

DOI:10.11784/tdxbz202311016

7075-T6 高强铝合金受弯构件局部稳定试验研究

陆欢¹, 王元清¹, 支新航¹, 范圣刚², 陈博珊¹, 欧阳元文^{3,4}

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 东南大学混凝土及预应力混凝土教育部重点实验室, 南京 210096;

3. 上海通正铝结构建设科技有限公司, 上海 200012; 4. 上海建科铝合金结构建筑研究院, 上海 201612)

摘要: 为研究结构工程中高强铝合金受弯构件的局部稳定性能, 促进高强铝合金的实际应用, 本文针对 7 个 7075-T6 铝合金工字形截面梁开展了局部稳定试验研究, 包括 4 个弯剪加载试件和 3 个局部承压试件, 并测量了 7075-T6 铝合金的材料力学性能和试件的初始局部几何缺陷, 重点分析了试件的破坏形态、极限承载力、局部屈曲承载力和荷载-跨中竖向位移曲线。试验结果表明: 7075-T6 铝合金材料平均名义屈服强度可达约 497 MPa, 试件翼缘与腹板的平均初始局部几何缺陷幅值百分比分别为 0.40%和 0.10%。试验中 4 个弯剪加载试件发生弯剪屈曲破坏, 形成拉力带; 3 个局部承压试件发生腹板局部屈曲破坏, 腹板出现明显凸起。采用应变反转法确定了构件的局部屈曲荷载, 发现构件的截面利用率和屈曲时应力水平平均随着腹板高厚比的增大而降低。跨中加劲肋的布置能大幅度提高构件的承载力和延性。同时, 根据试验得到的极限承载力结果, 对比了现行欧洲规范(EN 1999-1-1:2007 Eurocode 9)、美国规范(Aluminum Design Manual 2020)和中国规范(GB 50429—2007)中设计方法的计算值, 3 个规范计算值与试验结果的平均比值分别为 0.717、0.682 和 0.498, 表明上述规范预测 7075-T6 高强铝合金工字形截面受弯构件在腹板屈曲情况下试件的极限承载力偏于保守, 其中欧洲规范的预测结果更为准确。

关键词: 高强铝合金; 受弯构件; 局部稳定性能; 试验研究

中图分类号: TU395

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)12-1245-10

Experimental Study on Local Buckling Behavior of 7075-T6 High-Strength Aluminum Alloy Beams

Lu Huan¹, Wang Yuanqing¹, Zhi Xinhang¹, Fan Shenggang², Chen Boshan¹, Ouyang Yuanwen^{3,4}

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete of Ministry of Education,

Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Shanghai Tongzheng Aluminum Structure Construction & Technology Co., Ltd., Shanghai 200012, China;

4. Shanghai Jianke Aluminum Structure & Architecture Research Institute, Shanghai 201612, China)

Abstract: To study the local buckling behavior of high-strength aluminum alloy beams in structural engineering and promote the actual applications of high-strength aluminum alloy, local buckling tests were carried out on seven 7075-T6 aluminum alloy H-section beams, including four specimens with mid-span stiffeners and three specimens without mid-span stiffeners. The material and mechanical properties of 7075-T6 aluminum alloy and the initial local geometric imperfections of specimens were measured, and the failure modes, ultimate loads, critical local buckling loads and load-vertical displacement curves for specimens at mid-span were analyzed in detail. Test results indicated that the average nominal yield strength of 7075-T6 aluminum alloy reached approximately 497 MPa, and the mean values of

收稿日期: 2023-11-15; 修回日期: 2024-04-01.

作者简介: 陆欢(2000—), 女, 博士研究生, lu-h23@mails.tsinghua.edu.cn.

通信作者: 支新航, zhi_xh@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178146); 中国博士后科学基金资助项目(2022M711860); 中国博士后国际交流计划引进项目(YJ20220131).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52178146), the China Postdoctoral Science Foundation(No. 2022M711860), the China Postdoctoral International Exchange Program(No. YJ20220131).

initial local geometric imperfection amplitude ratios of flanges and webs were 0.40% and 0.10%, respectively. The four specimens with mid-span stiffeners failed by shear buckling, and a tension field was formed. In comparison, the three specimens without mid-span stiffeners failed by web crippling, and the web of them bulged. The critical local buckling loads were determined using a strain reversal method, and it was found that both the ratio of section utilization and the stress level during buckling decreased with an increase in the ratio of width-to-thickness of the web. The layout of mid-span stiffeners can greatly improve the ultimate loads and ductility of members. In addition, test results were utilized to compare the ultimate loads of bending members calculated by design methods proposed in the existing European standard (EN 1999-1-1: 2007 Eurocode 9), American standard (Aluminum Design Manual 2020) and Chinese standard (GB 50429—2007). The mean values of ratios of results calculated using the three standards to test results were 0.717, 0.682 and 0.498, respectively, indicating that the three standards offer conservative predictions while the European standard provides the most accurate prediction.

Keywords: high-strength aluminum alloy; beam; local buckling behavior; experimental study

铝合金材料具有轻质高强、耐腐蚀、低温韧性好、易于挤压成型等优点,其强度可以涵盖常用的低碳钢的强度范围,因此其可以从材料层面解决钢材易腐蚀的问题.近年来,随着网壳结构、平板网架结构等大跨空间结构的进一步应用与发展,铝合金材料在结构工程领域的应用范围不断扩大,传统的 5 系和 6 系铝合金无法满足现有工程领域对材料性能的要求. 7 系高强铝合金强度更高,能进一步减小截面面积、降低结构重量,在大跨空间结构、桥梁结构、海洋风力发电平台等场景下更具优势.

常用的铝合金弹性模量范围为 68 ~ 79 GPa, 伸长率范围为 11% ~ 14%^[1],明显低于普通碳素钢;同时,铝合金焊接热影响区的范围更大,强度下降可达 70%^[2].因此,需充分开展铝合金材料及结构的相关研究,使铝合金结构在设计阶段与普通钢结构有所区别,以进一步保证实际工程应用的安全性、有效性.

目前,7 系高强铝合金的研究多聚焦于其材料的基本力学性能:Zhang 等^[3]通过测量 7075-T6 铝合金在不同应变率下的动态力学行为,基于 Johnson-Cook (JC) 本构模型修正了应变率硬化效应计算式;王元清等^[4]通过循环加载试验研究了 7A04 高强铝合金在循环荷载作用下的性能;Branco 等^[5]对在不同应变比下的 7050-T6 铝合金开展了疲劳力学性能试验,并提出了 1 种 2 阶对数模型以解释平均应力松弛率;Chaves 等^[6]开展了 7075-T6 铝合金的疲劳性能试验,并研究了其疲劳力学行为和裂纹扩展行为;Karolczuk 等^[7]通过引入疲劳寿命分散评估方法,对 7075-T651 铝合金的疲劳失效概率展开了理论研究和试验研究;Sajadifar 等^[8]基于热加工的 6082 和 7075 板材的低周疲劳试验评价了在不同温度条件下两种板材在循环荷载下的力学性能,进一步构建了加工、材料性能与损伤之间的关系.

对于铝合金构件的稳定性能,学者们多针对轴压或偏压构件展开研究,包括 6 系普通强度铝合金^[9-10]和 7 系高强铝合金^[11-12].对于铝合金受弯构件的稳定性能,现有研究多集中于 6063-T5、6061-T6 及 6082-T6 等普通强度铝合金:Su 等^[13-14]对 6061-T6 及 6063-T5 铝合金受弯构件展开了 5 点弯曲试验和数值模拟,并评估了截面长细比、跨高比和力矩梯度对连续梁的强度、应变硬化和力矩再分配行为的影响;王元清等^[15-16]基于试验和数值模拟方法,探究了 6061-T6 及 6063-T5 大截面铝合金工字形受弯构件的局部稳定性能;Feng 等^[17]对带圆形穿孔的铝合金方矩形和方构件展开了 3 点弯和 4 点弯试验;Su 等^[18]重新评估了某铝合金结构设计标准中的宽厚比限值,根据连续强度法和直接强度法提出了基于全截面宽厚比的截面分类方法及相应的宽厚比限值;Zhu 等^[19]基于 6061-T6 和 6063-T5 槽形截面铝合金构件的 4 点弯试验,对比分析了现行规范及设计方法的准确性,结果表明连续强度法能提供更准确的承载力预测;Yuan 等^[20]对 6061-T6 铝合金挤压 H 型截面梁的局部稳定承载力开展了试验研究和参数化分析,并依据定义的 3 种失效模式对比了试验及数值结果.

对于 7 系高强铝合金受弯构件的稳定性能,现有研究还很少,有待深入开展.刘佳钰等^[21]通过数值模拟方法对 7A04 高强铝合金矩形管的纯弯性能展开研究,提出了 7A04 铝合金矩形管受弯承载力稳定系数的建议公式.Li 等^[22-23]基于 7A04-T6 高强铝合金矩形和方构件的 4 点弯曲试验和数值模拟,评估对比了不同国家和地区现行的铝合金结构设计规范的适用性,提出并验证了将连续强度法扩展到 7A04-T6 铝合金矩形和方受弯构件上的准确性和可靠性.

上述研究表明,7 系高强铝合金受弯构件稳定性能研究较为匮乏,且集中于整体稳定性能,有关其局

部稳定性能的研究尚未见报道,这严重制约了高强铝合金在工程领域范围内的应用.因此,本文开展了7个7075-T6高强铝合金工字形截面受弯构件局部稳定性能的试验研究,试验构件的材质和截面同文献[11]和[12],但文献[11]和[12]的研究对象为轴压构件,而本文研究对象为受弯构件.试验得到了该类受弯构件的破坏形态、局部屈曲承载力、极限承载力,探究了高强铝合金受弯构件局部稳定性能的影响因素,并对比分析了试验结果与《欧洲铝合金结构设计标准》(Eurocode 9, EC 9)^[24]、《美国铝合金设计手册》(Aluminum Design Manual, ADM)^[25]和中国现行的《铝合金结构设计规范》^[26]中设计方法的计算值,评估了上述规范对7075-T6高强铝合金受弯构件在腹板屈曲情况下承载力预测的准确性和适用性.

1 试验介绍

1.1 试验试件设计

本试验主要目的为探究腹板高厚比变化和布置加劲肋对高强铝合金受弯构件腹板局部稳定性能的影响.试验共设计7个试件,包含4个弯剪加载试件和3个局部承压试件,所有试件均采用截面尺寸为 $1150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ($H \times B \times t_w \times t_f$)模具挤压成型,然后利用机加工对试件的翼缘宽度、翼缘厚度和腹板厚度进行调整,以达到不同的板件宽厚比.截面的尺寸示意图如图1.

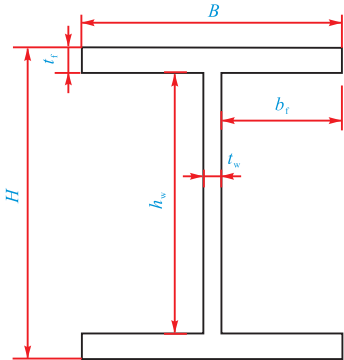


图1 试验试件截面尺寸示意

Fig.1 Schematic of cross-section of test specimen

由于铝合金材料的可焊性差^[15],所有试件的加劲肋与腹板采用铝螺栓连接.同时,考虑到铝合金材料与碳钢接触会产生电化学腐蚀^[27],加劲肋采用6063-T5铝合金,尺寸为 $L60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,通过机加工保证其端部与翼缘端部齐平,且长度等于腹板高度;连接螺栓采用6061-T6铝合金,规格包括 $M8 \times 50$ 和 $M8 \times 25$ 两种,加劲肋与工字形梁间的连

接如图2所示.

表1给出了所有试验试件的实测尺寸,其中腹板实测宽厚比变化范围为33.1~51.9,翼缘实测宽厚比变化范围为6.6~10.7.试件编号原则为:加载方式-腹板名义厚度-翼缘名义厚度.表1中MG表示弯剪加载,弯剪加载试件均布置跨中加劲肋;PL表示局部承压加载,局部承压加载试件均未布置跨中加劲肋.

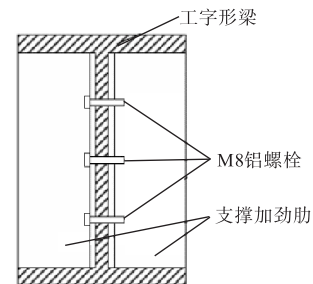


图2 加劲肋连接示意

Fig.2 Schematic of stiffener connection

表1 试件实测尺寸

Tab.1 Measured dimensions of specimens

试件编号	L/mm	B/mm	t_f/mm	h_w/mm	t_w/mm	b_e/t_f	h_w/t_w
MG-3.0-5.0	620.3	110.5	5.02	140.2	2.70	10.7	51.9
MG-3.5-6.0	620.2	111.2	6.11	137.9	3.39	8.8	40.7
MG-4.0-6.0	620.7	109.9	6.01	138.2	3.65	8.8	37.9
MG-4.5-8.0	620.4	110.0	7.98	134.2	4.05	6.6	33.1
PL-3.0-5.0	620.4	110.2	4.95	140.1	2.76	10.9	50.8
PL-3.5-6.0	620.2	111.1	6.05	137.9	3.38	8.9	40.8
PL-4.0-6.0	620.6	111.5	6.19	137.6	3.90	8.7	35.3

1.2 材料性能

为获取7075-T6高强铝合金的应力-应变曲线和基本力学参数,根据规范GB/T 228.1—2010^[28],在常温条件下开展了材料的单调拉伸试验.采用线切割方法进行取样,针对不同设计厚度的腹板和翼缘,各取4个平行试件,材性试件的加工尺寸如图3所示.在试验中,利用应变片和引伸计来监测试件的应变发展情况,通过试验测量获得的7075-T6铝合金应力-应变曲线如图4所示.除8mm厚度的4个试件外,其余材性试件均在Instron59(100kN)系列电子万能试验机上进行拉伸试验,如图5(a)所示;8mm厚度的4个试件采用300kN的电子万能试验机,如图5(b)所示.

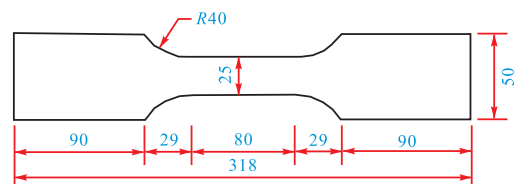


图3 拉伸试件的尺寸(单位:mm)

Fig.3 Dimensions of tensile coupons (unit: mm)

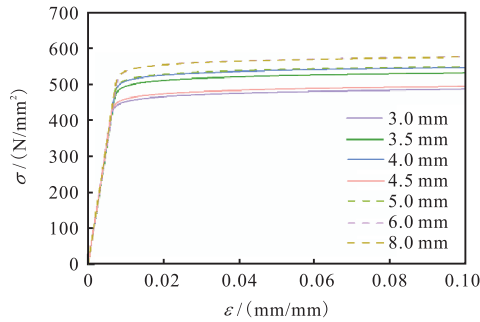
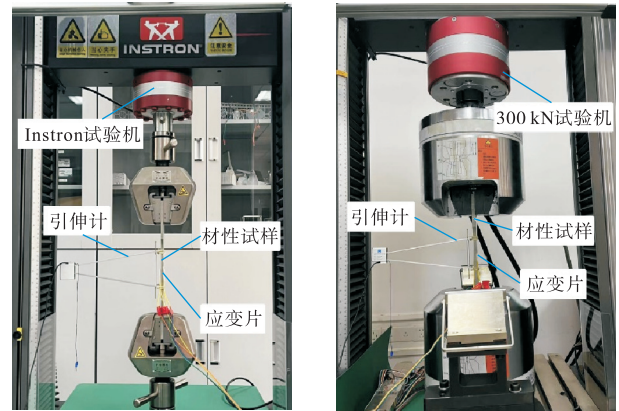


图 4 材料应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of materials

断裂后试件形态如图 6 所示,可以发现破坏时试件无明显的颈缩现象,整体呈现脆性破坏状态,且试件破坏时会发出较大脆响.表 2 汇总了各厚度材性试样试验结果的平均值,其中 E 表示弹性模量; $f_{0.1}$ 和 $f_{0.2}$ 分别为塑性应变为 0.1% 和 0.2% 对应的应力; f_u 为极限强度; δ_{80} 为断后延伸率.由表 2 可知,7075-T6

高强铝合金弹性模量 E 的平均值为 68.0 GPa,名义屈服强度 $f_{0.2}$ 和抗拉强度 f_u 平均值分别为 496.7 MPa 和 576.1 MPa,离散程度较大.



(a) Instron59 (100 kN) 电子万能试验机

(b) 300 kN 电子万能试验机

图 5 拉伸试件试验设备

Fig.5 Test setup for tensile coupons

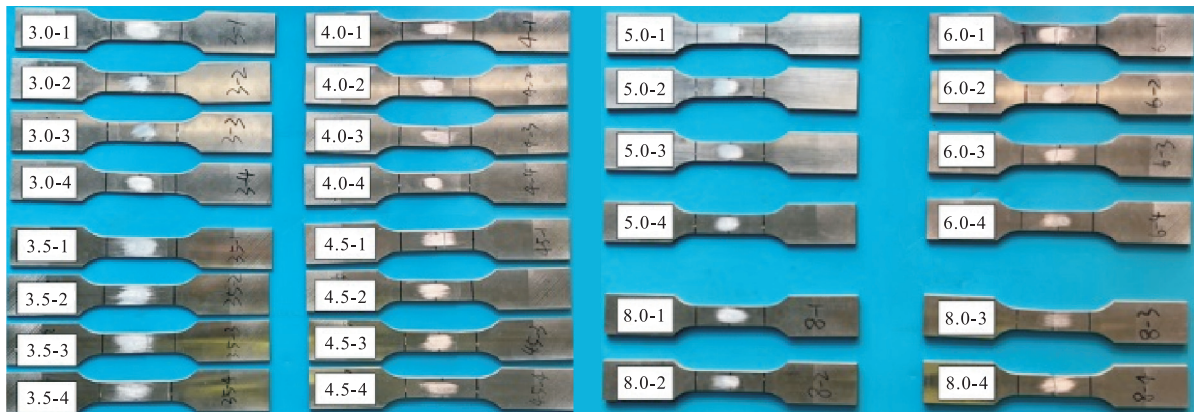


图 6 拉伸试件破坏形态

Fig.6 Failure modes of tensile coupons

表 2 拉伸试件试验结果汇总

Tab.2 Summary of test results of tensile coupons

材性试样名义厚度/mm	E /GPa	$f_{0.1}$ /MPa	$f_{0.2}$ /MPa	f_u /MPa	δ_{80} %
3.0	68.8	431.7	445.7	530.5	11.1
3.5	66.6	481.1	491.5	567.0	10.3
4.0	67.5	494.5	506.2	585.7	10.7
4.5	68.4	442.3	454.0	541.4	9.3
5.0	68.4	493.8	508.9	598.8	10.0
6.0	66.9	525.7	535.7	606.9	11.1
8.0	69.1	529.4	535.1	602.6	11.0
平均值	68.0	485.5	496.7	576.1	10.5
离散系数	0.014	0.077	0.072	0.053	0.064

1.3 局部几何初始缺陷

局部几何初始缺陷是影响高强铝合金受弯构件的刚度和极限承载力的一个重要因素,因此采用三维扫描技术对各试件进行几何初始缺陷的测量.

试件在测量前,需将反光标记点较均匀地贴在试件表面,然后采用手持激光三维扫描仪不间断地沿试

件表面进行移动扫描.手持激光三维扫描仪仪器型号为 COMBO,扫描精度为 0.02 mm,扫描数据能实现实时传输以创建形成点云图,如图 7 所示.

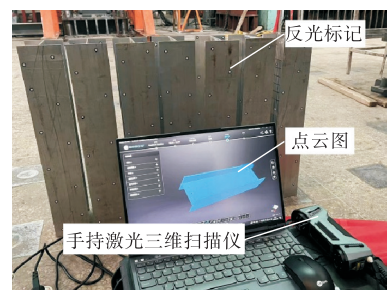


图 7 三维扫描测量方法示意

Fig.7 Schematic of 3D scanning measurement method

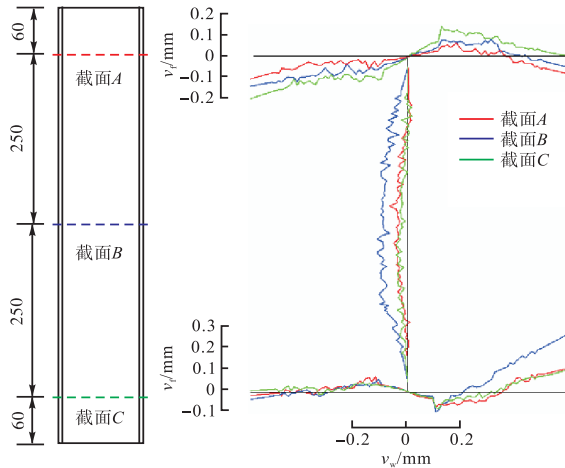
本文通过清华大学金属结构课题组开发的 3D DataProcess 软件,分析处理三维扫描得到的点云数据,最终得到各试验试件的局部几何初始缺陷分布,如表 3 所示,其中 v_f 为翼缘的缺陷实测最大值, v_w 为

腹板的缺陷实测最大值, v_f/b_f 和 v_w/h_w 分别为翼缘和腹板的缺陷幅值百分比. 由表 3 可知: 试件翼缘和腹板的平均缺陷幅值百分比分别为 0.40% 和 0.10%, 7 个试件的局部几何初始缺陷幅值均很小. 试件 PL-3.5-6.0 及 MG-3.5-6.0 的缺陷分布如图 8 和图 9 所示.

表 3 试件初始局部几何缺陷三维扫描测量结果

Tab.3 Measurement results of initial local geometric imperfections measured by 3D scanning

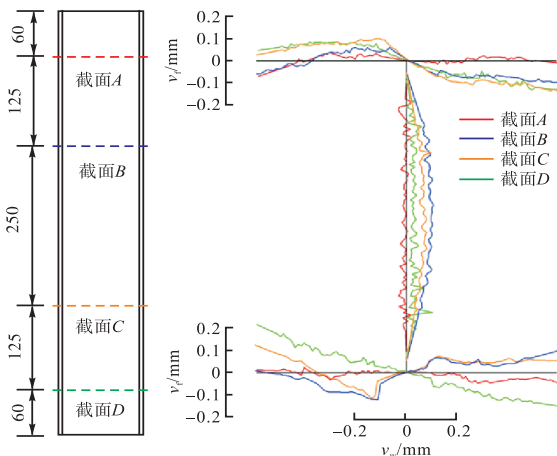
试件编号	v_f/mm	$(v_f/b_f)/\%$	v_w/mm	$(v_w/h_w)/\%$
MG-3.0-5.0	0.16	0.30	0.12	0.09
MG-3.5-6.0	0.22	0.41	0.13	0.09
MG-4.0-6.0	0.28	0.53	0.20	0.14
MG-4.5-8.0	0.20	0.38	0.12	0.09
PL-3.0-5.0	0.20	0.37	0.12	0.09
PL-3.5-6.0	0.18	0.33	0.06	0.04
PL-4.0-6.0	0.26	0.48	0.18	0.13
最大值	—	0.53	—	0.14
平均值	—	0.40	—	0.10
离散系数	—	0.08	—	0.03



(a) 截面观测位置(单位:mm) (b) 缺陷分布

图 8 试件 PL-3.5-6.0 初始局部几何缺陷示意

Fig.8 Schematic of initial local geometric imperfections for specimen PL-3.5-6.0



(a) 截面观测位置(单位:mm) (b) 缺陷分布

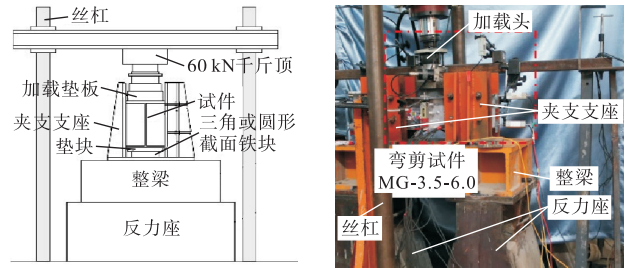
图 9 试件 MG-3.5-6.0 初始局部几何缺陷示意

Fig.9 Schematic of initial local geometric imperfections for specimen MG-3.5-6.0

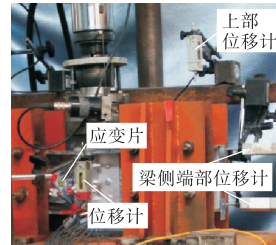
示, 测得的初始局部几何缺陷幅值均用于后续有限元模型建立中缺陷的模拟.

1.4 测点布置与试验加载

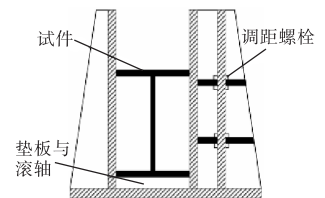
试验均在清华大学土木工程结构实验室进行, 试验加载采用 500 kN 油压千斤顶, 加载装置如图 10(a) 所示. 所有试件两端均采用夹支支座, 如图 10(c) 所示, 通过调节调距螺栓保证试件不发生平面外位移, 且在主平面内能自由转动^[15].



(a) 试验加载



(b) 试件细节



(c) 夹支支座示意

图 10 试验加载装置

Fig.10 Test setup for loading

结合测量得到的初始局部几何缺陷幅值, 试验前通过有限元模拟 7 个试件的破坏形态, 获取其极限承载力估算值, 并依据数值模拟结果设计加载程序及测点布置. 在正式加载前先进行预加载(约 0.2 倍的估算极限荷载), 用于消除各设备之间以及设备与试件间的间隙等空程误差. 正式加载前期采用力控制, 加载速度为 0.3 kN/s, 加载至 0.8 倍的估算极限荷载后更换为位移控制加载, 加载速率为 1 mm/min; 考虑到试验构件所用的 7075-T6 材料延性不足, 为避免试验安全事故, 加载至极限荷载后, 承载力约下降为 0.9 倍的极限荷载时停止加载并结束试验^[11]. 在整个试验过程中, 位移计和应变片均持续采集数据.

弯剪加载和局部承压条件下的各试件测点布置如图 11 所示. 弯剪加载试件的应变测点布置在腹板区格斜对角线的中部区域, 局部承压试件的应变测点布置在受压区正下方的腹板处. 在试件周围布置位移计, 监测试验过程中的位移变化: 两侧支座对应位置试件的上翼缘表面布置了位移计 1 和 2, 监测由于设备本身间隙导致的各试件加载时的刚体位移; 位移计 3 布置在试件下翼缘下表面的中部, 监测试件跨中

的竖向位移;位移计 4~6 布置在试件两侧上下翼缘的端部,以监测试件端部截面在加载过程中的转角.

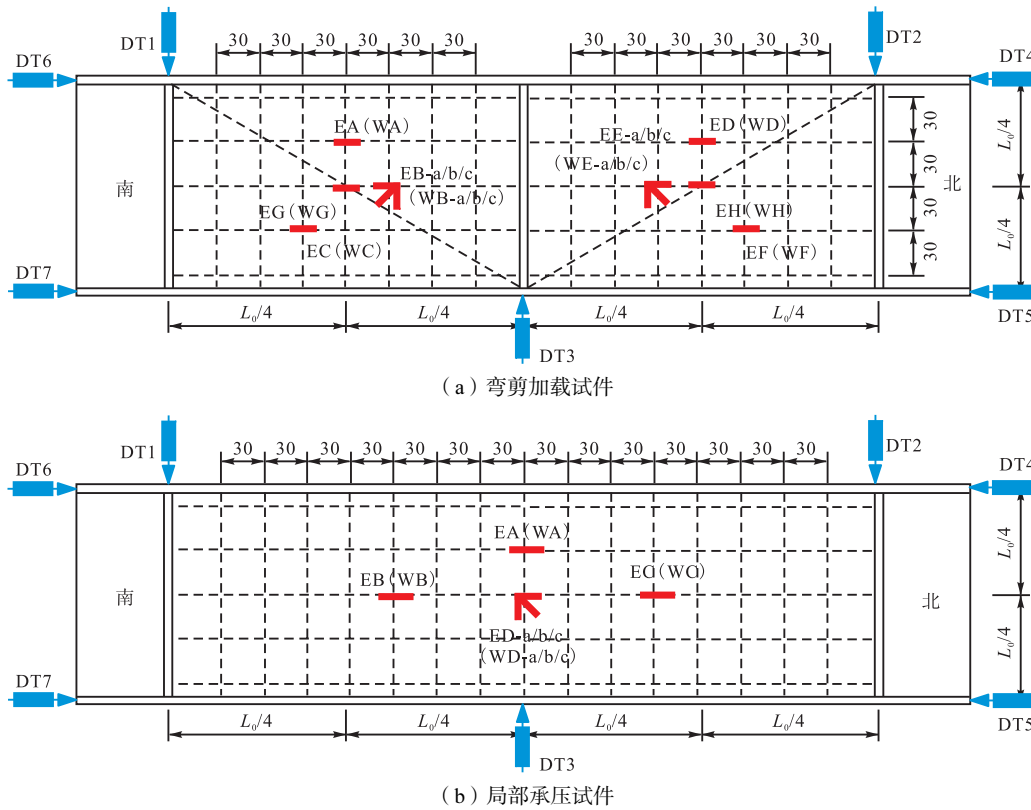


图 11 位移计和应变片布置示意(单位:mm)

Fig.11 Schematic of layout of LVDTs and strain gauges (unit: mm)

2 试验现象及分析

2.1 试件破坏模式

局部稳定试验全部试件的破坏模式如图 12(a)所



(a) 试件破坏模式汇总



(b) 翼缘板、腹板连接处脆性断裂现象

图 12 试件破坏模式

Fig.12 Failure patterns of test specimens

示. 弯剪加载试件的典型破坏模式如图 12(a) 左侧所示, 试件腹板区出现弯剪屈曲破坏, 翼缘未出现明显屈曲现象; 腹板最终破坏形状为半个屈曲波形, 屈曲位置从试件的跨中加劲肋底部斜向延伸至端部加劲肋上方. 试件 MG-4.5-8.0 的腹板未出现明显屈曲, 这是由于试验在加载过程中加载装置的丝杠发生弯曲致使试件未能完成加载. 当试验载荷下降约 5% 时, 除试件 MG-4.5-8.0 外, 试件均在腹板与翼缘板连接处发生断裂, 伴有较大声响, 破坏突然, 近似脆性破坏, 如图 12(b) 所示, 这表明 7075-T6 高强铝合金工字形受弯构件变形性能较差, 在实际工程设计中应采用合适的安全系数.

局部承压加载试件的典型破坏模式如图 12(a) 右侧所示, 靠近上翼缘一侧的试件腹板发生面外屈曲现象, 腹板最终的破坏形状为半个屈曲波形, 翼缘在受集中力区域向腹板位置发生少量凹陷, 未出现明显屈曲现象.

2.2 极限承载力

所有试验试件的极限承载力汇总于表 4, 可以发现: 在其他条件不变的情况下, 腹板高厚比越大, 极限荷载 F_T 与材料全截面屈服时的荷载 F_u 的比值越低, 即试件腹板的高厚比越大, 试件截面材料的强度

利用率越低;在不改变试件板件宽厚比的情况下,跨中加劲肋的布置能极大程度地提高试件的承载力,如布置跨中加劲肋的试件 MG-3.0-5.0 极限荷载是试件 PL-3.0-5.0 的 2.2 倍。

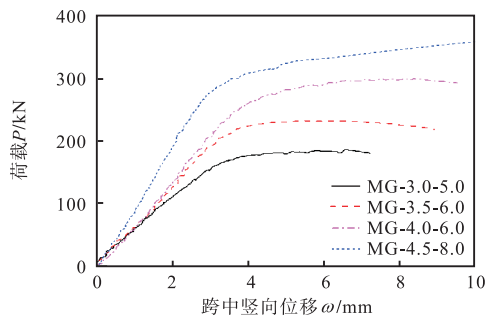
表 4 试件极限荷载

Tab.4 Ultimate loads of test specimens

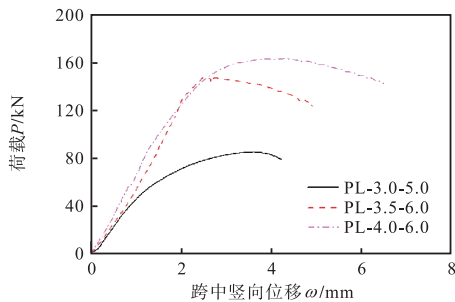
试件编号	b_f/t_f	h_w/t_w	F_T/kN	F_u/kN	F_T/F_u
MG-3.0-5.0	10.7	51.9	187.5	733.3	0.26
MG-3.5-6.0	8.8	40.7	231.7	957.2	0.24
MG-4.0-6.0	8.8	37.9	298.6	962.5	0.31
MG-4.5-8.0	6.6	33.1	—	1 133.5	—
PL-3.0-5.0	10.9	50.8	85.1	727.6	0.12
PL-3.5-6.0	8.9	40.8	147.3	948.7	0.16
PL-4.0-6.0	8.7	35.3	168.0	1 010.6	0.17

2.3 荷载-跨中竖向位移曲线

试验中各试件的跨中竖向位移由位移计 3 测量结果扣除试件刚体位移(取位移计 1 和 2 数值的平均值)得到,最终试验获得的各试件的荷载-跨中竖向位移曲线如图 13 所示,其中 ω 为跨中竖向位移且以向下为正, P 为荷载大小. 对比各试件曲线,可以发现:除 MG-4.5-8.0,所有试件均经历了线性、非线性和下降共 3 个阶段,承载力极值点发生在非线性阶段至下降阶段的转变点,腹板屈曲发生在极值点之前;对于构件 MG-4.5-8.0,由于在加载后期外荷载达到



(a) 弯剪加载试件



(b) 局部承压试件

图 13 各试件荷载-跨中竖向位移曲线

Fig.13 Load-vertical displacement curves at mid-span for all specimens

300 kN 左右时加载装置的丝杠发生弯曲,力无法继续加载至构件表面,故荷载-位移曲线的后半段荷载持续上升,但构件并未完全破坏;对比 4 个不同尺寸的弯剪加载试件,试件的极限承载能力和刚度随腹板厚度的增加而增加;弯剪试件的荷载-跨中竖向位移曲线在下降阶段斜率较局部承压构件的曲线斜率更为平缓,这说明跨中加劲肋的布置能有效提高试件的延性;相同试件尺寸下,局部承压试件的跨中竖向位移均小于弯剪构件,这是由于局部承压试件跨中没有加劲肋,构件的变形集中在靠近上翼缘一侧的腹板位置,上翼缘位移难以传递至下翼缘。

2.4 局部屈曲承载力

在试验的加载过程中,高强铝合金工字形梁的腹板会随着外荷载的不断增大出现局部屈曲现象,由于应变测点是对称布置的,故本文采取应变反转法^[29]获取腹板发生屈曲时的荷载,如图 14 所示。

图 14 给出了试件 MG-3.5-6.0 南侧应变片的发展情况:MG-3.5-6.0 发生屈曲位置的腹板两侧布置了应变片 WG 和 EG, WG 和 EG 在加载初期,两侧压应变发展一致;随着外荷载逐渐增大,腹板开始发生屈曲,应变片 EG 所在一侧腹板向面外突起,使得 EG 一侧压应变开始减小,而应变片 WG 的压应变持续迅速增长. 因此,试件的局部屈曲承载力可取为板件凸侧压应变减小时刻对应的荷载。

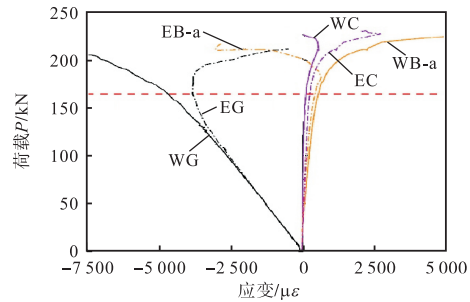


图 14 试件 MG-3.5-6.0 荷载-应变曲线

Fig.14 Load-stain curves of specimen MG-3.5-6.0

表 5 给出了根据应变反转法得到的 7 个试验试件的局部屈曲承载力,同时也给出了试件的极限承载力,并计算了试件发生局部屈曲时的应力水平(F_{cr}/F_T). 由表 5 可以发现:随着腹板高厚比的增大,试件发生局部屈曲时的应力水平随之减小;对于相同尺寸的工字形梁试件,跨中布置加劲肋能一定程度上提高试件发生局部屈曲时的应力水平;各试件在腹板屈曲后承载力仍有较大提升空间,结合高强铝合金延性较差的性质,在实际工程设计时应适度考虑腹板屈曲后强度,充分利用截面强度。

表 5 试验试件腹板屈曲时荷载

Tab.5 Critical local buckling loads of test specimens

试件编号	F_{cr}/kN	F_T/kN	F_{cr}/F_T	h_w/t_w
MG-3.0-5.0	134.9	187.5	0.72	51.94
MG-3.5-6.0	169.8	231.7	0.73	40.66
MG-4.0-6.0	228.8	298.6	0.77	37.91
MG-4.5-8.0	263.7	—	—	33.10
PL-3.0-5.0	28.1	85.1	0.33	50.76
PL-3.5-6.0	81.1	147.3	0.55	40.79
PL-4.0-6.0	97.9	168.0	0.58	35.28

2.5 极限承载力试验结果与各规范的对比分析

对于受弯构件腹板屈曲的设计方法,目前国外以 EC 9^[24]和 ADM^[25]较为权威^[30]。二者在设计方法上有所差异:EC 9^[24]采用有效厚度法,而 ADM^[25]通过折减材料强度以考虑局部屈曲带来的不利影响。中国

现行的《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)^[26]的主要设计理念与 EC 9^[24]类似,同样采用有效厚度法,通过折减受压区板件的厚度以考虑局部屈曲的影响。

表 6 对比了试验得到的试件极限承载力结果与 3 种规范中设计方法的计算结果,其中, F_{test} 为试验试件的极限承载力, F_{EC9} 、 F_{ADM} 和 F_{GB} 分别代表欧洲、美国及中国 3 类铝合金结构设计规范中设计方法的计算结果。结果表明,中国规范计算得到的极限承载力结果最为保守,具有较高的安全储备,而 EC 9^[24]的计算值最接近试验结果,能更好地利用材料强度。同时,对比弯剪加载试件和局部承压试件的规范计算结果,可以发现 3 种规范在局部承压试件的腹板屈曲承载力的计算上均偏于保守。

表 6 试验试件极限承载力与规范计算结果的对比

Tab.6 Comparison of ultimate loads of test specimens between test results and results calculated by codified design methods

试件编号	F_{test}/kN	EC 9 ^[24]		ADM ^[25]		GB 50429—2007 ^[26]	
		F_{EC9}/kN	F_{EC9}/F_{test}	F_{ADM}/kN	F_{ADM}/F_{test}	F_{GB}/kN	F_{GB}/F_{test}
MG-3.0-5.0	187.5	123.73	0.660	94.4	0.503	91.0	0.485
MG-3.5-6.0	231.7	203.04	0.876	196.6	0.849	123.4	0.533
MG-4.0-6.0	298.6	229.20	0.768	235.8	0.790	129.0	0.432
MG-4.5-8.0	316.5	274.61	0.868	266.9	0.843	157.2	0.497
PL-3.0-5.0	85.1	51.80	0.609	49.8	0.585	48.4	0.569
PL-3.5-6.0	147.3	83.70	0.568	80.5	0.547	69.2	0.470
PL-4.0-6.0	168.0	112.10	0.667	110.0	0.655	84.4	0.502
平均值	—	—	0.717	—	0.682	—	0.498
离散系数	—	—	0.123	—	0.145	—	0.044

3 结 论

本文选取 7075-T6 高强铝合金材料和工程常用的工字形截面,完成了 7 个受弯构件局部稳定试验,得到的主要结论如下。

(1) 试验构件均发生了局部屈曲破坏,除 MG-4.5-8.0 外,其余弯剪加载试件在荷载下降阶段均出现腹板和翼缘连接处断裂的现象,表明 7075-T6 高强铝合金工字形受弯构件的变形能力较差。

(2) 利用应变反转法确定了 7 个试验试件的局部屈曲荷载,结果表明:随着试件腹板高厚比的增大,试件屈曲后承载力的提升空间增大,而截面材料的强度利用率随之减小。

(3) 欧洲规范^[24]、美国规范^[25]及中国现行《铝合金结构设计规范》^[26]中的设计方法均保守预测了 7075-T6 高强铝合金受弯构件在腹板屈曲条件下极限承载力,其中欧洲规范中的设计方法预测的极限承载力值更接近试验结果。今后仍需进一步的有限元

模拟以弥补试验数量较少的缺陷,并更好地评估现有规范的适用性。

参考文献:

- [1] 邢国华, 王晓盼, 李翔宇, 等. 铝合金材料在建筑结构中的应用研究进展[J]. 结构工程师, 2021, 37(5): 214-221.
Xing Guohua, Wang Xiaopan, Li Xiangyu, et al. Review of application of aluminum alloy material in building structures[J]. Structural Engineers, 2021, 37(5): 214-221 (in Chinese).
- [2] 张 铮, 陈培旭, 张其林. 高强螺栓连接铝合金框架梁柱节点抗震性能试验研究及数值分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(21): 58-66.
Zhang Zheng, Chen Peixu, Zhang Qilin. Experimental study and numerical analysis on seismic behavior of high-strength bolted aluminum alloy frame beam column joints[J]. Building Structure, 2023, 53(21): 58-66 (in Chinese).

- [3] Zhang D N, Shangguan Q Q, Xie C J, et al. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 619: 186-194.
- [4] 王元清, 王中兴, 胡晓光, 等. 循环荷载作用下高强铝合金本构关系试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(增2): 1-7.
Wang Yuanqing, Wang Zhongxing, Hu Xiaoguang, et al. Experimental investigation on constitutive relationship of high strength aluminum alloy under cyclic loading[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(Suppl 2): 1-7 (in Chinese).
- [5] Branco R, Costa J D, Borrego L P, et al. Effect of strain ratio on cyclic deformation behaviour of 7050-T6 aluminium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 129: 105234.
- [6] Chaves V, Beretta G, Balbín J A, et al. Fatigue life and crack growth direction in 7075-T6 aluminium alloy specimens with a circular hole under biaxial loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 125: 222-236.
- [7] Karolczuk A, Kluger K, Palin-Luc T. Fatigue failure probability estimation of the 7075-T651 aluminum alloy under multiaxial loading based on the life-dependent material parameters concept[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 147: 106174.
- [8] Sajadifar S V, Scharifi E, Wegener T, et al. On the low-cycle fatigue behavior of thermo-mechanically processed high-strength aluminum alloys[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 156: 106676.
- [9] Zhao Y Z, Zhai X M, Wang J H. Buckling behaviors and ultimate strengths of 6082-T6 aluminum alloy columns under eccentric compression—Part I: Experiments and finite element modeling[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 143: 106207.
- [10] Liu M, Zhang L L, Wang P J, et al. Experimental investigation on local buckling behaviors of stiffened closed-section thin-walled aluminum alloy columns under compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 94: 188-198.
- [11] 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.
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 (in Chinese).
- [12] Zhi X H, Wang Y Q, Zhang Y, et al. Study of local buckling performance of 7075-T6 high-strength aluminium alloy H-section stub columns[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 180: 109925.
- [13] Su M N, Young B, Gardner L. Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections. I: Tests and FE model validation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(9): 04014232.
- [14] Su M N, Young B, Gardner L. Continuous beams of aluminum alloy tubular cross sections. II: Parametric study and design[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(9): 04014233.
- [15] 王元清, 王中兴, 殷福新, 等. 铝合金受弯构件局部稳定性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(8): 42-48.
Wang Yuanqing, Wang Zhongxing, Yin Fuxin, et al. Experimental study on local buckling behavior of aluminium alloy beams[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(8): 42-48 (in Chinese).
- [16] 王元清, 王中兴, 殷福新, 等. 铝合金受弯构件局部稳定性能的有限元分析[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(4): 577-584.
Wang Yuanqing, Wang Zhongxing, Yin Fuxin, et al. Finite element analysis for local buckling behavior of aluminum alloy flexible members[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science)*, 2015, 31(4): 577-584 (in Chinese).
- [17] Feng R, Sun W, Shen C D, et al. Experimental investigation of aluminum square and rectangular beams with circular perforations[J]. *Engineering Structures*, 2017, 151: 613-632.
- [18] Su M N, Young B, Gardner L. Classification of aluminium alloy cross-sections[J]. *Engineering Structures*, 2017, 141: 29-40.
- [19] Zhu J H, Li Z Q, Su M N, et al. Design of aluminum alloy channel section beams[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(5): 04020074.
- [20] Yuan L, Zhang Q L, Luo X Q, et al. Shear resistance of aluminum alloy extruded H-section beams[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 159: 107219.
- [21] 刘佳钰, 李雪峰, 张成, 等. 7A04 高强铝合金矩形管的弯曲性能参数化分析[J]. *城市道桥与防洪*, 2021(3): 159-163.
Liu Jiayu, Li Xuefeng, Zhang Cheng, et al. Paramet-

- ric analysis on bending properties of 7A04 high-strength aluminum alloy rectangular tube[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2021(3): 159-163(in Chinese).
- [22] Li B B, Wang Y Q, Wang Z X, et al. 7A04-T6 high-strength aluminium alloy SHS and RHS beams under pure bending—Testing, modelling and design recommendations[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 177: 109400.
- [23] Li B B, Wang Y Q, Zhang Y, et al. Flexural behaviour of 7A04-T6 high-strength aluminium alloy SHS and RHS beams under moment gradient[J]. *Engineering Structures*, 2022, 259: 114138.
- [24] EN 1999-1-1: 2007 Eurocode 9: Design of Aluminium Structures—Part 1-1: General Structural Rules[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [25] AA ADM-2020 Aluminum Design Manual 2020[S]. Washington DC, USA: Aluminium Association, 2020.
- [26] GB 50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- GB 50429—2007 Code for Design of Aluminium Structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2007(in Chinese).
- [27] 姚常华, 杨建国, 吴利权. 铝合金结构桥梁的应用现状、前景及发展建议[J]. *钢结构*, 2009, 24(7): 1-5. Yao Changhua, Yang Jianguo, Wu Liqun. Application status, prospects and development suggestion of aluminium alloy structure bridge[J]. *Steel Construction*, 2009, 24(7): 1-5(in Chinese).
- [28] GB/T 228.1—2010 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, 2011. GB/T 228.1—2010 Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011(in Chinese).
- [29] Rossman C A, Bartone L M, Dobrowski C V. Compressive strength of flat panels with Z-section stiffeners[R]. Virginia: National Advisory Committee for Aeronautics, 1944.
- [30] 石永久, 王元清, 程明, 等. 铝合金梁中腹板受弯屈曲的设计方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(4): 1-5. Shi Yongjiu, Wang Yuanqing, Cheng Ming, et al. Design method for bending buckling of web in aluminum beam[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2009, 31(4): 1-5(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)