磊^{1,2}, 回 丽^{1,2}, 周 松², 许 良^{1,2}

(1. 沈阳航空航天大学 机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

(2. 沈阳航空航天大学 航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 通过对峰时效与 T7951 二次时效 7055 铝合金力学性能测试、微观组织与断口分析, 研究了显微组织、基体析出相、晶界析出相与晶界无沉淀析出带对材料强度与断裂韧性的影响, 并分析了断裂机理。研究表明 T7951 二次时效产生的位错强化、细晶强化效应与基体内出现平衡 η 相导致的弱化作用之间的竞争机制导致材料强度较峰时效损失不大; 晶界析出相的团聚粗化是造成二次时效 7055 铝合金断裂韧性提高的主因; 7055 铝合金室温拉伸断口表明断裂机理为韧脆混合型断裂, 二次时效较峰时效表现出更强的韧性断裂特征。

关键词: 7055 铝合金; 二次时效; 强度; 断裂韧性; 析出相

中图分类号: TG146.2¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)04-1115-05

飞机的重量是制约其实现超高速与高机动性能的关键。目前, 只能通过提高航空材料的比强度和优化结构设计来实现飞机的减重。美国铝业公司开发的 7055 超高强铝合金由于其优异的可成形性、较高的断裂韧性、耐腐蚀性和优良的损伤容限性能, 逐渐替代传统的 7075 铝合金用于飞机机身横梁和骨架等关键构件。

热处理制度对 7055 铝合金的显微组织和力学性能影响显著。7055 铝合金热处理包括均匀化、固溶、淬火、时效等工艺, 其中时效又包括峰时效、双级时效、回归再时效和形变时效等等。通过峰时效可以得到最高的强度, 但断裂韧性和抗应力腐蚀性能较差; 双级失效(如 T74 和 T73)可以改善合金的断裂韧性和抗应力腐蚀性能, 但会造成强度的损失^[1,2]。因此, 实现 7055 铝合金强度、断裂韧性、抗应力腐蚀性能和疲劳强度等的良好匹配, 始终是重要的工程问题。

国内外针对该问题开展了大量研究, 主要期望通过时效过程工艺控制达到提高材料断裂韧性与抗腐蚀性的同时保持材料较高的强度^[3-7]。目前, 该系合金基本沿着高强—高强高韧—高强高韧耐腐蚀的方向发展, 而相应的热处理开发则是沿着 T6-T73-T74-T76-T77-T79 方向发展, 但许多关键工艺参数并未公开。

随着我国航空工业的快速发展, 对超高强高韧铝合金的需求日益紧迫, 而我国目前的高强高韧铝合金研究水平只相当于国外 90 年代中期, 大部分牌号处于

仿制阶段, 相应的加工工艺与热处理制度尚未明确^[8]。因此, 针对国外同类合金及其热处理制度开展研究, 对促进我国超高强高韧铝合金的研发具有重要意义。

目前关于 T7951 状态的 7055 铝合金研究较少, 本研究通过对比分析峰时效与 T7951 二次时效 7055 铝合金显微组织、拉伸与压缩性能、断裂韧性及断口分析等, 研究了 T7951 二次时效过程对材料组织与性能的影响。

1 实 验

试验选用 7055 航空铝合金, 材料成分(质量分数)为 Zn-7.9%, Mg-2.1%, Cu-2.2%, Zr-0.15%, Fe-0.12%, Si-0.08%, Mn-0.025%, 余量为 Al。二次时效为 T7951, 包括固溶、淬火、预拉伸与人工时效等过程, 但具体参数未公开。与 T6 峰时效作对比分析。

利用岛津电子万能试验机进行室温拉伸与压缩性能测试, 沿 L 向取样, 尺寸如图 1, 拉伸与压缩速率分别为 2 mm/min 和 10 kN/min; 断裂韧性 K_{IC} 测试在 MTS-810 电液伺服疲劳试验机上完成, 采用 CT 试样如图 2, 用计算机与 COD 规分别采集载荷和裂纹尖端张开位移。每组实验各取 6 个平行试样。利用 Olympus GX51 光学显微镜、Philips Tecnai 透射电镜与 Hitachi S-3400N 扫描电镜分别观察 7055 2 种状态的微观组织、析出相形貌及分布和拉伸断口。

收稿日期: 2016-04-28

基金项目: 辽宁省自然科学基金(2013024012)

作者简介: 王 磊, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 沈阳航空航天大学机电工程学院, 辽宁 沈阳 110136, 电话: 024-89728640, E-mail: wanglei545@gmail.com

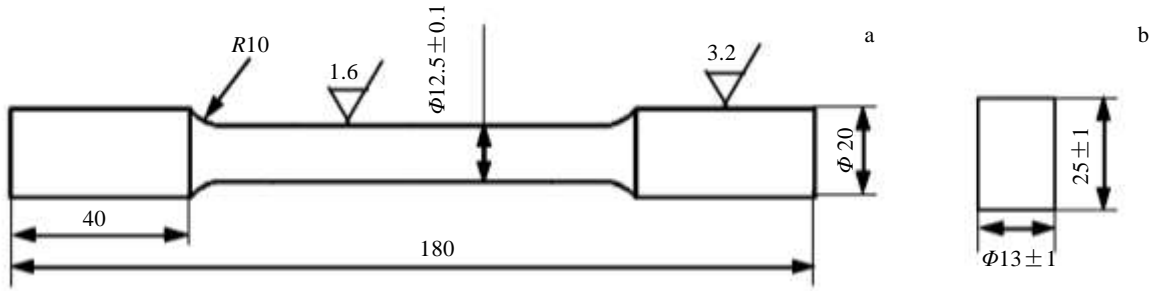


图 1 拉伸试样和压缩试样示意图

Fig.1 Schematic diagrams of tensile specimen (a) and compression specimen (b)

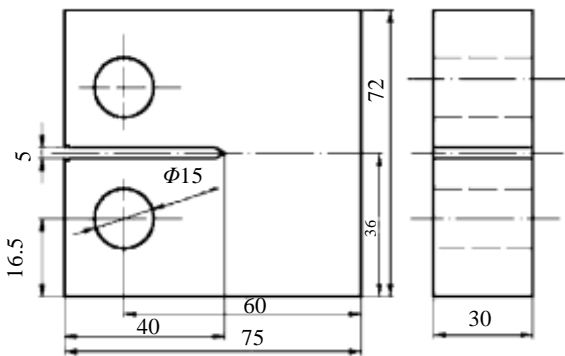


图 2 断裂韧性 CT 试样示意图

Fig.2 Schematic diagram of fracture toughness CT specimen

2 结果

2.1 力学性能

表 1 为峰时效与二次时效 7055 铝合金力学性能实验结果，可以看出二次时效对材料的拉伸与压缩性能影响不大，抗拉强度与屈服强度分别下降 1.9% 和 3.5%，抗压强度与压缩屈服强度上升 1.6% 和 0.8%；而对材料断裂韧性有较大的影响，导致断裂韧性上升 7.0%。以往有研究表明，双级时效会导致 7 系铝合金强度下降 10%~15%，同时会造成塑性和韧性的下降^[9]。本实验结果表明 T7951 二次时效在提高 7055 铝合金断裂韧性的同时并没有导致合金强度的明显变化。

表 1 不同热处理状态下 7055 铝合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of 7055 Al alloy after different heat treatments

Alloy	Tensile strength, σ_b /MPa	Yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	Compression strength, σ_c /MPa	Compression yield strength, $\sigma_{0.2}$ /MPa	Fracture toughness, K_{IC} /MPa $m^{1/2}$
T6_1	641.2	608.8	762.8	595.1	28.7
T6_2	641.7	607.3	745.1	591.8	28.9
T6_3	640.5	608.5	761.5	585.7	28.5
T6_4	640.8	607.5	743.2	584.3	29.6
T6_5	649.9	613.0	754.9	592.3	28.0
T6_6	643.9	608.5	767.2	590.2	28.5
T6_ave	643.0	608.9	755.8	589.9	28.7
T7951_1	630.0	586.6	783.8	596.2	29.1
T7951_2	628.5	581.2	790.2	594.7	33.1
T7951_3	629.8	586.0	759.5	593.0	29.1
T7951_4	630.8	588.8	748.0	592.0	31.6
T7951_5	635.5	592.9	751.7	594.9	30.0
T7951_6	628.5	590.3	773.3	596.3	31.1
T7951_ave	630.5	587.6	767.8	594.5	30.7
Variation	↓ 1.9%	↓ 3.5%	↑ 1.6%	↑ 0.8%	↑ 7.0%

2.2 金相组织

图3为2种热处理状态下7055铝合金金相显微组织。合金发生不完全再结晶,晶粒保持沿形变方向伸长并呈纤维状,如图3a,3b。峰时效后晶粒较大,存在部分亚晶,如图3c;二次时效后由于一定量的预拉伸导致纤维状晶粒更为细长,如图3b,出现部分尺寸较小的再结晶晶粒,如图3d,可见T7951二次时效起到一定程度的晶粒细化作用。

2.3 TEM 微观组织

图4为7055铝合金2种热处理状态下TEM组织。

峰时效基体沉淀相(MPt)为高密度的细小均匀弥散颗粒,主要强化相为细小的GP区和 η' 相,如图4b、4c,晶界析出 η 相(GBP)细长且呈链状分布,存在明显晶界无沉淀析出带(PFZ),宽度约为40nm,如图5;二次时效使晶内析出相尺寸粗化,密度下降而间距变大,MPt主要为过渡的 η' 相和平衡 η 相, η 相呈尺寸较大的盘状和片状,但细小的球状GP区并未完全消失,如图4e、4f,GBP逐渐团聚成非连续分布的粗大相,PFZ略微变宽,为50~60nm,如图4d。

2.4 断口形貌

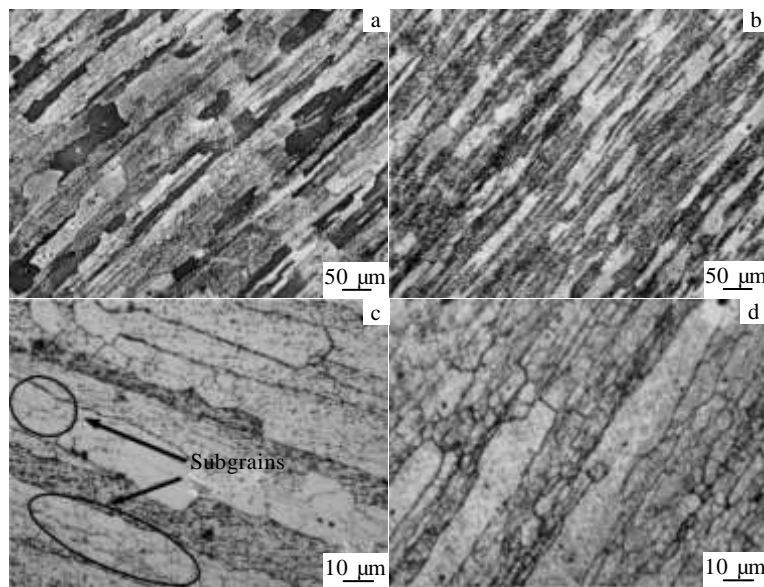


图3 不同热处理状态下7055铝合金的金相组织

Fig.3 Metallurgical structures of 7055 Al alloy after different heat treatments: (a, c) peak aging and (b, d) secondary aging

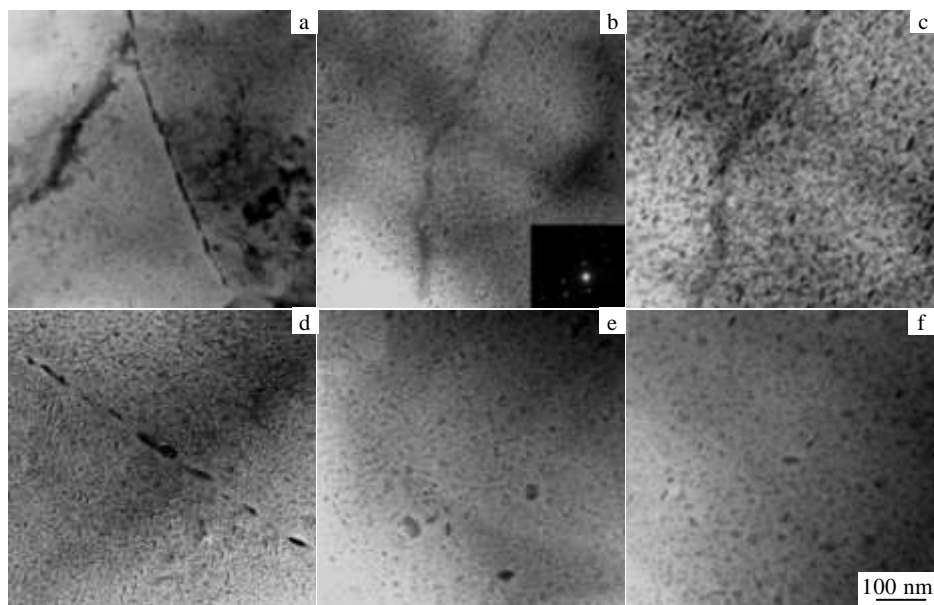


图4 不同热处理状态下7055铝合金晶界与晶内析出相形貌

Fig.4 TEM microstructures of 7055 Al alloy after different heat treatments: (a~c) peak aging and (d~f) secondary aging

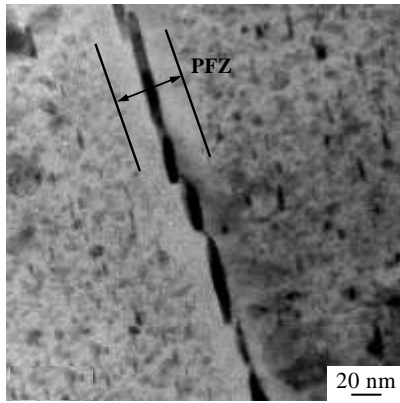


图 5 峰时效 7055 铝合金晶界无沉淀析出带

Fig.5 TEM microstructures of PFZ of 7055 Al alloy after peak aging

峰时效 7055 铝合金的室温拉伸断口均呈剪切断裂,断口呈现类似脆性解理台阶的层片结构,如图 6a,但河流花样与纯解理断口有较大差别,而且面心立方的铝合金材料由于本身具有较多的滑移系,很难出现纯解理型断裂。进一步观察发现很多层片结构上存在细小的韧窝,如图 6b。韧窝深度较浅,层片前沿韧窝尺寸稍大,呈拉长的抛物线状,如图 6c,表现出一定的韧性断裂特征,表明层片结构之间存在较大的撕裂应力,而层片前沿应力最大,促使较小的韧窝合并形成尺寸较大的韧窝。因此可以判断峰时效 7055 铝合金的断裂机理为韧脆混合型断裂。比较峰时效与二次时效拉伸断口可见,二次时效 7055 铝合金断口层片结构上的韧窝分布更为普遍,如图 6d,说明材料的韧性较峰时效得到提升。

3 分析与讨论

7055 是时效强化铝合金,可通过时效改变析出相的晶体结构、尺寸大小与分布等来改变力学性能。其强度主要由 MPt 的类型、尺寸和分布决定,而 GBP 和 PFZ 对材料的断裂韧性和抗腐蚀性能影响显著,晶

粒尺寸与形貌也会对材料性能产生影响。T7951 二次时效在提高 7055 断裂韧性的同时,并没有造成材料强度的明显损失,这可以从不同方面进行分析。

3.1 二次时效对材料强度的影响

T7951 二次时效过程预拉伸变形会在材料内部引入大量位错,产生位错强化效应。另外,位错的本质是一种晶体学缺陷,具有较高能量,位错与溶质原子、空位之间会产生弹性交互作用,易成为析出相形核中心而形成较大尺寸 η 相,如图 4e。由时效析出序列也可知,GP 区和 η' 相有转化为 η 相的趋势, η 相是非共格颗粒,无强化作用,会降低沉淀强化效果。因此,材料经二次时效后产生的位错强化效果与 η 相的出现产生的弱化作用存在竞争机制。从图 4e, 4f 可以看出机体内并没有出现过多的 η 相,可以判断 T7951 二次时效处理产生的位错强化与出现 η 相导致的弱化作用基本相当,因此材料强度变化不大。

由于铝合金较高的堆垛层错能,材料易发生回复反应产生亚晶组织,亚晶内大量的弥散质点会抑制再结晶的发生,形成不完全再结晶组织,如图 3,可以避免再结晶造成的材料强度损失,因此 2 种热处理状态下 7055 均具有较高的强度。二次时效较峰时效晶粒得到细化,产生细晶强化效应,也可以弥补部分由于平衡 η 相的出现产生的弱化作用。

3.2 二次时效对材料断裂韧度的影响

T7951 二次时效后析出相尺寸增大、间距变大,预拉伸在材料内部引入的位错使 η 相优先在位错处成核长大,最终在基体内形成细小的 GP 区与 η' 相中分布着粗大 η 相的组织,如图 4f,在变形过程中这些粗大的析出相不易被剪切,位错只能绕过,从而促成交滑移而消除共面滑移,使变形在晶粒内分布均匀,从而提高合金的断裂韧性。

由于晶界也是一种晶体学缺陷,具备较高能量,晶界附近溶质原子较晶内扩散更快,粗大平衡 η 相易于晶界处成核长大^[10]。峰时效时 GBP 呈连续链状析出,静载拉伸下由于较高的应力水平,沿晶界连续分

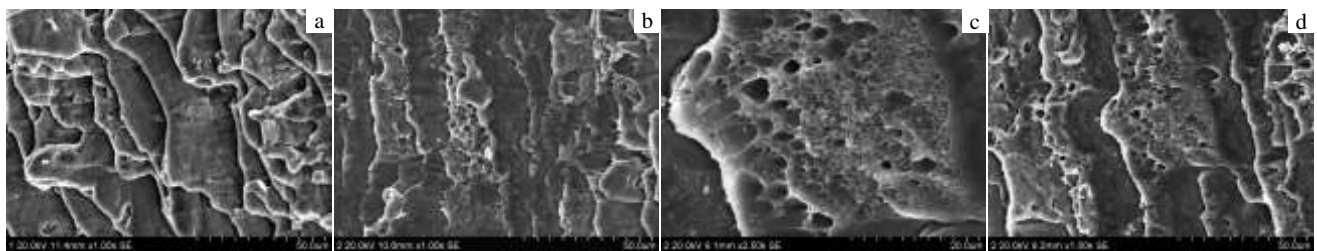


图 6 不同热处理状态下 7055 铝合金拉伸断口形貌

Fig.6 Fractographs of 7055 Al alloy after different heat treatments: (a~c) peak aging and (d) secondary aging

布的 η 相会使沿晶断裂变得相对容易, 材料的韧性相对较低; 二次时效后 GBP 由峰时效的连续链状分布逐渐团聚成断续分布的粗大颗粒, 并发生部分球化, 并且 PFZ 变宽, 如图 4d, 可以降低变形过程中晶界处的应力集中, 使变形时位错的切过转变为绕过机制, 减少位错在晶界处的塞积, 也可以改善材料的断裂韧度。

从拉伸断口也可以看出, 二次时效后层片结构上的韧窝较峰时效更多, 说明材料的韧性得到提升。Srivatsan^[5]的研究表明混合型断口的出现是由于材料内部存在的二次相决定的, 而韧窝的形成是以细小的二次相为核心。

4 结 论

1) T7951 二次时效通过基体沉淀相、晶界析出相与晶界无沉淀析出带的合理匹配, 使 7055 铝合金实现了高强度与高韧性的兼顾。

2) T7951 二次时效处理产生的位错强化、细晶强化与基体内出现 η 相发生弱化作用之间的竞争机制导致材料强度较峰时效变化不大。

3) T7951 二次时效后 MPt 由峰时效时的 GP 区和 η' 相转变为 GP 区和 η' 相中分布着粗大 η 相的组织, GBP 由连续链状分布转变为断续分布, 对提高材料的断裂韧性有利。

4) 7055 铝合金室温拉伸断口呈剪切断裂, 断裂机理为韧脆混合型断裂, 二次时效断口层片结构上的韧窝分布较峰时效更为普遍, 反映其韧性得到提高。

参考文献 References

- [1] Rometsch P A, Zhang Y, Knight S. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(7): 2003
- [2] Yan Liangming, Shen Jian, Li Zhoubing *et al.* *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(3): 625
- [3] Yan Yan(闫焱), Zheng Ziqiao(郑子樵), Long Jia(龙佳). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2010, 31(11): 128
- [4] Li Hai(李海), Zheng Ziqiao(郑子樵), Wang Zhixiu(王芝秀). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2005, 34(7): 1029
- [5] Srivatsan T S, Sriram S, Veeraraghavan D *et al.* *Journal of Materials Science*[J], 1997, 32(11): 2883
- [6] Chen Junzhou, Zhen Liang, Yang Shoujie *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2009, 500(1-2): 34
- [7] Robson J D. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 382(1-2): 112
- [8] Jiang Jianhui(蒋建辉). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Central South University, 2012
- [9] Chen Junzhou(陈军洲). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008
- [10] Liu Shengdan(刘胜胆), Li Chengbo(李承波), Deng Yunlai(邓运来) *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2012, 48(3): 343

Microstructures and Mechanical Properties of Secondary Aged 7055-T7951 Aluminum Alloy

Wang Lei^{1,2}, Hui Li^{1,2}, Zhou Song², Xu Liang^{1,2}

(1. Department of Electromechanical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: The influences of microstructures, matrix precipitates, grain boundary precipitates and precipitate free zone on the strength and fracture toughness of 7055 aluminum alloy after peak aging and secondary T7951 heat treatments were studied through mechanical property tests, microstructures and fractography analyses. Results show that the strength of 7055-T7951 does not decrease dramatically compared with that of the peak aged material because of the competition between the softening effect of η phase precipitating and the strengthening effects of dislocation and fine grains. The improvement of fracture toughness after secondary aging is mainly attributed to the aggregation and coarsening of grain boundary precipitates. Fractographic analyses indicate that the fracture mechanism is a mixture of both ductile and brittle features, but there are more ductile features in the secondary aged materials.

Key words: 7055 aluminum alloy; secondary aging; strength; fracture toughness; precipitate

Corresponding author: Hui Li, Ph. D., Professor, Department of Electromechanical Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-8972608, E-mail: syhuili@163.com