

弯曲铝合金方管的轴压性能试验研究

郭小农, 计丽艳, 李政宁, 欧阳辉

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为研究带初弯曲度铝合金方管的轴压承载力, 完成了 8 个试件的轴压稳定性试验, 并建立了与试验条件一致的有限元模型。通过对比试验和有限元分析结果验证了有限元模型的可靠性。结果表明, 带有较大初弯曲度铝合金方管的破坏模式为整体弯曲失稳。最后, 根据有限元分析结果拟合得到较大初弯曲度铝合金方管的整体稳定系数计算式, 并将拟合计算式结果和数值分析结果及试验结果进行对比, 验证了计算式的正确性。

关键词: 弯曲铝合金方管; 轴压承载力; 初始缺陷

中图分类号: TU391; TU317.1

文献标志码: A

Experimental Study on Axial Compression Performance of Bent Aluminum Alloy Square Tube

GUO Xiaonong, JI Liyan, LI Zhengning, OUYANG Hui
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the axial compression capacity of the aluminum alloy square tube with initial bending, the axial compression stability test of 8 specimens was completed, and a finite element model with the same test conditions was established. The reliability of the finite element model was verified by comparing the results of experiments and finite element analysis. The results show that the failure mode of the aluminum alloy square tube with large initial bending is the overall bending instability. Finally, according to the finite element analysis results, the calculation formula of the overall stability coefficient of the aluminum alloy square tube with large initial bending was obtained, and by comparing results of the fitting calculation formula with the numerical analysis results and the test results, the correctness of the calculation formula was verified.

Key words: bent aluminum alloy square tube; axial compression capacity; initial defects

与建筑用钢相比, 铝合金不仅具有质量轻、比强度高、密度低、耐腐蚀以及低温性能好等优点, 还具有易于挤压成型和便于回收再利用等特点, 是一种理想的建筑材料。国内对铝合金结构的研究始于 20 世纪 80 年代, 许多学者从国产结构用铝合金出发, 对铝合金结构的本构关系^[1]、轴心受压构件^[2]、受弯构件^[3]、压弯构件^[4]和节点连接^[5-6]等方面进行了深入研究。

由于轴心受压构件在工程中应用普遍, 因此我国很早开始对铝合金构件进行了轴压性能研究。李明等^[7]对几种不同长细比的 6061-T6 铝合金挤压构件进行试验研究。随后, 罗永峰等^[8]完成了 6061 系列工字型和圆管型截面的铝合金柱轴压试验, 并在已有研究基础上提出了新的计算式。2007 年, 我国颁布《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[9]。虽然该规范给出了铝合金轴压构件的计算式, 但是由于铝合牌号 and 构件截面种类繁多, 因此目前仍有学者对铝合金构件的屈曲性能进行了大量的试验研究。Zhu 等^[10-13]等采用试验和有限元法研究了端部焊接端板和不焊接端板的 6063-T5 和 6061-T6 构件的轴压性能, 翟希梅等^[14]对 17 根 H 型和箱型截面的 6082-T6 高强铝合金构件进行了有限元数值模拟, 王元清等^[15]对轴心受压的 L 形截面 7A04 铝合金柱进行了试验研究与有限元数值模拟。随着建筑外形的不断创新, 带有较大初弯曲度构件的使用日益广泛。Yang 等^[16]对带有较大初弯曲度的圆钢管进行了研究, 量化了具有较大初始曲率构件的轴压承载能力。

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51878473)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构。

E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通信作者: 李政宁(1998—), 男, 硕士生, 主要研究方向为铝合金结构。E-mail: 2032336@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

目前已有研究主要针对杆轴为直线的构件的轴压稳定性能。随着建筑结构外形的复杂化,传统的直杆已经不能满足需求,由此产生了很多异形杆件。以四川省成都市大邑县的建川综合陈列馆^[17]为例,其建筑造型呈“灯笼”状,因此结构的内外弦杆均采用带有一定初弯曲度的方形铝管。铝合金管的弯曲程度远超过规范规定的 $L/1\,000$ 的初弯曲度限值,因此其承载力不能通过传统的轴压承载力公式确定。

基于足尺试验和有限元分析,对弯曲铝合金方管的轴压性能进行研究,分析各参数对其整体稳定性的影响规律。最后,基于数值分析和理论推导得到弯曲铝合金方管轴压承载力的计算式,通过对比有限元分析结果和拟合计算式结果,验证了计算式的有效性。

1 弯曲铝合金方管试验方案

1.1 弯曲铝合金方管试件及材性试验

为探究带初弯曲度铝合金方管的轴压力学性

能,制作了4组不同尺寸的足尺构件,每组各2个试件,共计8个试件。第1组试件编号为GJ1600-1、GJ1600-2,第2组试件编号为GJ2100-1、GJ2100-2,第3组试件编号为GJ2800-1、GJ2800-2,第4组试件编号为GJ3300-1、GJ3300-2。方管的截面为 $\square 150\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。试件外形和几何尺寸如图1所示。试验前对试件的截面尺寸、长度和初弯曲度均进行了实测,实测数据如表1所示。构件的计算长度 L_0 取两端刀口转动中心之间的距离,即两端刀口厚度加上试件长度;构件的初弯曲度用跨中初弯曲幅值 Δ_0 和构件计算长度之比 $\gamma=\Delta_0/L_0$ 表示;特别地,由于试件为高精级铝合金挤压型材,实测发现截面尺寸和名义尺寸几乎一致,因此表1中直接列出名义尺寸。

弯曲铝杆所采用的材料牌号为6082-T6。对同批材料加工3个标准拉伸试件^[18],以得到材料的力学性能。通过拉伸试验得到了试件的应力-应变曲线,如图2所示。根据试验数据整理得到材料的物理力学性能参数,如表2所示。

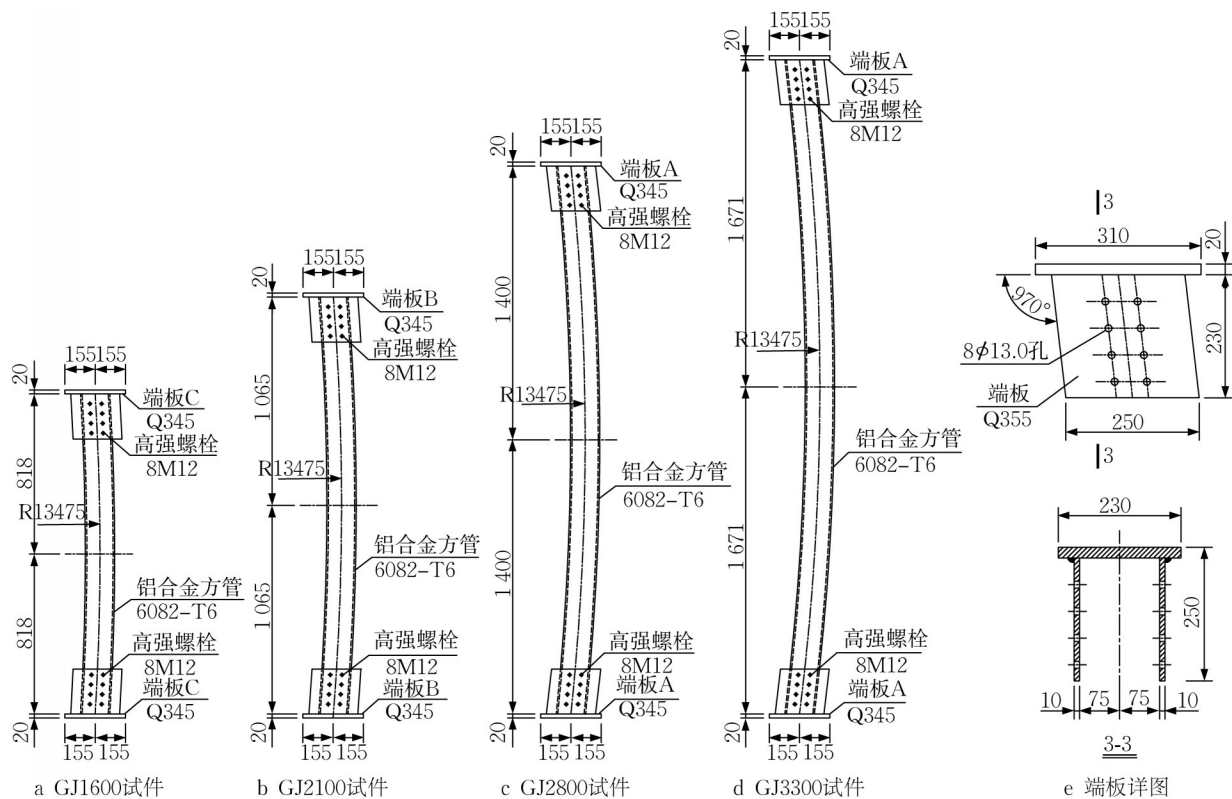


图1 试件外形及几何尺寸(单位:mm)

Fig.1 Appearance and geometric dimensions of specimens(unit:mm)

1.2 加载方案

试验在同济大学建筑结构实验室进行,采用力控制的单调加载制度。试验正式开始前采用力控制模式对试件进行预加载,卸载后开始正式加载。试

验采用分级加载,每级荷载稳压2 min后读取应变片和位移计读数,直至试件破坏,稳压5 min后缓慢卸载。采用静力单向加载的方式,探究初弯曲度较大的铝合金方管的轴压力学性能。试件的加载照片如

表 1 试件主要参数及试验和有限元结果

Tab.1 Properties of specimens and thier experimental and finite element results

试件编号	截面/(mm×mm)	构件长度 <i>L</i> /mm	计算长度 <i>L</i> ₀ /mm	初弯曲度 γ	承载力 <i>F</i> /kN	极限弯矩 <i>M</i> /(kN·m)	有限元结果 <i>F</i> ₀ /kN	误差/%
GJ1600-1	□150×8	1 624	1 724	1/79.04	790.97	34.51	905.39	14.47
GJ1600-2	□150×8	1 623	1 723	1/69.56	819.96	34.09	872.39	6.39
GJ2100-1	□150×8	2 111	2 211	1/57.64	748.26	46.11	674.71	−9.83
GJ2100-2	□150×8	2 115	2 215	1/61.04	706.71	41.47	687.42	−2.73
GJ2800-1	□150×8	2 775	2 875	1/41.22	466.71	52.51	450.34	−3.51
GJ2800-2	□150×8	2 779	2 879	1/49.83	466.17	50.72	486.20	4.30
GJ3300-1	□150×8	3 310	3 410	1/34.77	407.07	64.62	340.18	−16.43
GJ3300-2	□150×8	3 316	3 416	1/37.07	383.24	64.87	349.22	−8.88

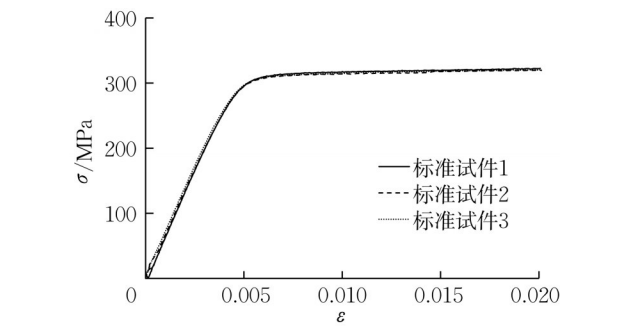


图 2 材料的应力-应变曲线图

Fig.2 Stress-strain curve of the material

图 3 所示。为模拟两端理想铰接的约束条件,两端设置了刀口支座。

1.3 测点布置

量测内容主要有弯曲铝合金方管的轴向变形、平面内和平面外的位移以及支座的相对转角(D1—D6)、试件 3 个截面处的纵向应变(S1—S16)。通过位移计读数可以得到弯曲铝合金方管在轴向荷载作

用下平面内和平面外的变形,通过应变片的读数可以得到上、中、下 3 个截面对应的轴力和弯矩。4 组铝合金方管的应变片和位移计布置均相似,以 GJ1600 的布置为例,如图 4 所示。

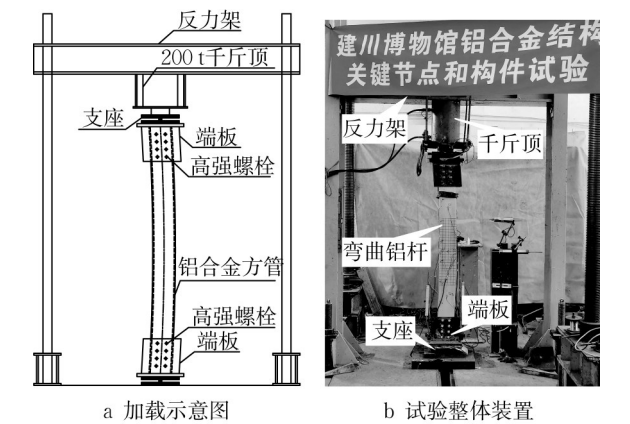


图 3 弯曲铝合金方管试验装置

Fig.3 Test device of bent aluminum alloy square tube

表 2 材性试验结果

Tab.2 Results of material test

材料	试件	屈服强度 $f_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 f_u /MPa	弹性模量 <i>E</i> /MPa	延伸率 δ_5 /%
铝合金 6082-T6	标准试件 1	317.8	335.4	63 881.4	11.13
	标准试件 2	314.8	331.2	64 713.2	10.54
	标准试件 3	316.5	333.3	66 403.3	11.09
	均值	316.4	333.3	65 332.6	10.92

2 试验结果及分析

2.1 破坏模式和极限承载力

4 组试件在加载初期基本上表现为线弹性,试件外观没有明显变化。随着荷载的加大,构件的跨中挠度开始加速增大,随后构件达到极限承载力,并在弯曲铝合金方管跨中部位发生局部屈曲,此时荷载已经出现较大幅度降低。结果表明,由于试件的长细比较大且截面的板件宽厚比较大,因此整体失稳先于局部失稳

发生。构件破坏时,铝合金方管和支座的连接部位未发生明显破坏。卸载后,弯曲铝合金方管的屈曲变形没有完全恢复。部分典型试件最终破坏模式如图 5 所示。各试件极限承载力如表 1 所示。

2.2 荷载-应变曲线

图 6 为试件 GJ1600-1 的 A-A 截面、B-B 截面(跨中截面)和 C-C 截面对应的荷载-应变曲线。荷载施加初期,各截面的应变呈线性增加,后期随着荷载的增加,截面进入非线性阶段。弯曲铝合金方管的初弯曲较大,因而构件的二阶效应较强,构件的非

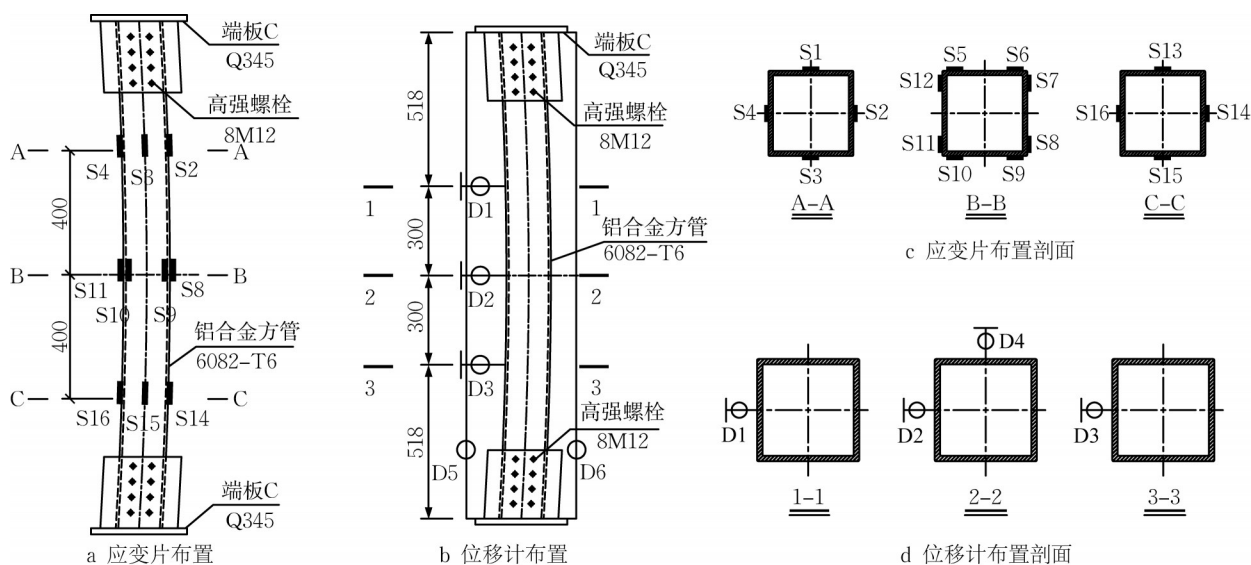


图4 试件GJ1600应变片和位移计布置

Fig.4 Layout of strain gauges and displacement transducers of GJ1600

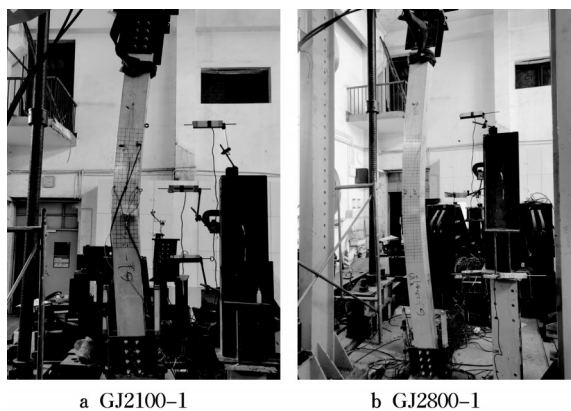


图5 部分典型试件的破坏模式

Fig.5 Failure mode of typical specimens

线性增长快。构件上下2个对称截面的应变片读数变化趋势较为一致。

2.3 荷载-位移曲线

位移计D1、D2、D3测量弯曲铝合金方管的平面内变形,位移计D4测量弯曲铝合金方管的平面外变形。图7为试件GJ1600-1荷载-位移曲线。由图7a

可知,荷载施加初期,试件处于弹性状态,随着荷载的增加,铝合金方管平面内的位移增长为线性增长。当荷载接近极限承载力时,从跨中截面开始,试件进入弹塑性状态,随着荷载的进一步增加,平面内位移增长,铝合金方管塑性发展,荷载不增加,但跨中截面的位移不断加大。试件的最大平面内变形超过50 mm。由图7b可知,构件在跨中部位出现了局部鼓曲,因此存在着较小的平面外变形。

3 数值模型的建立和验证

采用Ansys有限元软件建立弯曲铝合金方管的有限元模型,模型的几何尺寸与试件的实际尺寸相同。由试验结果可知,整体失稳先于局部失稳发生,而且主要研究弯曲构件的整体稳定性能,因此采用梁单元Beam188建立数值模型,打开高阶形函数开关;铝合金材料的本构关系采用R-O模型,力学性能参数根据表1取值。采用正弦曲线表示构件的初

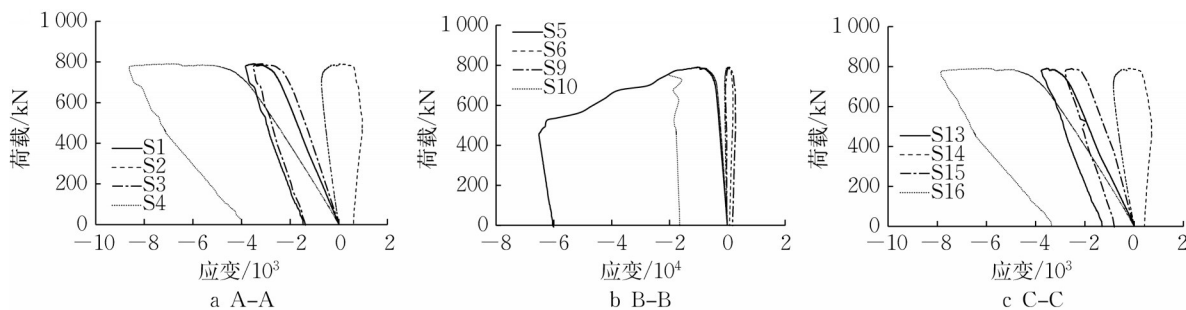


图6 试件GJ1600-1杆件的荷载-应变曲线

Fig.6 Load-strain curve of GJ1600-1

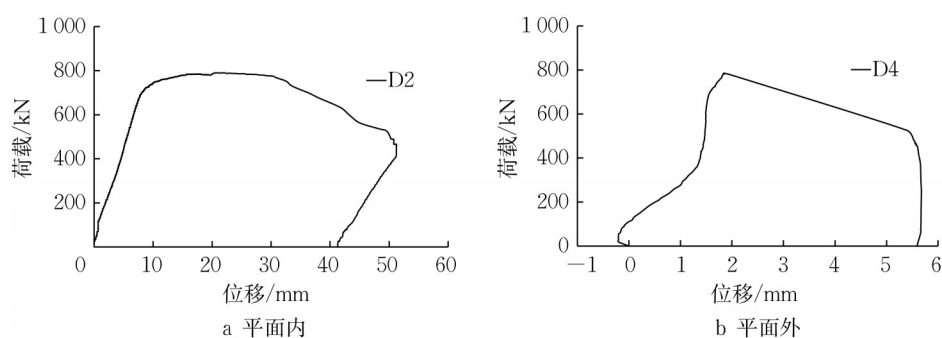


图7 试件GJ1600-1的荷载-位移曲线
Fig.7 Load-displacement curve of GJ1600-1

弯曲形状,幅值根据表1的实测结果确定。模型的约束条件和试验条件一致。试件的端部构造如图1e所示。虽然端部截面有所增大,但由于其位于构件两端,因此对弯曲铝杆的整体刚度影响可忽略不计,有限元模型中不考虑端板的影响。数值分析中考虑材料和几何非线性。有限元模型如图8所示。

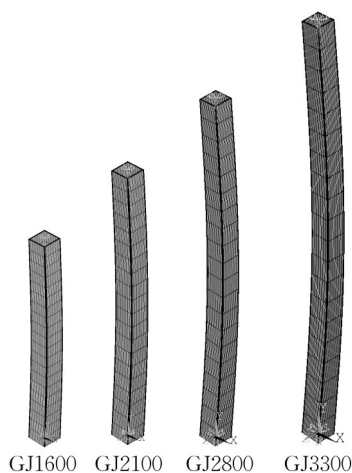


图8 各试件的有限元模型
Fig.8 Finite element model of specimens

通过对有限模型施加端部的轴向荷载,使得铝合金方管产生内力和变形。铝合金方管在轴力和弯

矩的作用下杆件发生整体失稳,达到极限承载力。最后得到的各构件承载力如表1所示。有限元分析与试验得到的铝合金方管破坏模式和极限承载力都较为相近。图9给出了GJ1600试件有限元分析得到的铝合金方管应力和变形。

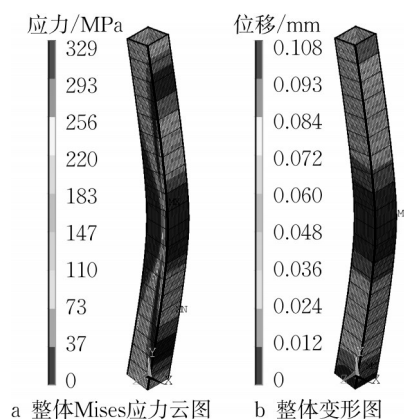


图9 试件GJ1600的有限元计算结果
Fig.9 Finite element calculation results of GJ1600

带有较大初弯曲度铝合金方管的二阶效应较强,因此构件的平面内变形较为明显。图10对比了部分典型试件的平面内荷载-位移的有限元结果和试验结果。从图10可以得到,有限元结果和试验结果吻合良好,充分验证了有限元模型的正确性。

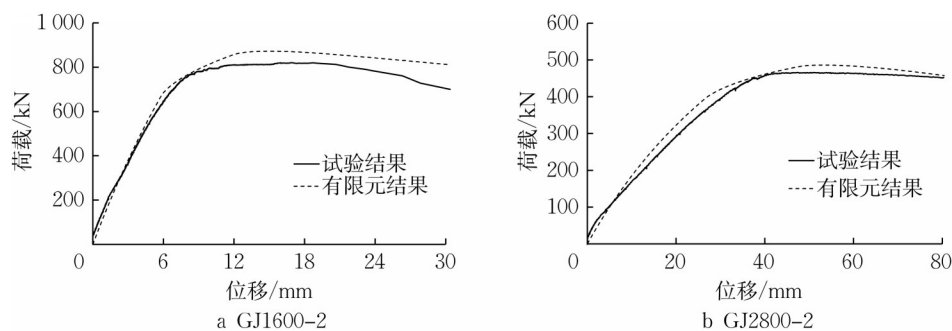


图10 部分典型试件的平面内荷载-位移曲线
Fig.10 In-plane load-displacement curves of some typical specimens

4 弯曲铝合金方管轴压稳定承载力参数分析

轴心受力构件是空间网格结构中广泛采用的一种基本受力构件,在构件截面无明显削弱的情况下,整体失稳是轴心受力构件的主要破坏模式。

当初弯曲度 $\gamma=0\sim 1/1\,000$ 时,基于各国规范中的柱子曲线及相关公式可有效地计算出轴压构件的稳定系数。当构件的初弯曲度超过限值,采用规范所给公式计算得到的稳定系数与实际构件的稳定系数差异较大,因此传统的计算公式已经不再适用于初弯曲度大的构件。下面以铝合金方管为例分析构件长细比和初弯曲度对构件轴压承载性能的影响。

为确定各项参数对弯曲铝合金方管轴压承载力的

影响,建立了10个系列的数值模型进行参数分析。根据工程中常用的方管截面,选取 $\square 80\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 、 $\square 120\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 、 $\square 150\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 、 $\square 200\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 、 $\square 240\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 、 $\square 300\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ 等6种截面的轴压构件进行分析。铝合金材料牌号均为6082-T6。根据《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[9],本研究中方管板件宽厚比均小于宽厚比限值,板件全截面有效,可以保证构件整体破坏前不发生局部屈曲。10个系列的构件初弯曲度分别为 $1/1\,000$ 、 $1/700$ 、 $1/500$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ 、 $1/30$ 、 $1/20$ 、 $1/10$,每个系列中包含10个相对长细比不同的构件,相对长细比取值为0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0。模型信息如表3所示。建模过程与3节相同,此处不再赘述。

表3 模型信息

Tab.3 Model information

初弯曲度 γ	材料	截面/(mm×mm)	相对长细比 $\bar{\lambda}$
$1/1\,000$ 、 $1/700$ 、 $1/500$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/100$ 、 $1/50$ 、 $1/30$ 、 $1/20$ 、 $1/10$	6082-T6	$\square 80\times 5$ 、 $\square 120\times 6$ 、 $\square 150\times 8$ 、 $\square 200\times 10$ 、 $\square 240\times 12$ 、 $\square 300\times 14$	0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0

图11为初弯曲度为 $L/1\,000$ 和 $L/100$ 的不同截面规格铝合金方管轴压构件稳定系数 φ 和相对长细

比 $\bar{\lambda}$ 的关系。从图11可以看出,构件的截面规格对稳定系数影响很小。

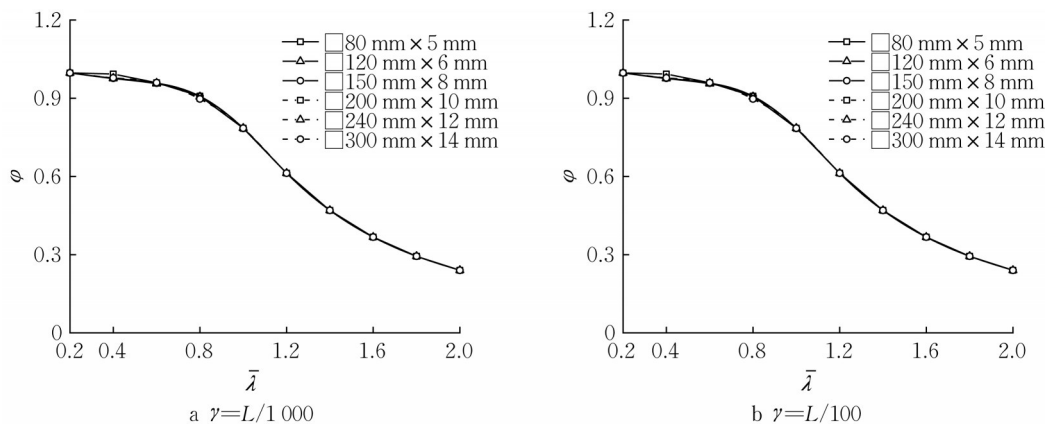


图11 稳定系数和截面形式的关系

Fig.11 Relationship between stability coefficient and section form

截面形式为 $\square 150\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的稳定系数数值分析结果如图12所示。由图12可知,构件的长细比对抗压稳定承载力有影响,随着构件长细比的增大,构件的稳定承载力逐渐降低。同时,若维持正则化长细比不变,则构件的整体稳定系数随着初弯曲度的增大而下降,如图13所示。

5 弯曲铝合金方管轴压整体稳定系数

若假设初弯曲形状为半波正弦曲线,则可根据

边缘纤维屈服准则,推导得到经典的Perry公式。我国铝合金结构设计规范中采用Perry公式的形式来表达构件的整体稳定系数,当不考虑焊接和局部失稳时,构件的整体稳定系数可按下式计算:

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

式中: η 为等效偏心率。对于6082-T6铝合金, η 的计算式为

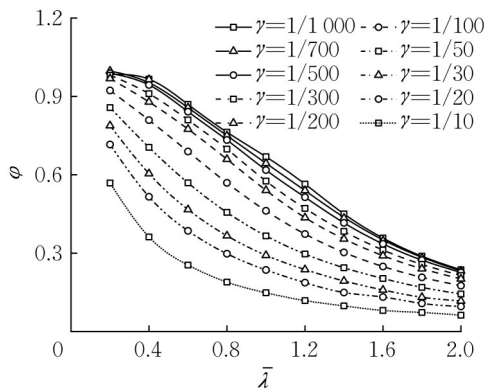


图12 稳定系数和相对长细比关系

Fig.12 Relationship between stability coefficient and relative slenderness ratio

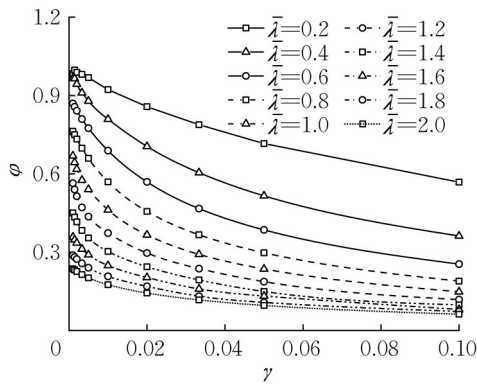


图13 稳定系数和初弯曲度关系

Fig.13 Relationship between stability coefficient and initial curvature

$$\eta = 0.2(\bar{\lambda} - 0.15) \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{0.2}}{E}} \quad (3)$$

式中: $f_{0.2}$ 为材料的名义屈服强度; E 为材料的弹性模量。

式(1)仅可用于初弯曲度小于 1/1 000 的情况,当初弯曲度较大时,式(1)将不再适用。为同时考虑初弯曲度和构件长细比的影响,对式(1)进行修正,如下所示:

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

式中: α 为考虑初弯曲度的影响系数,后文将根据数值计算结果对 α 进行拟合。同时,为提升计算式的精确度,将式(2)的等效偏心率改用下式计算:

$$\eta = \frac{A\Delta_0}{W} \quad (5)$$

式中: A 为截面面积; W 为绕弯曲轴的截面模量。 $L_0 =$

λi , 其中 i 为绕弯曲轴的回转半径,代入式(5)得到

$$\eta = \frac{A}{W} \gamma \lambda i \quad (6)$$

将式(3)代入式(6)得到等效偏心率

$$\eta = \gamma \bar{\lambda} \left(\frac{A i}{W} \pi \sqrt{\frac{E}{f_{0.2}}} \right) \quad (7)$$

根据数值计算结果, α 和初弯曲度以及相对长细比的关系如图 14 和图 15 所示。从图 14 可以看出,当初始缺陷不变时,影响系数随着长细比的增加而减小;从图 15 可以看出,当相对长细比不变时,影响系数随着初弯曲度的增加而增加。根据大量数值分析结果可拟合得到初弯曲度的影响系数,计算式如下所示:

$$\alpha = 1 + \gamma(2 - 1.3 \ln \bar{\lambda}) \quad (8)$$

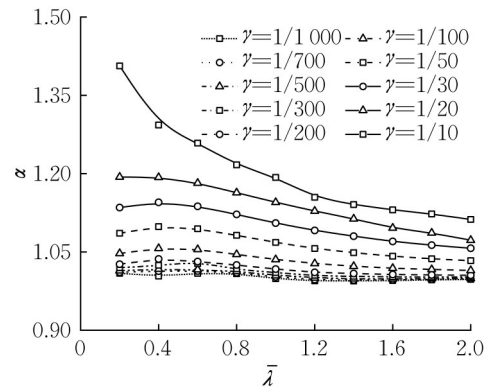


图14 影响系数和相对长细比关系

Fig.14 Relationship between influence coefficient and relative slenderness ratio

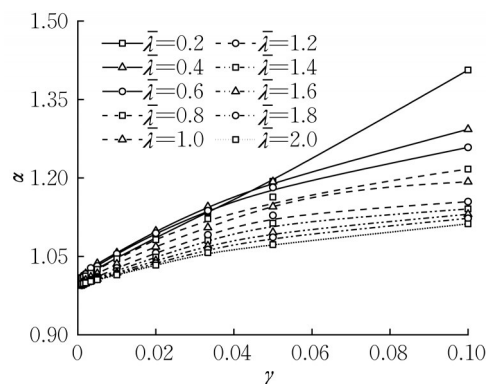


图15 影响系数和初弯曲度关系

Fig.15 Relationship between influence coefficient and initial curvature

为验证上述拟合式(4)的正确性,采用截面规格为 $\square 80 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、 $\square 120 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 、 $\square 150 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 、 $\square 200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 、 $\square 240 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 、 $\square 300 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 的铝合金方管进行轴压性能数

值分析。比较具有不同初弯曲度构件的拟合计算式结果和有限元分析结果,得到弯曲铝合金方管稳定系数结果,如图 16 所示。其中,构件的初弯曲度分

别为 1/1 000、1/700、1/500、1/300、1/200、1/100、1/50、1/30、1/20、1/10。截面规格为□150 mm×8 mm 的弯曲铝合金方管轴压稳定系数如表 4 所示。

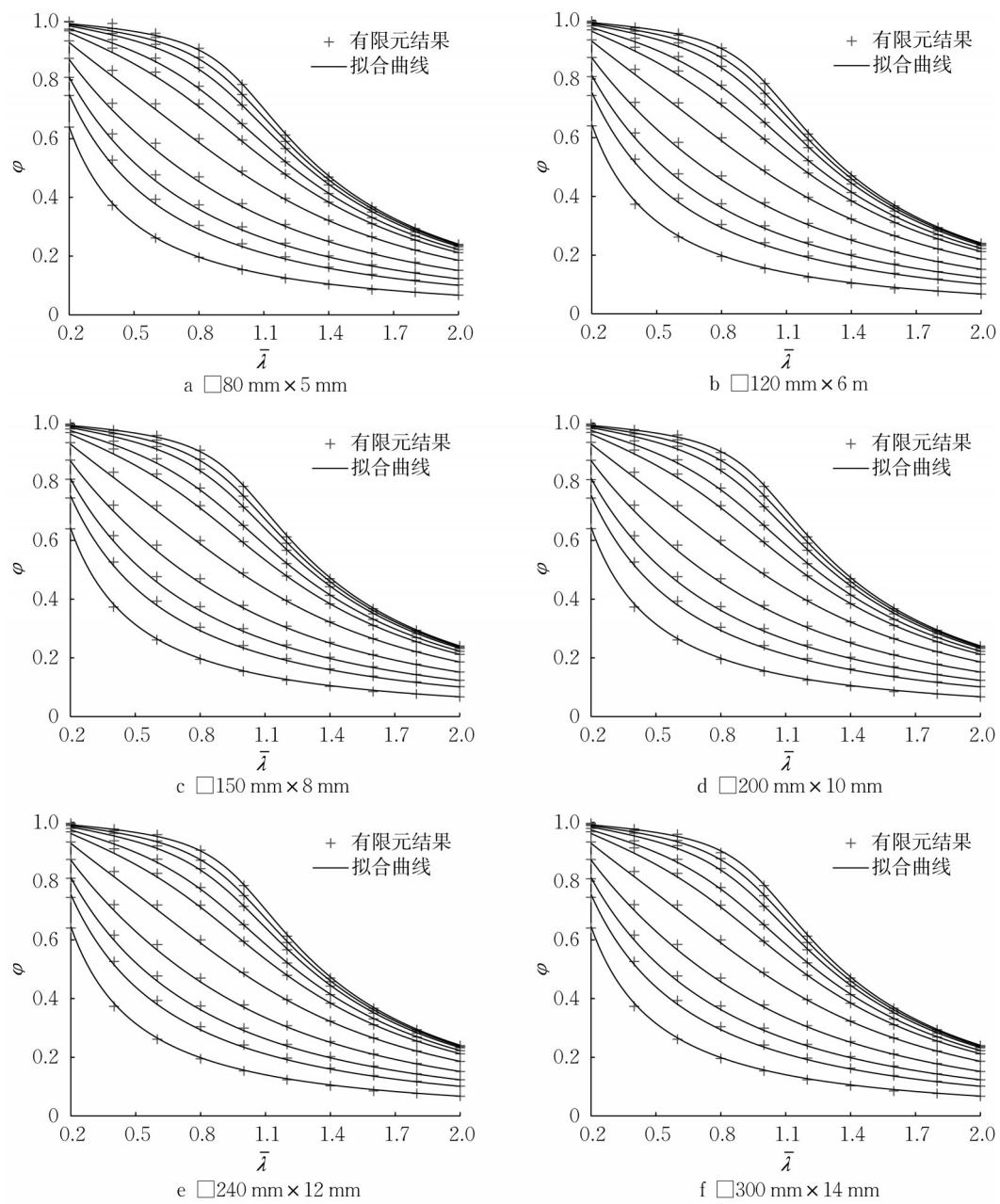


图 16 有限元及拟合结果对比

Fig.16 Comparison between finite element results and fitting results

表 4 □150 mm×8 mm 弯曲构件的稳定系数

Tab.4 Stability coefficient of □150 mm×8 mm bending members

相对长细比 $\bar{\lambda}$	初弯曲度 γ	有限元结果	式(4)	误差/%	相对长细比 $\bar{\lambda}$	初弯曲度 γ	有限元结果	式(4)	误差/%
0.2	1/1 000	0.997 0	0.992 0	−0.50	0.2	1/100	0.933 4	0.927 8	−0.60
0.4	1/1 000	0.976 6	0.976 0	−0.06	0.4	1/100	0.832 8	0.813 1	−2.36
0.6	1/1 000	0.957 7	0.951 7	−0.63	0.6	1/100	0.718 8	0.699 7	−2.67
0.8	1/1 000	0.907 6	0.902 2	−0.59	0.8	1/100	0.599 7	0.586 8	−2.15
1.0	1/1 000	0.784 3	0.786 7	0.32	1.0	1/100	0.489 6	0.482 3	−1.50

续表									
相对长细比 λ	初弯曲度 γ	有限元结果	式(4)	误差/%	相对长细比 λ	初弯曲度 γ	有限元结果	式(4)	误差/%
1.2	1/1 000	0.612 5	0.617 0	0.73	1.2	1/100	0.397 0	0.393 0	-1.00
1.4	1/1 000	0.469 9	0.473 3	0.73	1.4	1/100	0.323 3	0.321 1	-0.68
1.6	1/1 000	0.367 4	0.369 6	0.61	1.6	1/100	0.265 8	0.264 5	-0.49
1.8	1/1 000	0.293 9	0.295 3	0.49	1.8	1/100	0.221 3	0.220 4	-0.41
2.0	1/1 000	0.240 1	0.240 9	0.37	2.0	1/100	0.186 5	0.185 8	-0.36
0.2	1/700	0.993 9	0.988 6	-0.53	0.2	1/50	0.873 5	0.870 4	-0.36
0.4	1/700	0.974 5	0.966 2	-0.85	0.4	1/50	0.720 1	0.697 4	-3.15
0.6	1/700	0.942 1	0.933 1	-0.95	0.6	1/50	0.584 2	0.562 3	-3.76
0.8	1/700	0.877 3	0.871 4	-0.67	0.8	1/50	0.469 8	0.454 2	-3.33
1.0	1/700	0.750 9	0.751 3	0.06	1.0	1/50	0.378 7	0.368 6	-2.65
1.2	1/700	0.591 0	0.594 1	0.54	1.2	1/50	0.307 9	0.301 7	-2.01
1.4	1/700	0.457 5	0.460 3	0.61	1.4	1/50	0.253 8	0.249 6	-1.64
1.6	1/700	0.359 8	0.361 7	0.54	1.6	1/50	0.211 7	0.208 9	-1.35
1.8	1/700	0.288 9	0.290 1	0.44	1.8	1/50	0.178 8	0.176 8	-1.16
2.0	1/700	0.236 5	0.237 3	0.34	2.0	1/50	0.152 9	0.151 2	-1.09
0.2	1/500	0.989 8	0.984 1	-0.58	0.2	1/30	0.808 7	0.809 8	0.13
0.4	1/500	0.963 7	0.953 5	-1.05	0.4	1/30	0.616 3	0.595 6	-3.37
0.6	1/500	0.919 9	0.910 1	-1.07	0.6	1/30	0.477 0	0.456 6	-4.27
0.8	1/500	0.842 9	0.836 2	-0.79	0.8	1/30	0.374 8	0.359 5	-4.07
1.0	1/500	0.714 2	0.713 7	-0.06	1.0	1/30	0.299 7	0.289 2	-3.49
1.2	1/500	0.566 5	0.568 4	0.34	1.2	1/30	0.244 2	0.236 9	-2.97
1.4	1/500	0.442 7	0.444 7	0.46	1.4	1/30	0.202 4	0.197 2	-2.59
1.6	1/500	0.350 3	0.351 9	0.44	1.6	1/30	0.170 2	0.166 4	-2.22
1.8	1/500	0.282 5	0.283 6	0.37	1.8	1/30	0.145 1	0.142 1	-2.05
2.0	1/500	0.232 1	0.232 7	0.29	2.0	1/30	0.125 2	0.122 7	-1.93
0.2	1/300	0.979 9	0.973 9	-0.61	0.2	1/20	0.744 7	0.751 5	0.92
0.4	1/300	0.938 2	0.925 6	-1.34	0.4	1/20	0.526 6	0.511 9	-2.79
0.6	1/300	0.878 5	0.862 4	-1.83	0.6	1/20	0.393 5	0.377 3	-4.11
0.8	1/300	0.778 6	0.770 9	-0.99	0.8	1/20	0.304 3	0.291 5	-4.21
1.0	1/300	0.651 4	0.648 9	-0.38	1.0	1/20	0.242 2	0.232 7	-3.93
1.2	1/300	0.521 3	0.521 6	0.05	1.2	1/20	0.197 4	0.190 4	-3.56
1.4	1/300	0.413 4	0.414 2	0.19	1.4	1/20	0.164 1	0.158 9	-3.17
1.6	1/300	0.331 0	0.331 8	0.22	1.6	1/20	0.138 0	0.134 7	-2.42
1.8	1/300	0.269 2	0.269 8	0.21	1.8	1/20	0.118 4	0.115 7	-2.27
2.0	1/300	0.222 5	0.222 9	0.16	2.0	1/20	0.102 2	0.100 5	-1.63
0.2	1/200	0.967 4	0.961 7	-0.59	0.2	1/10	0.639 9	0.641 3	0.22
0.4	1/200	0.911 8	0.893 7	-1.99	0.4	1/10	0.373 2	0.380 7	2.02
0.6	1/200	0.826 7	0.812 1	-1.77	0.6	1/10	0.261 5	0.263 2	0.64
0.8	1/200	0.718 5	0.709 1	-1.31	0.8	1/10	0.195 0	0.197 0	1.01
1.0	1/200	0.595 3	0.591 1	-0.70	1.0	1/10	0.153 9	0.154 9	0.62
1.2	1/200	0.479 0	0.478 0	-0.20	1.2	1/10	0.123 6	0.125 9	1.88
1.4	1/200	0.384 3	0.384 0	-0.08	1.4	1/10	0.103 6	0.105 0	1.36
1.6	1/200	0.310 7	0.310 8	0.01	1.6	1/10	0.088 6	0.089 2	0.74
1.8	1/200	0.254 8	0.254 8	0.02	1.8	1/10	0.076 9	0.077 0	0.07
2.0	1/200	0.211 9	0.211 9	0.03	2.0	1/10	0.067 3	0.067 2	-0.21

对比截面形式为□150 mm×8 mm的弯曲铝合金方管轴压稳定系数的拟合结果和有限元结果,两者的误差在±5%以内,满足工程要求。因此,拟合得到的计算式具有一定的计算精度。

6 结论

(1)所有弯曲铝合金方管试件在轴向荷载作用下均发生了整体弯曲失稳破坏。在构件的跨中附近

出现局部屈曲现象,即构件的整体失稳先于局部失稳发生。采用Ansys有限元软件建立有限元模型,通过对比数值分析结果和试验结果验证了有限元模型的可靠性。

(2)参数化分析结果表明:随着构件长细比的增大,构件的整体稳定承载力逐渐降低;随着构件初弯曲度的增大,构件的整体稳定承载力逐渐降低。

(3)传统的Perry公式不适用于初弯曲度较大的构件,故引入了考虑弯曲缺陷因子和相对长细比的

承载力影响系数,拟合得到了适用于具有较大初弯曲度的轴压构件整体稳定系数计算式,通过与试验结果及数值分析结果的对比验证了计算式的适用性。

作者贡献声明:

郭小农:提出研究课题,提供经费支持,提出指导意见,修订论文,终审论文。

计丽艳:调研、整理文献,撰写论文,参与试件试验,整理数据。

李政宁:提供技术支持和指导意见。

欧阳辉:参与试件试验,整理数据。

参考文献:

- [1] 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(6): 110.
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(6): 110.
- [2] 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(6): 118.
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(6): 118.
- [3] 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(6): 129.
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, *et al.* Theoretical and experimental research on aluminum alloy beams [J]. Journal of Building Structures, 2007(6): 129.
- [4] 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(6): 136.
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(6): 136.
- [5] 马会环, 范峰, 柯嘉, 等. 网架网壳结构半刚性节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010(11): 65.
MA Huihuan, FAN Feng, KE Jia, *et al.* Experimental research on semi-rigid joints used in grid structures and reticulated domes [J]. Journal of Building Structures, 2010(11): 65.
- [6] 纪晗, 熊世树, 黄丽婷. 大型焊接空心球节点的多轴加载有限元分析与足尺试验[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 173.
JI Han, XIONG Shishu, HUANG Liting. Finite element analysis and full-scale experimental study on large spherical joint in multi-axial loading [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 173.
- [7] 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(1): 59.
LI Ming, CHEN Yangji, QIAN Ruojun, *et al.* Experimental study on stability factor of circular tube aluminum alloy axial compression rod [J]. Space Structure, 2000(1): 59.
- [8] 罗永峰, 季跃, 芮渊. 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.
LUO Yongfeng, JI Yue, RUI Yuan. Stability analysis of the aluminum alloy members under axial compressions [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(4): 401.
- [9] 铝合金结构设计规范: GB 50429—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Design standards for aluminum alloy structures: GB 50429—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [10] ZHU J, YOUNG B. Experimental investigation of aluminum alloy circular hollow section columns [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 207.
- [11] ZHU J, YOUNG B. Numerical investigation and design of aluminum alloy circular hollow section columns [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(12): 1437.
- [12] ZHU J, YOUNG B. Aluminum alloy tubular columns. Part I: finite element modeling and test verification [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(9): 961.
- [13] ZHU J, YOUNG B. Aluminum alloy tubular columns. Part II: parametric study and design using direct strength method [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(9): 969.
- [14] 翟希梅, 吴海, 王誉瑾, 等. 铝合金轴心受压构件的稳定性研究与数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(12): 1.
ZHAI Ximei, WU Hai, WANG Yujin, *et al.* Stability research and numerical simulation of high-strength aluminum alloy column in compression [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(12): 1.
- [15] 王元清, 王中兴, 胡晓光. 7A04 高强铝合金 L 形截面柱轴压整体稳定性试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016(6): 174.
WANG Yuanqing, WANG Zhongxing, HU Xiaoguang. Experimental study on overall stability of 7A04 high strength aluminium alloy L-shaped section columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2016(6): 174.
- [16] YANG Xu, XIANG Yang, LUO Yongfeng, *et al.* Axial compression capacity of steel circular tube with large initial curvature: column curve and application in structural assessment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177(2): 106481.
- [17] 周永丹, 王存海, 欧阳辉, 等. 某灯笼状铝合金空间结构设计简介[J]. 有色金属加工, 2021, 50(4): 55.
ZHOU Yongdan, WANG Cunhai, OUYANG Hui, *et al.* Introduction to the design of a lantern-shaped aluminum alloy space structure [J]. Nonferrous Metal Processing, 2021, 50(4): 55.
- [18] 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Tensile test of metallic materials Part 1 Test method at room temperature: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.