

7075-T6 高强铝合金方管轴心受压承载能力研究

刘均利¹, 黎海霖^{1*}, 安永昌², 杜熙¹, 吕涛¹, 项光韬¹

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 广西桂通工程管理集团有限公司, 南宁 532315)

摘要: 为了研究 7075-T6 高强铝合金方管的轴心受压承载力, 制作了 9 个试件进行轴心受压试验, 得到了试件的极限承载力、破坏模式和荷载-轴向位移曲线。进行了试件的有限元数值分析, 并将数值分析结果与试验结果对比, 验证了有限元数值分析的准确性。采用有限元数值分析进行参数分析, 获得了适用于 7075-T6 高强铝合金方管构件的整体稳定系数-相对长细比曲线, 讨论了当相对长细比变化时局部屈曲对承载力的影响。结果表明, 7075-T6 高强铝合金方管具有一定的延性; 建立的有限元模型可以精确模拟试件加载的全过程以及极限承载力; 文中提出的整体稳定系数-相对长细比曲线的准确性比弱硬化曲线的准确性更好; 对于同种截面, 相对长细比不同的试件, 局部初始几何缺陷对于试件极限承载力的影响是不同的。

关键词: 7075-T6 铝合金; 有限元分析; 整体失稳; 整体稳定系数; 相对长细比; 局部初始几何缺陷

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0068-09

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20231128001

Study on Axial Compression Bearing Capacity of 7075-T6 High-Strength Aluminum Alloy Square Tube

LIU Junli¹, LI Hailin^{1*}, AN Yongchang², DU Xi¹, LYU Tao¹, XIANG Guangtao¹

(1. College of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Guitong Engineering Management Group Co., Ltd., Nanning 532315, China)

*Corresponding author: 1464694163@qq.com

Abstract: In order to investigate the axial compression bearing capacity of 7075-T6 aluminum alloy square tubes, nine specimens were fabricated and subjected to axial compression tests. The study obtained the ultimate bearing capacity, failure modes, and load-axial displacement curves of the specimens. Finite element models of the specimens were established for numerical analysis, and the effectiveness of finite element numerical analysis was validated by comparison with experimental data. Parametric analysis was conducted using finite element numerical analysis, proposing a overall stability coefficient-relative slenderness ratio curve suitable for 7075-T6 aluminum alloy square tubes. The paper discussed the influence of local buckling on bearing capacity as the relative slenderness ratio varied. The results indicate that 7075-T6 aluminum alloy square tubes exhibit certain ductility. The established finite element models accurately simulate the entire loading process and ultimate bearing capacity of the specimens. The proposed overall stability coefficient-relative slenderness ratio curve has better accuracy than the softening curve. For members with the same cross-section but different relative slenderness ratios, the influence of local initial geometric defect on the ultimate bearing capacity varies.

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 交通运输重点科技项目(QD2022-88)

作者简介:

刘均利(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程结构方面的研究。E-mail: 417214056@qq.com。

通信作者:

黎海霖(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事铝合金构件方面的研究。E-mail: 1464694163@qq.com。

Keywords: 7075-T6 aluminum alloy; finite element analysis; global instability; overall stability coefficient; relative slenderness ratio; local initial geometric defect

自20世纪40年代开始铝合金在建筑结构中得到应用。与钢材等传统金属材料相比,铝合金具有强度高、外形美观、抗腐蚀能力强等优点,目前在空间网壳结构、过街人行天桥、输电塔等建筑结构中都得到了应用^[1]。然而,从力学的角度来看,铝合金的弹性模量相对较小,平均在70 GPa左右,因此,在实际工程中,铝合金结构更容易出现失稳现象。针对这一问题,国内众多学者针对铝合金结构的稳定性开展了一系列研究。

目前,国内对于铝合金结构稳定性的研究主要集中在6XXX系铝合金材料的结构上。从2001年到2005年,多位学者针对具有对称截面的铝合金构件开展了轴心受压试验,计算了构件的整体稳定系数,给出了适用于对称截面的6XXX系铝合金轴心受压构件整体稳定系数计算方法^[2-7]。在2007年,部分学者从材料本构、受力性能两个方面对6061-T6铝合金结构开展试验研究,提出了适用于国内6061-T6铝合金的本构关系和不同受力情况下的设计计算方法^[8-10]。综合国内大量的研究成果,我国于2007年颁布了《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[11],涵盖了国内常用的6XXX系铝合金。目前,国内对于6XXX系铝合金的研究已经相对成熟。然而,6XXX系铝合金的强度普遍不大于300 MPa,仅与常用的Q235钢材的强度相当,且其弹性模量仅为钢材弹性模量的1/3,这些因素限制了铝合金在建筑结构中的应用。

随着各类工程对材料强度的要求提高,自20世纪40年代开始,7XXX系高强铝合金开始在航空工业中得到应用。7XXX系铝合金强度普遍超过400 MPa,属于高强铝合金^[12]。目前,国内已有一些学者从本构关系、受力性能的角度研究7XXX系铝合金结构。部分学者对7A04铝合金圆管的本构关系和轴心受压性能进行研究,得出了适用于7A04圆管的材料本构关系及其整体稳定系数的计算方法^[13-14]。胡晓光等^[15-16]对分别由701铝合金和703铝合金制成的L形截面构件进行轴心受压性能研究,认为国内规范的方法可以精确预测两种L形截面构件的整体稳定系数。支新航等^[17]对7075-T6铝合金H形截面构件的轴心受压局部稳定进行研究,认为在实际使用中,应当充分考虑此类构件在局部屈曲后的强度。

7075-T6铝合金最早被用于航空工业中,与常见的6XXX系铝合金相比,具有强度高、耐腐蚀性强的优点。目前,国内对7075-T6铝合金构件轴心受压稳定承载力的研究依然不足。因此本文对7075-T6高强铝合金方管的轴心受压承载能力开展研究,可为今后7075-T6高强铝合金方管在工程结构中的推广应用提供数据参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了研究7075-T6高强铝合金方管的轴压承载能力,本文以方管的截面宽厚比与长细比为变量,设计了9个试件以开展轴心受压试验研究。试件截面尺寸共3种,分别为40 mm×40 mm×5 mm、40 mm×60 mm×3 mm、60 mm×80 mm×3 mm,截面宽厚比的变化范围为6.00~24.67;3种长细比分别为30、45、60。方管试件的截面尺寸如图1所示。方管试件的具体信息如表1所示。

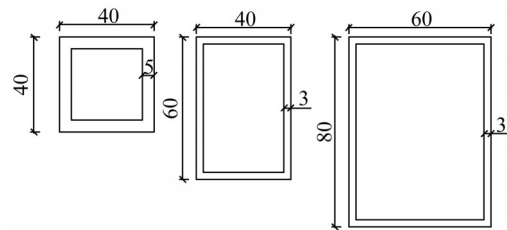


图1 截面尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Section dimensions (unit: mm)

1.2 材料性能测试

根据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[18],沿着铝合金方管的长度方向切取拉伸试样,并进行材料拉伸试验。每种截面规格的试件各切取3个拉伸试样,不同截面规格的试件所切取的拉伸试样尺寸如图2所示。拉伸试验在液压万能试验机上进行,并通过电子引伸计测量拉伸试样在加载过程中的变形,如图3所示。

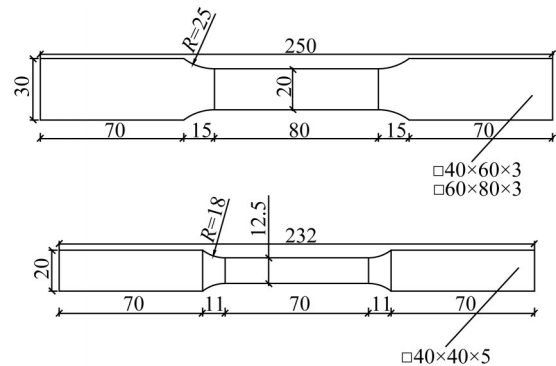


图2 拉伸试样尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Tensile specimen dimensions (unit: mm)

拉伸试样破坏前无明显征兆,仅在断裂前伴随有脆响。所有拉伸试样的材料拉伸试验结果如表2所示,其中 E 为原点弹性模量; $f_{0.1}$ 为规定塑性延伸率为0.1%时的

表1 试件具体信息

Table 1 Specific information of specimens

试件编号	截面规格/mm	预设长细比	实测截面长度/mm	实测截面宽度/mm	实测截面厚度/mm	实际长度/mm	实际长细比
试件1	40×40×5	30	39.94	40.01	4.99	493	34.20
试件2	40×40×5	45	40.01	39.96	5.00	710	49.24
试件3	40×40×5	60	39.98	39.98	4.99	926	64.18
试件4	60×40×3	30	60.01	40.03	2.99	562	35.24
试件5	60×40×3	45	60.01	40.01	3.00	729	45.75
试件6	60×40×3	60	60.02	40.10	2.99	981	61.42
试件7	80×60×3	30	79.94	59.95	2.96	785	32.51
试件8	80×60×3	45	80.09	59.88	2.97	1 146	47.51
试件9	80×60×3	60	79.94	59.92	2.97	1 509	62.53

应力; $f_{0.2}$ 为规定塑性延伸率为0.2%时的应力,又叫名义屈服强度; f_u 为极限抗拉强度。

关于铝合金材料的本构关系,目前最常用的模型为Ramberg-Osgood模型。该模型由Ramberg和Osgood于1939年提出,采用三个材料参数来描述铝合金的本构关系^[19]。在Ramberg-Osgood模型中,铝合金的本构关系如式(1)所示。

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

式中: E 为原点弹性模量; ϵ 为材料应变; σ 为材料应力; n 为硬化指数,反映了材料的应变硬化能力。其中 E 、 $f_{0.2}$ 可以通过材料拉伸试验直接测得,而 n 则无法通过材料拉伸试验直接测得。在实际计算中,往往采用SteinHardt在1971年提出的近似计算公式计算^[20],如式(2)所示。

$$10n = f_{0.2} \quad (2)$$

根据材料拉伸试验结果和SteinHardt的建议公式,得到7075-T6高强铝合金的原点弹性模量为76.04 GPa,名义屈服强度 $f_{0.2}$ 为418.03 MPa,极限抗拉强度 f_u 为498.90 MPa,硬化指数 n 为41.80。7075-T6高强铝合金本构关系曲线如图4所示。

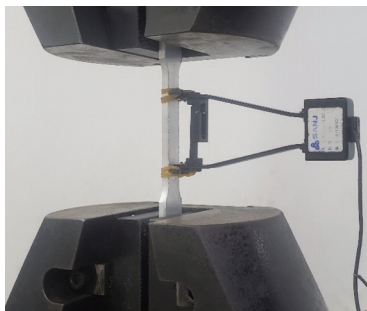


图3 拉伸试验设备

Fig. 3 Tensile test setup

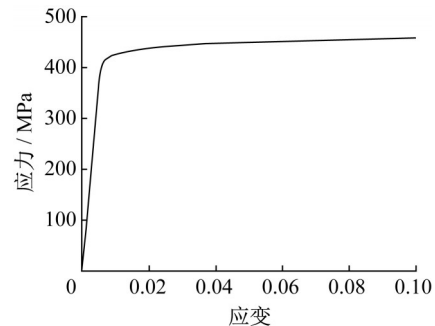


图4 7075-T6高强铝合金本构关系曲线

Fig. 4 Constitutive relationship curve of 7075-T6 high-strength aluminum alloy

表2 材料拉伸试验结果

Table 2 Material tensile test results

试样编号	E	$f_{0.1}$	$f_{0.2}$	f_u
T-1	74 360	309.43	322.06	423.77
T-2	76 460	364.63	375.55	462.99
T-3	77 000	472.73	483.79	575.64
T-4	78 840	359.69	372.16	460.48
T-5	79 540	549.03	557.27	607.44
T-6	74 710	432.96	443.94	509.84
T-7	73 210	463.59	473.82	541.41
T-8	76 310	360.70	371.35	457.47
T-9	73 910	350.92	362.33	451.02

1.3 试验装置和加载方案

轴心受压试验在YAW-500型电液伺服长柱试验机上进行,试验机上方为一个带有球铰的反力架。将试件的下端固定在双向铰支座中,如图5所示,这种双向铰支座具有良好的双向转动能力。采用双向铰支座和反力架

自带的球铰来模拟两端铰支的边界条件。



图5 双向铰支座

Fig. 5 Bidirectional hinge support

为测量加载端的轴向位移变化,将4个千分表仪器布置在加载端四周,如图6所示。试验的荷载数据将通过仪器自带的采集系统进行采集。在试件中点位置附近的截面布置8个应变片用以采集此处截面的应变变化情况,每个板件各布置2个应变片,应变片距离最近的板件边缘为5 mm。



图6 千分表布置

Fig. 6 Dial gauge arrangement

所有试件均采用单调分级加载的方式进行加载。开始时采用一级5 kN的分级加载方式,每一级持荷时间为2~3 min,待数据稳定时,进行数据的采集,当位移增加而荷载数据没有明显变化时,采用控制位移的方式进行缓慢加载,直到试件出现明显变形且荷载数据出现明显下降时,停止加载。

1.4 试验结果与分析

轴心受压试验的结果汇总于表3中, P_1 为试验中的极限承载力; P_{FEA} 为2.1节中有限元分析极限承载力结果。

所有试件的破坏模式均为整体失稳和局部屈曲的

表3 承载力的试验结果与有限元分析结果

Table 3 Bearing capacity of experimental results and finite element analysis results

试件编号	P_1 /kN	P_{FEA} /kN	破坏模式	误差/%
试件1	271.7	288.5		6.18
试件2	223.7	220.8		-1.30
试件3	134.6	142.2		5.65
试件4	249.6	229.8	整体失稳和 局部屈曲的 耦合破坏	-7.93
试件5	147.9	159.8		8.05
试件6	108.8	99.3		-8.73
试件7	239.5	264.6		10.48
试件8	185.0	197.9		6.97
试件9	138.7	149.8		6.18

耦合破坏模式。本文以典型试件7为例,对破坏模式进行说明,试件的整体破坏形态和局部破坏形态分别如图7所示。图9则为典型试件中点截面的荷载-应变变化曲线,各应变片位置如图8所示。结合图7~9可以看出,试件在加载初期,其变形主要是轴向变形。当荷载加至实测承载力的80%左右时,试件的形态开始出现微小的变化。对于发生整体失稳的试件而言,这种微小的变化体现在试件沿轴线出现了微小的弯曲当中。随着荷载的进一步增加,试件的弯曲幅度会逐渐增大,随后,试件弯曲点附近的板件将出现一定的变形。直至施加的荷载大小达到试件实测承载力,荷载数据开始出现下降变化,试件沿着轴线出现明显的弯曲变形,发生破坏,且在弯曲点附近的破坏区域,板件出现明显的局部屈曲变形。



a) 整体破坏形态 b) 局部破坏形态

图7 试件整体破坏形态和局部破坏形态

Fig. 7 Overall and local failure mode of specimen

所有试件的荷载-轴向位移变化曲线如图10所示,从图中可以看出,在加载初期,所有试件的荷载和轴向位

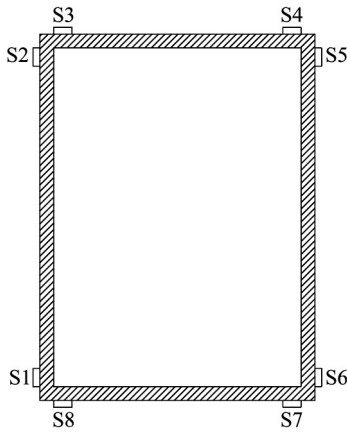


图8 应变片布置

Fig. 8 Arrangement of strain gauges

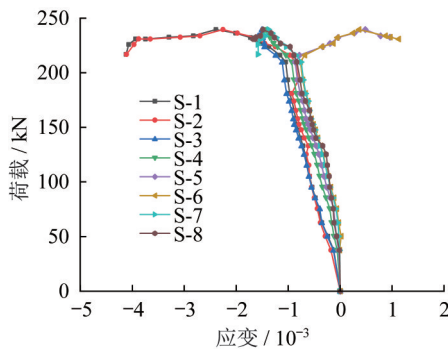


图9 典型试件的荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of typical specimen

移呈现近似线性关系。当试件的荷载加至实测承载力的80%左右时,荷载和轴向位移不再呈线性关系,轴向位移迅速增长,直到荷载抵达峰值。

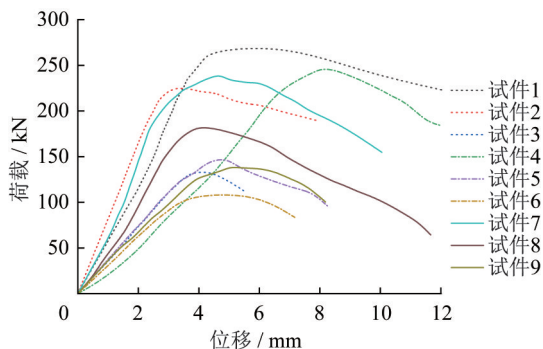


图10 所有试件的荷载-轴向位移曲线

Fig. 10 Load-axial displacement curves of all specimens

根据图10试件的荷载-轴向位移曲线的结果,计算所有试件的延性比和下降段负刚度,汇总于表4中。从表4可以看出,对具有相同截面规格的试件,试件的延性随着长细比的增加而降低。所有试件的平均延性系数 μ 为1.27,该数值大于1,说明7075-T6高强铝合金方管构件具有一定的延性。

所有试件的负刚度在荷载下降段差异较大,这可能是由于,测量下降段的荷载与位移变化数据时,以位移的变化控制加载,此时仪器为了保持一定的位移,所施加荷载的大小波动很大,导致不同试件在下降段的荷载大小存在差异,进而导致不同试件的负刚度差异很大。

2 有限元数值分析

2.1 有限元模型

本文采用有限元分析软件ABAQUS建立试件的有限元模型。模型的材料属性参数由材料拉伸试验获得,具体数值已在1.2节中给出。

表4 延性系数和负刚度

Table 4 Ductility coefficient and negative stiffness

试件编号	延性系数 μ	负刚度/(kN·mm ⁻¹)
试件1	1.52	-8.63
试件2	1.24	-7.61
试件3	1.20	-21.29
试件4	1.65	-18.82
试件5	1.21	-17.54
试件6	1.01	-19.94
试件7	1.32	-14.43
试件8	1.19	-18.32
试件9	1.10	-12.75

对试件的有限元模型进行屈曲分析,在获取各阶屈曲模态后,根据试验中观察到的试件破坏模式,选择合适的屈曲模态作为有限元模型的初始缺陷引入其中。对于整体失稳的屈曲模态试件,其幅值取模型全长的1/1000^[21];对于局部屈曲的屈曲模态试件,其幅值采用Walker公式计算^[21]。

$$\omega_d = 0.3t \sqrt{\frac{f_{0.2}}{\sigma_{cr}}} \quad (3)$$

式中: ω_d 为局部屈曲缺陷幅值; t 为板件厚度; $f_{0.2}$ 为名义屈服强度; σ_{cr} 为欧拉临界应力。

2.2 有限元数值分析的有效性

所有试件的试验破坏模式与有限元预测的破坏模式对比如图11所示,图中的数字与表1中试件的序号对应。从图11中可以看出,有限元数值分析所预测破坏模式为整体失稳,与试验结果较吻合。图12分别展示了典型试件7的实测荷载-轴向位移曲线和有限元数值分析预测的荷载-轴向位移曲线,从中可以看出,两者曲线形状基本一致。

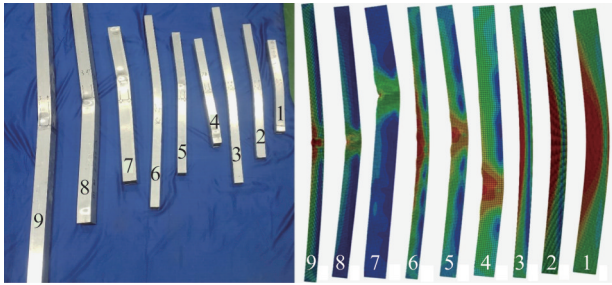


图 11 所有试件试验和有限元的破坏模式对比

Fig. 11 Comparison of failure modes of all specimens between test and finite element analysis

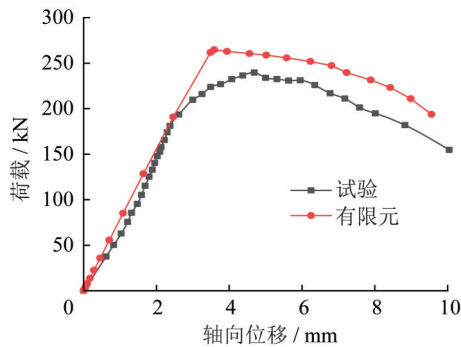


图 12 荷载-轴向位移曲线比较

Fig. 12 Comparison of load axial-displacement curve

通过有限元数值分析得到的承载力结果已列于表 3 中,实测承载力结果和有限元承载力结果的误差,其绝对值的平均值为 6.91%。结合表 3 承载力结果,可以看出,2.1 节中建立的有限元模型可以准确计算 7075-T6 高强铝合金方管的轴心受压承载力,可以用于进一步的参数分析。

2.3 参数分析

在 2.2 节已经论证了有限元数值分析的有效性。在此基础上,建立一批 7075-T6 高强铝合金方管的有限元模型。方管的截面规格选取了常见的 39 种铝厂生产的截面规格,各种截面规格铝管的相对长细比变化范围为

0.6~3.4,相邻规格的铝管的相对长细比相差 0.2,共 15 种相对长细比。因此,共建立了 585 个有限元模型,用于进一步考察 7075-T6 高强铝合金方管的轴心受压性能。截面规格和相对长细比种类汇总于表 5 中。

3 理论分析与对比

3.1 国内规范计算方法简介

在我国规范《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[11]中,非焊接双轴对称截面的铝合金轴心受压构件按承载力照下面的公式进行计算:

$$N_u = \eta_e \varphi f_{0.2} A \quad (4)$$

式中: N_u 为构件的极限承载力; η_e 为考虑局部屈曲影响的截面修正系数,该修正系数是根据组成截面的板件类型、宽厚比,对截面的厚度进行折减后得到的; $f_{0.2}$ 为铝合金材料的名义屈服强度; A 为构件毛截面面积; φ 为构件的整体稳定系数。该系数由 Perry 公式计算得到:

$$\varphi = \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \left[(1 + \eta + \bar{\lambda}^2) - \sqrt{(1 + \eta + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right] \quad (5)$$

$$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (6)$$

$$\bar{\lambda} = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right) \sqrt{\frac{f_{0.2}}{E}} \quad (7)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为构件的相对长细比,其为构件长细比 λ 的正则化形式; η 为构件的缺陷系数,通过对系数 α 和 $\bar{\lambda}_0$ 的调整,可以反映不同构件的初始弯曲缺陷和初始偏心缺陷的影响。在我国的铝合金结构规范中,根据铝合金构件使用材料的应变硬化能力,将铝合金构件分为强硬化合金构件和弱硬化合金构件。对于上述两类构件, α 分别取 0.35 和 0.20, $\bar{\lambda}_0$ 分别取 0.10 和 0.15。因此,我国铝合金规范采用了两条 $\varphi-\bar{\lambda}$ 曲线来计算铝合金轴心受压构件的整体稳定系数。

7075-T6 高强铝合金方管属于弱硬化合金,因此,本文将在 3.2 节中讨论用弱硬化曲线计算 7075-T6 高强铝合金方管轴心受压整体稳定系数的吻合度。

表 5 截面规格和相对长细比种类

Table 5 Section specifications and relative slenderness ratio types

截面规格/mm	相对长细比
40×40×3,40×40×4,40×40×5,40×50×3,40×50×4,40×60×3,40×60×4,40×60×5,40×70×4,40×80×4,44×76×3,50×50×3,50×50×4,50×50×5,50×70×3,50×70×5,50×100×4,50×100×5,60×60×3,60×60×4,60×60×5,60×60×6,60×80×3,60×80×4,60×80×5,60×120×4,60×120×5,70×70×4,70×70×5,70×70×8,80×80×5,80×80×8,80×80×10,80×100×5,90×90×5,100×100×5,100×100×6,100×100×8,100×100×10	0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6,1.8,2.0,2.2,2.4,2.6,2.8,3.0,3.2,3.4

3.2 数值分析结果与弱硬化曲线的比较

对 2.3 节中创建的 585 个有限元模型进行有限元分

析。由于国内规范中的稳定系数仅考虑了整体初始几何缺陷对极限承载力的影响,为了与规范保持一致,本文仅

引入有限元模型的整体初始几何缺陷。对计算结果进行整理,绘制585个有限元模型的 $\varphi-\bar{\lambda}_0$ 散点图,图中同时绘制了国内规范的弱硬化曲线,如图13所示。

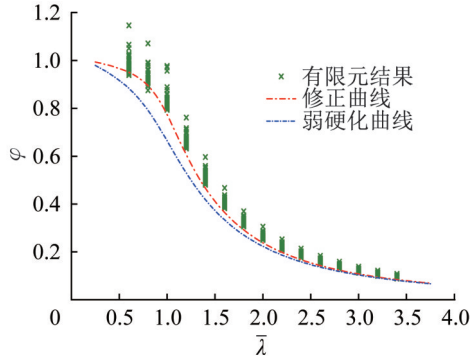


图13 有限元结果与规范曲线、修正曲线的对比
Fig. 13 Comparison of finite element results, standard curves and correction curves

从图13中可以直观看出,当构件相对长细比较小时,国内规范的弱硬化曲线对于7075-T6高强铝合金方管稳定系数 φ 的预测是偏保守的。其相关指数 R^2 为0.920 52,可见弱硬化曲线拟合效果一般。这是由于国内的规范曲线是在综合国内外对5XXX系铝合金和6XXX系铝合金试验数据和模拟数据的研究基础上进行拟合分析得到的。因此,弱硬化曲线会低估7075-T6高强铝合金方管的稳定系数。

由于弱硬化曲线低估了7075-T6高强铝合金方管的稳定系数,所以,采用已获得的585个有限元模型稳定系数结果,通过Origin软件的非线性拟合功能,修正系数 α 和系数 $\bar{\lambda}_0$ 。修正后, α 和 $\bar{\lambda}_0$ 的取值分别为0.08和0.17,修正曲线已绘制在图13中。在使用修正曲线拟合有限元模型的稳定系数后,相关指数 R^2 为0.981 95,相比弱硬化曲线,拟合效果更佳。且由图13可以看出,修正曲线基本处于有限元结果绘制的散点曲线下方,可见,修正曲线对7075-T6高强铝合金方管稳定系数的预测具有一定的安全性。

为了进一步验证修正曲线的合理性,本文分别使用弱硬化曲线、修正曲线计算2节中9个轴向受压试件的稳定系数理论值,并计算稳定系数的理论值与试验值之间的比值,结果汇总于表6中。 φ_{th} 为稳定系数理论值; φ_t 为稳定系数试验值。

从表6中可以看出,两条曲线预测的试件稳定系数结果离散性都较低。而修正曲线得到的稳定系数的理论值与试验值之间的比值,其均值相比规范曲线的均值更接近于1。上述结果说明使用修正曲线来预测7075-T6高强铝合金方管轴心受压稳定系数更具合理性。

表6 理论值与试验值的比值

Table 6 Ratio of theoretical value to experimental value

项目	弱硬化曲线	修正曲线
φ_{th}/φ_t	0.848	0.960
	0.725	0.834
	0.798	0.878
	0.725	0.826
	0.964	1.019
	0.850	0.942
	1.010	1.132
	0.938	1.085
	0.826	0.913
	均值	0.854
方差	0.010	0.011
变异系数	0.012	0.012

3.3 局部初始几何缺陷对承载力的影响

我国规范采用有效厚度法来考虑局部初始几何缺陷这一因素,对铝合金轴向受压试件的极限承载力的影响。有效厚度法根据组成截面的板件类型、宽厚比,相应对截面厚度进行折减,由此反映局部初始几何缺陷对极限承载力的折减。有效厚度法对于同种截面、不同相对长细比大小的构件采用了相同的折减系数,即认为大小不同相对长细比的试件,局部初始几何缺陷因素对试件极限承载力的影响是相同的。

为了研究局部初始几何缺陷对同种截面、不同相对长细比试件的极限承载力影响是否相同。本文从2.3节中的585个有限元模型中选取了6种不同截面规格、15种不同相对长细比的90个有限元模型,相对长细比种类和表4相同,并把具有相同截面长宽尺寸的构件划分为一组。具体信息汇总于表7中。

表7 分组信息

Table 7 Group information

截面规格/mm	分组编号	相对长细比
60×60×3	a	
60×60×4		
60×80×4	b	0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.6、2.8、3.0、3.2、3.4
60×80×5		
50×50×5	c	
50×50×5		

对以上90个有限元模型,为了考虑初始局部几何缺陷的影响,引入整体失稳模态和第一阶局部屈曲模态作

为初始缺陷,其幅值按 Walker 公式计算。

把 90 个有限元模型的承载力大小的数值,取为:

$$\rho = \frac{P_{FEA}}{Af_{0.2}} \quad (8)$$

式中: ρ 是对有限元模型承载力数值的无量纲化结果。对同一组中,具有相同大小的相对长细比,不同截面宽厚比的 2 个有限元模型,计算 2 个有限元模型 ρ 的差值,如下式:

$$\tau = \rho_a - \rho_b \quad (9)$$

式中: ρ_a 为截面宽厚比较小模型的 ρ 值, ρ_b 为截面宽厚比较大模型的 ρ 值。 τ 值的大小可以反映,在相同截面长宽,相同相对长细比的情况下,不同截面宽厚比对试件承载力的影响, τ 值越大则影响越大,反之则越小。 τ 值的结果如图 14 所示。

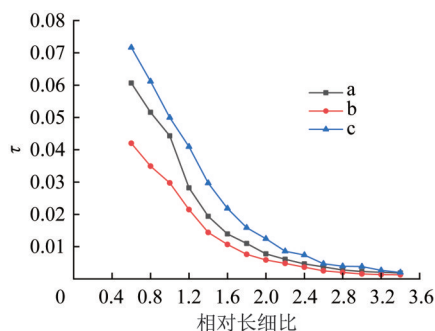


图 14 τ 值随相对长细比的变化趋势

Fig. 14 Trend of value τ variation with relative slenderness ratio

从图中可以看出,试件截面宽厚比对试件承载力的影响是随着相对长细比的变化而变化的。当相对长细比变大时,试件截面宽厚比对试件极限承载力的影响变小,即对于同种截面,不同相对长细比的试件,局部初始几何缺陷对于试件极限承载力的影响是不同的。

4 结论

文章针对 7075-T6 高强铝合金方管轴心受压的承载能力展开研究,共制作了 9 根方管试件以开展轴心受压试验,并进行了大量的有限元数值分析,得出以下结论:

(1) 9 根方管试件的破坏模式均为整体失稳,试件的延性比表明,7075-T6 高强铝合金方管在轴心受压的情况下,具有一定的延性。

(2) 通过有限元数值分析可以精确得到试件的承载力,并能准确预测试件的破坏模式,且两者的荷载-轴向位移曲线变化趋势基本一致。

(3) 进行了参数分析,基于参数分析结果和非线性拟合方法,提出了用于计算 7075-T6 高强铝合金方管稳定系数的 $\varphi-\bar{\lambda}_0$ 曲线。结果表明,该曲线准确性较好。

(4) 对于同种截面,不同相对长细比的试件,局部初始几何缺陷对于试件极限承载力的影响不同。其可能的

原因是,对于相对长细比较大的细长试件,因局部初始几何缺陷使板件出现局部屈曲变化前,试件已发生整体失稳破坏。

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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.013.
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100-109. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.013. (in Chinese)
- [2] 沈祖炎,郭小农. 对称截面铝合金挤压型材压杆的稳定系数[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 31-36, 48. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2001.04.006.
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong. Stability coefficient of symmetrical cross-section aluminum alloy extruded profiles for compression bars [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4): 31-36, 48. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2001.04.006. (in Chinese)
- [3] 李明,陈扬骥,钱若军,等. 工字形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(1): 52-54, 60. DOI: 10.13204/j.gyjz2001.01.017.
LI Ming, CHEN Yangji, QIAN Ruojun, et al. Experimental research on stability parameters for I-section aluminum alloy bars loaded by axial compressive force [J]. Industrial Construction, 2001, 31(1): 52-54, 60. DOI: 10.13204/j.gyjz2001.01.017. (in Chinese)
- [4] 罗永峰,季跃,芮渊,等. 铝合金结构轴心压杆稳定性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(4): 401-405. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2001.04.005.
LUO Yongfeng, JI Yue, RUI Yuan, et al. Stability analysis of the aluminum alloy members under axial compressions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(4): 401-405. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2001.04.005. (in Chinese)
- [5] 张茂功,吴东红,向华,等. 铝合金圆管轴心受压构件稳定系数的试验研究[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(1): 12-14. DOI: 10.3321/j.issn:1673-2049.2004.01.004.
ZHANG Maogong, WU Donghong, XIANG Hua, et al. Experiment research on stability factor for circular section aluminum-alloy members under axially compressive load [J]. Journal of Chang'an University (Architectural and Environmental Science Edition), 2004, 21(1): 12-14. DOI: 10.3321/j.issn:1673-2049.2004.01.004. (in Chinese)
- [6] 李明,陈扬骥,钱若军,等. 圆管形铝合金轴心压杆稳定系数的试验研究[J]. 空间结构, 2000, 6(1): 59-64, 53. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2000.01.010.
LI Ming, CHEN Yangji, QIAN Ruojun, et al. Experimental study on the stability coefficient of cylindrical aluminum alloy axial compression bars [J]. Spatial Structures, 2000, 6(1): 59-64, 53. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2000.01.010. (in Chinese)
- [7] 李源,殷继刚,闫文魁,等. 折叠网架轴心受压铝合金杆件的稳定系数[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊1): 357-358, 413.

- DOI:10.13204/j.gyjz2005.s1.10.
LI Yuan, YIN Jigang, YAN Wenkui, et al. The stability-factor of axially loaded aluminum-alloy member for folding latticed frame [J]. Industrial Construction, 2005, 35 (Suppl. 1) : 357-358, 413. DOI: 10.13204/j.gyjz2005.s1.10. (in Chinese)
- [8] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 铝合金偏心受压构件理论和试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6) : 136-146. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.017.
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, et al. Theoretical and experimental research on aluminum alloy members under eccentric compression [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6) : 136-146. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.017. (in Chinese)
- [9] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 铝合金受弯构件理论和试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6) : 129-135, 146. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.016.
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, et al. Theoretical and experimental research on aluminum alloy beams [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6) : 129-135, 146. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.016. (in Chinese)
- [10] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 铝合金轴心受压构件理论和试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6) : 118-128. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.015.
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, et al. Theoretical and experimental research on aluminum alloy members under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6) : 118-128. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.06.015. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 铝合金结构设计规范: GB 50429—2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Aluminum Structures: 50429—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)
- [12] 李贝贝, 王元清, 支新航, 等. 我国 $7\times\times\times$ 系高强铝合金及其研究进展 [J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(7) : 1-10. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.001.
LI Beibei, WANG Yuanqing, ZHI Xinhang, et al. A review on the research of the 7XXX series high strength aluminum alloy as structural material in China [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(7) : 1-10. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.07.001. (in Chinese)
- [13] 李进军, 丁永君, 王衬心, 等. 7A04-T6 铝合金圆管的材性试验和本构模型研究 [J]. 钢结构 (中英文), 2019, 34(12) : 35-39. DOI: 10.13206/j.gjg201912007.
LI Jinjun, DING Yongjun, WANG Chenxin, et al. Research on properties test and constitutive model of 7A04-T6 aluminum alloy tubes [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2019, 34(12) : 35-39. DOI: 10.13206/j.gjg201912007. (in Chinese)
- [14] 李振宇, 王衬心, 李进军, 等. 7A04 铝合金圆管构件轴压稳定性研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2020, 53(10) : 1036-1044. DOI: 10.11784/tdxbz20198037.
LI Zhenyu, WANG Chenxin, LI Jinjun, et al. Stability of 7A04 aluminum alloy circular tubes under axial compression [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(10) : 1036-1044. DOI: 10.11784/tdxbz20198037. (in Chinese)
- [15] 胡晓光, 程永锋, 陈宣宇, 等. 国产 701 铝合金 L 形轴压构件承载性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(11) : 63-71. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.008.
HU Xiaoguang, CHENG Yongfeng, CHEN Xuanyu, et al. Research on the performance of domestic 701 aluminum alloy L-shaped members under axial compression [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(11) : 63-71. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.008. (in Chinese)
- [16] 胡晓光, 程永锋, 周津地, 等. 国产 703 高强铝合金轴压角铝构件试验 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2020, 48(10) : 1442-1451. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.20056.
HU Xiaoguang, CHENG Yongfeng, ZHOU Jindi, et al. Test on domestic 703 high-strength aluminum alloy angle members in axial compression [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(10) : 1442-1451. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.20056. (in Chinese)
- [17] 支新航, 王元清, 李贝贝, 等. 7075-T6 高强铝合金轴心受压构件局部稳定试验研究 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2022, 55(7) : 745-753. DOI: 10.11784/tdxbz202106026.
ZHI Xinhang, WANG Yuanqing, LI Beibei, et al. Experimental study on local buckling behavior of 7075-T6 high-strength aluminum alloy stub columns under axial compression [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(7) : 745-753. DOI: 10.11784/tdxbz202106026. (in Chinese)
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [19] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington D. C.: NASA, 1943.
- [20] STEINHARDT O. Aluminum constructions in civil engineering [J]. Aluminum, 1971, 47: 131-139.
- [21] 陈向荣, 李文博, 卢小松, 等. 基于连续强度法的铝合金箱型截面轴压构件稳定承载力研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2022, 38(3) : 401-409. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2022.03.03.
CHEN Xiangrong, LI Wenbo, LU Xiaosong, et al. Research on stability bearing capacity of aluminum alloy box section axial compression members based on continuous strength method [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022, 38(3) : 401-409. DOI: 10.11717/j.issn:2095-1922.2022.03.03. (in Chinese)