

2099 和 2196 铝锂合金挤压型材拉伸性能

王 望¹ 王永军¹ 刘天骄¹ 王 健² 韩 钢²

(1 西北工业大学,陕西省数字化制造工程技术研究中心,西安 710072)

(2 中航飞机西安飞机分公司,西安 710089)

文 摘 对4种不同截面2099-T83和2196-T8511铝锂合金挤压型材进行了单向拉伸试验研究,获得了不同截面、侧壁和厚度型材的应力—应变关系曲线和力学性能。观察铝锂合金的断口形貌发现,各断口分布有不规则的撕裂带和韧窝,2196-T8511比2099-T83铝锂合金断口中的韧窝小且浅,表明2099-T83铝锂合金塑性较好,与力学性能测试结果相吻合。

关键词 铝锂合金,挤压型材,单向拉伸,拉伸性能,断口形貌

中图分类号: TG113.25

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.04.011

Tensile Properties of 2099 and 2196 Al-Li Alloy Extrusions

WANG Wang¹ WANG Yougjun¹ LIU Tianjiao¹ WANG Jian² HAN Gang²

(1 Shaanxi Engineering Research Center for Digital Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

(2 AVIC Xi'an Aircraft Industry Company, Xi'an 710089)

Abstract Uniaxial tensile tests were carried out to investigate the variation of the tensile properties on 2099-T83 and 2196-T8511 Al-Li alloy extrusions. Each material involved four kinds of cross-section extrusions. The true stress-strain curves and mechanical properties of different cross-sections, the different sidewall and different thickness were determined. Irregular tear zone and dimples are distributed everywhere by observing the fracture surface of Al-Li alloy. Dimples in 2196-T8511 are smaller and shallower than the 2099-T83 Al-Li alloy, indicating that the plasticity of 2099-T83 Al-Li alloy is better, which is consistent with the mechanical properties.

Key words Al-Li Alloy, Extrusions, Uniaxial tensile tests, Tensile property, Fracture surface morphology

0 引言

铝锂合金以其比强度和比模量高、抗疲劳性和耐腐蚀性能好等优异的综合性能被用于大型客机的零件(如框缘类零件)制造^[1-5]。铝锂合金的应用已经成为减轻飞机质量、增加负载和提高燃油效率的一种重要的途径^[6]。美国 Alcoa 公司研制的 2099 新型铝锂合金,具有较高的损伤容限、耐超低温性能和热暴露稳定性能^[7-11]。2196 合金是由 Alcan 公司注册的一种可焊铝锂合金,与 7075 合金相比,具有更高的强度、更低的密度和良好的腐蚀性能,主要用于挤压型材。

铝锂合金挤压型材与板材相比,其基本力学性能

具有特殊性。Paulsen 等^[12]研究发现,即使材料相同,挤压型材的厚度和截面形状不同,其基本力学性能也有较大差异。Tryland 等^[13]也验证了这一观点,但截取的试样在同一根型材的不同侧壁、沿型材长度方向不同位置时,力学性能差别不大^[14]。因此,型材力学性能参数不具有通用性,要获得材料准确的力学性能数据,需要对具体的型材进行实验研究。而基本力学性能数据的匮乏是目前数值模拟和理论计算遇到的难点之一^[15]。

对于截面为非对称或不规则形状的型材,型材原料不同部位在成形过程受力状态、热处理条件可能因为截面相对位置不一致而导致各部分材料力学性能

收稿日期:2013-11-22;修回日期:2014-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275420),航空科学基金资助项目(2008ZE53037)

作者简介:王望,1991年出生,硕士研究生,主要研究塑性成形基础理论。E-mail:519473156@qq.com

有所差异。因此,有必要在型材的多个部位取样,进行单拉试验,来获取其准确的材料力学性能参数。本文选取 2099-T83 和 2196-T8511 两种铝合金的 4 种不同截面型材进行实验,获得材料的应力与应变曲线,得到不同截面、侧壁以及厚度情况下材料力学性能的差异以及变化规律。

1 试验

1.1 材料

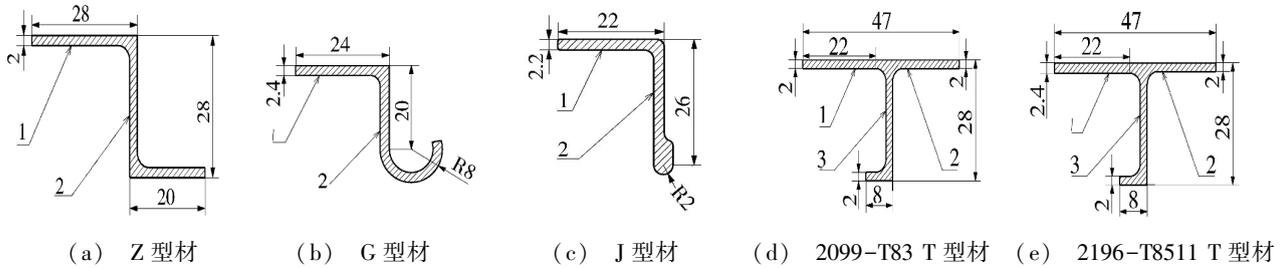


图 1 型材的截面图

Fig. 1 Cross-sectional view of extrusions

截取试样的过程中,由于型材侧壁宽度与所需截取的试件的宽度相当,所以在每个侧壁的宽度方向只能截取一个试件,其他试件沿着型材长度方向均匀排列。对于 Z、G 和 J 型材来说,两种材料对应的截面尺寸均一致,只对 T 型材来说,这两种材料的截面稍有差异。

1.3 试件尺寸

材料的力学性能按 GB6397—86 测试。

4 种型材所截得的试件厚度有 2、2.2 和 2.4 mm,除了 2 mm 与 2.4 mm 厚度均可以取自材料 2196-T8511 的 T 型材之外,其他均来自不同的型材,并且在 Z 型材和 T 型材上都可以截得 2 mm 厚的试件。

2 基本力学性能试验

采用 CSS-44100 电子万能试验机进行 2099-T83 和 2196-T8511 铝锂合金型材单向拉伸试验。

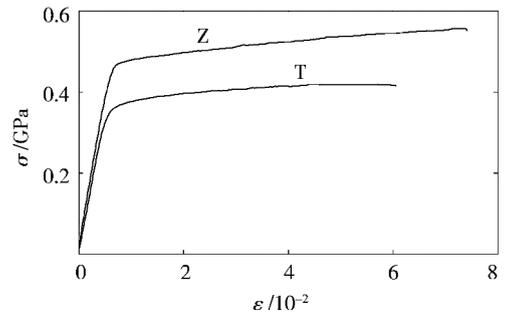
2.1 型材不同截面的力学性能

分别取 Z 型材与 T 型材上所截取的试件(厚度均为 2 mm)在试验机上拉伸至断裂,每种材料与截面下取得三组有效试验数据,各自得到 3 条名义上的应力—应变曲线,取其中各参数接近平均值的一组试验数据,将 Z 型材与 T 型材上试件所得到的曲线进行对比,得到 2099-T83 与 2196-T8511 铝锂合金 Z 型材与 T 型材的真实应力—应变关系如图 2 所示(2099Z 型材的试件取自侧壁 1, T 型材试件取自侧壁 2, 2196Z 型材的试件取自侧壁 2, T 型材的试件取自侧壁 2)。

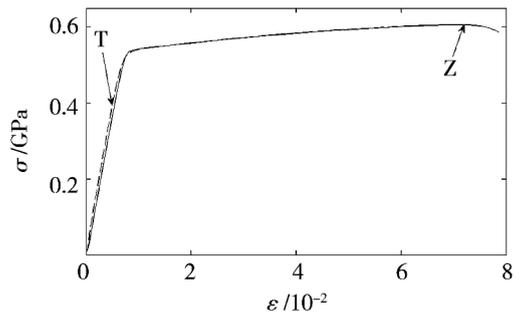
2099/2196 时效状态铝锂合金的 4 种不同截面的挤压型材,根据 AMS4287A 和 AMS4416,获得 2099 和 2196 的主要合金元素质量分数分别为:2.7Cu-1.8Li-0.7Zn-0.3Mn-0.3Mg-0.08Zr 和 2.9Cu-1.7Li-0.4Mg-0.4Ag-0.10Zr。

1.2 型材截面

2099-T83 和 2196-T8511 铝锂合金的 Z、T、G 和 J 型材截面如图 1 所示。



(a) 2099-T83



(b) 2196-T8511

图 2 铝锂合金不同截面型材的应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for different cross-sections of Al-Li alloy

采用弹性-幂次强化模型对曲线进行拟合,模型表达式为

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_s \\ \sigma = K\varepsilon^n & \varepsilon > \varepsilon_s \end{cases} \quad (1)$$

利用 Matlab 软件对试验数据进行拟合,获得材料的力学性能参数,表 1 为 2099-T83 和 2196-T8511 铝锂合金在不同截面型材的力学性能参数。

表1 铝锂合金在不同截面型材的拉伸性能

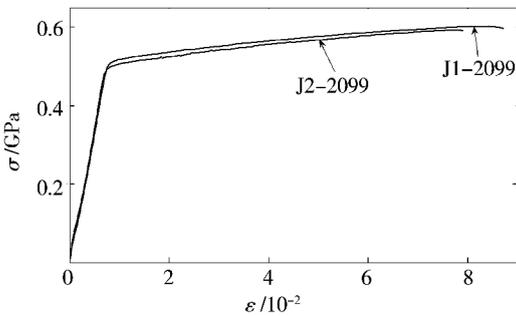
Tab.1 Tensile properties for different cross-sectional extrusions of Al-Li alloy

截面	牌号	$E/$ GPa	$\sigma_s/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$K/$ MPa	n	$\delta/$ %
Z	2099	77.02	473.02	559.48	676.73	0.0754	7.50
	2196	76.66	535.12	607.72	713.98	0.0612	7.30
T	2099	76.8	363.21	419.47	518.97	0.0668	5.70
	2196	79.85	526.97	602.08	714.87	0.0635	7.35

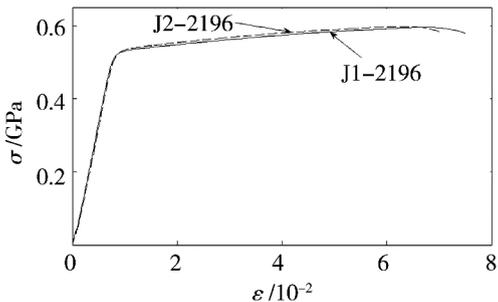
对于 2099-T83 铝合金材料,Z 型材与 T 型材截面材料的弹性模量差异不大,而其他的力学性能参数相差较大,Z 型材上的屈服、抗拉强度以及延伸率都较 T 型材大很多。而对于 2196-T8511 铝合金材料,Z 型材与 T 型材的应力—应变曲线几乎重合,仅 T 型材的弹性模量较 Z 型材稍大,而其他的力学性能参数的数值相差很小,对于 2196-T8511 铝合金来说,型材的截面不同对材料的力学性能的影响可以忽略不计。

2.2 型材不同侧壁的力学性能

分别取 J 型材上所截取的两种不同侧壁如图 2 (c) 所示(厚度均为 2.2 mm)的试件进行试验,得到 2099-T83 和 2196-T8511 铝锂合金不同侧壁的应力—应变关系如图 3 所示。



(a) 2099-T83



(b) 2196-T8511

图3 铝锂合金 J 型材在不同侧壁的应力—应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves for different wall of J-section extrusion of Al-Li alloy

J1 和 J2 分别代表的是从 J 型材侧壁 1 和 2 上所截取的试件。

采用弹性—幂次强化模型,对试验数据进行拟合,获得材料的各个参数,2099-T83 和 2196-T8511 在 J 型材不同侧壁上的力学性能参数见表 2。

表2 铝锂合金 J 型材不同侧壁的拉伸性能

Tab.2 Tensile properties for different wall of J-section extrusion of Al-Li alloy

编号	牌号	$E/$ GPa	$\sigma_s/$ MPa	$\sigma_b/$ MPa	$K/$ MPa	n	$\delta/$ %
J1	2099	73.44	515.78	600.44	726.45	0.0759	8.07
	2196	70.51	525.19	588.56	707.20	0.0670	6.80
J2	2099	74.43	494.11	586.30	717.64	0.0823	7.87
	2196	69.03	528.40	592.41	708.51	0.0648	7.87

对于 2099-T83 铝锂合金,在同一型材的不同侧壁,材料的弹性模量几乎不变,材料的屈服强度与抗拉强度稍有差别。对于 2196-T8511 铝锂合金,型材不同侧壁的应力—应变曲线几乎重合,各力学性能参数几乎没有变化。

2.3 型材不同厚度的力学性能

对这 4 种不同截面的型材,只有 2196-T8511 铝合金 T 型材的不同侧壁具有不同厚度($t=2$ 与 2.4 mm),并且在之前的试验中,可以得出对于 2196-T8511,型材的不同侧壁对其力学性能的影响很小,所以,仅研究 2196-T8511 铝锂合金型材在同一截面上的不同厚度变化对材料力学性能的影响。如图 4 所示为 T 型材上不同厚度情况下的应力—应变关系图。

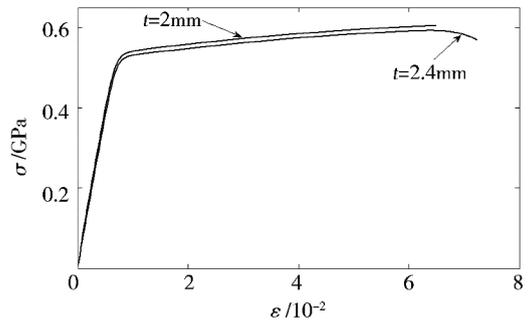


图4 2196-T8511 铝锂合金 T 型材在不同厚度的应力—应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves for different thicknesses of T-section extrusion of Al-Li alloy 2196-T8511

采用弹性—幂次强化模型,对试验数据进行拟合,获得材料的各个参数,2196-T8511 在同一型材截面不同厚度上的力学性能参数如表 3 所示。

在同一型材上不同的试件厚度会影响材料的力学性能,对于 2196-T8511 铝合金,厚度越大,材料的屈服强度、抗拉强度、应变硬化系数和指数反而越小。

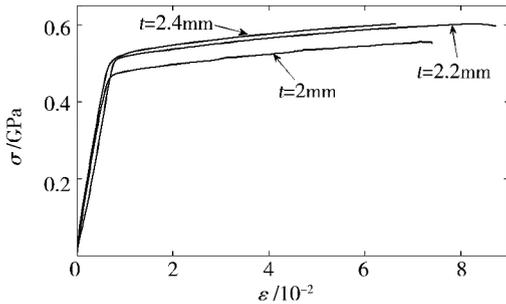
在之前的试验中,可以得出对于 2196-T8511,不同型材对其力学性能的影响较小,所以,分别取 Z 型

材($t=2\text{ mm}$)、J 型材($t=2.2\text{ mm}$)与 G 型材($t=2.4\text{ mm}$)上所截取的试件进行试验,得到 2099-T83 和 2196-T8511 铝锂合金不同厚度的应力—应变曲线(图 5)。

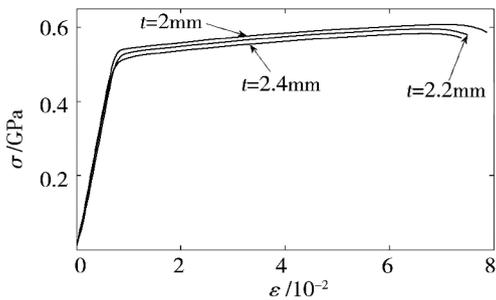
表 3 2196-T8511 铝锂合金在 T 型材截面不同厚度的拉伸性能

Tab.3 Tensile properties for different thicknesses of T-section extrusion of 2196-T8511 Al-Li alloy

t/mm	E/GPa	σ_s/MPa	σ_b/MPa	K/MPa	n	$\delta/\%$
2.4	73.17	519.93	592.23	705.867	0.0640	6.97
2.0	79.85	526.97	602.08	714.873	0.0635	7.35



(a) 2099-T83



(b) 2196-T8511

图 5 铝锂合金不同厚度的真实应力—应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves for different thicknesses of Al-Li alloy

其中图 5(a)中 2 mm 厚度的试件取自 Z 型材的侧壁 1,厚度为 2.2 mm 的试件取自 J 型材的侧壁 1, 2.4 mm 厚度试件取自 G 型材的侧壁 2。图 5(b)中 2 mm 厚度的试件取自 Z 型材的侧壁 2,厚度为 2.2 mm 的试件取自 J 型材的侧壁 2,2.4 mm 厚度试件取自 G 型材的侧壁 2。

采用弹性-幂次强化模型,利用 Matlab 软件对试验数据进行拟合,获得材料的各个参数,2099-T83 和 2196-T8511 在不同厚度上的力学性能参数见表 4。可知,型材的厚度影响材料的力学性能。对于 2099-T83 合金,随着试件厚度的增大,其屈服、抗拉强度以及应变硬化系数和应变硬化指数均增大,而弹性模量与延伸率变化不大。而对于 2196-T8511 合金,随着试件厚度的增加,材料的屈服、抗拉强度、应变硬化系

数与指数减小。

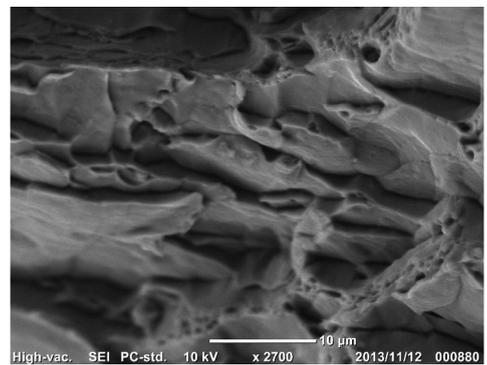
表 4 铝锂合金在不同厚度上的拉伸性能

Tab.4 Tensile properties for different thicknesses of Al-Li alloy

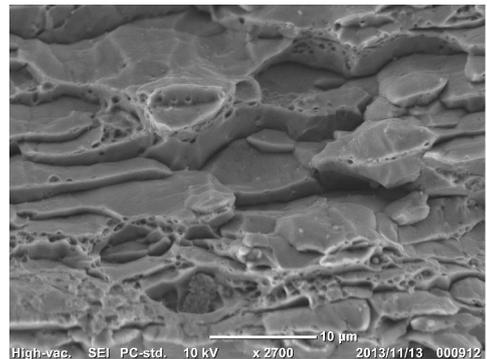
t/mm	牌号	E/GPa	σ_s/MPa	σ_b/MPa	K/MPa	n	$\delta/\%$
2.4	2099	77.02	473.02	559.48	676.73	0.0754	7.50
	2196	76.66	535.12	607.72	713.98	0.0612	7.30
2.0	2099	73.44	515.78	600.44	726.45	0.0759	8.07
	2196	70.51	525.19	588.56	707.20	0.0670	6.80

3 断口形貌

采用日本电子 JCM-6000 电子扫描电镜对试件的断口进行观察,发现两种材料的试件断口都表现为大量台阶状的撕裂带,在其表面有少量小而浅的韧窝,如图 6 所示。对比两种材料的拉伸变形断口^[16], 2196-T8511 比 2099-T83 合金断口中的韧窝小且浅。同时,由各断口中不规则分布的撕裂带和韧窝。由单向拉伸试验可以得到 2099-T83 与 2196-T8511 合金的伸长率都在 7% 左右,属于韧性断裂。而 2099-T83 合金的伸长率比 2196-T8511 的稍高,同时, 2099-T83 合金试件断口内的韧窝较深,分布较广,因此,其塑性稍优于 2196-T8511,这与力学性能试验数据相吻合。



(a) 2099-T83 合金



(b) 2196-T8511 合金

图 6 材料的断口形貌

Fig.6 Fracture surface morphology

4 结论

研究 2099-T83 和 2196-T8511 合金挤压型材的力学性能和断口形貌,可得到如下结论:

(1) 4 种截面 2099-T83 和 2196-T8511 合金挤压型材不同侧壁(不同侧壁的厚度不同)材料力学性能试验研究表明:不同截面、不同侧壁和不同厚度型材的材料力学性能有差异。2196-T8511 和 2099-T83 合金的延伸率几乎均小于 8%,2099-T83 合金的延伸率略高。其中,2196-T8511 的抗拉强度为 588 ~ 602 MPa,而 2099-T83 的抗拉强度为 419 ~ 611 MPa。

(2) 2099-T83 和 2196-T8511 合金的断口都分布着大量台阶状的撕裂带,并在其表面有少量小而浅的韧窝,其中 2099-T83 合金试件断口内的韧窝较深,分布较广,说明 2099-T83 合金的塑性较好,这与试验结果吻合。

参考文献

[1] 刘天骄,王永军,吴建军等. 大型客机铝锂合金型材拉弯成形关键技术[J]. 航空制造技术,2012(17):40-44

[2] 张荣霞,曾元松. 铝锂合金的发展,工艺特性及国外应用现状[J]. 航空制造技术,2007(增刊):438-441

[3] 尹登峰,郑子樵. 铝锂合金的研究开发的历史现状[J]. 材料导报,2003(2):19-23

[4] 邱惠中. 铝锂合金的发展概况及其应用[J]. 宇航材料工艺,2001,31(4):38-45

[5] 刘斌,陈铮铮. 铝锂合金的发展与应用[J]. 现代机械,2001(4):71-75

[6] Rioja R J, Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications[J]. Metall Mater Trans A, 2012,43:3325-37

[7] Ward N, Tran A, Abad A, et al. The effects of retrogression and reaging on aluminum alloy 2099(C458)[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2011,20(6):989-996

[8] Romios M, Tiraschir, Parrish C, et al. Design of multi-step aging treatments of 2099(C458) Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2005,14(5):641-646

[9] Jabra J, Romios M, Lai J, et al. 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

[10] 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

[11] Ortiz D, Brown J, Abdelshheid M, et al. 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

[12] Paulsen F, Welo T. Cross-sectional deformations of rectangular hollow sections in bending: part I - experiments[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2001,43(1):109-129

[13] Tryland T, Hopperstad O S, Langseth M. Design of experiments to identify material properties[J]. Materials and Design,2000,21(5):477-492

[14] 刁可山,周贤宾,李晓星等. 铝合金 AA6082(T5)挤压型材基本力学性能试验和成形极限图的建立[J]. 中国机械工程,2004,15(13):1202-1204

[15] 刁可山,周贤宾,金朝海. 铝合金型材拉弯成形研究进展[J]. 塑性工程学报,2003,10(6):38-42

[16] 刘瑛,张新明,李慧中,等. 3 种高强铝合金的低温拉伸力学性能研究[J]. 金属热处理,2007,32(1):53-55

(编辑 吴坚)