

文章编号:1673-2049(2018)04-0034-11

铝合金方形和矩形管截面开孔梁受弯性能试验

冯 然^{1,2}, 陆 洋¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要:对铝合金方形和矩形管截面开孔试件进行了受弯性能试验研究,试验共计 13 个试件,分别进行了三点弯曲试验和四点弯曲试验;试验材料分别为国产 6061-T6 和 6063-T5 铝合金挤压型材,主要对试件的破坏模式、抗弯承载力、弯矩-曲率曲线和应变分布曲线进行了研究,探讨了铝合金方形和矩形管截面梁在 2 种受弯状态下孔洞参数对受弯性能的影响。结果表明:试验中所有试件都发生了受压局部屈曲破坏;对于方形管截面梁,在 2 种受弯状态下,当孔洞的径高比为 0.3 时,孔洞对试件的抗弯承载力影响较小,当孔洞的径高比为 0.6 时,孔洞对试件的抗弯承载力有很大程度的影响;对于矩形管截面梁,在三点弯曲状态下,随着孔洞数目的增加,试件的抗弯承载力有很大程度的降低,在四点弯曲状态下,开孔数目对抗弯承载力影响较小;方形管截面梁在 2 种弯曲状态下的承载力相差较小,而矩形管截面梁在三点弯曲状态下的抗弯承载力比四点弯曲状态下的抗弯承载力有明显提高。

关键词:铝合金;方形管截面;矩形管截面;抗弯承载力;局部屈曲;径高比
中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Experiment on Flexural Behaviour of Aluminium Alloy Square and Rectangular Tube Section Perforated Beams

FENG Ran^{1,2}, LU Yang¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),
Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: The flexural behaviour of aluminum alloy square and rectangular tube section perforated specimens was studied by tests. A total of 13 specimens were tested subjected to three-point bending or four-point bending. The test materials were made of domestic 6061-T6 and 6063-T5 aluminum alloy extruded profiles respectively. The failure modes, flexural capacity, moment-curvature curves and strain distribution curves of the members were mainly studied. The influence of pore parameters on flexural behaviour of aluminum alloy square and rectangular tube section beams under two bending states was discussed. The results show that all specimens are subjected to local buckling failure under compression. For the square tube section beam, under the two bending states, when the diameter to height ratio of the hole is 0.3, the influence of the hole on the flexural capacity of specimen is less. When the diameter to height ratio of the hole is 0.6, the bearing capacity of the specimen is greatly reduced. For the rectangular tube section

收稿日期:2017-09-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51528803)

作者简介:冯 然(1978-),男,湖北武汉人,教授,工学博士,E-mail:r.feng@hfut.edu.cn。

beam, the flexural capacity of the specimen decreases greatly with the increase of the number of holes in the three point bending. The number of holes has little effect on flexural capacity under four point bending. The bearing capacity difference of the square tube section beam is small in the two bending states. The flexural capacity of the rectangular tube section beam under three point bending is obviously higher than that of four point bending.

Key words: aluminium alloy; square tube section; rectangular tube section; flexural capacity; local buckling; diameter to height ratio

0 引言

铝合金构件在建筑结构上得到了越来越多的应用。铝合金的密度约为钢材的 1/3, 而比强度(材料的抗拉强度与材料表观密度的比值)则可达到或超过结构钢。铝合金易于加工成各种外形, 从而能为建筑结构提供最经济的横截面类型^[1]。采用铝合金不仅可以有效地减轻建筑物的自重, 还可以减少构件运输、安装的工作量, 加快施工进度。同时, 铝合金还具有良好的耐腐蚀性、独特的金属质感光泽, 且易于回收和反复循环使用^[2]。到目前为止, 铝合金在一些大跨网架、网壳和桥梁等结构中得到了广泛的应用, 中国学者也针对铝合金构件的力学性能开展了相关研究工作, 取得了一系列研究成果^[3-7]。

Zhu 等^[8]对 10 个不同截面的铝合金方形管截面受弯构件进行了纯弯试验, 并在试验的基础上对铝合金受弯构件进行了有限元数值模拟, 对试验和数值模拟的抗弯承载力结果进行了对比分析, 推导出了用于计算铝合金方形管截面受弯构件抗弯承载力的直接强度法计算公式。Su 等^[9]对铝合金方形和矩形管截面梁进行了弯曲试验, 试验包括 14 个三点弯曲试验和 15 个四点弯曲试验, 试件宽厚比的范围为 2.8~20.5。通过试验和数值模拟得到的抗弯承载力对美国铝合金结构规范^[10]、澳大利亚/新西兰铝合金规范^[11]、欧洲规范^[12]和连续强度法(CSM)^[13-17]的计算结果进行了评估, 发现这 3 个设计规范的计算结果都偏于保守, 而 CSM 能提供更准确和更一致的抗弯承载力预测值。

在实际建筑工程应用中, 通常会在受弯构件的腹板上开设一定数量和形式的孔洞, 这样不仅为电线、管道和设备的安装提供了方便, 同时也降低了结构高度, 节省了材料, 减轻了构件的质量。孔洞的开设破坏了结构的几何连续性, 改变了构件的应力分布, 对构件的稳定性能产生了较大的影响。目前, 国内外对铝合金开孔受弯构件的研究几乎没有, 而开孔对受弯构件性能的影响是安全设计必须考虑的问题。

因此, 本文就开孔参数对铝合金受弯构件的承载力、应力分布和破坏模式的影响进行了试验研究, 为今后的理论研究和实际工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验分别对铝合金方形和矩形管截面开孔梁进行了三点和四点弯曲试验, 试验共计 13 个试件, 其中开孔试件 9 个, 未开孔试件 4 个, 用来对试验结果进行对比分析, 试验材料分别为国产 6061-T6 和 6063-T5 铝合金挤压型材。试件截面几何参数定义和孔洞位置见图 1, 其中 H 为截面长度, B 为截面宽度, t 为截面厚度, d 为孔洞直径, S 为孔洞间距, L 为试件长度。试验前分别在试件不同截面位置测量其截面宽度、高度和厚度以及试件长度, 并测量孔洞的直径和间距, 试件的实际测量几何尺寸列于表 1, 表 1 中每个试件的编号按照材料类型、截面尺寸、孔洞直径、孔洞个数和加载方式确定。例如编号 H150×150×3-d45-n4-B3-R 表示试件材料为高强 H 铝合金材料 6061-T6, 如果为 N, 则表示试件为普通强度铝合金材料 6063-T5, 名义横截面尺寸为 150 mm(宽度)×150 mm(高度)×3 mm(厚度), 孔洞直径 d 为 45 mm, 孔洞个数 n 为 4 个, B3 表示承受三点弯曲试验, B4 表示承受四点弯曲试验, R 表示重复试验, 用来验证试验的可靠性。

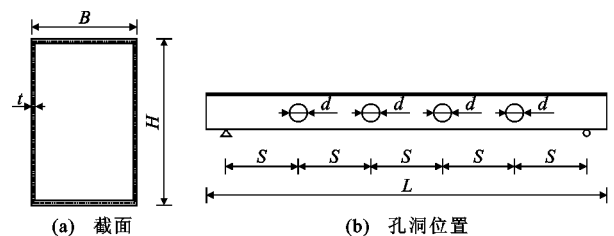


图 1 试件截面及孔洞位置

Fig. 1 Section and Hole Locations of Specimens

1.2 材料属性

铝合金属于典型的非线性金属材料, 材料的应力-应变曲线没有明显的屈服平台, 而是一条连续光

表 1 试件实测几何尺寸

Tab. 1 Measured Dimensions of Specimens

试件编号	B/mm	H/mm	t/mm	d/mm	S/mm	L/mm
H150×150×3-d0-B3	150.18	150.20	3.063			2 000.4
H150×150×3-d0-B4	149.97	150.09	3.036			2 000.3
H150×150×3-d45-n4-B3	150.37	149.98	3.049	45.34	360.1	1 999.4
H150×150×3-d45-n4-B3-R	150.25	150.12	3.010	45.41	359.8	1 999.8
H150×150×3-d45-n4-B4	150.04	150.15	3.033	45.61	360.2	2 000.3
H150×150×3-d90-n4-B3	150.35	150.30	3.052	90.66	360.0	1 999.4
H150×150×3-d90-n4-B4	149.96	150.00	3.071	90.41	359.7	1 999.8
N50×200×2.5-d0-B3	49.27	199.70	2.391			2 750.5
N50×200×2.5-d0-B4	49.38	199.80	2.416			2 749.7
N50×200×2.5-d90-n4-B3	49.08	199.50	2.376	89.54	490.3	2 750.2
N50×200×2.5-d90-n4-B4	49.60	199.80	2.373	89.77	490.5	2 750.8
N50×200×2.5-d90-n6-B3	49.34	199.80	2.399	89.92	350.8	2 750.8
N50×200×2.5-d90-n6-B4	49.22	200.10	2.402	89.87	350.5	2 751.5

滑的曲线^[18]。目前描述铝合金材料本构关系最经典的模型是 Ramberg-Osgood 方程^[19],其表达式为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{C}\right)^m \quad (1)$$

式中: ϵ 为应变; σ 为应力; E 为弹性模量; C, m 为根据试验确定的参数。

结合式(1)可得

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002\left(\frac{\sigma}{f_{0.2}}\right)^m \quad (2)$$

式中: $f_{0.2}$ 为残余应变为 0.2% 时对应的应力。

针对指数 m , Steinhardt^[20] 在 1971 年提出了一个近似计算公式,即

$$10m = f_{0.2} \quad (3)$$

本次试验的试件共有方形管截面 150 mm×150 mm×3 mm 和矩形管截面 50 mm×200 mm×2.5 mm 两种截面形式,材料属性通过标准试件拉伸试验获得。按照《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[21] 的有关规定,对标准试件的尺寸和材性试验的方法进行确定,标准试件分别在试件的相邻翼缘和腹板上截取,每种截面形式取 4 个试件,共计 8 个标准试件。试验在 SANS(CMT5105)电子万能试验机上进行,如图 2 所示,拉伸试验标准试件破坏后的照片见图 3,拉伸试验所得各标准试件的应力-应变曲线见图 4,5,所有标准试件的材性试验结果列于表 2。

1.3 加载装置和测点布置

本次试验在合肥工业大学结构实验室进行。试验采用液压千斤顶手动加载,通过千斤顶和反力架施加竖向荷载。试验中施加的荷载、应变片和位移计的读数通过数据采集仪实时采集。试件的两端分



图 2 材性试验装置

Fig. 2 Setup of Material Test

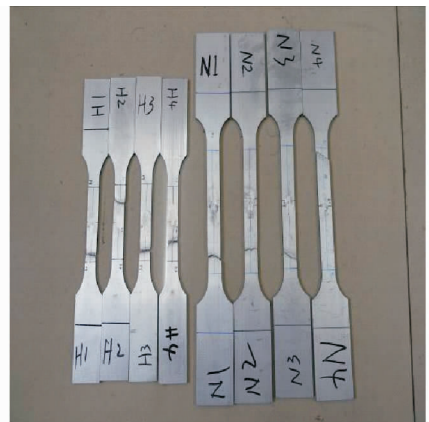


图 3 试件破坏后照片

Fig. 3 Photo of Failed Specimen

别采用固定铰支座和滑动铰支座来模拟简支边界条件。图 6,7 分别为四点弯曲试验和三点弯曲试验的试验装置。为了防止加载点和支座处承受集中荷载

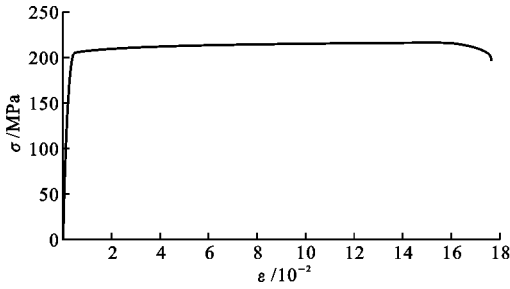


图 4 6061-T6 铝合金试件实测应力-应变关系曲线
Fig. 4 Measured Stress-strain Curve of 6061-T6 Aluminium Alloy Specimen

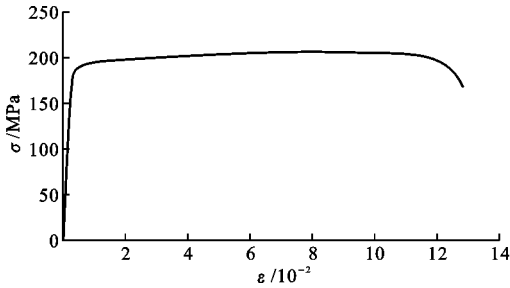


图 5 6063-T5 铝合金试件实测应力-应变关系曲线
Fig. 5 Measured Stress-strain Curve of 6063-T5 Aluminium Alloy Specimen

表 2 铝合金试件材料性能

Tab. 2 Material Properties of Aluminium Alloy Specimen

材料	E/MPa	$f_{0.2}/\text{MPa}$	σ_u/MPa	$\epsilon_f/\%$
6061-T6	69 047	206.53	215.82	17.40
6063-T5	67 402	192.34	207.47	12.60

注: σ_u 为极限应力; ϵ_f 为断后延伸率。

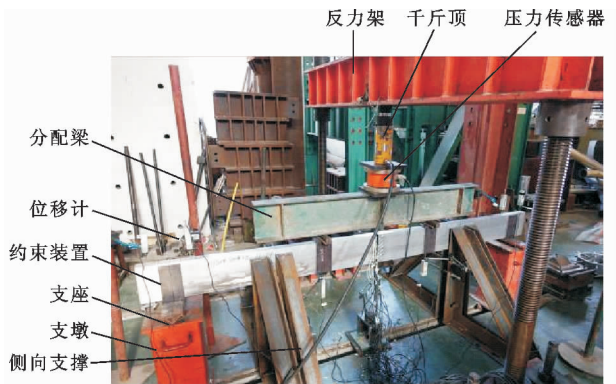


图 6 四点弯曲试验装置

Fig. 6 Setup of Four-point Bending Test

的部位过早发生受压局部屈曲破坏,特别设计制作了宽 100 mm、厚 10 mm 的约束装置(图 6)。在矩形管截面 50 mm×200 mm×2.5 mm 梁试验中,由于试件的高宽比较大,在试件两侧设置角钢三脚架作为侧向支撑,从而防止试件过早发生平面外失稳而破坏(图 6)。试验在正式加载之前先进行预加



图 7 三点弯曲试验装置

Fig. 7 Setup of Three-point Bending Test

载,在加载初期,采用力控制分级加载,每级加载为 2~3 kN,待加载至预估极限荷载的 80%左右时,适当减小每级的加载量,在达到试件的极限承载力后,荷载不再上升,此时采用位移控制分级加载,得到试验曲线的下降段。在试验过程中,待每级加载完毕,暂停 2 min,从而得到稳定的荷载值和相对应的应变和位移值。

在三点弯曲试验中,铝合金梁在跨中承受集中荷载作用。在每个试件的跨中布置 1 个位移计,用来测量跨中垂直挠度;在试件两端靠近支座的孔洞截面处分别布置 1 个位移计,用来测量试件在线性变化的梯度弯矩作用下弯曲的曲率;在试件的两端分别布置 2 个位移计,用来测量试件的端部转角;在试件孔洞周围布置应变片,用来监测孔洞周围截面在试验过程中的应变变化和可能发生的局部屈曲。在四点弯曲试验中,采用三分点加载,通过分配梁对试件两点对称加载。在每个试件的跨中布置 1 个位移计,用来测量跨中垂直挠度;在 2 个加载点处分别布置 1 个位移计,用来测量试件在纯弯段弯曲的曲率;在试件两端分别布置 2 个位移计,用来测量试件的端部转角;在试件的跨中和孔洞周围布置应变片,用来监测跨中和孔洞周围截面在试验过程中的应变变化和可能发生的局部屈曲。图 8 为试件 H150×150×3-d45-n4-B4 的位移计和应变片布置,其中 P 为荷载。

2 试验现象及结果分析

2.1 三点弯曲试验

2.1.1 破坏模式

在加载初期,所有试件均保持弹性。由于在加载点处设置了约束装置,增大了加载点处试件材料的刚度,荷载直接作用在约束装置上表面,避免了加载点处铝合金材料在集中荷载作用下过早发生屈曲

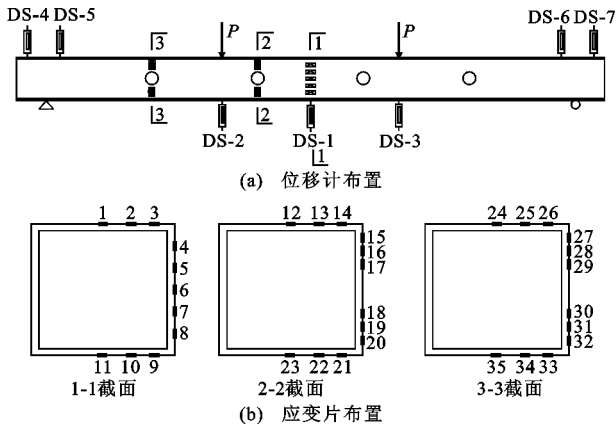


图8 试件 $H150 \times 150 \times 3-d45-n4-B4$ 测点布置
Fig. 8 Arrangement of Measuring Points for Specimen $H150 \times 150 \times 3-d45-n4-B4$

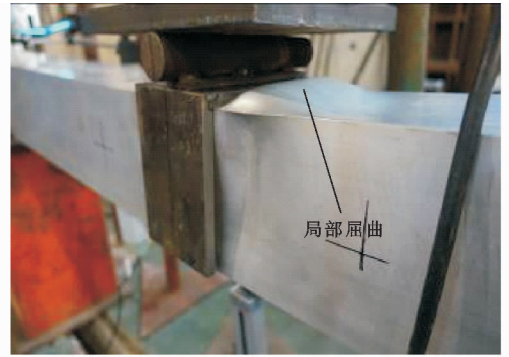
变形。随着荷载的不断增加,2种截面试件都在加载点附近或孔洞位置处发生了局部屈曲破坏。

对于方形管截面试件,未开孔试件 $H150 \times 150 \times 3-d0-B3$ 的局部屈曲出现在加载点附近的受压翼缘和腹板处,小开孔试件 $H150 \times 150 \times 3-d45-n4-B3$ 的局部屈曲同样出现在加载点附近的受压翼缘和腹板处,观察孔洞位置基本没有发生屈曲,说明当径高比(开孔直径与截面高度之比)为0.3时,开4个孔对试件的屈曲模式基本没有影响。然而大开孔试件 $H150 \times 150 \times 3-d90-n4-B3$ 的局部屈曲出现在靠近加载点附近的孔洞位置处,说明当径高比为0.6时,开4个孔对试件的屈曲模式有较大影响。试件破坏模式如图9所示。

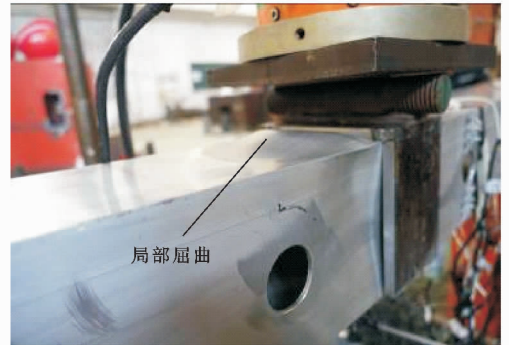
对于矩形管截面试件,未开孔试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d0-B3$ 的局部屈曲出现在加载点附近的受压翼缘和腹板处,开4个孔试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n4-B3$ 在加载点附近的受压翼缘、腹板和靠近加载点附近的孔洞位置处都出现了局部屈曲,说明当径高比为0.45时,开4个孔对试件的屈曲模式有一定的影响。开6个孔试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B3$ 的局部屈曲出现在靠近加载点附近的孔洞位置处,说明当径高比为0.45时,开6个孔对试件的屈曲模式有较大影响。本次试验设计的矩形管截面试件的高宽比为4:1,比值较大,故试件在集中荷载作用下,当接近极限荷载时,试件都发生了平面外失稳的现象。试件破坏模式如图10所示。

2.1.2 抗弯承载力

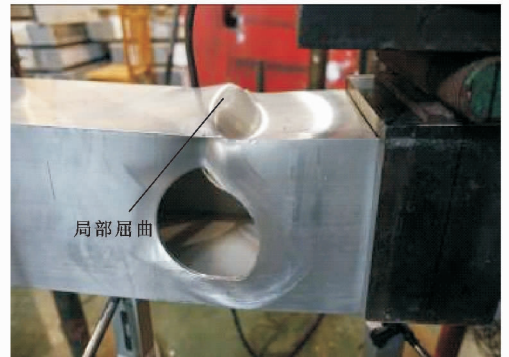
表3列出了所有三点弯曲试验试件的抗弯承载力 M_{Exp-3} 。通过对比开孔试件和未开孔试件的试验结果,研究铝合金方形和矩形管截面梁在线性变化



(a) 试件 $H150 \times 150 \times 3-d0-B3$



(b) 试件 $H150 \times 150 \times 3-d45-n4-B3$



(c) 试件 $H150 \times 150 \times 3-d90-n4-B3$

图9 方形管截面试件三点弯曲试验破坏模式
Fig. 9 Failure Modes of Square Tube Section Specimens of Three-point Bending Test

的梯度弯矩作用下开孔参数对其抗弯承载力的影响。从表3可以看出:

(1) 铝合金梁开孔后,在线性变化的梯度弯矩作用下,2种截面试件抗弯承载力都有所下降,随着孔洞大小和数目的增加,试件抗弯承载力下降幅度也增加。

(2) 对于方形管截面试件,在线性变化的梯度弯矩作用下,当开4个孔洞,且径高比为0.3时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降2.1%;当径高比为0.6时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降14.9%,可见当孔洞尺寸较小时,开孔对试件的抗弯承载力几乎没有影响;当孔洞尺寸较大时,开孔对试件的抗弯承载力有较大影响,并且随着孔径的

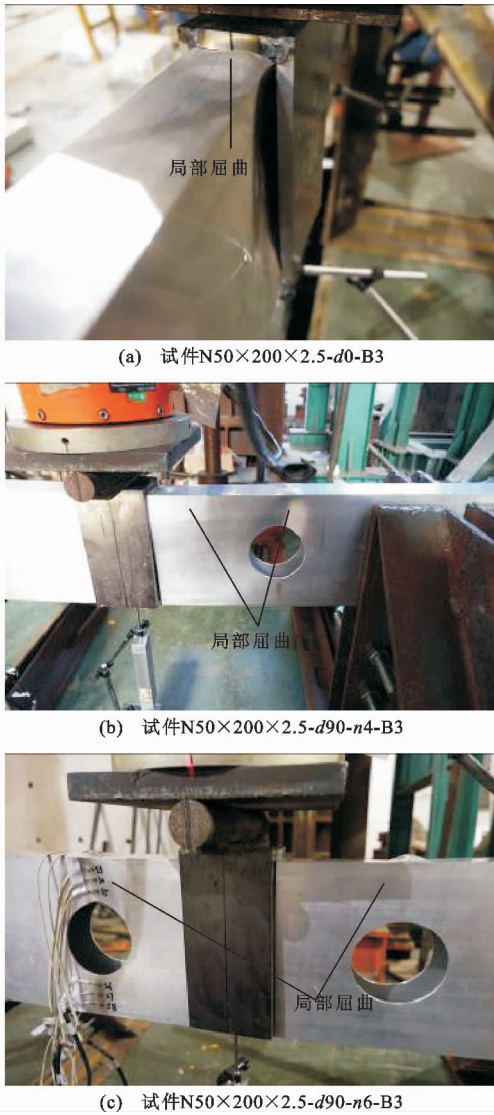


图 10 矩形管截面试件三点弯曲试验破坏模式
Fig. 10 Failure Modes of Rectangular Tube Section Specimens of Three-point Bending Test

表 3 三点弯曲试验试件抗弯承载力

Tab. 3 Flexural Capacities of Specimens of Three-point Bending Test

试件编号	$M_{Exp-3}/(kN \cdot m)$	破坏模式
H150×150×3-d0-B3	16.70	L
H150×150×3-d45-n4-B3	16.36	L
H150×150×3-d45-n4-B3-R	16.43	L
H150×150×3-d90-n4-B3	14.54	L
N50×200×2.5-d0-B3	12.34	L+O
N50×200×2.5-d90-n4-B3	11.47	L+O
N50×200×2.5-d90-n6-B3	10.89	L+O

注:L表示局部屈曲;O表示平面外失稳。

增加,铝合金梁的抗弯承载力下降幅度越来越大。

(3)对于矩形管截面试件,在线性变化的梯度弯矩作用下,当径高比为 0.45,且孔洞个数为 4 个时,

试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 7.6%;孔洞个数为 6 个时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 13.4%,可见随着开孔个数的增加,铝合金梁的抗弯承载力下降幅度越来越大,表明孔洞的数目对开孔试件的抗弯承载力有较大影响。

2.1.3 弯矩-曲率曲线

图 11 为三点弯曲试验未开孔试件与开孔试件的弯矩-曲率曲线。通过对比可知:在线性变化的梯度弯矩作用下,2 种截面试件开孔后的抗弯承载力都有一定程度的下降;方形管截面试件的抗弯刚度在开孔后有较为明显的下降,且随着孔洞大小或数目的增加,下降幅度逐渐变大;径高比为 0.6 的试件 H150×150×3-d90-n4-B3 在达到极限承载力后继续加载,曲线急剧下降,此时靠近加载点附近的孔洞处突然发生较大的屈曲变形破坏,而其他试件的曲线下降段都比较平缓,表明铝合金梁具有较好的延性。

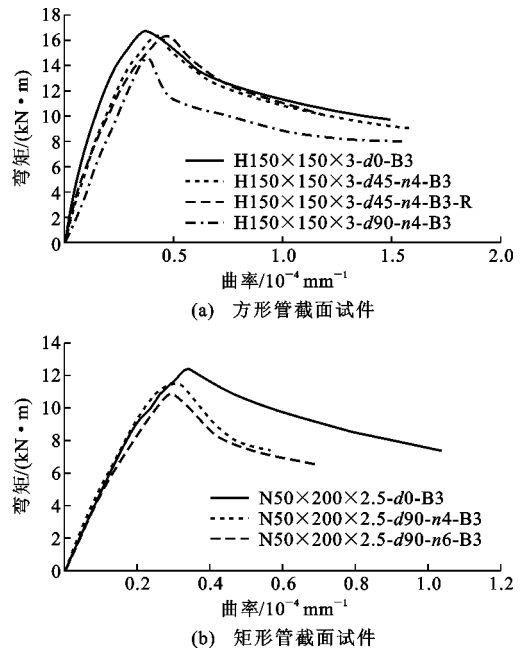


图 11 三点弯曲试验试件弯矩-曲率曲线

Fig. 11 Moment-curvature Curves of Specimens of Three-point Bending Test

2.1.4 应变分布曲线

图 12 为矩形管截面试件 N50×200×2.5-d90-n6-B3 在线性变化的梯度弯矩作用下,孔洞位置处沿腹板高度方向的应变片布置,位于梁中性轴以上的应变片测点处于受压状态,位于梁中性轴以下的应变片测点处于受拉状态。图 13 为试件在不同等级荷载(从屈服弯矩到极限弯矩)作用下,孔洞位置处的应变分布曲线,由图 13 可知:3,4,5 号测点在

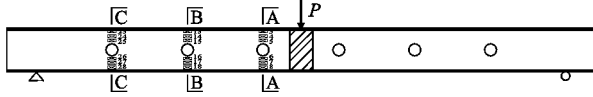


图 12 试件 N50×200×2.5-d90-n6-B3 孔洞位置
应变片布置

Fig. 12 Arrangement of Strain Gauges at Hole Position for
Specimen N50×200×2.5-d90-n6-B3

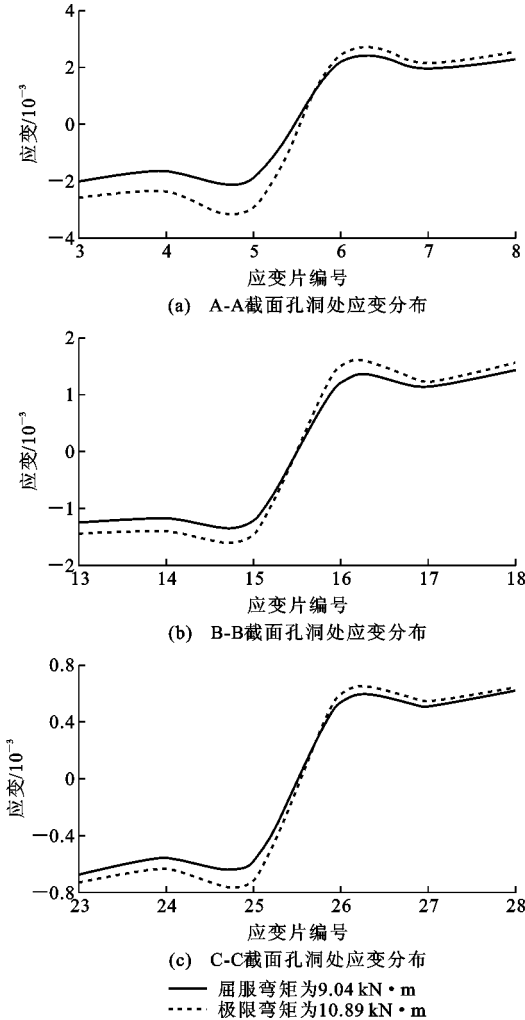


图 13 试件 N50×200×2.5-d90-n6-B3 孔洞位置应变
分布曲线

Fig. 13 Strain Distribution Curves at Hole Position for
Specimen N50×200×2.5-d90-n6-B3

荷载从屈服弯矩增大到极限弯矩过程中,应变有较明显的增大,说明该位置处发生了局部屈曲,而其他测点的应变变化较小,并没有发生局部屈曲现象,与图 10(c)的试件破坏相吻合;由材料属性可知,当荷载达到屈服弯矩时,A-A 截面处材料提前达到屈服强度,而 B-B,C-C 截面处材料并没有达到屈服强度;梁在弯矩作用下,截面的应变与截面到中性轴的距离成正比,离中性轴越近,应变值越小,但试件

N50×200×2.5-d90-n6-B3 在腹板上由于孔洞的存在,导致应力重分布,使得靠近孔洞位置的应变反而较大。

2.2 四点弯曲试验

2.2.1 破坏模式

在四点弯曲试验中,2 种截面试件在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,都发生了局部屈曲破坏,反观试件的弯剪段,基本没有发生变形,局部屈曲的位置基本都出现在跨中附近或纯弯段孔洞位置处。

对于方管截面试件,未开孔试件 H150×150×3-d0-B4 的局部屈曲出现在跨中附近的受压翼缘和腹板处,而小开孔试件 H150×150×3-d45-n4-B4 和大开孔试件 H150×150×3-d90-n4-B4 的局部屈曲都出现在纯弯段孔洞位置处,可知在四点弯曲试验中,方管截面试件孔洞的存在及大小对试件的抗弯承载力和屈曲模式都有较大的影响。试件破坏模式如图 14 所示。

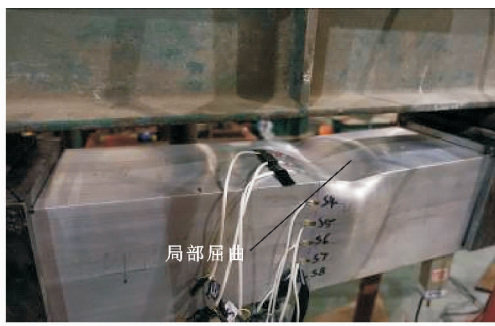
对于矩形管截面试件,未开孔试件 N50×200×2.5-d0-B4 的局部屈曲出现在试件跨中和加载点的中间位置受压翼缘和腹板处,开 4 个孔试件 N50×200×2.5-d90-n4-B4 和开 6 个孔试件 N50×200×2.5-d90-n6-B4 的局部屈曲都出现在纯弯段孔洞位置处,表明在四点弯曲试验中,矩形管截面试件孔洞的存在及数目对试件的抗弯承载力和屈曲模式都有较大的影响。所有试件在局部屈曲发生之前并没有发生平面外失稳现象。试件破坏模式如图 15 所示。

2.2.2 抗弯承载力

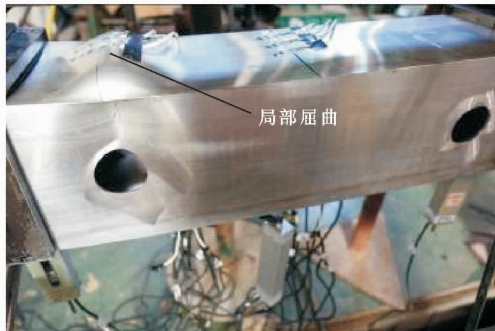
表 4 列出了所有四点弯曲试验试件的抗弯承载力 M_{Exp-4} 。通过对比开孔试件和未开孔试件的试验结果,研究铝合金方形和矩形管截面梁在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下开孔参数对其抗弯承载力的影响。从表 4 可以看出:

(1) 铝合金梁开孔后,在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,2 种截面试件抗弯承载力都有所下降,随着孔洞大小和数目的增加,试件抗弯承载力下降幅度也增加。

(2) 对于方管截面试件,在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,当开 4 个孔洞,且径高比为 0.3 时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 1.8%,当径高比为 0.6 时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 23.6%,可见当孔洞尺寸较小时,开孔对试件的屈曲模式有一定影响,但对试件的抗弯承载力几乎没有影响;当孔洞尺寸较大时,开孔对试件的屈曲模式和抗弯承载力都有较大影响,且随着孔径



(a) 试件H150×150×3-d0-B4



(b) 试件H150×150×3-d45-n4-B4



(c) 试件H150×150×3-d90-n4-B4

图 14 方形管截面试件四点弯曲试验破坏模式

Fig. 14 Failure Modes of Square Tube Section

Specimens of Four-point Bending Test

的增加,铝合金梁的抗弯承载力下降幅度越来越大。

(3)对于矩形管截面试件,在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,当径高比为 0.45,且孔洞个数为 4 个时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 2.0%;孔洞个数为 6 个时,试件抗弯承载力与未开孔试件相比下降 5.8%,表明在一定范围内,铝合金梁在两点对称荷载作用下,开孔数目对抗弯承载力的影响较小,且随着孔洞数目的增加,铝合金梁的抗弯承载力下降幅度越来越大。

2.2.3 弯矩-曲率曲线

图 16 为四点弯曲试验未开孔试件与开孔试件的弯矩-曲率曲线。通过对比可以看出:①在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,2 种截面试件开孔后的抗弯承载力除了试件H150×150×3-d90-n4-



(a) 试件N50×200×2.5-d0-B4



(b) 试件N50×200×2.5-d90-n4-B4



(c) 试件N50×200×2.5-d90-n6-B4

图 15 矩形管截面试件四点弯曲试验破坏模式

Fig. 15 Failure Modes of Rectangular Tube Section

Specimens of Four-point Bending Test

表 4 四点弯曲试验试件抗弯承载力

Tab. 4 Flexural Capacities of Specimens of

Four-point Bending Test

试件编号	$M_{Exp-4} / (kN \cdot m)$	破坏模式
H150×150×3-d0-B4	16.52	L
H150×150×3-d45-n4-B4	16.23	L
H150×150×3-d90-n4-B4	13.37	L
N50×200×2.5-d0-B4	9.47	L
N50×200×2.5-d90-n4-B4	9.28	L
N50×200×2.5-d90-n6-B4	8.95	L

B4 的下降幅度较大外,其他试件的下降幅度都很小;②2 种截面试件的抗弯刚度在开孔后都没有明显的变化;③开孔试件 H150×150×3-d45-n4-B4 和N50×200×2.5-d90-n4-B4 的曲线比未开孔试件

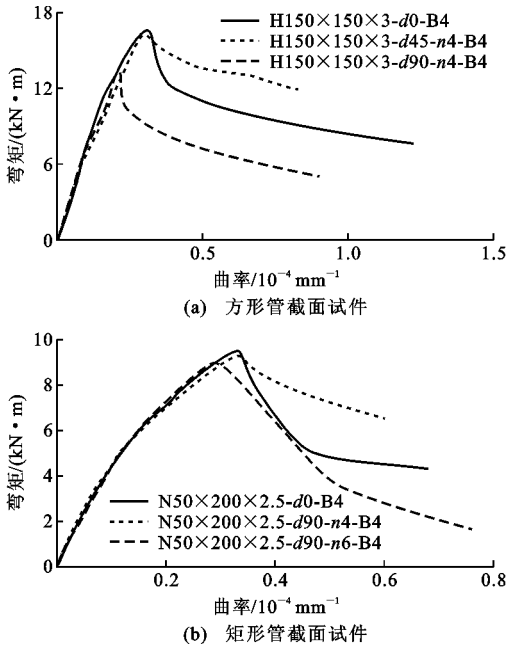


图 16 四点弯曲试验试件弯矩-曲率曲线

Fig. 16 Moment-curvature Curves of Specimens of Four-point Bending Test

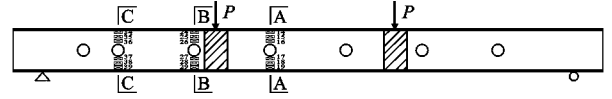
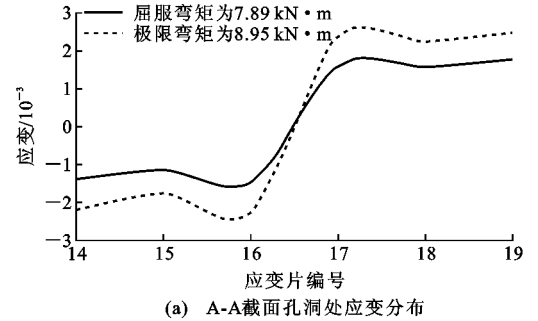
的曲线下降更为平缓,表明在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,铝合金梁开设较小孔径或较少数目的孔洞对其塑形变形能力都有一定程度的提高。

2.2.4 应变分布曲线

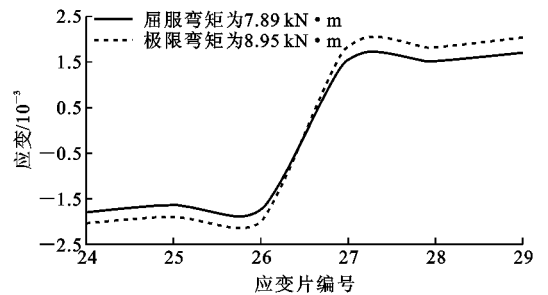
图 17 为矩形管截面试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B4$ 在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用下,孔洞位置处沿腹板高度方向的应变片布置,A-A 截面位于纯弯段,B-B,C-C 截面位于弯剪段。图 18 为试件在不同等级荷载(从屈服弯矩到极限弯矩)作用下孔洞位置处的应变分布曲线。由图 18 可知:14,15,16 号测点在荷载从屈服弯矩增大到极限弯矩过程中,应变有较明显的增大,说明该位置处发生了局部屈曲,而其他测点的应变变化较小,并没有发生局部屈曲现象,与图 15(c)显示的试件破坏相吻合;由材料属性可知,当荷载达到屈服弯矩时,A-A,B-B 截面处材料提前达到屈服强度,而 C-C 截面处材料并没有达到屈服强度;试件的 A-A 截面位于纯弯段,满足平截面假定,截面的应变与截面到中性轴的距离成正比,但孔洞的存在导致应力重分布,使得应变不再满足线性分布,靠近孔洞位置的应变值增大。

2.3 三点和四点弯曲试验对比

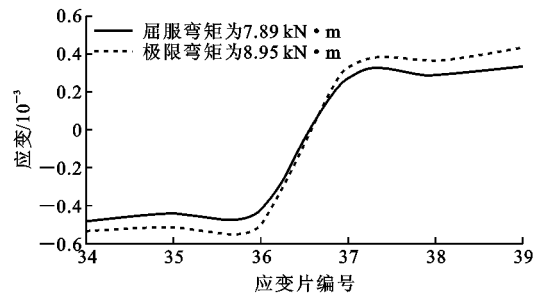
在三点弯曲试验中,铝合金梁在两端与跨中之间承受线性变化的梯度弯矩作用,在四点弯曲试验中,铝合金梁在纯弯段承受恒定不变的弯矩作用。为了分析同一截面试件在不同弯矩形式作用下对其

图 17 试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B4$ 孔洞位置应变片布置Fig. 17 Arrangement of Strain Gauges at Hole Position for Specimen $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B4$ 

(a) A-A截面孔洞处应变分布



(b) B-B截面孔洞处应变分布



(c) C-C截面孔洞处应变分布

图 18 试件 $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B4$ 孔洞位置应变分布曲线Fig. 18 Strain Distribution Curves at Hole Position of Specimen $N50 \times 200 \times 2.5-d90-n6-B4$

抗弯性能产生的影响,表 5 列出了所有试件在三点和四点弯曲试验中的破坏模式和抗弯承载力。从表 5 可以看出:所有三点弯曲试验试件的抗弯承载力都高于四点弯曲试验试件的抗弯承载力,且破坏模式都为局部屈曲破坏。对于方管截面梁,三点弯曲试验试件的承载力比四点弯曲试验试件的承载力提高幅度小,都在 10% 以内,且当试件未开孔或开孔较小时,两者的承载力相差很小;对于矩形管截面梁,三点弯曲试验试件的承载力比四点弯曲试验试件的承载力提高幅度较大,都在 20% 以上,且随

表5 三点和四点弯曲试验结果对比

Tab.5 Results Comparison Between Three-point and Four-point Bending Tests

试件编号	三点弯曲试验		四点弯曲试验		$\frac{M_{Exp-3} - M_{Exp-4}}{M_{Exp-4}} / \%$
	$M_{Exp-3} / (kN \cdot m)$	破坏模式	$M_{Exp-4} / (kN \cdot m)$	破坏模式	
H150×150×3-d0	16.70	L	16.52	L	1.09
H150×150×3-d45-n4	16.36	L	16.23	L	0.80
H150×150×3-d90-n4	14.54	L	13.37	L	8.75
N50×200×2.5-d0	12.34	L+O	9.47	L	30.31
N50×200×2.5-d90-n4	11.47	L+O	9.28	L	23.60
N50×200×2.5-d90-n6	10.89	L+O	8.95	L	21.68

着开孔数目的增加,提高幅度反而降低。综上可以得出:试件的截面形式是影响三点弯曲试验和四点弯曲试验结果的因素之一,铝合金方形管截面梁在线性梯度弯矩和纯弯段恒定弯矩作用下,承载力相差较小;铝合金矩形管截面梁在线性梯度弯矩和纯弯段恒定弯矩作用下,承载力相差较大。此外,试件孔洞的存在、大小和数目对其承载力也有一定程度的影响。

3 结 语

(1)通过对比开孔试件与未开孔试件的试验结果,发现孔洞的存在降低了受弯试件的抗弯承载力,靠近加载点附近的孔洞更容易发生屈曲破坏。

(2)对于方形管截面梁,在三点弯曲状态或四点弯曲状态下,当孔洞的径高比为0.3时,孔洞的存在对试件的抗弯承载力影响较小,下降幅度仅在2%左右;当孔洞的径高比为0.6时,孔洞的存在对试件抗弯承载力有较大影响,特别是在四点弯曲状态下,下降幅度达到23.6%。

(3)对于矩形管截面梁,在三点弯曲状态下,开4个孔试件与未开孔试件的抗弯承载力相比下降7.6%;开6个孔时,抗弯承载力下降13.4%,随着开孔个数的增加,铝合金梁的抗弯承载力下降幅度越来越大,表明孔洞的数目对开孔试件的抗弯承载力有较大影响。在四点弯曲状态下,开孔数目对抗弯承载力影响较小,开6个孔时,下降幅度仅为5.8%。

(4)铝合金梁的截面形式是影响三点弯曲试验和四点弯曲试验结果的因素之一,方形管截面梁在2种弯曲状态下的抗弯承载力相差不多,矩形管截面梁在三点弯曲状态下的抗弯承载力比四点弯曲状态下的抗弯承载力有明显上升。此外,试件孔洞的存在、大小和数目对三点弯曲试验和四点弯曲试验的结果也有一定程度的影响。

参考文献:

References:

- [1] MAZZOLANI F M. Aluminum Alloy Structures[M]. 2nd ed. London: E & FN Spon, 1995.
- [2] 王元清,常 婷,石永久,等. 铝合金工形截面短柱轴压局部稳定试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5):46-53.
WANG Yuan-qing, CHANG Ting, SHI Yong-jiu, et al. Experimental Study on Local Buckling Behavior of Aluminum Alloy Columns Under Uniform Compression[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5):46-53.
- [3] 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.
LI Ming, CHEN Yang-ji, QIAN Ruo-jun, et al. Experimental Research on the Stability Parameters of Aluminium Pipes Under Axially Compressed Load[J]. Spatial Structures, 2000, 6(1):59-64,53.
- [4] 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.
GUO Xiao-nong, SHEN Zu-yan, LI Yuan-qi, et al. Theoretical and Experimental Research on Aluminum Alloy Members Under Axial Compression[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):118-128.
- [5] 董 震,张其林. 铝合金轴压构件屈曲荷载计算方法[J]. 结构工程师, 2008, 24(2):28-34,47.
DONG Zhen, ZHANG Qi-lin. Calculation Method of Buckling Load of Aluminium Alloy Members Under Axial Force[J]. Structural Engineers, 2008, 24(2):28-34,47.
- [6] 董 震,张其林. 薄壁铝合金轴压构件承载力计算的直接强度法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(6):28-34.
DONG Zhen, ZHANG Qi-lin. Direct Strength Method for Calculation of the Bearing Capacity of Thin-wall Aluminum Alloy Members Under Axial Load[J].

- China Civil Engineering Journal, 2009, 42(6): 28-34.
- [7] 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): 1-6.
- ZHAI Xi-mei, WU Hai, WANG Yu-jin, 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): 1-6.
- [8] ZHU J H, YOUNG B. Design of Aluminum Alloy Flexural Members Using Direct Strength Method[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(5): 558-566.
- [9] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Deformation-based Design of Aluminium Alloy Beams[J]. Engineering Structures, 2014, 80: 339-349.
- [10] Aluminum Association. Aluminum Design Manual 2010 [M]. Washington DC: Aluminum Association, 2010.
- [11] AS/NZS1664. 1:1997, Aluminium Structures — Part 1: Limit State Design[S].
- [12] BS EN 1999-1-1:2007, Eurocode 9: Design of Aluminium Structures — Part 1-1: General Structural Rules [S].
- [13] GARDNER L. The Continuous Strength Method[J]. Structures and Buildings, 2008, 161(3): 127-133.
- [14] GARDNER L, WANG F, LIEW A. Influence of Strain Hardening on the Behaviour and Design of Steel Structures[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2011, 11(5): 855-875.
- [15] ASHRAF M, YOUNG B. Design Formulations for Non-welded and Welded Aluminium Columns Using Continuous Strength Method[J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3197-3207.
- [16] AFSHAN S, GARDNER L. The Continuous Strength Method for Structural Stainless Steel Design [J]. Thin-walled Structures, 2013, 68: 42-49.
- [17] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Testing and Design of Aluminium Alloy Cross-sections in Compression[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(9): 04014047.
- [18] 张其林, 季俊, 杨联萍, 等. 《铝合金结构设计规范》的若干重要概念和研究依据[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 1-12.
- ZHANG Qi-lin, JI Jun, YANG Lian-ping, et al. Some Important Concepts and Research Bases of *Code for Design of Aluminum Structures* [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 1-12.
- [19] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of Stress Strain Curves by Three Parameters[R]. Washington DC: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [20] STEINHARDT O. Aluminum Constructions in Civil Engineering[J]. Aluminum, 1971, 47: 131-139.
- [21] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验: 第1部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].