

## 国产铝合金材料滞回本构模型研究

王丽,郭小农,刘林林,朱劭骏<sup>†</sup>  
(同济大学土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**材料的滞回本构模型是准确预测结构弹塑性地震响应的基础.为此,在国产6082-T6和7020-T6铝合金材料的循环加载试验的基础上,得到了铝合金在单调荷载和循环荷载作用下的应力-应变曲线;随后采用分段Ramberg-Osgood模型对单调拉伸曲线、循环加载曲线以及骨架曲线进行拟合,并提出了国产铝合金材料的单轴滞回本构模型.将所提出的滞回本构模型与试验结果进行对比,结果表明本文提出的滞回本构模型能够准确地描述铝合金材料在循环荷载作用下的受力性能.

**关键词:**铝合金;循环加载试验;滞回本构模型;骨架曲线;滞回曲线

**中图分类号:**TU395

**文献标志码:**A

## Study on Hysteretic Constitutive Model of Domestic Aluminum Alloy

WANG Li, GUO Xiaonong, LIU Linlin, ZHU Shaojun<sup>†</sup>  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:**The hysteretic constitutive model is used to predict the structural elasto-plastic seismic behavior of materials accurately. Chinese 6082-T6 and 7020-T6 aluminum alloy were tested under cyclic loading, and their stress-strain curves under monotonic and cyclic loading were obtained. Secondly, the expressions of monotonic tensile curves, hysteretic curves and skeleton curves were fitted based on the piecewise Ramberg-Osgood model. As a consequence, the uniaxial hysteretic constitutive model of Chinese aluminum alloy was proposed. The obtained hysteretic constitutive model was validated against the test curves, and the results showed that the uniaxial hysteretic behavior of Chinese aluminum alloy can be accurately described by the proposed model.

**Key words:**aluminum alloy; cyclic loading test; hysteretic constitutive model; skeleton curve; hysteresis curve

铝合金结构具有轻质高强、施工方便、造型美观等优点,在国内外得到了越来越广泛的应用<sup>[1-3]</sup>,在大跨度空间结构中的应用尤为常见.对于大跨度空间铝合金结构,当其遭受强震作用时,结构可能

发生弹塑性动力失稳甚至坍塌.在强震反复作用下,结构中的部分节点和构件将进入塑性阶段,且可能出现较大的塑性应变<sup>[4-7]</sup>;此时,铝合金材料在较大应变区间内的滞回特性直接决定了结构的抗震性

\* 收稿日期:2017-06-21

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:王丽(1992—),女,安徽合肥人,同济大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: zhushaojun@tongji.edu.cn

能.因此,有必要对铝合金材料的滞回性能进行研究,从而为研究铝合金结构的抗震性能打下基础.

目前,国外一些学者对铝合金材料滞回性能进行了一定的试验研究和数值模拟,并得出了部分牌号的铝合金材料的滞回性能.1995年,Hopperstad等<sup>[8]</sup>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,结果表明两种材料的滞回曲线都比较饱满;2004年,Borrego等<sup>[9]</sup>对 6082-T6 和 6060-T6 铝合金进行了单轴滞回性能试验,结果表明两种材料都具有饱满稳定的滞回性能,且 6082-T6 表现出一定的循环硬化;2012年,Matteis等<sup>[10]</sup>对 EN-AW-1050A-H24 铝合金进行了拟静力试验,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.总体而言,对铝合金材料滞回性能的研究主要集中在欧美日等国家,且铝合金材料的牌号较为有限.由于国内外铝合金加工工艺以及材料特性尚存在差异,因此国外学者提出的计算模型是否适用于我国的铝合金材料还有待验证.

同时,国内对国产铝合金滞回特性的研究则基本处于起步阶段.2018年,郭小农等<sup>[11]</sup>完成了国产 6082-T6 和 7020-T6 铝合金滞回性能试验研究,采用等幅升幅、等幅交替和循环拉伸 3 种不同的加载制度对其进行循环加载试验,通过循环加载试验获得了铝合金材料的应力-应变关系,然而该文并没有进一步提出铝合金材料滞回本构模型.

针对上述研究不足,本文在文献[11]所完成试验的基础上,采用 Ramberg-Osgood 模型<sup>[12]</sup>,对其单调拉伸曲线、循环加载曲线以及骨架曲线进行了拟合,据此提出铝合金材料的单轴滞回本构模型,期为铝合金结构体系强震分析提供依据.

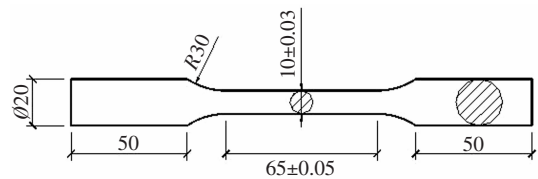
### 1 文献[11]试验简介

文献[11]完成了 6082-T6 和 7020-T6 两种牌号铝合金材料的循环加载试验,其试件编号如表 1 所示.每种牌号分别包括 3 根单调拉伸标准试件、1 根单调拉伸小标距试件和 3 根循环加载小标距试件.单调拉伸标准试件具体尺寸如图 1(a)所示;小标距试件的具体尺寸如图 1(b)所示.该试验在 MTS 试验机上进行,除单调拉伸外,共设计了等幅升幅、等幅交替和循环拉伸 3 种不同的加载制度(详见图 2).文献[11]试验所得的应力-应变曲线本文不再赘述.

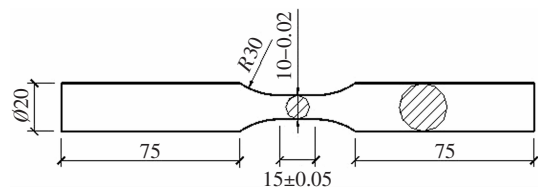
表 1 文献[11]试件编号表

Tab.1 Specimen number table of reference [11]

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



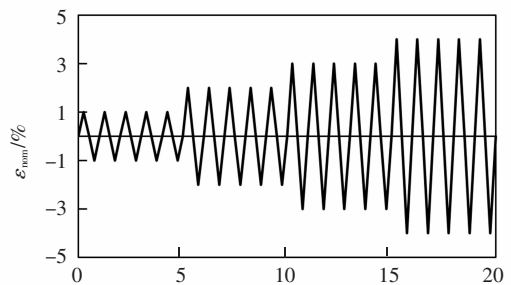
(a) 单调拉伸试件



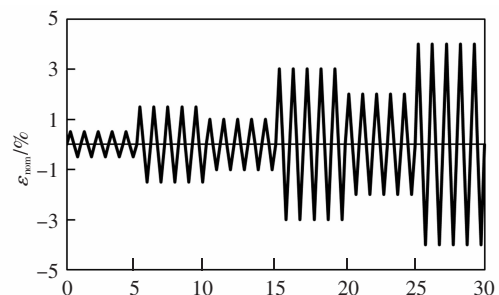
(b) 循环拉伸试件

图 1 文献[11]的试件尺寸

Fig.1 Specimen size of reference [11]



循环次数 n  
(a) 等幅升幅



循环次数 n  
(b) 等幅交替

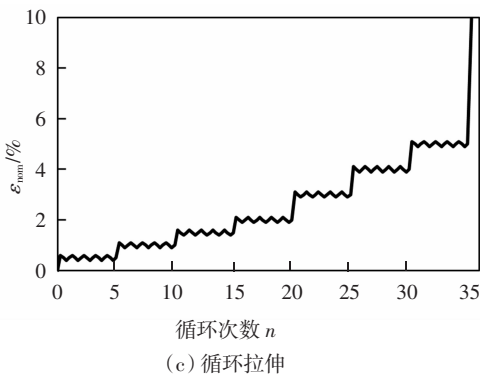


图 2 文献[11]的循环加载制度示意图  
Fig.2 Cyclic loading system of reference [11]

## 2 单调拉伸曲线的拟合

2007 年,文献[13]在 45 根实测国产 6061-T6 铝合金的应力-应变曲线的基础上,指出国产铝合金的本构关系满足 Ramberg-Osgood 方程(简称 R-O 方程,下同),并满足 SteinHard 建议.但是随着试验

数据库的逐渐丰富,研究发现 R-O 方程中的指数  $n$  离散性较大,且受到应变的拟合区间影响很大;另外,R-O 方程对于铝合金材料应力-应变曲线转角处的拟合误差较大.因此,本节对应变拟合区间对拟合结果的影响进行了讨论.

R-O 方程的表达式如下:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n \quad (1)$$

式中: $n$  为应变软化指数; $K$  为强度系数; $E$  为初始切线模量. $n$ 、 $K$ 、 $E$  均为常量,通过试验获得.

以文献[11]的标准试件单调拉伸结果为例,分别按应变范围为 0~1%、0~2%、0~3%、0~4%和 0~应变峰值点进行曲线拟合,得到了文献[11]中所有单调拉伸试验的各拟合参数如表 2 所示.图 3 列出了 AL6-1 试件和 AL7-1 试件在各个区间的拟合曲线.拟合结果表明,随着应变拟合区间的变大, $K$  的取值逐渐增大, $n$  的取值逐渐减小,拟合的曲线在转折点附近也逐渐降低,拟合偏差也逐渐增大.

表 2 单调拉伸曲线不同应变拟合区间拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of monotonic tensile curves at different strain fitted intervals

| 试件编号  | 弹性模量 $E/\text{MPa}$ | $K_1$    | $\sigma_a$ | 拟合参数 | 应变拟合区间 |        |        |        |         |
|-------|---------------------|----------|------------|------|--------|--------|--------|--------|---------|
|       |                     |          |            |      | 0 ~ 1% | 0 ~ 2% | 0 ~ 3% | 0 ~ 4% | 0~应变峰值点 |
| AL6-1 | 70 140              | 783.32   | 299.46     | $K$  | 327.67 | 351.66 | 370.60 | 387.50 | 399.32  |
|       |                     |          |            | $n$  | 73.91  | 36.92  | 26.04  | 20.49  | 17.78   |
| AL6-2 | 71 107              | 781.32   | 301.61     | $K$  | 328.10 | 350.85 | 370.61 | 385.71 | 394.37  |
|       |                     |          |            | $n$  | 80.19  | 39.94  | 27.30  | 21.83  | 19.51   |
| AL6-3 | 70 896              | 818.64   | 297.01     | $K$  | 325.48 | 345.69 | 366.04 | 384.13 | 400.87  |
|       |                     |          |            | $n$  | 75.72  | 40.99  | 27.41  | 21.05  | 17.22   |
| AL7-1 | 73 324              | 1 245.35 | 311.72     | $K$  | 342.77 | 380.92 | 416.45 | 444.86 | 499.91  |
|       |                     |          |            | $n$  | 88.75  | 32.45  | 20.15  | 15.44  | 10.55   |
| AL7-2 | 71 176              | 1 166.04 | 317.56     | $K$  | 346.29 | 382.86 | 416.55 | 443.40 | 488.11  |
|       |                     |          |            | $n$  | 99.02  | 34.63  | 21.47  | 16.38  | 11.65   |
| AL7-3 | 71 621              | 1 164.17 | 318.62     | $K$  | 347.71 | 375.70 | 410.10 | 439.98 | 484.44  |
|       |                     |          |            | $n$  | 100.98 | 42.61  | 23.94  | 17.29  | 12.13   |

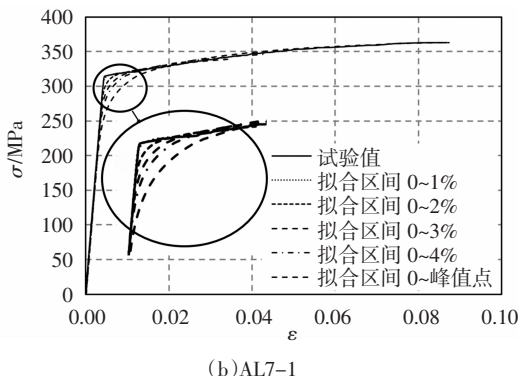
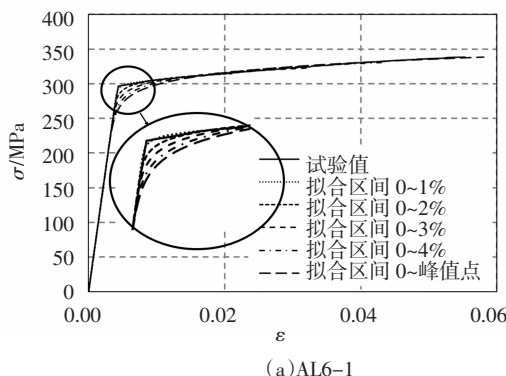


图 3 试件 AL6-1 和试件 AL7-1 各拟合曲线比较

Fig.3 Comparison of different region fitted curves of AL6-1 and AL7-1

由于应变拟合区间对于 R-O 方程中的各参数拟合结果影响较大,为了合理选取拟合区间,本文考察了不同应变拟合区间所得本构方程对轴心受压构件柱子曲线的影响.轴心受压构件两端铰接,其截面为 H300 mm × 200 mm × 8 mm × 14 mm,初弯曲取 L/1 000;材料本构关系采用 AL6-1 的拟合结果,采用有限元软件 ANSYS 计算得到了各拟合区间下的柱子曲线,计算结果如图 4 所示,图中横轴为正则化长细比,纵轴为轴心压杆稳定系数.从图 4 可以看到,对于长细比较小的构件,不同拟合区间对轴心压杆稳定系数有一定影响;对于长细比较大的构件,不同拟合区间的影响几乎可忽略.当采用 0~峰值点的拟合区间时,得到的柱子曲线是最低的,这说明采用这种拟合区间得到的 R-O 本构方程用于构件承载力的计算是偏于安全的. 但为准确拟合铝合金材料滞回本构,本文拟采用分段函数来拟合单调曲线,分段点设置在距离加载起始应变为 0.02 处,则拟合方程为:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n, & \varepsilon \leq 0.02 \\ \sigma = K_1(\varepsilon - 0.02) + \sigma_d, & \varepsilon > 0.02 \end{cases} \quad (2)$$

式中:K<sub>1</sub> 为直线段斜率,可根据分段点(ε<sub>d</sub>, σ<sub>d</sub>)之后的斜直线拟合得到,拟合得到的 K<sub>1</sub> 和 σ<sub>d</sub> 结果见表 2.

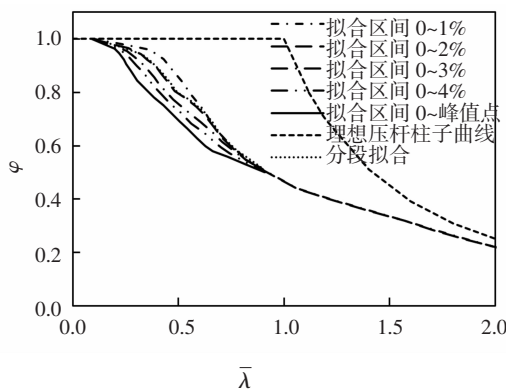


图 4 AL6-1 各拟合区间的轴心受压构件的柱子曲线  
Fig.4 The column curves of members of AL6-1

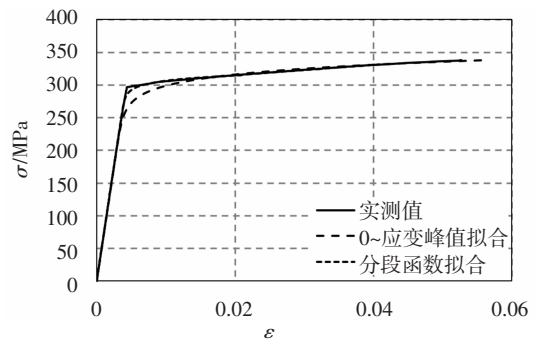
分段拟合参数的统计分析结果如表 3 所示.从表 3 中可以看出,同种牌号铝合金材料的拟合参数值很相近,可以用试验数据的平均值来统一表示;7020-T6 铝合金材料相对于 6082-T6 铝合金而言,具有较大的 K 值以及较小的 n 值,这也说明 AL7 试件的曲线会更高以及更陡.图 5 列出了 AL6-1 和

AL7-1 试件的单调拉伸试验曲线和拟合曲线,均说明拟合效果良好.

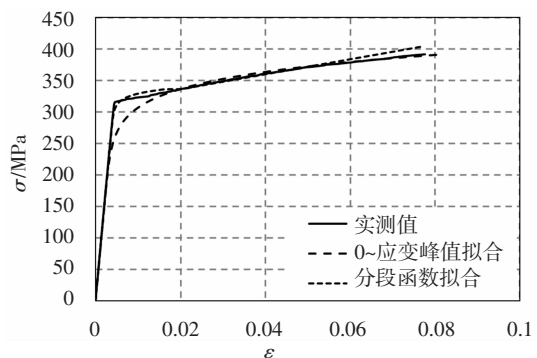
表 3 文献[11]单调拉伸曲线拟合参数统计

**Tab.3 Fitted parameters statistics of monotonic tension curves**

| 牌号      | 统计量            | 最大值      | 最小值      | 平均值      | 标准差   | 变异系数 |
|---------|----------------|----------|----------|----------|-------|------|
| 6082-T6 | K              | 351.66   | 345.69   | 349.4    | 2.62  | 0.01 |
|         | n              | 40.99    | 36.92    | 39.28    | 1.73  | 0.04 |
|         | K <sub>1</sub> | 818.64   | 781.32   | 794.39   | 17.17 | 0.02 |
|         | E              | 71 107   | 70 140   | 70714    | 415   | 0.01 |
| 7020-T6 | K              | 382.86   | 375.7    | 379.83   | 3.02  | 0.01 |
|         | n              | 42.61    | 32.45    | 36.56    | 4.37  | 0.12 |
|         | K <sub>1</sub> | 1 245.35 | 1 164.17 | 1 191.85 | 37.83 | 0.03 |
|         | E              | 73 324   | 71 176   | 72 040   | 926   | 0.01 |



(a)AL6-1



(b)AL7-1

图 5 AL6-1 和 AL7-1 试件单调拉伸试验与拟合应力-应变曲线比较

Fig.5 Comparison of monotonic tensile test and fitted stress-strain curves of AL6-1 and AL7-1

### 3 骨架曲线的拟合

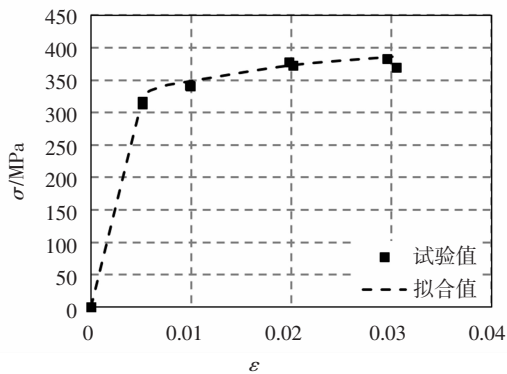
根据文献[11]循环加载试验结果,仍采用分段函数式(2)拟合,其中 K<sub>s</sub>、n<sub>s</sub>、K<sub>1s</sub> 为骨架曲线中对应

的拟合参数. 试验中骨架曲线与单调拉伸曲线的初始刚度基本一致, 因此, 在骨架曲线的拟合中,  $E$  取表 3 中的平均值; 对于 6082-T6 取  $E = 70\ 714\ \text{MPa}$ ; 对于 7020-T6 取  $E = 72\ 040\ \text{MPa}$ . 试验表明, 正向和反向加载骨架曲线具有相同的形状, 因此在拟合骨架曲线时, 同时采用了正反向两组数据点. 图 6 给出了部分试件的拟合结果, 图中试验点为滞回曲线上各正反向循环的峰值点. 所有试件的拟合结果如表 4 所示. 相较于单调拉伸曲线而言, 骨架曲线的数据点较少, 因此拟合结果的误差相对较大, 但各试件的拟合参数相关系数的平方均大于 0.95, 说明骨架曲线的拟合程度相当好. 图 6 列出了所有试件的骨架曲线和拟合曲线, 均可说明拟合效果良好.

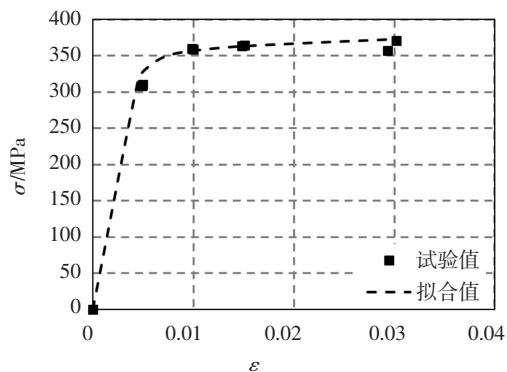
表 4 文献[11]试验的骨架曲线拟合结果

Tab.4 Skeleton curve fitted results of reference [11]

| 参数       | AL6-a  | AL6-b  | AL6-c  | AL7-a    | AL7-b    | AL7-c    |
|----------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| $K_s$    | 376.57 | 371.30 | 352.20 | 430.87   | 437.90   | 410.45   |
| $n_s$    | 28.75  | 28.14  | 34.77  | 22.64    | 24.25    | 24.55    |
| $K_{ls}$ | 862.83 | 743.21 | 730.78 | 1 137.16 | 1 212.52 | 1 186.71 |



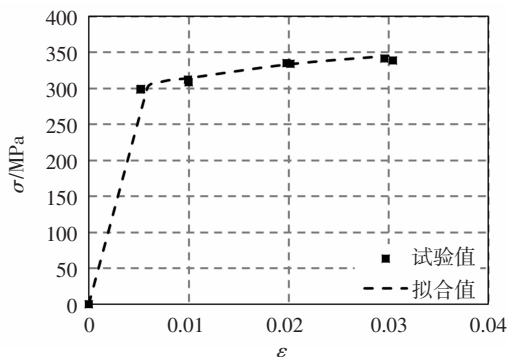
(c)AL7-a



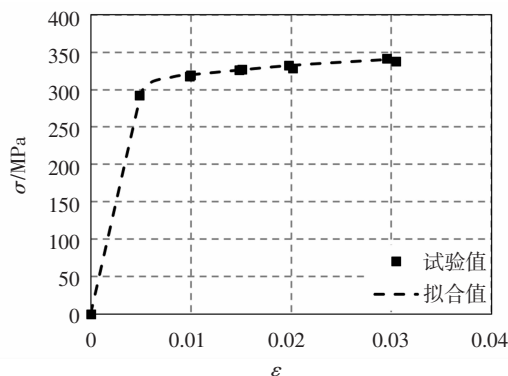
(d)AL7-b

图 6 试验骨架曲线与拟合骨架曲线

Fig.6 Test and fitted skeleton curves



(a)AL6-a



(b)AL6-b

### 4 滞回曲线的拟合

试验表明, 正向和反向滞回曲线具有相同的形状, 因此在拟合滞回曲线时, 可以采用相同的公式. 观察试件的滞回曲线可以发现, 当应变幅值较大时, 曲线的塑性段斜率趋近于零, 这会造成  $n$  值过大或者无法拟合的情况. 因此拟采用分段函数来拟合滞回曲线, 分段点设置在距离反向再加载起始应变为 0.02 处. 设滞回曲线反向加载起点坐标为  $(\varepsilon_0, \sigma_0)$ , 设分段点坐标为  $(\varepsilon_d, \sigma_d)$ , 则拟合方程为:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{2} = \frac{\sigma - \sigma_0}{2E} - \left( \frac{\sigma - \sigma_0}{2K_h} \right)^{n_h}, & |\varepsilon - \varepsilon_0| \leq 0.02 \\ \sigma = K_{lh}(\varepsilon - \varepsilon_0 - 0.02) + \sigma_d, & |\varepsilon - \varepsilon_0| > 0.02 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $n_h, K_h, K_{lh}$  为滞回环曲线中对应的拟合参数;  $E$  采用单调拉伸的实测平均值;  $K_{lh}$  为直线段斜率, 可根据分段点  $(\varepsilon_d, \sigma_d)$  和再加载曲线卸载点  $(\varepsilon_u, \sigma_u)$  计算得到.

拟合结果与试验结果对比如表 5 和图 7 所示. 从图 7 可以看出, 拟合曲线和试验曲线在应变幅不

大于 0.01 时基本重合;随着加载等级的增加,拟合曲线在各环的拐角处相对外突,但总体拟合程度较高.从滞回试件的拟合参数中发现,R-O 段拟合的相关系数都非常接近 1.0,说明拟合效果很好.对于同种铝合金材料,不同加载制度在不同加载级别下的  $K_h$  相差不大,  $n_h$  值随着应变幅的变化不明显.从表 5 可以看出,直线段的斜率  $K_{lh}$  随着循环次数的增加而快速下降,这说明多次循环加载会引起材料强化段的刚度退化.

表 5 文献[11]试验的滞回曲线拟合结果  
Tab.5 Hysteresis curve fitted results of reference [11]

| 试件编号  | 应变幅   | $K_h$  | $n_h$ | $K_{lh}$ |
|-------|-------|--------|-------|----------|
| AL6-a | 0.02  | 384.29 | 25.91 | 507.58   |
|       | 0.03  | 376.91 | 32.36 | 289.93   |
|       | 0.04  | 398.27 | 22.52 | 212.48   |
| AL6-b | 0.015 | 404.92 | 18.81 | 825.76   |
|       | 0.02  | 396.75 | 21.30 | 428.33   |
|       | 0.03  | 390.13 | 26.12 | 275.49   |
| AL7-a | 0.02  | 437.75 | 23.87 | 640.50   |
|       | 0.03  | 442.85 | 24.50 | 328.91   |
| AL7-b | 0.015 | 445.08 | 20.01 | 689.21   |

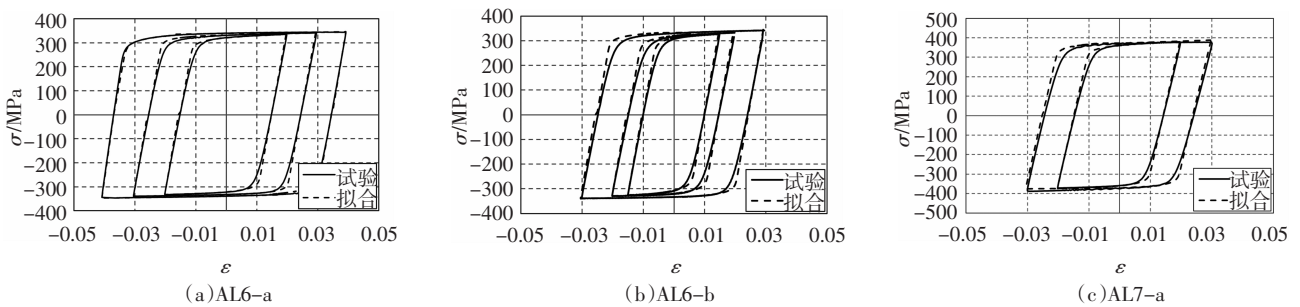


图 7 滞回试件试验与拟合应力-应变曲线  
Fig.7 Hysteresis test and fitted stress-strain curves

## 5 滞回本构模型

### 5.1 滞回本构模型描述

本节借鉴钢材滞回模型建立的方法,在单调曲线的基础上建立结构用铝合金材料的滞回模型,拟采用简单的折减系数法对骨架曲线及滞回曲线的参数进行拟合.循环加载试件经历循环加载,较单调拉伸试件而言,材料的积累损伤对其有一定影响.这个影响可以用单调拉伸曲线参数的折减系数来表

达.在已知单调曲线的情况下,将骨架曲线方程中的  $K_s$  和  $n_s$  及滞回曲线方程中的  $K_h$  和  $n_h$  表示成单调拉伸曲线方程中  $K$  和  $n$  的函数,如式(4)所示.

$$\begin{cases} K_s = \alpha_s \cdot K, n_s = \beta_s \cdot n, K_{ls} = \gamma_s \cdot K_1 \\ K_h = \alpha_h \cdot K, n_h = \beta_h \cdot n, K_{lh} = \gamma_h \cdot K_1 \end{cases} \quad (4)$$

分别将表 3 中的  $E, K, K_1, n$  平均值和表 4 中的  $K_s, n_s, K_{ls}$  平均值以及表 5 中的  $K_h, n_h, K_{lh}$  平均值汇总于表 6 中.由此可计算得到式(4)中各参数,详见表 7.从表中可以看出,在滞回曲线中,随着加载的应变增大,  $\gamma_h$  随之减小.

表 6 各 R-O 方程拟合参数平均值汇总  
Tab.6 Summary of fitted parameters in R-O equation

| 牌号      | $E$    | $K$ | $n$ | $K_1$ | $K_s$ | $n_s$ | $K_{ls}$ | $K_h$ | $n_h$ | $K_{lh}$ |        |        |        |
|---------|--------|-----|-----|-------|-------|-------|----------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|
|         |        |     |     |       |       |       |          |       |       | 0.015    | 0.020  | 0.030  | 0.040  |
| 6082-T6 | 70 714 | 349 | 39  | 1 191 | 366   | 30    | 778      | 391   | 24    | 825.76   | 467.96 | 282.71 | 212.48 |
| 7020-T6 | 72 040 | 379 | 36  | 794   | 426   | 23    | 1 178    | 441   | 22    | 689.21   | 640.50 | 328.91 | —      |

表 7 公式参数拟合汇总表  
Tab.7 Summary of formula parameters

| 牌号      | $\alpha_s$ | $\beta_s$ | $\gamma_s$ | $\alpha_h$ | $\beta_h$ | $\gamma_h$ |       |       |       |
|---------|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|-------|-------|-------|
|         |            |           |            |            |           | 0.015      | 0.020 | 0.030 | 0.040 |
| 6082-T6 | 1.05       | 0.78      | 0.65       | 1.12       | 0.62      | 0.69       | 0.39  | 0.24  | 0.18  |
| 7020-T6 | 1.12       | 0.65      | 1.48       | 1.16       | 0.62      | 0.87       | 0.81  | 0.41  | —     |

根据式(4)以及表 7,就可以在铝合金单调拉伸曲线的基础上得到相应的骨架曲线和滞回曲线的关键参数,基于此建立铝合金材料滞回本构模型如下.

1)单调加载曲线方程:

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n, \varepsilon \leq 0.02 \\ \sigma = K_1(\varepsilon - 0.02) + \sigma_d, \varepsilon > 0.02 \end{cases} \quad (5)$$

2)循环加载骨架曲线方程:

$$\begin{cases} |\varepsilon| = \frac{|\sigma|}{E} + \left(\frac{|\sigma|}{K}\right)^n, |\varepsilon| \leq 0.02 \\ |\sigma| = K_1(|\varepsilon| - 0.02) + |\sigma_d|, |\varepsilon| > 0.02 \end{cases} \quad (6)$$

3)滞回曲线方程:

$$\begin{cases} \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{2} = \frac{\sigma - \sigma_0}{2E} - \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{2K}\right)^n, |\varepsilon - \varepsilon_0| \leq 0.02 \\ \sigma = K_1(\varepsilon - \varepsilon_0 - 0.02) + \sigma_d, |\varepsilon - \varepsilon_0| > 0.02 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $E, K, n$  可以根据单调拉伸试验获得;循环加载骨架曲线方程中对应的拟合参数  $K_s, n_s, K_{1s}$  取值以及滞回曲线方程中对应的拟合参数  $K_h, n_h, K_{1h}$  可根据式(4)计算得到.

上述滞回模型参见图 8,其中,定义第  $i$  次拉伸方向再加载曲线起点为  $(\varepsilon_{0,i}^s, \sigma_{0,i}^s)$ ;第  $i$  次压缩方向再加载曲线起点为  $(\varepsilon_{0,i}^c, \sigma_{0,i}^c)$ ;第  $i$  次拉伸方向再加载曲线分段点为  $(\varepsilon_{d,i}^s, \sigma_{d,i}^s)$ ;第  $i$  次压缩方向再加载曲线分段点为  $(\varepsilon_{d,i}^c, \sigma_{d,i}^c)$ ;第  $i$  次拉伸方向卸载曲线起点为  $(\varepsilon_{u,i}^s, \sigma_{u,i}^s)$ ;第  $i$  次压缩方向卸载曲线起点为  $(\varepsilon_{u,i}^c, \sigma_{u,i}^c)$ .首次加载沿着单调加载曲线到达卸载点 A;从 A 点弹性卸载到达反向再加载点 B;利用式(7)确定反向再加载曲线;在再加载曲线上的点 D 弹性卸载直到反向再加载点 E;利用式(7)确定反向再加载曲线;在反向加载曲线上的点 F 弹性卸载直到反向再加载点 G.后续加载过程遵循以上规则.加载路径依次为:

$O(0,0) \rightarrow A(\varepsilon_{u,1}^s, \sigma_{u,1}^s) \rightarrow B(\varepsilon_{0,1}^c, \sigma_{0,1}^c) \rightarrow C(\varepsilon_{d,1}^s, \sigma_{d,1}^s) \rightarrow D(\varepsilon_{u,1}^c, \sigma_{u,1}^c) \rightarrow E(\varepsilon_{0,1}^s, \sigma_{0,1}^s) \rightarrow F(\varepsilon_{u,2}^s, \sigma_{u,2}^s) \rightarrow G(\varepsilon_{0,2}^c, \sigma_{0,2}^c) \rightarrow H(\varepsilon_{d,2}^s, \sigma_{d,2}^s) \rightarrow I(\varepsilon_{u,2}^c, \sigma_{u,2}^c) \rightarrow J(\varepsilon_{u,3}^s, \sigma_{u,3}^s)$ .

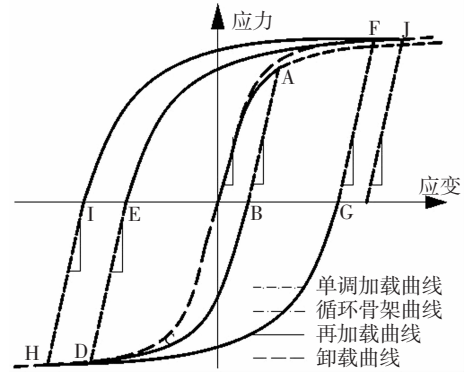
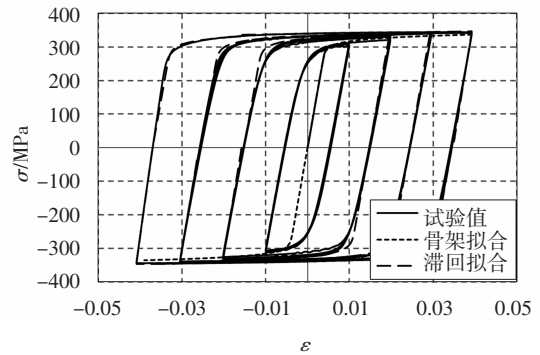


图 8 滞回模型加载准则示意图

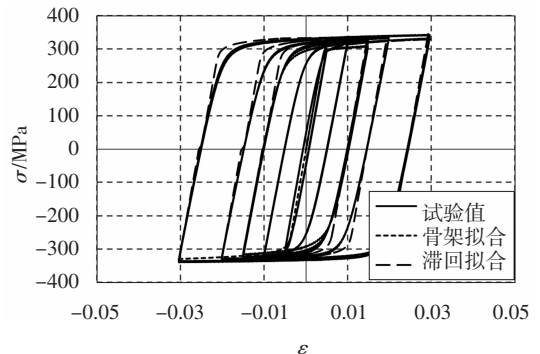
Fig.8 Diagrammatic sketch of hysteretic model

### 5.2 滞回本构模型与试验结果比较

对文献[11]中 6082-T6 和 7020-T6 铝合金材料在等幅升幅和等幅交替下的滞回模型进行拟合,并与试验结果进行对比.图 9 为两种材料分别在等幅升幅加载制度和等幅交替加载制度下的滞回模型曲线与试验曲线.从图中可以看出,滞回模型与试验曲线的吻合度较高,特别是在小应变幅的情况下;随着应变幅的增加,滞回曲线在拐角处的吻合程度相对较差.滞回模型上各峰值点均在骨架曲线上,且与试验曲线的峰值应力点基本吻合,说明本文提出的建立铝合金材料模型的方法针对这两组试件可行.对于该滞回模型的可行性,还需要更多的试验结果进行检验.



(a)AL6-a



(b)AL6-b

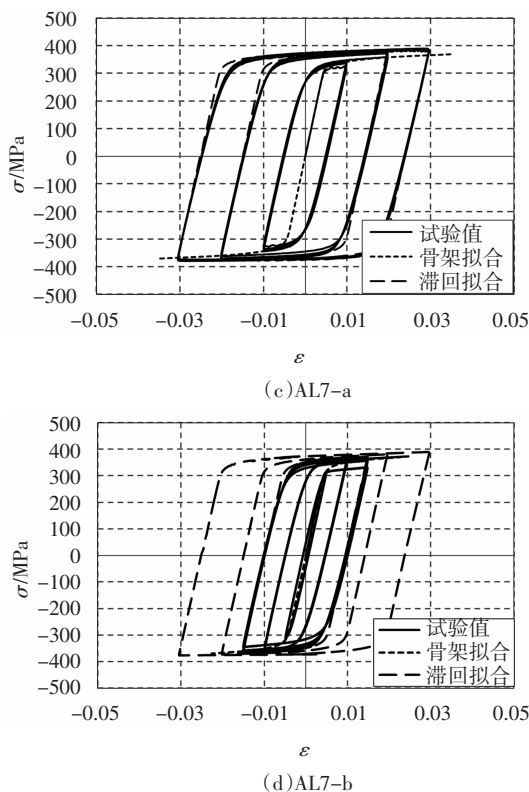


图9 滞回模型曲线与试验曲线对比

Fig. 9 Comparison of hysteresis model curves and experimental curves

## 6 结论

分析了国产 6082-T6 和 7020-T6 铝合金材料在循环荷载下的应力-应变关系,得出如下结论:

1) 国产 6082-T6 和 7020-T6 铝合金材料在循环加载下滞回环饱满稳定,其具有良好的耗能能力。

2) 铝合金材料在循环荷载作用下的骨架曲线和滞回曲线能够采用分段 Ramberg-Osgood 模型较好地拟合。

3) 循环荷载下与单调荷载下的应力-应变关系虽然存在一定差别,但差异不大,因此可以在单调曲线的基础上采用折减系数法建立结构用铝合金的滞回模型。

4) 本文提出的铝合金材料滞回本构模型,能够较好地描述铝合金材料在循环荷载作用下的应力-应变地关系,通过与试验曲线进行对比,证明本文提出的模型具有准确性和实用性。

## 参考文献

[1] 沈祖炎,郭小农,李元齐.铝合金结构研究现状综述[J].建筑结构学报,2007,28(6):100—109.

[2] 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)

[3] 郭小农,高志朋,朱劲骏,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.

[4] 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)

[5] 郭小农.铝合金结构构件理论和试验研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2006:1—7.

[6] GUO X N. Theoretical and experimental research on the aluminum alloy structure members [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2006:1—7. (In Chinese)

[7] XUE L A. Unified expression for low cycle fatigue and extremely low cycle fatigue and its implication for monotonic loading[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(10/11):1691—1698.

[8] NIP K H, GARDNER L, DAVIES C M, *et al.* Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1):96—110.

[9] NATHANIEL G C, KRAWINKLER H. Uniaxial cyclic stress-strain behavior of structural steel[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(9):1105—1120.

[10] MASATOSHI K. Extremely low cycle fatigue life prediction based on a new cumulative fatigue damage model[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 24(6):699—703.

[11] 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.

[12] BORREGO L P, ABREU L M, COSTA J M, *et al.* Analysis of low cycle fatigue in AlMgSi aluminium alloys[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(5):715—725.

[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] 郭小农,邹家敏,刘林林,等.两种结构用铝合金循环加载试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(9):57—64.

[15] GUO X N, ZOU J M, LIU L L, *et al.* Cyclic loading tests of structural aluminum alloy[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2018, 45(9):57—64. (In Chinese)

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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)