

两种结构用铝合金循环加载试验研究^{*}

郭小农, 邹家敏, 刘林林, 高舒羽[†]

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:铝合金材料的滞回性能是研究铝合金结构抗震性能的基础. 针对国产 6082-T6 和 7020-T6 铝合金, 采用等幅升幅、等幅交替和循环拉伸 3 种不同的加载制度进行循环加载试验, 最大应变控制在 $\pm 4\%$. 试验采用标距与直径比为 1.5 的小标距试件防止其在循环加载时发生受压失稳. 小标距试件和标准试件的单调拉伸结果对比表明, 在 4% 的应变范围内, 小标距试件和标准试件的试验结果相差很小, 因此采用小标距试件进行循环加载试验是可行的. 通过循环加载试验获得了铝合金材料的应力-应变关系及滞回特性. 试验结果显示, 铝合金材料有良好的滞回性能和延性, 加载方式对其骨架曲线有一定影响.

关键词:铝合金; 循环加载试验; 滞回性能

中图分类号: TU512.4

文献标志码: A

Cyclic Loading Tests of Two Types of Structural Aluminum Alloy

GUO Xiaonong, ZOU Jiamin, LIU Linlin, GAO Shuyu[†]

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The hysteretic behavior of aluminum alloy is fundamental for studying the seismic behavior of aluminum alloy structures. A total of three different loading protocols, including cyclic ascending, cyclic alternating and cyclic tensile, with the maximum strain amplitude up to $\pm 4\%$, were adopted for the 6082-T6 and 7020-T6. In order to avoid buckling, the small gauge specimen with length-to-diameter ratio of 1.5 was adopted. The comparison of monotonous tensile results between the small gauge specimen and standard specimen revealed that the error of the two specimens was very small, which indicated the feasibility of the adoption of the small gauge specimens. The stress-strain relationship and hysteretic behavior of aluminum alloy were also obtained by cyclic loading test. The obtained results show that the aluminum alloy has good hysteretic behavior and ductility, and the load protocol influences its skeleton curve to a certain extent.

Key words: aluminum alloy; cyclic loading test; hysteretic behavior

由于铝合金结构具有自重轻、耐腐蚀和易加工 等诸多优点, 在国内外应用十分广泛^[1-2]. 随着铝

^{*} 收稿日期: 2017-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478335), National Natural Science Foundation of China(51478335)

作者简介: 郭小农(1977-), 男, 四川成都人, 同济大学副教授, 工学博士

[†] 通讯联系人, E-mail: 1630545@tongji.edu.cn

合金结构应用日益增多,许多学者对铝合金结构的静力承载性能进行了深入研究^[3-6];同时,诸多学者对铝合金结构的抗震性能也开展了研究,2016年,同济大学郭小农等^[7]对铝合金板式节点网壳的阻尼特性进行了试验研究,并建议其阻尼比可取为3%。

6082-T6 铝合金是我国近年来研发的新型合金牌号,其强度比 6061-T6 略高而延伸率略低,主要用于铝合金结构构件;7020-T6 铝合金的强度更高,通常用于铝合金结构的连接螺栓以及节点板。在强震作用下,铝合金构件和节点均会经历较大的循环塑性变形,可能因为过大的塑性变形而断裂,从而引发整个结构的破坏。为了深入研究铝合金结构在强震作用下的延性和耗能能力,首先需要研究铝合金材料的滞回性能。

目前,国外对铝合金本构关系进入了深入的研究^[8],并提出了诸多本构关系模型。如 Ramberg 和 Osgood^[9]于 1939 年提出的三参数 Ramberg-Osgood 模型;Baehre 于 1966 年提出的贝尔模型^[10];Mazzolani 在其著作《铝合金结构》中提出的马佐拉尼模型^[10]。而在国内,同济大学郭小农等^[11]完成了 45 个国产结构铝合金拉伸试验,试验结果表明国产结构用铝合金 6061-T6 的本构关系可以采用 Ramberg-Osgood 模型表达,其指数 n 可以根据 Steinhartdt 建议确定。

相对于单调拉伸本构关系的研究,国内外对于铝合金材料滞回性能的研究还不够成熟,1995 年, Hopperstad 等^[12]对 AA6060-T4、AA6060-T6 铝合金进行了单轴滞回性能的试验和数值研究,试验应变幅最大为 1.2%,结果表明两种材料的滞回曲线都比较饱满,且表现出一定的包辛格效应,其中 T4 试件表现出明显的循环硬化,而 T6 则表现出不明显的循环软化特性。2012 年,意大利 Matteis 等^[13]对 EN-AW-1050A-H24 铝合金(一种经过热处理后性能接近于纯铝的材料)进行了拟静力试验,试验结果表明材料具有良好的循环受力特性,滞回环稳定饱满,相同位移下拉压应力幅值基本一致,等向硬化现象明显。2013 年,波兰 Dusicka 等^[14]采用热处理铝合金 6061-T6511 进行了单调拉伸和循环加载试验,试验结果表明滞回曲线由初期线弹性直线段、平滑非线性过渡段和塑性发展段构成,且卸载刚度与初始刚度基本相同。总体来说,目前欧洲学者对铝合

金属材料滞回性能有一定研究,但材料的牌号有限;而国内对于铝合金滞回性能的研究则基本空白。

基于此,本文以 6082-T6 和 7020-T6 两种牌号的铝合金作为研究对象,在 3 种循环加载制度下进行滞回性能试验,研究铝合金材料在循环荷载下的滞回性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验针对 6082-T6 和 7020-T6 两种牌号的铝合金材料,进行 $-4\% \sim +4\%$ 应变幅的循环加载。

试验中铝合金材料的力学性能由单调拉伸试验确定。单调拉伸标准试件根据国家标准 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》^[15]设计,具体尺寸如图 1(a)所示。其中,标距段长度为 65 mm,直径为 10 mm,标距与直径之比为 5.0,夹持端直径为 20 mm。

为避免在循环加载试验过程中发生受压失稳现象,循环加载试件采用了较小标距。本文根据国家标准 GB/T 15248-2008《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》^[16]设计了小标距循环加载试件,如图 1(b)所示。其中,标距段长度为 15 mm,直径为 10 mm,标距与直径之比为 1.5,夹持端直径为 20 mm。

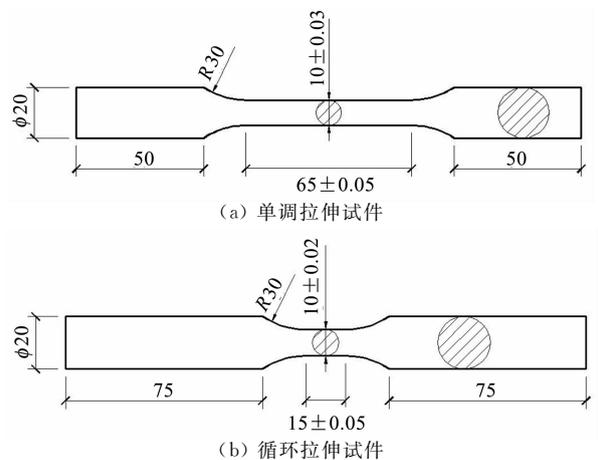


图 1 试件尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Specimen size(Unit:mm)

每种牌号的铝合金材料分别设计 3 根单调拉伸试验标准试件、1 根单调拉伸试验小标距试件和 3 根对应着 3 种不同循环加载制度的小标距循环加载试件。试件编号如表 1 所示。

1.2 加载制度

本试验在上海交通大学力学实验中心疲劳和断裂联合实验室 MTS-Landmark (100 kN) 试验机上进行,试验装置见图 2。在试验过程中,小标距试件采用标距为 10 mm 的引伸计采集变形。

循环加载的加载制度通过计算机编程实现,计算机通过名义应变控制整个加载过程,试验程序符合国家标准 GB/T 15248—2008。具体加载制度见表 2 及图 3。循环加载加载制度均采用三角波,加载应变速率为 0.000 5/s。在加载制度完成后,取下引伸计,将轴向力卸载至零,然后拉断。



(a) MTS 试验机



(b) 10 mm 引伸计

图 2 试验加载装置

Fig.2 Test loading device

表 1 试件编号表

Tab.1 Specimen number table

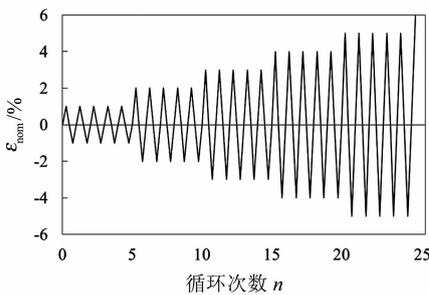
材料牌号	单调拉伸 (标准试件)	单调拉伸 (小标距试件)	等幅升幅	等幅交替	循环拉伸
6082-T6	AL6-1 (2,3)	AL6-0	AL6-a	AL6-b	AL6-c
7020-T6	AL7-1 (2,3)	AL7-0	AL7-a	AL7-b	AL7-c

表 2 循环加载制度

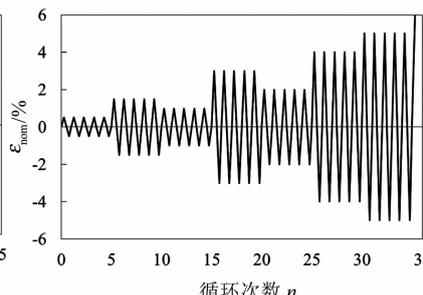
Tab.2 Cyclic loading system

加载制度	加载方式
等幅升幅	0 → ±0.01 (5) → ±0.02 (5) → ±0.03 (5) → ±0.04 (5) → 拉断
等幅交替	0 → ±0.005 (5) → ±0.001 5 (5) → ±0.01 (5) → ±0.03 (5) → ±0.02 (5) → ±0.04 (5) → 拉断
循环拉伸	0 → 0.005 (5) → 卸载(荷载卸载到 0) → 0.01 (5) → 卸载 → 0.001 5 (5) → 卸载 → 0.02 (5) → 卸载 → 0.03 (5) → 卸载 → 0.004 (5) → 卸载 → 0.005 (5) → 拉断

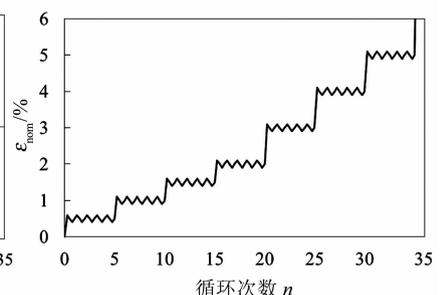
注:括号前的数据为目标应变值,用名义应变表达;括号内的数字为循环次数。



(a) 等幅升幅



(b) 等幅交替



(c) 循环拉伸

图 3 循环加载制度示意图

Fig.3 Cyclic loading system

2 试验结果及分析

2.1 单调拉伸试验结果

为了验证小标距试件结果的合理有效性,首先完成了小标距试件的单调拉伸试验,并将其结果与标准试件拉伸试验结果进行了对比。单调拉伸试验加载方式根据国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》的规定进行。当应力小于名义屈服强度时,单调试验的加载速率为 0.1 mm/min;应力达到名义屈服强度后再以

0.5 mm/min 的加载速率将试件拉断。

图 4 为标准试件和小标距试件单调拉伸试验后的破坏形态对比,表 3 为两类试件单调试验结果对比。AL6 小标距试件与标准试件破坏形态大致相同,在断口附近有明显的颈缩,断口截面成杯口形状;而 AL7 小标距试件断口附近颈缩不明显,断口截面接近于平面。从表 3 可以看出,标准试件单调拉伸得到的名义屈服强度、抗拉强度和断后延伸率均符合国家标准 GB/T228.1—2010 要求;小标距试件单调拉伸试验的名义屈服强度和抗拉强度与标准试件相差较小,但因其标距只有 15 mm,颈缩段所

占比例远大于标准试件,故断后伸长率远大于标准试件.图5为两类试件的名义应力-应变曲线对比,从图中可以看出在名义应变 $\epsilon_{nom} < 0.040$ 时,标准试件和小标距试件的曲线基本重合,这说明小标距试件在 $\pm 4\%$ 应变范围内进行循环加载是可行的.

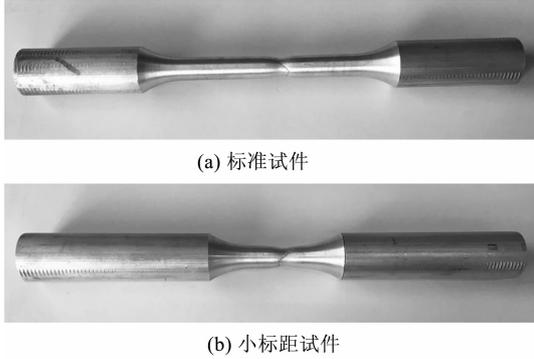


图4 单调拉伸试验后试件破坏形态

Fig. 4 Failure mode of monotonic tensile specimen

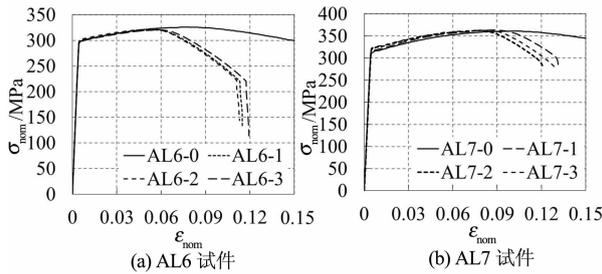


图5 标准试件与小标距试件名义应力-应变曲线

Fig. 5 Comparison of standard specimen and small gauge specimen

表3 单调拉伸试验结果对比

Tab. 3 Comparison of monotonic tensile test results

试件编号	名义屈服强度 $f_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 E/MPa	屈强比 $f_{0.2}/f_u$	断后伸长率 $\delta/\%$	断后收缩率 $\Psi/\%$
AL6-标准	298.3	321.0	70 714	0.89	10.21	52.42
AL6-小标距	299.1	325.9	70 154	0.89	34.40	55.21
AL7-标准	321.2	363.9	72 040	0.88	12.65	39.70
AL7-小标距	314.4	361.0	71 621	0.89	24.40	45.24

2.3 循环加载试验结果

各循环加载试件的破坏形态如图7所示,各试件编号标注于图中.其中,AL6-a试件为受压失稳破坏,其余试件均为拉断,断口呈金属光泽.AL7-c、AL6-c这两根循环拉伸试件,试验现象与单调拉伸试验类似,有明显的颈缩段,断口呈杯口状;AL7-a、AL7-b试件在试验过程中没有明显的颈缩现象,断口较单调拉伸试件更为平整;AL6-b试件发生与单调拉伸试验相似的颈缩现象,表现为塑性断裂模式.

2.2 真实应力-应变曲线和名义应力-应变曲线对比

众所周知,当应变较大时,真实应力-应变曲线和名义应力-应变曲线之间会出现较大差异.为了衡量应变范围 $\pm 4\%$ 以内名义应力-应变关系的准确性,本节将单调拉伸得到的名义应力-应变曲线和真实应力-应变曲线进行了对比.真实应力应变的转换公式如式(1)、式(2)所示,其中 σ 和 ϵ 分别为真实应力和真实应变, σ_{nom} 和 ϵ_{nom} 分别为名义应力和名义应变.

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{nom}) \quad (1)$$

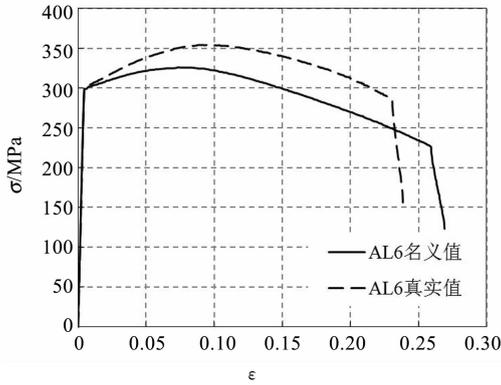
$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (2)$$

图6列出了AL6和AL7小标距试件的真实应力-应变曲线和名义应力-应变曲线;表4给出了真实应力和名义应力的数值对比.从图6可知,当 $\epsilon_{nom} = 0.040$ 时,真实应力-应变曲线和名义应力-应变曲线已经有明显的分叉,越到后期分叉越大.从表4可以看出,当名义应变 $\epsilon_{nom} = 0.040$ 时,对应的名义应力和真实应力最大差别为4.18%;当名义应变 $\epsilon_{nom} = 0.050$ 时,对应的名义应力和真实应力最大差别为5.25%;而真实抗拉强度和名义抗拉强度的最大差别则达到了11.1%.由此可见,当 $\epsilon_{nom} > 0.050$ 时,宜采用真实曲线代替名义曲线.后文循环加载试验的名义应变均不超过5%,采用名义应力-应变的偏差较小,故对试验数据的分析讨论均可直接采用名义应力-应变数值.

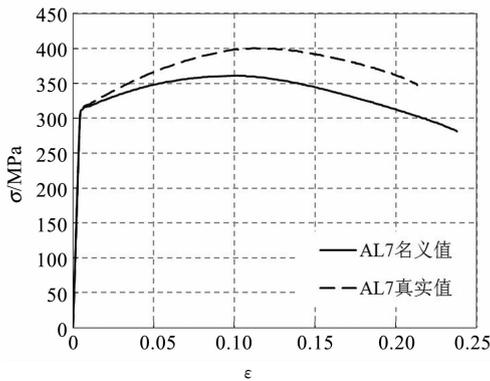
表4 真实应力和名义应力值对比

Tab. 4 Comparison of true and nominal stress values

试件编号	两种应力	名义应变		抗拉强度 f_u
		5%	4%	
AL6-0	名义应力	321.7	318.2	321.0
	真实应力	338.6	331.5	354.1
AL7-0	名义应力	348.2	342.1	361.0
	真实应力	366.7	355.9	400.8



(a) AL6 小标距曲线对比



(b) AL7 小标距曲线对比

图 6 小标距试件名义应力-应变曲线与真实应力-应变曲线对比
Fig. 6 Comparison of nominal stress-strain curve and true stress-strain curve

延伸率;同时也揭示了拉压循环的累积塑性应变对于铝合金材料损伤的影响. 另外还可以发现 AL7 试件的断后伸长率小于 AL6 构件,说明 AL7 铝合金材料的塑性弱于 AL6 铝合金材料,这也佐证了 AL7 小标距试件破坏的断口更加平整以及颈缩段不明显的现象.

图 8 为 6 根试件在循环加载制度下的名义应力-应变滞回曲线. 从图 8 可以看出铝合金材料的滞回曲线比较饱满,滞回性能较好. 随着应变的增加,应力也不断上升,试件发生循环硬化;当应变增加到一定程度后,硬化现象不再明显. 表 6 给出了试件 AL6-a 在每个循环应变达到设定值时所对应的应力值. 从表 6 和图 8 可以看出,在同一应变幅下的各圈滞回曲线并不完全重合,表现出一定的应力强化现象. 各级循环的卸载弹性模量大致相同,这说明循环塑性损伤对于铝合金材料滞回性能影响不大. 另外从图 8 还可以看出,等幅升幅试件在第 1 圈循环中,其拉伸时的屈服点大于反向压缩卸载时的屈服点,表现出一定的包辛格效应.

表 5 循环加载试件的断后延伸率
Tab. 5 The elongation at break of the specimens after cyclic loading

试件编号	实测直径 D/mm	断后伸长率 δ/%
AL6-a	10.00	—
AL6-b	10.00	20
AL6-c	10.00	40
AL7-a	10.00	15
AL7-b	10.00	14
AL7-c	9.99	28

图 9 对比了 AL6-a 和 AL7-a 试件的各个循环应力-应变曲线. 表 7 给出了不同应变范围内 AL6-a 和 AL7-a 滞回环面积比较.

从图 9 和表 7 可以看出在应变幅较小时,AL7-a 的耗能能力高于 AL6-a 耗能能力,其原因是 ±1%、±2% 应变均未达到两种铝材的极限应变,而 AL7 的强度更高,其对应的滞回环面积更大;图 9 (c)取破坏前最后一圈滞回曲线作为包络曲线,对比两试件的滞回曲线包络线,可以发现 AL6-a 试件的包络曲线所围面积大于 AL7-a 试件,其原因是 AL7-a 试件均先于 AL6-a 试件破坏,也说明在应变幅较大时,AL7-a 试件的耗能能力小于 AL6-a 试



图 7 试件破坏形态

Fig. 7 Failure mode of specimen

表 5 给出了循环加载试件的实测直径和断后伸长率,其中 AL6-a 由于受压失稳,无法测量其断后伸长率. 由表 5 可以看出,除循环拉伸外,等幅升幅、等幅交替这两种加载制度下的断后伸长率均小于单调拉伸试验(表 2). 其原因是在循环拉伸的加载制度下,积累了较大的拉伸塑性变形,从而降低了断后

件.图10给出了试件AL6-a和AL6-b的滞回曲线包络线对比情况,其对应滞回环面积分别是47.70 J

和43.38 J,这也说明加载方式对于滞回曲线有一定影响.

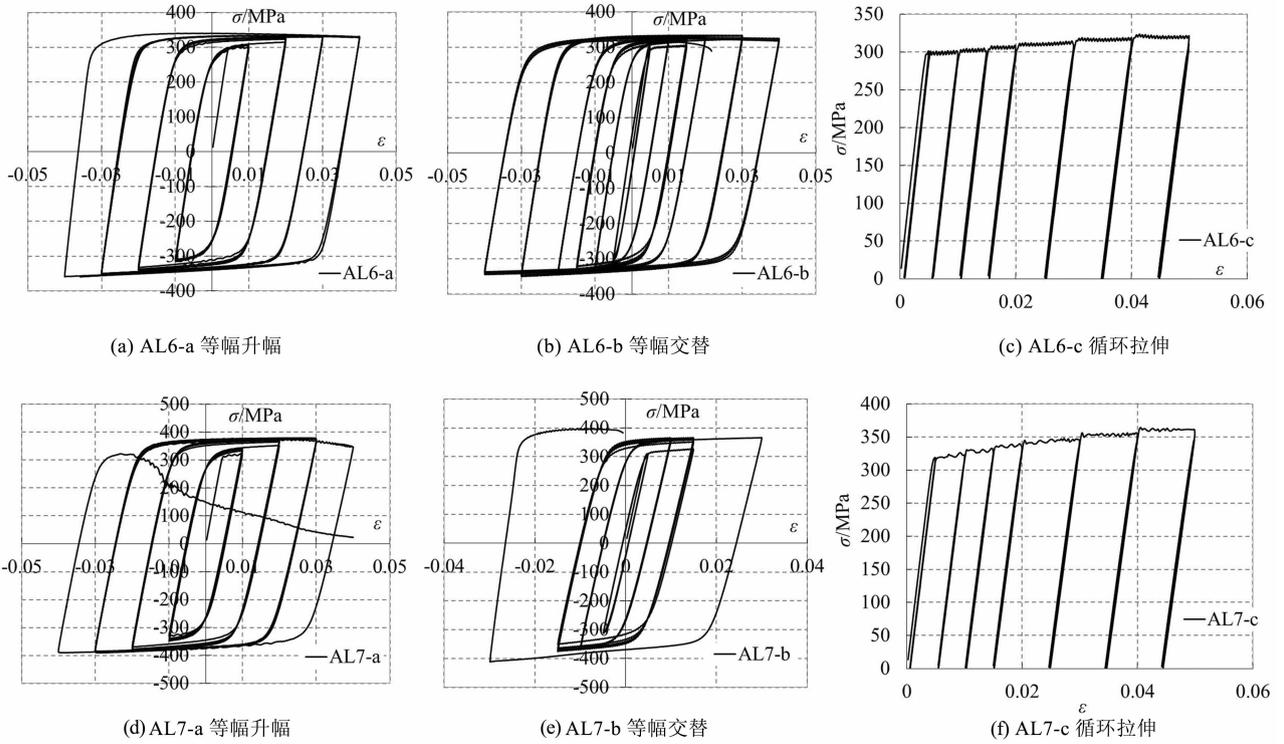


图8 循环加载的应力-应变曲线
Fig. 8 Stress-strain curves of cyclic loading

表6 试件AL6-a各控制点对应的应力
Tab. 6 Stress of the corresponding control points of AL6-a

应变 $\epsilon_{nom}/\%$	第1环 σ/MPa	第2环 σ/MPa	第3环 σ/MPa	第4环 σ/MPa	第5环 σ/MPa	应变 $\epsilon_{nom}/\%$	第1环 σ/MPa	第2环 σ/MPa	第3环 σ/MPa	第4环 σ/MPa	第5环 σ/MPa
+1	300.2	303.1	307.3	308.2	309.0	+3	329.6	331.5	331.4	330.9	331.0
-1	-309.6	-310.2	-311.7	-313.1	-315.4	-3	-349.7	-349.8	-349.7	-350.6	-351.8
+2	315.0	323.6	326.6	328.1	328.8	+4	328.2	331.2	-	-	-
-2	-332.5	-337.7	-339.6	-340.8	-341.2	-4	-358.6	360.1	-	-	-

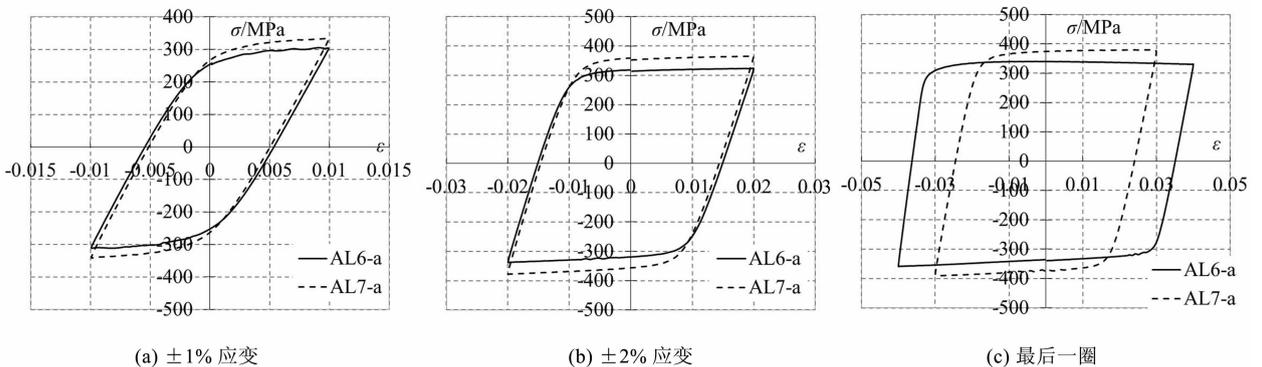


图9 试件AL6-a和AL7-a的应力-应变滞回曲线对比
Fig. 9 Stress-strain hysteresis curves comparison of AL6-a with AL7-a

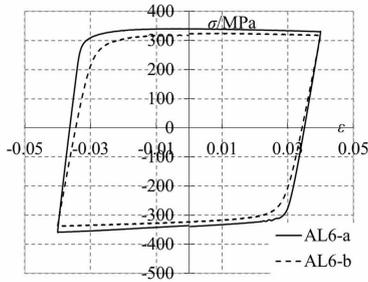


图 10 试件 AL6-a 和 AL6-b 的滞回曲线包络线对比

Fig. 10 Hysteresis curve envelope of AL6-a with AL6-b

2.4 单调拉伸曲线与循环骨架曲线比较

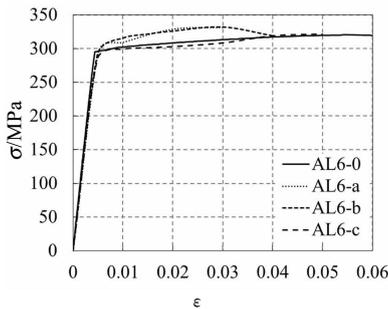
图 11 分别为 AL6 和 AL7 两类小标距试件的单调拉伸曲线和各循环加载制度下第一象限限骨架曲线的对比. 从图 11 可以看出, 循环拉伸试件的骨架

曲线与单调拉伸试件的试验曲线基本重合, 这说明循环拉伸对铝合金材料的本构影响不大; 而等幅升幅和等幅交替试件的骨架曲线在弹性段和单调拉伸试件曲线基本重合, 在塑性段均高于单调拉伸曲线, 这说明在循环加载中, 试件出现了应力强化现象. 从图 11 还可以看到, 在曲线的转折点处, 各骨架曲线和单调拉伸曲线具有一定差异, 骨架曲线提前进入屈服段, 而单调拉伸曲线的弹性段则更长.

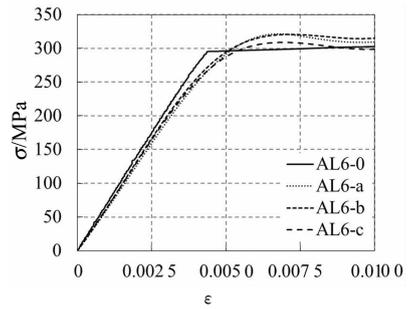
表 7 滞回环面积比较

Tab. 7 Comparison of hysteresis loop area

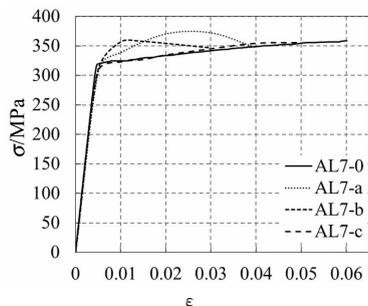
应变范围	AL6-a/J	AL7-a/J	AL6-a/AL7-a
±1%应变	6.03	6.21	97.10%
±2%应变	18.79	20.33	92.42%
最后一圈	47.70	35.63	133.86%



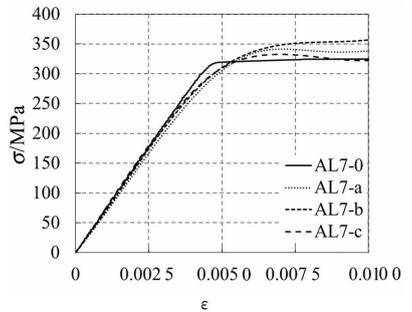
(a) AL6 曲线对比



(b) AL6 曲线局部放大图



(c) AL7 曲线对比



(d) AL7 曲线局部放大图

图 11 骨架曲线和单调拉伸曲线的对比

Fig. 11 Contrast of skeleton curve and monotonic tensile curve

3 结论

本文完成了国产 6082-T6 和 7020-T6 铝合金的循环加载试验, 通过试验可以得出以下结论:

1) 通过单调拉伸试验证明小标距试件和标准试件的实测应力-应变曲线在 5% 应变范围内差别很小, 因而采用小标距试件进行循环加载试验是可行

的, 且使用小标距试件可避免试件在循环拉压试验中受压失稳.

2) 对比了单调拉伸试验得到的名义应力-应变曲线和真实应力-应变曲线, 结果表明在名义应变小于 0.05 时, 真实应力和名义应力之间的最大差别为 5.25%, 因此, 当应变小于 0.05 时, 可以采用名义应力-应变关系分析试件的滞回性能.

3) 循环加载会降低试件的断后伸长率; 在等幅

交替和等幅循环加载方式下,试件延伸率下降最为严重;而在循环拉伸加载方式下,试件延伸率下降较小。

4)循环拉伸加载方式下,试件的骨架曲线基本和单调拉伸试验曲线重合;而在等幅交替和等幅循环加载方式下,试件的骨架曲线在塑性段明显高于单调拉伸试验曲线。

5)试验结果表明 6082-T6 和 7020-T6 这两种牌号的铝合金材料具有一定的耗能能力和延性,且 7020-T6 铝合金的耗能能力和延性弱于 6082-T6 铝合金。

参考文献

- [1] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):100-109.
SHEN Z Y, GUO X N, LI Y Q. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):100-109. (In Chinese)
- [2] 杨联萍,韦申,张其林. 铝合金空间网格结构研究现状及关键问题[J]. 建筑结构学报,2013,34(2):1-19.
YANG L P, WEI S, ZHANG Q L. Aluminum reticulated spatial structures: state of the art and key issues[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2):1-19. (In Chinese)
- [3] GUO X, ZHU S, LIU X, *et al.* Study on out-of-plane flexural behavior of aluminum alloy gusset joints at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123:452-466.
- [4] ZHU S, GUO X, LIU X, *et al.* The in-plane effective length of members in aluminum alloy reticulated shell with gusset joints [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123:483-491.
- [5] 郭小农,熊哲,罗永峰,等. 铝合金板式节点面外初始弯曲刚度的杆件间交互影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(3):36-42.
GUO X N, XIONG Z, LUO Y F, *et al.* The out-of-plane initial bending stiffness interaction of members on the aluminum alloy gusset joint [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(3):36-42. (In Chinese)
- [6] 郭小农,邱丽秋,罗永峰,等. 铝合金板式节点受弯承载力试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2014,41(4):47-53.
GUO X N, QIU L Q, LUO Y F, *et al.* Experimental research on the bending capacity of aluminum alloy gusset joints[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(4):47-53. (In Chinese)
- [7] 郭小农,王丽,相阳,等. 铝合金板式节点壳阻尼特性试验研究[J]. 振动与冲击,2016,35(18):34-39.
GUO X N, WANG L, XIANG Y, *et al.* Experimental study on the damping property of aluminum alloy latticed shells with gusset joints[J]. Journal of Vibration & Shock, 2016, 35(18):34-39. (In Chinese)
- [8] 郭小农,高志朋,朱劭骏,等. 国产结构用铝合金高温力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(7):20-28.
GUO X N, GAO Z P, ZHU S J, *et al.* Experimental research on mechanical property of aluminum alloy at elevated temperatures[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(7):20-28. (In Chinese)
- [9] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters TN-902[R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943:1-13.
- [10] MAZZOLANI F M. Aluminum alloy structures[M]. Boston: Pitman Advanced, 1985:25-31.
- [11] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):110-117.
GUO X N, SHEN Z Y, LI Y Q, *et al.* Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):110-117. (In Chinese)
- [12] HOPPERSTAD O S, LANGSETH M, REMSETH S. Cyclic stress-strain behaviour of alloy AA6060, part I: uniaxial experiments and modelling[J]. International Journal of Plasticity, 1995, 11(6):725-739.
- [13] MATTEIS G D, BRANDO G, MAZZOLANI F M. Pure aluminium: an innovative material for structural applications in seismic engineering [J]. Construction & Building Materials, 2012, 26(1):677-686.
- [14] DUSICKA P, TINKER J. Global restraint in ultra-lightweight buckling-restrained braces[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(1):139-150.
- [15] GB/T 228.1-2010 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2010:9-11.
GB/T 228.1-2010 Metallic materials: tensile testing; part 1: method of test at room temperature[S]. Beijing: China Standard Press, 2010:9-11. (In Chinese)
- [16] GB/T 15248-2008 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008:7-8.
GB/T 15248-2008 The test method for axial loading constant-amplitude low-cycle fatigue of metallic materials[S]. Beijing: China Standard Press, 2008:7-8. (In Chinese)