文章编号: 1004-0609(2013)04-0964-06

# 2099 铝锂合金挤压材的组织与力学性能

张振强, 许晓静, 宋 涛, 张允康, 罗 勇, 吴 瑶, 邓平安

(江苏大学 先进制造与现代装备技术工程研究院,镇江 212013)

摘 要:采用金相显微镜、扫描电镜、常温拉伸及断裂韧性测试等实验方法研究 2099 铝锂合金挤压材的组织和 力学性能。结果表明:合金在 T83 时效处理中采用(121 ℃,14 h)一级时效和(181 ℃,30~66 h)二级时效时,其屈服 强度随二级时效时间的延长而显著提高,二级时效时间为48 和 66 h 时的屈服强度为 445 和 491 MPa,抗拉强度 为 543 和 551 MPa,伸长率为 5.7%和 4.7%,合金弹性模量高达 78.75 GPa,实测密度为 2 517 kg/m<sup>3</sup>,具有极高的 比强度和比刚度。在双级时效制度为(121 ℃,14 h)+(181 ℃,48 h)时,合金断裂韧性 *K*<sub>IC</sub> 值为 22.87 MPa·m<sup>12</sup>,断裂 裂纹沿着细小再结晶组织、粗大不(难)溶第二相等组织缺陷扩展。

**关键词:** 2099 铝锂合金挤压材; 时效制度; 组织; 力学性能 中图分类号: TG174.4 **文献标志码:** A

# Microstructure and mechanical properties of 2099 Al-Li alloy extrusion materials

ZHANG Zhen-qiang, XU Xiao-jing, SONG Tao, ZHANG Yun-kang, LUO Yong, WU Yao, DENG Ping-an

(Engineering Institute of Advanced Manufacturing and Modern Equipment Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties of 2099 Al-Li alloy extrusion materials were investigated by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), ambient temperature tensile testing and fracture toughness testing, and so on. The results show that, when the alloy is aged at T83 heat treatment which includes the first aging treatment (121 °C, 14 h) and the secondary aging treatment (181 °C, 30~66 h), the yield strength improves significantly with the increase of the secondary aging time. The yield strength, tensile strength and elongation are 445 and 491 MPa, 543 and 551 MPa and 5.7% and 4.7%, respectively, at the secondary aging time of 48 and 66 h. The elastic modulus is as high as 78.75 GPa and actual density is 2 517 kg/m<sup>3</sup>. The alloy has superior specific strength and specific stiffness. When the duplex aging is (121 °C, 14 h)+(181 °C, 48 h), the fracture toughness  $K_{IC}$  value of alloy is 22.87 MPa·m<sup>1/2</sup>. The crack expands along the microstructure defects, such as the fine recrystallization structure, the coarse insoluble second phase, and so on.

Key words: 2099 Al-Li alloy extrusion materials; aging treatment; microstructure; mechanical properties

先进金属结构材料是一个非常重要的研究课题, 是国际上竞争最激烈的科学技术领域之一。飞机、导 弹以及航天器都要求结构材料具有低密度、高比强度、 高比刚度等性能,使之能够减轻结构质量,达到增加 有效载荷或提高射程的目的。有报道称,在航天飞行 器结构中,每增加 1 kg 的有效载荷量就可以带来 4 400~110 000 美元的经济效益<sup>[1]</sup>,铝锂合金因其具有 密度低、比模量高、比强度高、成形性能好等性质, 而成为先进国防武器装备和航空航天高科技领域中最 重要的结构材料之一<sup>[2]</sup>。

基金项目: 江苏省工业科技支撑计划资助项目(BE2008118); 江苏大学"拔尖人才培养工程"基金资助项目(1211110001)

收稿日期: 2012-04-16; 修订日期: 2012-09-20

通信作者: 许晓静,教授,博士; 电话: 0511-88792058; E-mail: xjxu67@ujs.edu.cn

2099 铝锂合金系美国空军 Wright 材料实验 室、Dayton 大学、Alcoa 公司合作研发的第三代新型 铝锂合金, 其基本成分(质量分数,%)如下: 2.4~3.0Cu, 1.6~2.0Li, 0.4~1.0Zn, 0.1~0.5Mg, 0.1~0.5Mn, 0.05~ 0.12Zr, 剩余为 Al。该合金于 2004 年被美国铝业协会 正式命名为 2099, 具有较低的各向异性和密度,较高 的比模量、比强度、损伤容限、抗腐蚀性、耐超低温 性能和热暴露稳定性能<sup>[3-7]</sup>。代替传统航空铝合金应用 (如用于制造机身结构)具有 14%的减轻质量效果。目 前, 2099 铝锂合金已在 A380 大飞机上作为地板梁等 应用,并也已在 A350 飞机作为地板梁、机身蒙皮和 下翼面桁条应用,我国大飞机也拟采用该合金<sup>[8]</sup>。

关于 2099 铝锂合金,国外尚处于保密状态,有关 其制备加工技术方面的报导几乎是空白,而在国内, 从研究报导<sup>[9-13]</sup>来看,也只有郑子樵教授课题组和本 课题组展开研究。本文作者成功研制了钪和锶复合微 合金化的高锌 2099 型铝合金并获授权发明专利<sup>[14]</sup>。 目前,国内外已发表文章主要涉及对该合金时效制度 的探讨、合金元素的影响及部分力学性能,而关于其 拉伸与断裂后的微观组织及性能尚无公开详细报导。 因此,本文作者研究 2099 铝锂合金挤压材的拉伸性 能、断裂韧性及断裂行为,提出其组织中存在的问题 及影响,为进一步的研究指明了方向,以期为该合金 性能的提升提供科学依据。

# 1 实验

试验材料为直径 30 mm 的 2099 铝锂合金挤压圆 棒。参照国外关于合金成分的报导,试验合金熔炼以 工业纯铝(99.79%)、纯锂(99.9%)、纯锌、纯镁和中间 合金 Al-50% Cu、Al-10% Mn、Al-4% Zr、Al-10% Sr、 Al-2% Sc 为熔炼原材料, 按照一定的比例添加, 熔炼 加工温度控制在 780~800 ℃,金属模浇注成型。将铸 锭置于 475 ℃保温 24 h 进行均匀化退火处理, 挤压成 型时先在 478 ℃保温 8 h, 然后挤压成直径为 30 mm 的圆棒,挤压比 21.5。经德国 SPECTRO MAXx 光谱 仪实测,该合金化学成分(质量分数,%)为: Al-2.57Cu-1.86Li-1.31Zn-0.420Mg-0.321Mn-0.0735Zr-0.0943Sr-0.0433Sc。将合金置于 540 ℃电阻炉中保温 2 h 进行固溶处理。采用变形加双级时效的形式进行热 处理,即先在室温条件下沿轴向进行压缩量约为 4% 的冷变形加工,然后对各试样分别进行不同的时效处 理并进行性能测试。

拉伸性能测试按 GB/T 228-2002 标准<sup>[15]</sup>,试样

尺寸如图 1 所示,取向 L-R,将经过预处理的 2099 铝 锂合金挤压材中的 3 组试样统一进行(121 ℃,14 h)的 一级时效处理,然后在 181 ℃条件下分别进行 30、48 和 66 h 的二级时效,采用美国英斯特朗 Instron 5887 电子万能材料试验机测试,拉伸速度: 屈服前 1 mm/min,屈服后 5 mm/min。

断裂韧性按 GB 4161—2007 标准<sup>[16]</sup>制作紧凑拉伸 试样,试样尺寸如图 1 所示,取向 L-R,所用设备为 MTS-812-50KN。将断裂后的试样进行表面镀镍,镶 嵌并制成金相试样,从断口纵剖面观察断裂形式。微 观形貌通过 Nikon EPIPHOH 300 金相显微镜和 JEOL JSM-7001F 型场发射扫描电子显微镜进行观察。



图1 拉伸及断裂韧性试样尺寸

Fig. 1 Sizes of tension specimen and fracture toughness specimen (Unit: mm)

# 2 结果及分析

#### 2.1 微观组织

图 2 所示为 2099 铝锂合金挤压材固溶态组织。由 图 2 可以看出,合金组织沿挤压方向呈带状(纤维状) 分布,部分区域发生再结晶,形成细小再结晶组织带, 不(难)溶第二相尺寸仍较大,并沿挤压方向排列分布。 组织的方向性会造成其挤压材性能表现出各向异性; 存在的粗大第二相也易在受力后成为裂纹产生和扩展 的源头,影响材料的性能。

#### 2.2 拉伸性能

3 组拉伸试样的性能测试平均值如表 1 所列(包括 弹性模量、屈服强度、极限强度、伸长率和断面收缩



图 2 2099 铝锂合金挤压材固溶态组织 Fig. 2 Microstructure of 2099 Al-Li alloy extrusion materials

after solid-solution treatment

率)。由表 1 可以看出, 2099 铝锂合金具有较高的弹 性模量,其值达到 78.75 GPa,显著高于 7075 铝合金 (71.0 GPa)和 2024 铝合金(72.4 GPa)<sup>[17]</sup>。当二级时效时 间在 30 h 到 66 h 区间范围内时,随着二级时效时间的 延长,合金性能发生明显变化,强度尤其是屈服强度 显著提高,这是由于时效促进合金内部沉淀相数量不 断增加,有效钉扎位错。当二级时效时间分别为 48 和 66 h 时,其屈服强度分别为 445 和 491 MPa,抗拉 强度分别为 541 和 551 MPa,伸长率分别为 5.7%和 4.7%,合金表现出优异的性能。经实测,该合金密度 为 2 517 kg/m<sup>3</sup>,远低于 7075 铝合金(2 810 kg/m<sup>3</sup>)和 2024 铝合金(2 770 kg/m<sup>3</sup>)<sup>[18]</sup>,因此,2099 铝锂合金挤 压材具有较高的比弹性模量(弹性模量与密度的比 值),代替 7000 系和 2000 系铝合金将具有非常卓越的 减轻质量和提升刚度优势。

图3所示为2099铝锂合金挤压材经拉伸试验后的 断裂试样。由图3可以看出,试样标距部分的形貌均 为典型的均匀变形,没有明显的颈缩现象。图4所示 为拉伸过程中的应力—应变曲线。由图4可以看出, 试样在拉伸过程中持续硬化并直至断裂,曲线在末端 没有出现下降现象,说明拉伸断裂试样没有出现明显

#### 表1 2099 铝锂合金挤压材的拉伸性能测试

 Table 1
 Tensile property test of 2099 AL-Li alloy extrusion materials

Elasticity Yield Ultimate Contraction of Aging treatment Elongation/% modulus/GPa strength/MPa strength/MPa area/% (121 °C, 14 h)+(181 °C, 30 h) 78.67 386.33 489.33 5.37 8.13 (121 °C, 14 h)+(181 °C, 48 h) 78.75 445.00 541.00 5.70 8.03 (121 °C, 14 h)+(181 °C, 66 h) 76.00 491.00 551.00 4.70 9.00

的缩颈过程,这与图 3 中的试样形貌一致,两者之间相互印证。

图 5 所示为 3 组 2099 铝锂合金挤压材拉伸试样的 断口形貌。由图 5 可以看出,低倍断口都呈分层断裂 特征,具有铝锂合金断口的典型特征;高倍断口都以 沿晶(亚晶)界断裂特征为主,随着二级时效时间的延 长以及合金屈服强度提高,沿晶断裂特征越明显。在



### 图 3 2099 铝锂合金挤压材拉伸断裂试样

**Fig. 3** Tensile failure samples of 2099 Al-Li alloy extrusion materials at (121 °C, 14 h)+(181 °C, 48 h)



**图 4** 不同热处理状态 2099 铝锂合金挤压材应力一应变 曲线

**Fig. 4** Stress—strain curves of 2099 Al-Li alloy extrusion materials at different heat treatment states



图 5 不同热处理状态 2099 铝锂合金挤压材的拉伸断口形貌

**Fig. 5** Tensile fractographs of 2099 Al-Li alloy extrusion materials at different heat treatment states: (a), (b) (121 °C, 14 h)+(181 °C, 30 h); (c), (d) (121 °C, 14 h)+(181 °C, 48 h); (e), (f) (121 °C, 14 h)+(181 °C, 66 h)

二级时效时间为66h时,断口更多的呈现冰糖状形貌, 这是沿晶断裂的明显特征,从而也导致了合金伸长率 下降。

# 2.3 断裂韧性

鉴于上述 2099 铝锂合金挤压材在二级时效时间 为 48 h 时的强塑性匹配较佳,因此断裂韧性测试试样 采取与其相同的时效制度。实际工艺为:约 4.32%的 预压缩和(121 °C,14 h)+(181 °C,48 h)的时效。经测试, 其  $K_{\rm IC}$  值达到 22.87 MPa·m<sup>1/2</sup>。

图 6 所示为断裂韧性试样断口经化学镀镍保护后 沿其纵剖面切开经磨抛和腐蚀后的组织照片。从图 6



图 6 断裂韧性试样纵剖面组织照片

Fig. 6 Longitudinal section microstructure of fracture toughness sample

可以看出,合金内部存在非均匀分布的细小再结晶晶 粒和粗大不(难)溶第二相等组织缺陷,并且这些缺陷 在断裂裂纹处的分布更为明显,也即断裂主要沿上述 组织缺陷进行扩展。对断口进行扫描观察和能谱分析 后发现,断口裂纹扩展区存在粗大不(难)溶第二相(见 图 7),这些第二相主要是一些未溶的 Al-Cu 相等。由 此可以看到,正是由于上述问题的存在造成合金更易 在这些存在缺陷的地方率先出现失效。因此,合金断 裂韧性的进一步提高需要减少和抑制细小再结晶组 织、粗大不(难)溶第二相等组织缺陷。



图 7 断口粗大第二相形貌及能谱分析

**Fig. 7** Morphology(a) and EDS analysis(b) of coarse second phase in fracture surface

# 3 结论

1) 2099 铝锂合金挤压材经(540 ℃, 2 h)固溶淬火
 后,其组织呈带状(纤维状)分布,部分区域形成再结晶组织带。

2) 2099 铝锂合金的弹性模量为 78.75 GPa, 密度 为 2 517 kg/m<sup>3</sup>, 其比弹性模量显著高于 7000 系和 2000 系铝合金的。

3) 2099 铝锂合金挤压材在二级时效(181 ℃,
 30~66 h)过程中,随二级时效时间的延长,强度尤其

是屈服强度显著提高,且沿晶断裂特征逐步明显。

4) 2099 铝锂合金挤压材断裂韧性的进一步提高 需要减少和抑制细小再结晶组织、粗大不(难)溶第二 相等组织缺陷。

# REFERENCES

- 霍红庆,郝维新,耿桂宏,达道安. 航天轻型结构材料—铝锂 合金的发展[J]. 真空与低温,2005,11(2):63-69.
   HUO Hong-qing, HAO Wei-xin, GENG Gui-hong, DA Dao-an. Development of the new aerocraft material—aluminum-lithium alloy[J]. Vacuum and Cryogenics, 2005, 11(2): 63-69.
- [2] DU Yu-xuan, ZHANG Xin-ming, YE Ling-ying, LUO Zhi-hui. Superplastic behavior of Al-Cu-Li based alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(S3): 1379–1382
- [3] WARD N, TRAN A, ABAD A, LEE E W, HAHN M, FORDAN E, ES-SAID O S. The effects of retrogression and reaging on aluminum alloy 2099 (C458)[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(6): 989–996.
- [4] ROMIOS M, TIRASCHI R, PARRISH C, BABEL H W, OGREN J R, ES-SAID O S. Design of multistep aging treatments of 2099 (C458) Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance. 2005, 14(5): 641–646.
- [5] JABRA J, ROMIOS M, LAI J, LEE E, SETIAWAN M, LEE E W, WITTERS J, ABOURIALY N, OGREN J.R, CLARK R, OPPENHEIM T, FRAZIER W E, ES-SAID O S. The effect of thermal exposure on the mechanical properties of 2099-T6 die forgings, 2099-T83 extrusions, 7075-T7651 plate, 7085-T7452 die forgings, 7085-T7651 plate and 2397-T87 plate aluminum alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance. 2006, 15(5): 601–607.
- [6] VANDER KOOI D C, PARK W, HILTON M R. Characterization of cryogenic mechanical properties of aluminum-lithium alloy C-458[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(11): 1185–1190.
- [7] ORTIZ D, BROWN J, ABDELSHEHID M, DELEON P, DALTON R, MENDEZ L, SOLTERO J, PEREIRA M, HAHN M, LEE EUI, OGREN J, CLARK JR R, FOYOS J, ES-SAID O S. The effects of prolonged thermal exposure on the mechanical properties and fracture toughness of C458 aluminum lithium alloy[J]. Engineering Failure Analysis. 2006, 13(1): 170–180.
- [8] 楼瑞祥.大飞机用铝合金的现状与发展趋势[C]//中国航空学会 2007 年学术年会论文集.深圳:中国航空学会材料工程分会,2007:1-8.

LOU Rui-xiang. The present situation and the development tendency of aluminum used by big plane[C]//Conference Collected Papers of CSSA in 2007. Shenzhen: Materials Engineering Branch of China Aviation Institute, 2007: 1–8.

[9] 朱小辉,郑子樵,钟 申. Mg和Zn对2099 合金时效组织与 拉伸性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(10): 1861-1867.
ZHU Xiao-hui, ZHENG Zi-qiao, ZHONG Shen. Effect of Mg

and Zn on microstructure and tensile properties of 2099 alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(10): 1861–1867.

[10] 魏修宇,郑子樵,佘玲娟,陈秋妮,李世晨. Mg、Zn 在 2099 铝锂合金中的微合金化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1583-1587.

WEI Xiu-yu, ZHENG Zi-qiao, SHE Ling-juan, CHEN Qiu-ni, LI Shi-chen. Microalloying roles of Mg and Zn additions in 2099 Al-Li alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering. 2010, 39(9): 1583–1587.

- [11] 郑子樵,李劲风,陈志国,李红英,李世晨,谭澄宇. 铝锂合 金的合金化与微观组织演化[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2337-2351.
  ZHENG Zi-qiao, LI Jin-feng, CHEN Zhi-guo, LI Hong-ying, LI Shi-chen, TAN Cheng-yu. Alloying and microstructural evolution of Al-Li alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2337-2351.
- [12] 朱小辉. 新型铝锂合金(2099 和 2196 合金)挤压材组织与性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
  ZHU Xiao-hui. Microstructure and properties of new types of Al-Li alloy (2099 and 2196) extrusion materials[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [13] 许晓静,王 彬,吴桂潮,张福豹,宋 涛,罗 勇,程晓农.
   锶微合金化高锌 2099 型铝合金抗晶间腐蚀及剥蚀性能[J].稀
   有金属材料与工程,2011,40(S2):248-251.

XU Xiao-jing, WANG Bin, WU Gui-chao, ZHANG Fu-bao, SONG Tao, LUO Yong, CHENG Xiao-nong. Intergranular corrosion and exfoliation corrosion properties of strontium microalloyed 2099 type aluminum alloy with high zinc content[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 248–251.

[14] 许晓静,王 彬,罗 勇,王宏宇,吴桂潮,潘 励,赵梓皓,成 城,宋 涛,程晓农. 钪和锶复合微合金化的高锌 2099 型 铝 合 金 及 其 制 备 方 法:中国,201010134381.4[P].2011-06-22.

XU Xiao-jing, WANG Bin, LUO Yong, WANG Hong-yu, WU Gui-chao, PAN Li, ZHAO Zi-hao, CHENG Cheng, SONG Tao, CHENG Xiao-nong. Preparation methods of Sc and Sr microalloyed 2099 Al-Li alloy with high Zn content: China, 201010134381.4[P]. 2011–06–22.

- [15] GB/T 228—2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S].
   GB/T 228—2002. Metallic materials—Tensile testing at ambient temperature[S].
- [16] GB/T 4161—2007. 金属材料平面应变断裂韧度 K<sub>IC</sub> 试验方法
   [S].

GB/T 4161—2007. Metallic materials–Determination of planestrain fracture toughness[S].

- [17] 林 钢,林慧国,赵玉涛. 铝合金应用手册[M]. 北京: 机械 工业出版社, 2006: 364-404.
  LIN Gang, LIN Hui-guo, ZHAO Yu-tao. Aluminum alloy application manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 364-404.
  [18] 潘复生,张丁非. 铝合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社,

PAN Fu-sheng, ZHANG Ding-fei. Aluminum alloy and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 301–327.

(编辑 李艳红)