

# 循环荷载下 7075 高强铝合金本构模型研究

常召群, 彭平泽, 邢国华, 李锦源, 韩萌, 刘伯权

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**为了描述 7075 高强铝合金的力学性能,设计制作了 3 个高强铝合金单调拉伸试件及 5 个循环加载试件,基于 Ramberg-Osgood 模型分别对单调拉伸应力-应变曲线及循环加载骨架曲线进行数值拟合,对比分析了铝合金的受拉力学性能与滞回力学性能,标定了高强铝合金的混合强化参数,建立了铝合金的混合强化滞回本构模型,利用 ABAQUS 软件建立了高强铝合金的数值模型,模拟分析结果与试验结果进行了对比验证。研究表明:7075 高强铝合金具有良好的滞回性能,Ramberg-Osgood 模型对高强铝合金单调力学性能表现出了良好的适用性;基于混合强化模型的有限元模拟结果与试验结果吻合较好,该混合强化模型及标定参数值可用于铝合金加固结构的抗震性能分析中。

**关键词:**7075 高强铝合金;循环荷载;混合强化模型;本构模型;有限元分析

中图分类号:TU512.4

文献标志码:A

## Study on constitutive model of 7075 high-strength aluminum alloy under cyclic loading

CHANG Zhaoqun, PENG Pingze, XING Guohua, LI Jinyuan, HAN Meng, LIU Boquan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To characterize the mechanical properties of 7075 high-strength aluminum alloy, three specimens for the monotonic tensile test and five specimens for cyclic loading were designed and fabricated. Based on the Ramberg-Osgood model, numerical fitting was carried out separately for the monotonic tensile stress-strain curves and cyclic loading skeleton curves of aluminum alloy bars. A comparative analysis was conducted on the tensile mechanical properties and hysteresis mechanical properties of 7075 high-strength aluminum alloy. The combined hardening parameters for high-strength aluminum alloy were calibrated, and a combined hardening hysteresis constitutive model was established. Using the software ABAQUS, a numerical analysis model of high-strength aluminum alloy was created, and the simulation results were compared with and validated against experimental results. The results indicate that 7075 high-strength aluminum alloy exhibits excellent hysteresis performance, and the Ramberg-Osgood model shows good applicability to the monotonic mechanical properties of high-strength aluminum alloy. The finite element simulation results based on the combined hardening model are in good agreement with the test results. The calibrated combined hardening model can be used for the seismic behavior analysis of structures reinforced with high-strength aluminum alloy.

**Key words:** 7075 high-strength aluminum alloy; cyclic loading; combined hardening model; constitutive model; finite element analysis

收稿日期:2024-01-30; 修回日期:2024-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(52308137,52178103);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0617);中央高校基本科研业务费专项资金(300102281303)

作者简介:常召群(1992—),男,副教授,博士,主要从事工程结构减隔震控制等研究。E-mail:czq199212@163.com

通信作者:邢国华(1983—),男,教授,博士,主要从事工程结构减隔震控制等研究。E-mail:ghxing@chd.edu.cn

## 0 引言

铝合金材料兼具自重轻、比强度高、耐腐蚀性能强等优点,其在工程结构加固中得到了应用。ZHU 等<sup>[1]</sup>使用加劲肋铝合金板对钢筋混凝土梁进行抗弯加固,考虑了加固长度、板宽和加劲肋高度等对加固试件的影响。ABDALLA 等<sup>[2-3]</sup>完成了外部粘贴铝合金板加固钢筋混凝土梁抗剪性能的试验研究,验证了铝合金板用于混凝土构件加固的可行性。我国国家标准 GB/T 16474—2011《变形铝及铝合金牌号表示方法》<sup>[4]</sup>按主要合金元素将铝合金分为 9 个系列,采用国际 4 位数字牌号体系时,第 1 位数字表示合金组别,第 2 位数字表示对合金的修改次数,最后 2 位数字无特殊意义。其中锌元素为主的 7 系铝合金由于其非比例延伸强度可稳定达到 600 MPa 以上,在混凝土结构加固中得到了初步应用<sup>[5-8]</sup>。邢国华等<sup>[9-11]</sup>对 7075 高强铝合金筋嵌入式加固混凝土构件的抗弯性能和抗震性能开展了系列试验研究和理论分析,但相关分析中高强铝合金的本构模型采用的是简化双折线模型,对理论分析结果影响较大。

材料本构模型是高强铝合金在工程结构中应用的基础,对高强铝合金加固结构受力性能分析具有重要意义。铝合金单调本构模型<sup>[12-14]</sup>研究已较为成熟,其中 Ramberg-Osgood (R-O)模型<sup>[12]</sup>被广泛使用<sup>[15-16]</sup>,但 R-O 模型对作为受力筋的 7075 高强铝合金的适用性和参数确定需要进一步研究。在金属滞回本构模型方面,CHABOCHE<sup>[17]</sup>综合考虑钢材等向强化和随动强化特征后,提出了一种混合强化模型并给出了关键参数的计算方法,能够较好地描述 Q460D、奥氏体不锈钢和 SN490B 等各种钢材的循环本构特征<sup>[18-20]</sup>,已被嵌入至有限元软件 ABAQUS 中。贾斌等<sup>[21]</sup>给出了适用于 5083、5012、6061 铝合金材料的 Chaboche 硬化模型参数,表明 Chaboche 混合强化模型对于 5 系及 6 系铝合金材料的本构关系适用性强。WANG 等<sup>[22]</sup>基于 Chaboche 混合强化模型,结合试验数据给出了适用于 7A04 高强铝合金的本构模型参数;此外,AGIUS 等<sup>[23]</sup>通过板材试样试验给出了 7075 铝合金 Chaboche 模型关键参数。但是随着铝合金研发工艺的不断改进,其铝合金材料力学性能与所用的 7075 高铝合金有一定差异,其主要关注铝合金的疲劳寿命问题,目前相关研究给出的 Chaboche 混合强化模型参数对所使用的 7075 高强铝合金可能不适用。

本文设计了 7075 高强铝合金棒材试件分别进行单调拉伸试验及循环荷载试验,采用 R-O 模型分别对单调拉伸应力-应变曲线及循环骨架曲线拟合,分析 7075 高强铝合金的单调性能及滞回性能,通过循环荷载下的应力-应变曲线标定了 Chaboche 混合强化模型参数,建立了循环荷载下 7075 高强铝合金的本构模型,并通过 ABAQUS 有限元软件对所建立本构模型进行了验证。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

高强铝合金的力学性能试验共设计了 3 个单调拉伸试件和 5 个循环加载试件,材料使用的是由美国铝业公司 (ALCOA) 生产的 7075-T6 高强铝合金,T6 表示铝合金通过固溶热处理后进行人工时效。

单调拉伸试件根据 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[24]</sup>设计,具体尺寸如图 1(a)所示,标距段长度为 50 mm,直径为 9 mm,夹持端直径为 16 mm。循环加载试件根据 GB/T 15248—2008《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》<sup>[25]</sup>设计,如图 1(b)所示。其中,标距段长度为 15 mm,直径为 8 mm,夹持端直径为 16 mm。

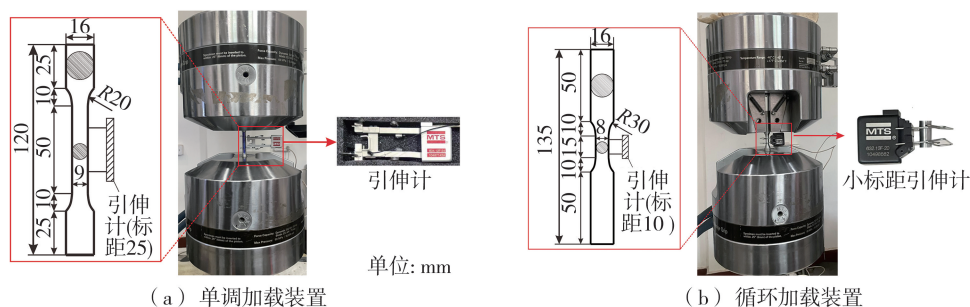


图 1 试验概况

Fig. 1 Test overview

## 1.2 试验装置及加载制度

高强铝合金的单调拉伸试验及循环荷载试验在西安交通大学金属材料强度国家重点实验室液压伺服测试系统(MTS 370.25)上完成,试验装置如图1所示。单调拉伸试验采用标距为25 mm的引伸计 MTS 634.12F-24 测量应变;循环荷载试验通过计算机控制应变加载,采用标距为10 mm的小标距引伸计 MTS 632.13 F-20 测量应变,应变测量范围为 $\pm 15\%$ 。加载速率为 $0.0005\text{ s}^{-1}$ ,循环荷载试验共设置5种加载制度,具体加载制度如表1和图2所示。

表1 7075 高强铝合金加载制度

Table 1 Loading protocols of 7075 high-strength aluminum alloy

试件编号	加载制度
A1	关于 $\varepsilon=0$ 对称加载,先拉后压,应变增量为0.5%,每级循环加载1次,加载至 $\varepsilon=\pm 4\%$
A2	关于 $\varepsilon=0$ 对称加载,先拉后压,应变增量为1%,每级循环加载3次,加载至 $\varepsilon=\pm 3\%$
A3	关于 $\varepsilon=0$ 对称加载,先拉后压,拉、压应变为2%,等幅循环加载
A4	关于 $\varepsilon=0.5\%$ 对称加载,先拉后压,应变增量为0.5%,每级循环加载1次,加载至 $\varepsilon=4\%$ (-3%)
A5	初始拉应变为0.5%,循环拉伸,应变增量为0.5%,每级循环加载1次,加载至 $\varepsilon=4\%$

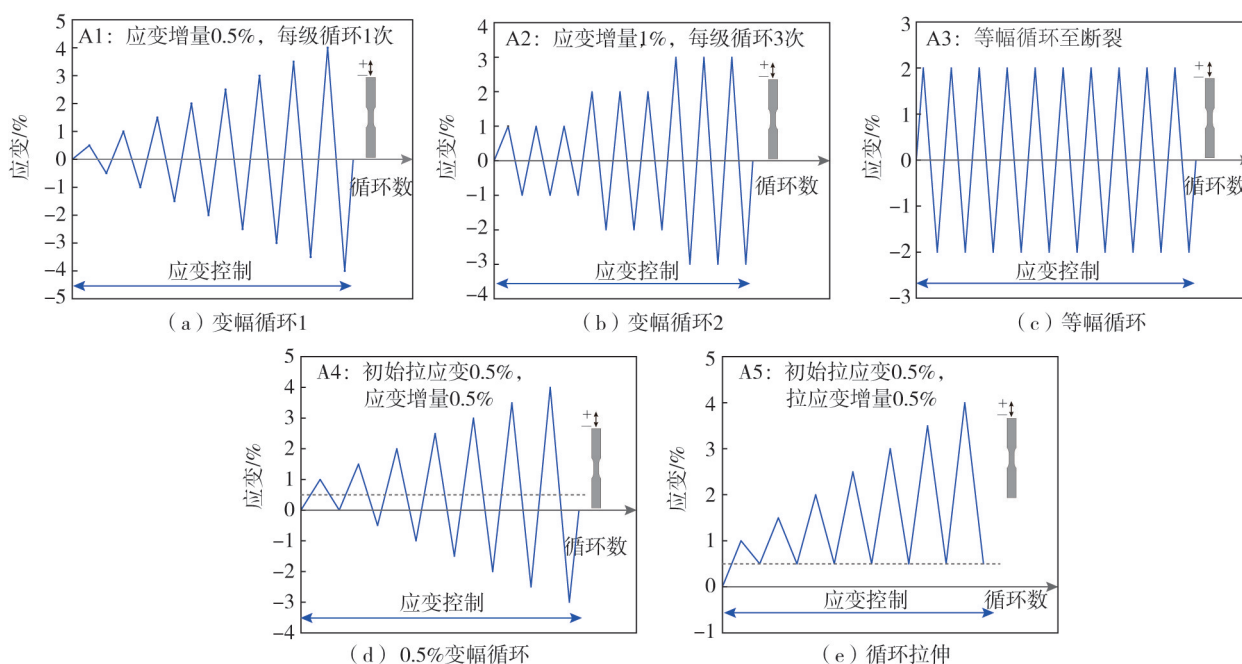


图2 不同的加载制度

Fig. 2 Different loading protocols

## 2 试验结果与分析

### 2.1 单调拉伸试验

7075 高强铝合金试件单调加载试验结果如表2所示,其名义屈服强度和峰值应力平均值高达602.7、659.2 MPa,弹性模量平均值72.6 GPa,约为钢材的1/3,高强铝合金应力-应变曲线无明显的屈服点。此外,各单调拉伸试件的破坏形态如图3所示,试件的断裂面与拉应力方向成 $45^\circ$ ,其颈缩现象相较于低碳钢不显著<sup>[26-27]</sup>,但高强铝合金的平均极限应变为9.03%(预应力钢绞线仅为5%左右<sup>[28]</sup>),表现出了良好的延性。7075 高强铝合金优越的力学性能为其在混凝土结构中的应用奠定了基础。

R-O 模型<sup>[12]</sup>能够较好地预测铝合金的力学性能,被广泛使用。其通用表达式为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n \quad (1)$$

式中: $E$ 为铝合金的弹性模量; $n$ 为非弹性区段应变硬化程度,通过最小二乘法拟合得到,根据试验结果取值为41.8; $f_{0.2}$ 为非比例延伸率为0.2%所对应的应力,取值为602.7 MPa。

表 2 单调拉伸试验结果  
Table 2 Test results of monotonic tensile

试件	名义屈服强度 $f_{0.2}/\text{MPa}$	屈服应变 $\varepsilon_{0.2}/\%$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	峰值应力 $f_u/\text{MPa}$	极限应变 $\varepsilon_u/\%$
AA1	602.8	1.04	72.1	658.3	9.13
AA2	601.5	1.01	73.9	663.6	8.99
AA3	603.9	1.04	71.8	655.8	8.96
平均值	602.7	1.03	72.6	659.2	9.03

试验应力-应变曲线与 R-O 模型对比如图 4 所示,R-O 模型虽然在拐点处略微高估了铝合金的应力水平,但整体吻合良好,证明了经典 R-O 模型对 7075 高强铝合金单调力学性能描述的适用性。



图 3 单调拉伸试件破坏形态

Fig. 3 Failure mode of monotonic tensile specimens

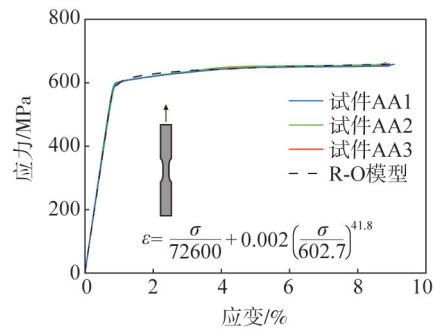


图 4 试验曲线与 R-O 模型对比图

Fig. 4 Comparison of the test curve and the R-O model

### 2.2 循环荷载试验

如图 5 所示,高强铝合金试件 A3 在加载至第 11 次循环时发生断裂;试件 A4 在加载过程中观察到发生了屈曲变形。为了进一步研究高强铝合金循环加载后的力学性能,将试件 A1、A2 在循环加载完成再进行单调拉伸至断裂,通过对比发现,试件 A1、A2、A3 的断裂面均为“V”型,与单调加载的铝合金试件断裂面(图 3)有明显区别,断口截面无明显收缩现象。

循环荷载作用下的高强铝合金试件应力-应变曲线如图 6 所示,并根据滞回曲线计算得到了各试件的滞回能,图中  $N_c$  为滞回圈数,  $E_n$  为滞回能。由图可知:①在循环荷载作用下 7075 铝合金表现出了明显的包辛格效应,在拉伸产生塑性应变后卸载再反向加载,反向加载的屈服强度明显低于其初始屈服强度;②随着应变幅值的增加,表现出了显著的应变强化现象,试件 A1 在首次加载至应变 1%及 4%时,应力由 577.7 MPa 提升至 663.5 MPa;③7075 高强铝合金在各级循环卸载及再加载时,其弹性模量较初始弹性模量无明显变化;④在各循环加载制度下,拉应变和压应变值相同时,铝合金压应变所对应的应力大于拉应变所对应的应力,原因是材料拉伸时截面面积减小,压缩时截面面积增大;⑤7075 高强铝合金在各加载制度下表现出了明显的混合强化特征,既包含了各向同性强化又包含了随动强化;⑥各加载制度下应力-应变曲线饱满,试件 A1 滞回能可达到 209.76 kN·mm,将滞回能单位“kN·mm”转换为“MPa”,试件 A1 在循环加载前 6 圈的滞回能为 155.2 MPa, Q235 钢<sup>[29]</sup>(与试件 A1 前 6 圈加载制度相同)平均滞回能为 137.7 MPa,高强铝合金较 Q235 钢高出了 11.3%,高强铝合金表现出了良好的滞回性能。

试件 A1 和 A2 循环加载后单调拉伸的应力-应变曲线如图 7 所示。由图可知,7075 高强铝合金在循环加载后强度明显提升,试件 A1 和 A2 的名义屈服强度分别为 642.7、664.5 MPa,较 7075 高强铝合金名义屈服强度平均值 602.7 MPa 分别提高了 6.64%、10.25%,但延性有较大幅度降低,主要是由于铝合金在循环加载过程中存在累积损伤所致。试件 A1 相较于 A2 在循环加载时应变变化较大导致累积损伤严重,进入塑性阶段后立即断裂。

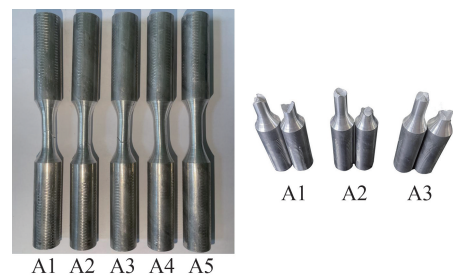


图 5 循环加载试件破坏形态

Fig. 5 Failure mode of the cyclic loading specimen

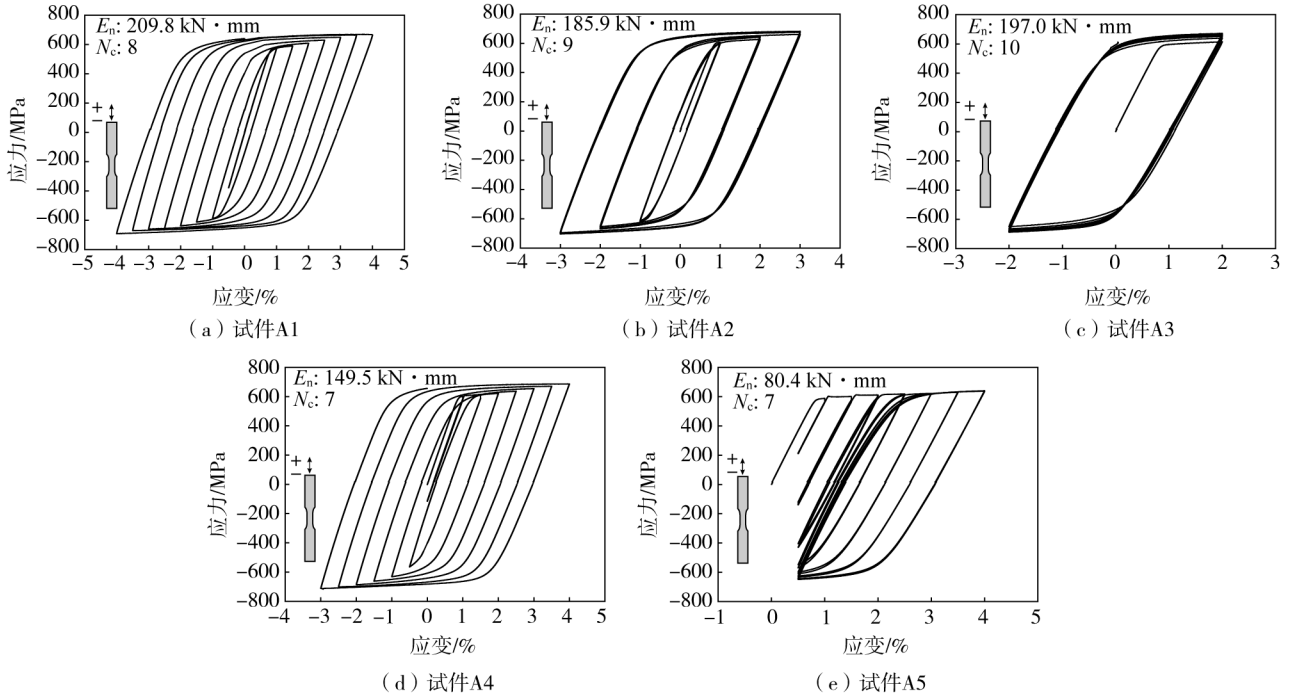


图6 循环加载应力-应变曲线

Fig. 6 Cyclic loading stress-strain curves

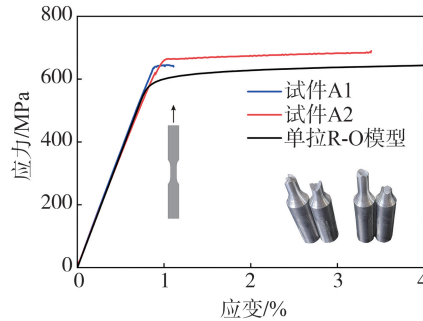


图7 试件循环加载后单调拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 Monotonic tensile stress-strain curves of the specimen after cyclic loading

2.3 循环加载骨架曲线

由于加载方式存在差异,循环荷载作用下高强铝合金的骨架曲线表现出了一定的差异性,如图8所示。试件A1、A2均为对称变幅循环加载,但在相同应变水平下,试件A2的应力大于A1,原因是试件A2在各级应变下等幅循环3次,体现出高强铝合金的各向同性硬化。试件A4、A5初始拉应变均为5%,试件A4基于应变5%对称变幅循环加载,试件A5基于应变5%变幅循环拉伸,随着应力水平的不断增加,相同应变水平下试件A4的应力逐渐大于A5,原因是试件A4应变变化幅度较大,体现出高强铝合金的随动硬化特点。

不同加载制度下高强铝合金的骨架曲线与单调拉伸应力-应变曲线表现出了差异,故使用 Ramberg-Osgood 模型的另一种表达式拟合循环骨架曲线,如式(2)所示:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\Delta \sigma}{2E} + \left( \frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{1/n'} \quad (2)$$

为便于拟合,将式(2)变形为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (3)$$

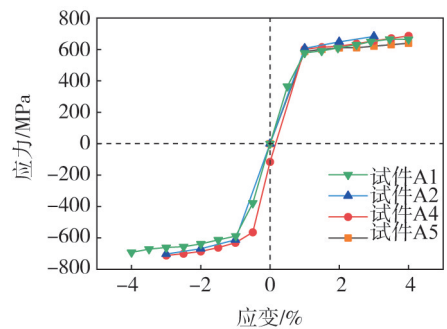


图8 试件循环骨架曲线

Fig. 8 Cyclic skeleton curves of the specimen

式中: $\Delta\varepsilon$  为总应变幅; $\Delta\varepsilon_e$  为弹性应变幅; $\Delta\varepsilon_p$  为塑性应变幅; $\Delta\sigma$  为应力幅; $K'$  为循环强化系数; $n'$  为循环强化指数; $E$  为铝合金弹性模量。

通过分析试验结果,使用式(3)分别对图 8 中各试件应力为正的骨架曲线点拟合,得到了各试件的循环强化参数  $K'$  和  $n'$ ,如表 3 所示,表中  $E$  为各试件的弹性模量。7075 高强铝合金循环骨架曲线与单调拉伸曲线的对比如图 9 所示。由图可知:Ramberg-Osgood 模型可以较好地拟合铝合金循环骨架曲线;试件 A5 为循环拉伸,未产生压应变,其循环骨架曲线与单调拉伸曲线基本重合;随着循环次数的增加,试件 A1、A2、A4 硬化现象显著,强度明显提升。单调拉伸曲线与循环荷载下骨架曲线有明显差异,可见加载历史对铝合金的滞回曲线有一定的影响,使用单调拉伸本构模型低估了高强铝合金的应变强化效应,在高强铝合金钢筋混凝土结构的滞回性能分析中精度有待提高,故提出高强铝合金在循环荷载作用下的本构模型是有必要的。

表 3 7075 高强铝合金循环强化参数  
Table 3 Cyclic hardening parameters of 7075 high-strength aluminum alloy

试件	$E/\text{MPa}$	$K'/\text{MPa}$	$n'$
A1	72 000	610.98	0.081 96
A2	72 000	650.77	0.064 89
A4	71 300	621.87	0.083 49
A5	72 000	603.26	0.048 06

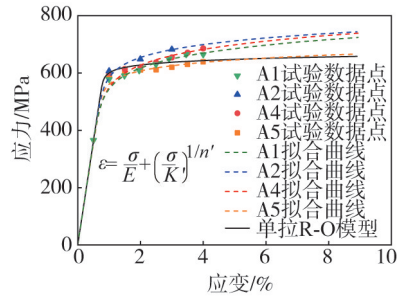


图 9 循环骨架曲线与单调加载曲线对比  
Fig. 9 Comparison between cyclic skeleton curves and monotonic loading curve

### 3 高强铝合金混合强化本构模型

#### 3.1 Chaboche 混合强化模型

如图 10 所示,基于 Von-Mises 屈服准则的混合强化模型<sup>[17]</sup>,包含了各向同性强化模型和非线性的随动强化模型。图 10(a)为各向同性强化模型,其表达式为

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty(1 - e^{-b\varepsilon^{\text{pl}}}) \quad (4)$$

式中: $\sigma|_0$  为材料等效塑性应变为 0 时对应的屈服应力; $Q_\infty$  和  $b$  为通过试验数据对  $(\varepsilon_i^{\text{pl}}, \sigma_i^0)$  拟合的材料参数, $Q_\infty$  为材料屈服面的最大变化值,  $b$  定义了屈服面随着塑性应变发展的变化率; $\sigma^0$  和  $\varepsilon^{\text{pl}}$  通过试验数据进行标定。

$\sigma_i^0$  为第  $i$  圈循环加载时屈服面的大小,定义为

$$\sigma_i^0 = (\sigma_i^t - \sigma_i^c) / 2 \quad (5)$$

式中: $\sigma_i^t$  和  $\sigma_i^c$  分别为第  $i$  次循环加载的最大拉应力及卸载后再加载弹性段的最大压应力。

与  $\sigma_i^0$  对应的  $\varepsilon_i^{\text{pl}}$  为第  $i$  圈循环加载的等效塑性应变,定义为

$$\varepsilon_i^{\text{pl}} = \frac{1}{2}(4i-3)\Delta\varepsilon^{\text{pl}} \quad (6)$$

式中: $\Delta\varepsilon^{\text{pl}}$  为塑性应变变化范围,由式(7)确定:

$$\Delta\varepsilon^{\text{pl}} \approx \Delta\varepsilon - 2\sigma_1^t / E \quad (7)$$

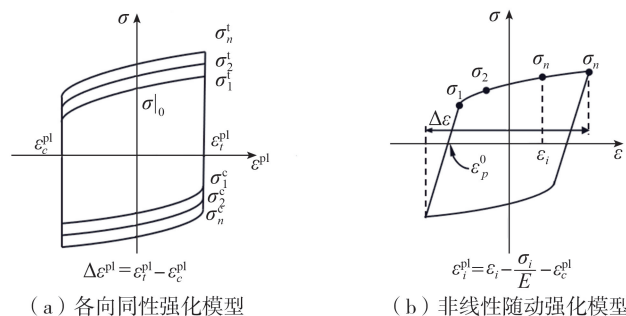


图 10 混合强化模型

Fig. 10 Combined hardening model

图 10(b)为随动强化模型,该模型通过背应力叠加的方式描述应力随应变的非线性变化,表达式如式(8)、式(9)所示:

$$\alpha = \sum_{k=1}^N \alpha_k \tag{8}$$

$$\alpha_k = \frac{C_k}{\gamma_k} (1 - e^{-\gamma_k \epsilon^{pl}}) + \alpha_{k,1} e^{-\gamma_k \epsilon^{pl}} \tag{9}$$

式中: $N$ 为背应力数目,本文取 $N=3$ ;  $\alpha_{k,1}$ 为第 $k$ 个背应力函数的初值; $C_k$ 与 $\gamma_k$ 为通过试验数据对 $(\epsilon_i^{pl}, \alpha_i)$ 拟合的材料参数, $C_k/\gamma_k$ 决定了第 $k$ 个背应力函数变化的最大范围;数据对 $(\epsilon_i^{pl}, \alpha_i)$ 通过式(10)和式(11)得到:

$$\epsilon_i^{pl} = \epsilon_i - \frac{\sigma_i - \sigma_i^0}{E} - \epsilon_p^0 \tag{10}$$

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma^s \tag{11}$$

式中, $\sigma^s = (\sigma_1 + \sigma_n)/2$ 为屈服面的大小。

### 3.2 混合强化模型参数标定

为了准确描述 7075 高强铝合金在循环荷载下的本构关系,各向同性强化模型通过试验曲线中等幅加载制度下的应力-应变数据点进行参数拟合。如图 11(a)所示,高强铝合金的各向同性强化部分参数,通过式(4)对试件 A3 在循环加载中的最大拉应力及卸载后再加载弹性段的最大压应力数据点进行拟合。

非线性随动强化模型通过试验曲线中应变变化最大一圈的应力-应变数据点进行参数拟合。如图 11(b)所示,高强铝合金的非线性随动强化部分参数,通过式(8)、式(9)对试件 A1 在循环加载中应变由-3.5%~4.0%的数据点进行拟合得到。

综上所述,通过循环荷载试验曲线拟合分析,表 4 给出了 7075 高强铝合金混合强化模型各参数建议值。

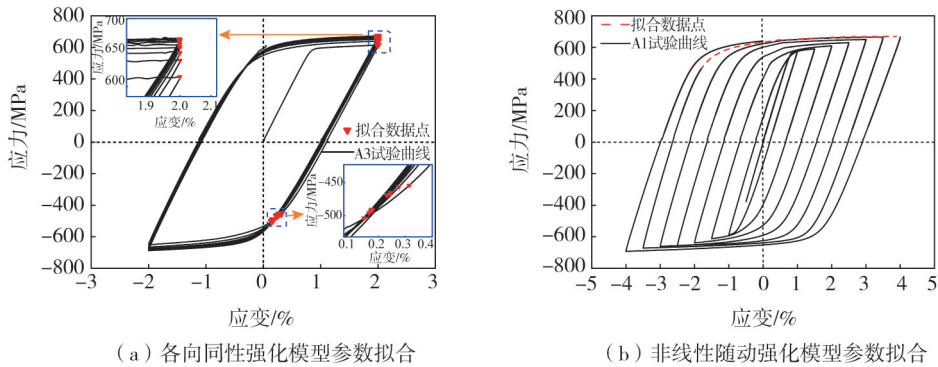


图 11 混合强化模型参数标定

Fig. 11 Parameter calibration of combined hardening model

表 4 7075 高强铝合金混合强化模型参数校准

Table 4 Parameter calibration of combined hardening model of 7075 high-strength aluminum alloy

材料	$\sigma_{l_0}/\text{MPa}$	$Q_{\infty}/\text{MPa}$	$b$	$C_1/\text{MPa}$	$\gamma_1$	$C_2/\text{MPa}$	$\gamma_2$	$C_3/\text{MPa}$	$\gamma_3$
7075 铝合金	534.0	56.0	6.2	8437.4	489.9	15094.5	2077.4	5895.2	74.6

### 3.3 有限元模拟验证

基于有限元软件 ABAQUS 对 7075 高强铝合金材料混合强化模型参数进行设置,非线性随动强化部分在 ABAQUS 软件材料塑性中将 Hardening 设置为 Combined, Data type 项设置为 Parameters, 设置 7075 高强铝合金背应力个数为 3。各向同性强化部分在材料塑性子选项中设置 Cyclic Hardening 参数得以实现。单元类型选择三维实体单元 C3D8R, 模拟相同加载制度下的应力-应变曲线。

有限元模拟结果与试验结果滞回能对比情况如表 5

表 5 模拟结果与试验结果耗能量对比

Table 5 Comparison of energy dissipation between simulation and experimental results

试件	模拟曲线 /(kN·mm)	试验曲线 /(kN·mm)	误差/%
A1	204.20	209.76	2.65
A2	179.73	185.86	3.30
A3	196.04	196.98	0.48
A4	151.04	149.36	-1.12
A5	79.97	80.35	0.47

所示,各试件的滞回能误差最大仅为 3.30%,有限元模拟结果可以较好地反映出高强铝合金的滞回能力。图 12 为循环加载试验结果与有限元模拟结果对比图。由图可知,通过试件 A1 及试件 A3 所标定的 Chaboche 混合强化模型参数得出的模拟结果与试验曲线总体吻合较好,此外,其余 3 组试件也均取得了较好吻合结果。表明该组混合强化模型参数能用于 7075 高强铝合金加固混凝土结构的抗震性能分析。

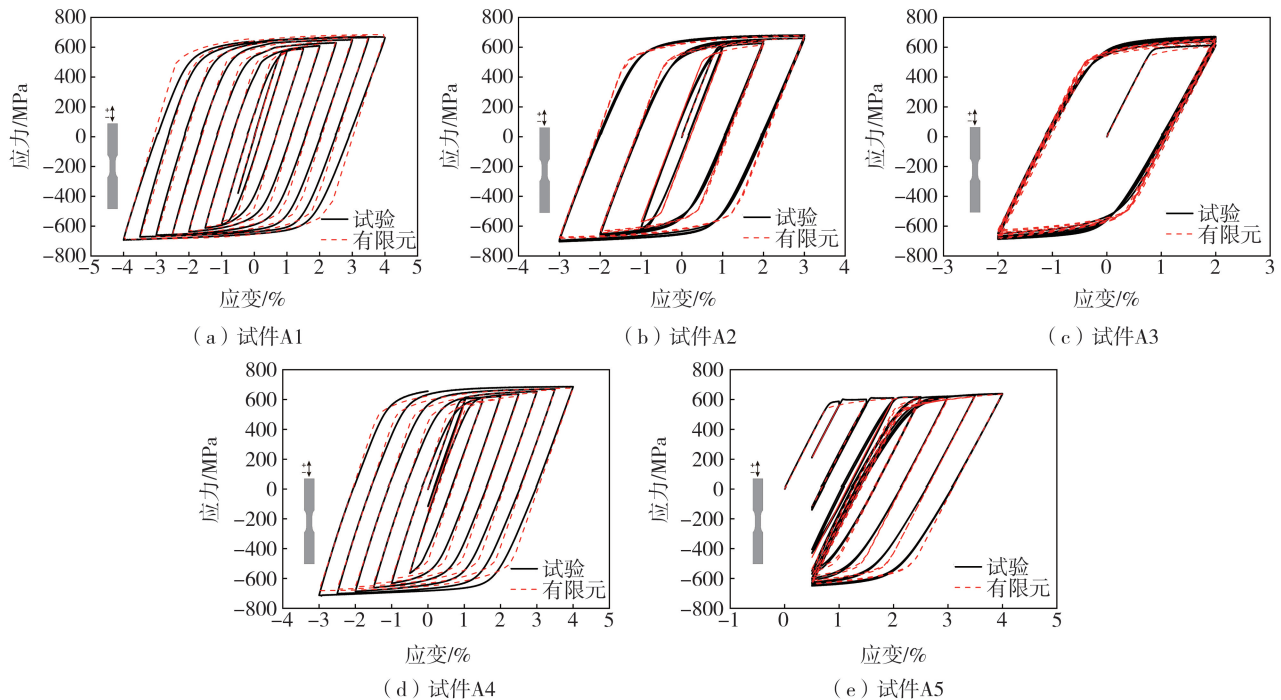


图 12 试验与模拟曲线对比

Fig. 12 Comparison between simulation and experimental result

## 4 结论

1) 通过高强铝合金的单调拉伸试验,获得了其力学性能参数,各特征参数值为  $f_{0.2} = 602.7 \text{ MPa}$ ,  $f_u = 659.2 \text{ MPa}$ ,  $E = 72.6 \text{ GPa}$ ,  $\varepsilon_u = 9.03\%$ , 7075 高强铝合金具有良好的延性和抗拉强度,可用于混凝土结构的受力配筋中。

2) Ramberg-Osgood 模型对 7075 高强铝合金的单调拉伸试验结果表现出了良好的适用性,但因其不能考虑加载历史对铝合金滞回性能的影响,使得 R-O 模型低估了高强铝合金的应变强化效应,与循环骨架曲线有一定的差异。

3) 7075 高强铝合金在各种循环加载制度下应力-应变曲线饱满,表现出了良好的滞回性能;试件循环加载后再单调加载,平均屈服强度提升了 8.45%,但由于循环加载累积损伤导致其延性相较于单调加载显著降低。

4) 基于 Chaboche 混合强化模型,标定了 7075 高强铝合金材料的混合强化参数,并应用于有限元数值模拟中,模拟结果与试验结果吻合结果较好,滞回能误差不超过 3.30%。

## 参考文献:

- [1] ZHU J H, WEI L L, WU W T, et al. Experimental study of concrete strengthened by stiffened aluminum plate[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 584-586: 997-1000.
- [2] ABDALLA J A, ABU-OBEIDAH A R, HAWILEH R A. Use of aluminum alloy plates as externally bonded shear reinforcement for R/C beams[J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 17: 403-410.
- [3] ABU-OBEIDAH A, HAWILEH R A, ABDALLA J A. Finite element analysis of strengthened RC beams in shear with aluminum plates[J]. Computers & Structures, 2015, 147: 36-46.
- [4] GB/T 16474—2011 变形铝及铝合金牌号表示方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
GB/T 16474—2011 Designation system for wrought aluminium and aluminium alloy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [5] CHANG Z Q, XING G H, ZHAO J H, et al. Feasibility and flexural behavior of RC beams prestressed with straight unbonded aluminum alloy tendons[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(7): 1466-1479.

- [6] YU X G, XING G H, CHANG Z Q. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted 7075 aluminum alloy bars[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101393.
- [7] XING G H, CHEN X, HUANG J, et al. Reinforced concrete beams strengthened in flexure with near-surface mounted 7075 aluminum alloy bars[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(1): 04021242.
- [8] 邢国华, 黄娇, 罗小宝, 等. 预应力铝合金筋嵌入式补强钢筋混凝土梁裂缝分析与计算[J]. *工程力学*, 2022, 39(3): 171-181.  
XING Guohua, HUANG Jiao, LUO Xiaobao, et al. Crack calculation and analysis of concrete beams strengthened with near-surface mounted prestressed aluminium alloy bars[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3): 171-181. (in Chinese)
- [9] WANG H N, XING G H, ZHAO J H, et al. Seismic behavior of RC columns strengthened with near-surface-mounted aluminum alloy bars and CFRP wraps[J]. *Engineering Structures*, 2022, 268: 114742.
- [10] XING G H, WANG H N, CHANG Z Q, et al. Prediction of the seismic behavior of concrete beams strengthened with aluminum alloy bars and/or basalt fiber-reinforced polymer bars[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2022, 31(4): e1911.
- [11] XING G H, LI X Y, CHANG Z Q, et al. Behavior of RC beams strengthened with near-surface mounted aluminum alloy bars under fully reversible cyclic loads[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(11): 04022103.
- [12] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters Technical Note No. 902[R]. Washington D. C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [13] BAEHRE R. Trycktastravorav elastoplastikt material-nagrafragestallningar (Comparison between structural behaviour of elastoplastic materials): No. 16 Tekn. [R]. Stockholm, Sweden: De Arne Johnson Ingenjorsbyra, 1966.
- [14] MAZZOLANI F M. Aluminium structural design[M]. Cham: Springer Vienna, 2003
- [15] 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 Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, 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)
- [16] 王誉瑾, 钱宏亮, 范峰. 结构用铝合金 6082-T6 材料本构关系及力学参数试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(增刊 1): 309-313, 319.  
WANG Yujin, QIAN Hongliang, FAN Feng. Experimental study on constitutive relation and mechanical parameters of structural aluminum alloy 6082-T6[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(Sup. 1): 309-313, 319. (in Chinese)
- [17] CHABOCHE J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, 2(2): 149-188.
- [18] 施刚, 王飞, 戴国欣, 等. Q460D 高强度结构钢材循环加载试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(7): 48-55.  
SHI Gang, WANG Fei, DAI Guoxin, et al. Experimental study of high strength structural steel Q460D under cyclic loading[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(7): 48-55. (in Chinese)
- [19] 王元清, 常婷, 石永久. 循环荷载下奥氏体不锈钢的本构关系试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(6): 1175-1179.  
WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu. Experimental study on constitutive relationship in austenitic stainless steel under cyclic loading[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(6): 1175-1179. (in Chinese)
- [20] 王元清, 柳晓晨, 戴国欣, 等. 循环荷载作用下 SN490B 钢材本构关系试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(4): 142-148.  
WANG Yuanqing, LIU Xiaochen, DAI Guoxin, et al. Experimental study on constitutive relation of steel SN490B under cyclic loading[J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(4): 142-148. (in Chinese)
- [21] 贾斌, 张其林, 罗晓群. 结构用铝合金材料循环加载性能研究[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(8): 21-27, 36.  
JIA Bin, ZHANG Qilin, LUO Xiaoqun. Study on cyclic loading performance of structural aluminium alloy materials[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(8): 21-27, 36. (in Chinese)
- [22] WANG Y Q, WANG Z X. Experimental investigation and FE analysis on constitutive relationship of high strength aluminum alloy under cyclic loading[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 2016: 2941874.
- [23] AGIUS D, KAJTAZ M, KOUROUSIS K I, et al. Sensitivity and optimisation of the Chaboche plasticity model parameters in strain-life fatigue predictions[J]. *Materials & Design*, 2017, 118: 107-121.
- [24] GB/T 228.1—2021 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, 2021.  
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [25] 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.  
GB/T 15248—2008 The test method for axial loading constant-amplitude low-cycle fatigue of metallic materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [26] 姜涛, 戴君武, 杨永强, 等. Q235B 结构钢颈缩后的力学行为研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(6): 82-93.  
JIANG Tao, DAI Junwu, YANG Yongqiang, et al. Study on the mechanical behavior of Q235B structural steel after necking[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(6): 82-93. (in Chinese)
- [27] 孙传智, 缪长青, 李爱群, 等. 配置 630 MPa 级高强钢筋的混凝土柱抗震损伤指数模型修正[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(1): 121-132.  
SUN Chuanzhi, MIAO Changqing, LI Aiqun, et al. Correction for seismic damage index model of concrete column with 630 MPa high strength steel bar[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(1): 121-132. (in Chinese)
- [28] DU Y, PENG J Z, RICHARD LIEW J Y, et al. Mechanical properties of high tensile steel cables at elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 52-65.
- [29] 杨舒涵. 冷弯钢材及铝合金材料循环本构模型研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
YANG Shuhan. Research and application of cyclic constitutive models for cold-formed steel and aluminum alloy materials [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)