

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.006

铝合金偏压构件高温下整体弯扭承载力研究*

郭小农, 高舒羽, 朱劭骏, 陶磊

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为研究铝合金偏压构件在高温下的整体弯扭稳定承载性能, 完成了12根铝合金H型截面构件偏心受压稳定承载力试验, 所有试件均发生弯扭失稳。采用ANSYS对试件进行数值模拟, 有限元与试验结果在破坏形态和荷载一位移曲线上吻合良好。基于所建立的数值模型, 对不同铝合金牌号、截面类型、截面规格和长细比的国产铝合金偏压构件进行了大规模参数分析, 共得到532条相关曲线。根据试验和有限元结果, 提出铝合金偏压构件高温下的弯扭稳定承载力计算公式, 为铝合金偏压构件的抗火设计提供了依据。

关键词: 铝合金; 偏压构件; 高温; 弯扭失稳

中图分类号: TU395 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0181-08

Study on Flexural-Torsional Behavior of Aluminum Alloy Members under Eccentric Compression at Elevated Temperatures

GUO Xiaonong, GAO Shuyu, ZHU Shaojun, TAO Lei

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Experiments on 12 H-shaped eccentrically compressed specimens under various temperatures were performed to explore the flexural-torsional stability of the aluminum alloy members, and all the specimens failed with flexural-torsional buckling. The specimens were simulated using ANSYS. The finite element (FE) and experimental results agreed well on the failure modes and load-displacement curves. Parametric study was carried out using the established FE model considering variation of aluminum alloy brands, slenderness, section types and specifications, through which 532 interaction curves were obtained. Finally, on the basis of the test and FE results, a formula for capacity calculation on flexural-torsional stability of aluminum alloy eccentrically compressed members under elevated temperatures was proposed, which provided a foundation for fire design of aluminum alloy members under eccentric compression.

Keywords: aluminum alloy; members under eccentric compression; elevated temperatures; flexural-torsional stability

* 收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51478335)资助

作者简介: 郭小农(1977-), 男, 副教授, 博士, 博导。主要从事铝合金结构方面的研究。

Email: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 陶磊(1994-), 男, 硕士研究生。主要从事铝合金结构方面的研究。Email: 1732456@tongji.edu.cn

引言

铝合金由于其轻质、高强、耐腐蚀等优点被广泛地应用于网壳、网架等空间建筑结构中。然而,铝合金高温下的力学性能较差,其熔点低、导热系数高。因此,铝合金结构更容易遭受火灾破坏,对铝合金构件的高温性能进行研究具有很重要的现实意义。

偏心受压构件广泛存在于铝合金空间结构中,目前国内外对其常温下承载性能的研究成果非常丰富^[1-8],许多国家的铝合金设计规范也详细给出了常温下铝合金偏压构件的设计方法^[9-12]。与常温下的研究成果相比,高温下铝合金偏压构件承载性能的研究起步较晚。2013年,韩川^[13]完成了一系列国产6061-T6铝合金偏压构件高温下平面内弯曲失稳的恒温加载试验,并分析了偏心率、长细比和温度等参数对偏压构件极限承载力的影响。同年,黄力才^[14]采用数值计算方法,对高温下铝合金偏压构件的弯曲和弯扭稳定承载性能进行了数值研究,提出了可用于计算铝合金偏压构件高温下弯曲和弯扭稳定承载力的相关公式。2016年,林维春^[15]对高温下铝合金偏压构件的弯曲和弯扭承载力进行了大规模数值分析,提出了与文献^[14]形式略有不同的相关公式。

不难看出,目前针对铝合金偏压构件高温承载力的研究十分匮乏。相关高温试验仅限于铝合金方管 and 圆管的弯曲失稳试验,关于偏压构件的弯扭试验尚未见诸报道。为进一步了解铝合金偏压构件的高温弯扭承载性能,本文完成了一批国产6063-T5铝合金偏压构件的常温和高温弯扭承载力试验,并采用有限元软件ANSYS建立了数值模型进行大规模数值分析,提出了用于计算高温下铝合金偏压构件弯扭稳定承载力的相关公式。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了12根国产6063-T5铝合金偏压构件的常温和高温平面外弯扭失稳承载力试验,得到了12个有效试验数据点。所有试件截面规格均为H100×50×4×5,计算长度 l_0 为900 mm。试验采用恒温加载,共设置20、200和300℃三个温度点。

每个温度点下的偏压试件设置 $e=10$ mm和 $e=30$ mm两种偏心距。为确保试验数据的准确,对每种偏心距进行两个相同试件的试验。

试验前,对所有试件按不同的温度和偏心距进行编号。所有试件的具体参数见表1。图1给出了试验前全部试件的照片。

表1 铝合金偏压试件汇总

Table 1 Information of aluminum alloy member specimens

试件编号	杆件截面	A/mm^2	λ_y	$T/^\circ\text{C}$	e/mm
H1-10A/B	H100×50×4×5	860	81.59	20	10
H1-30A/B	H100×50×4×5	860	81.59	20	30
H2-10A/B	H100×50×4×5	860	81.59	200	10
H2-30A/B	H100×50×4×5	860	81.59	200	30
H3-10A/B	H100×50×4×5	860	81.59	300	10
H3-30A/B	H100×50×4×5	860	81.59	300	30

注: e 为偏心距, A 为截面面积, λ_y 为杆件绕弱轴的长细比

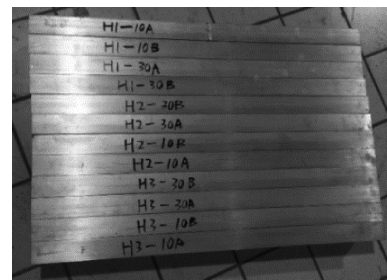


图1 试验前全部试件

Fig.1 Specimens before test

1.2 材性试验

试验前,从同批试件的翼缘和腹板位置各取样2件,材性试件的尺寸如图2所示。材性试验结果见表2。由表2可以看出,该批铝合金常温下的平均名义屈服强度 $f_{0.2}$ 为177.40 MPa,极限抗拉强度 f_u 为206.80 MPa,弹性模量 E 为65 364 MPa。

1.3 试验装置

试验装置如图3所示。所有试件均采用两端铰

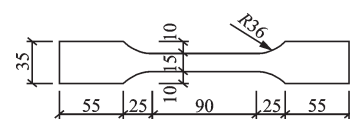


图2 材性试件尺寸

Fig.2 Dimensions of aluminum alloy specimen

表 2 材性试验结果

Table 2 Mechanical properties of the material

试件	E/MPa	$f_{0.1}/\text{MPa}$	$f_{0.2}/\text{MPa}$	f_u/MPa
MP1	65 209	150.65	184.22	217.63
MP2	61 649	153.54	177.74	227.64
MP3	68 498	119.75	171.82	213.47
MP4	66 102	120.28	175.84	195.58
平均值	65 364	136.06	177.40	206.80

接的支座条件,支座为双刀口支座。为保证试件端部截面与支座的有效接触,试验采用端板固定、螺栓机械咬合的方式实现试件与支座的可靠连接。图4为端板详图,在偏心方向开有间距为20 mm的螺栓孔,以便于实现两种偏心情况下的试验。

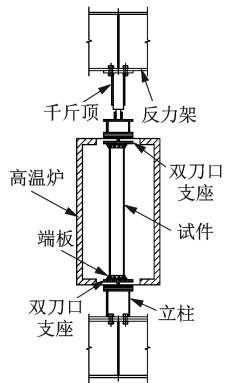


图3 试验装置

Fig.3 Test set-up

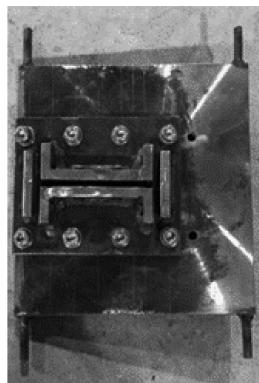


图4 端板详图

Fig.4 Details of the end plate

1.4 测点布置

试验测量内容包括:构件的轴向压缩变形、跨中水平位移和跨中截面的纵向应变。试件测点布置情况如图5和图6所示。其中应变片SG1~SG4和侧向位移计DT9~DT11均布置在试件跨中截面,竖向位移计DT1~DT8布置在上、下支座处。高温下,由于试验仪器的限制,跨中截面的侧向位移计仅设置一个DT9,也没有布置高温应变片;其余测点的布置与常温下一致。

1.5 试验方法

高温试验全过程分为三个阶段。第一阶段为预加载阶段,即加载至屈服荷载的30%,检查测量仪器的工作状态并对试件进行对中,预加载完毕后再卸载至零;第二阶段为升温阶段,关闭高温试验炉舱门并在缝隙处填充防火棉,开启温控采集并升

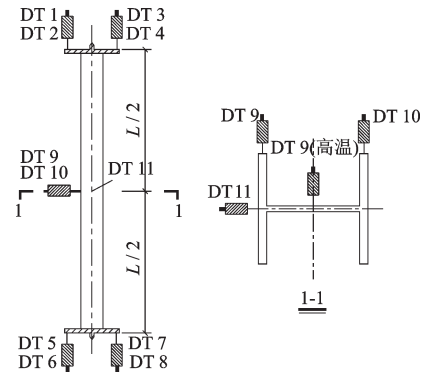


图5 位移计布置

Fig.5 Arrangements of LVDTs

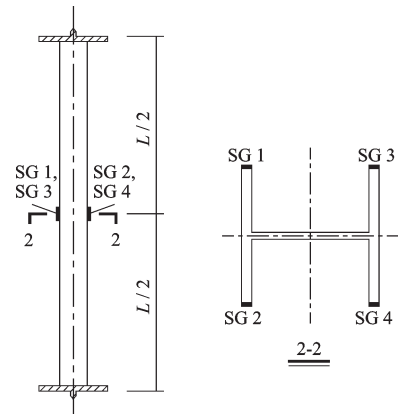


图6 应变片布置

Fig.6 Arrangements of strain gauges

温至构件温度达到试验温度,此时松开千斤顶以使试件可以自由伸缩;第三阶段为正式加载阶段,加载初期为等速力控制,每级荷载为极限荷载的10%,接近极限荷载后切换为连续缓慢加载,并采用跨中侧向位移控制加载速率。

2 试验结果及其分析

2.1 破坏模式

所有试件均发生弯扭失稳,部分试件的破坏模式如图7所示。由于试件长细比较小且绕强轴受弯,试件的扭转变形并不十分明显,试件以绕弱轴的弯曲变形为主。由图7可见,20℃和200℃下,试件的最大水平位移仍发生在跨中处;300℃时试件的最大水平位移均发生在跨中偏上100~150 mm处。这是由于在300℃高温条件下,炉内热空气向上流动导致炉内上部温度较高,因此,试件上端材性折减更大。

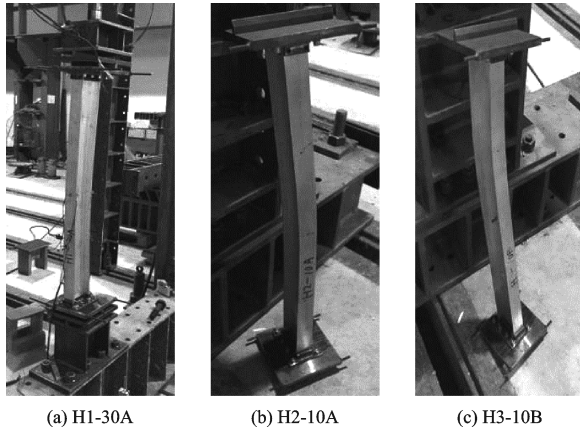


图7 试件破坏模式
Fig.7 Failure modes

2.2 荷载—跨中应变曲线

部分常温试件的荷载—应变曲线如图8所示。加载初期,试件处于弹性状态,荷载与跨中应变的关系呈线性,且沿偏心方向一侧应变增长速度较快;随着荷载增大,应变呈非线性增长;当试件达到极限状态后,荷载开始下降,偏心方向一侧压应变迅速增大,另一侧压应变迅速减小并最后转化为拉应变,此时试件发生弯扭失稳破坏。

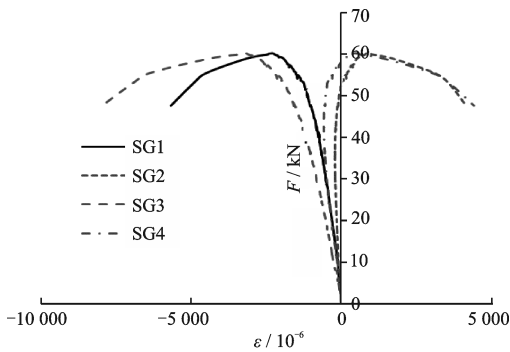


图8 试件H1-10B的荷载—应变曲线
Fig.8 Load-strain curves of H1-10B

2.3 荷载—跨中位移曲线

图9(a)和(b)分别给出了偏心距为10 mm和30 mm下各温度点试件的荷载—跨中位移曲线。从图9可见,在相同的偏心距下,铝合金偏压构件的承载力随温度升高而降低,且不同温度点试件的荷载—跨中位移曲线形状类似。在加载初期,试件的跨中水平位移很小,位移随荷载线性增加;随着偏心荷载的增加,轴力的二阶效应更加显著,曲线呈现出明显的非线性;最后,当荷载达到极值点后,跨中水平位移

迅速增大,试件发生平面外弯扭失稳破坏。

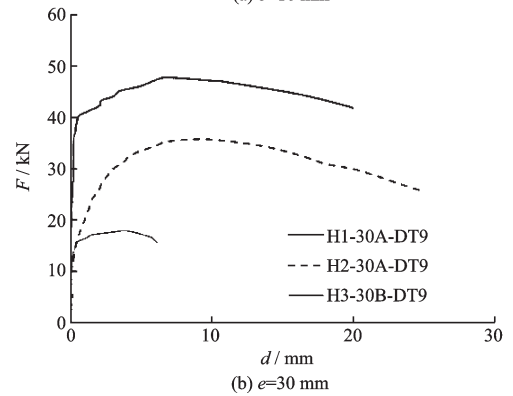
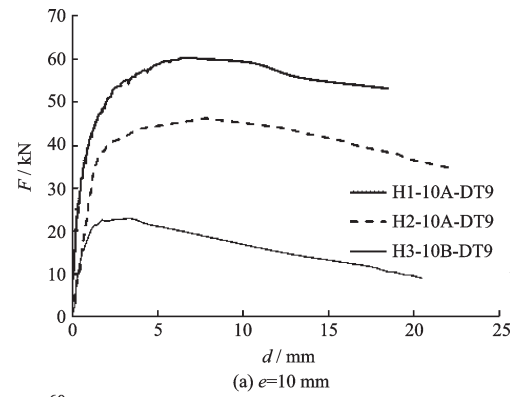


图9 荷载—跨中位移曲线
Fig.9 Load-displacement curves

3 有限元分析

3.1 有限元模型

根据实测材性和几何尺寸,采用ANSYS建立了12个铝合金偏压构件的数值模型,如图10所示。单元类型采用SHELL181,边界条件为两端铰接,在端部施加线荷载以模拟试验中的偏压加载。

有限元模型中的铝合金常温和高温本构关系采用Ramberg-Osgood模型^[16],其应力—应变关系表达式如下:

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

式中, $f_{0.2}$ 为铝合金的名义屈服强度; E 为弹性模量; n 为硬化系数,根据Steinhard建议^[16]的计算表达式如下:

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

式(1)中,常温下材料特性采用试验前进行的材性试验结果;高温下的材料特性根据EC9^[17]的建议由常温材性进行折减获得。

为模拟300℃试件高温炉内的不均匀温度场,

在数值模型中施加了下部 250 °C、上部 300 °C 的线性变化的温度场。

3.2 模型验证

有限元计算的部分试件破坏模式如图 11 所示。对比图 7 和图 11 可知,有限元和试验破坏形态吻合良好。部分试件的荷载—跨中位移曲线对比结果如图 12 所示。所有试件的实测承载力和有限元结果对比见表 3。由图 12 和表 3 可知,所建立的有限元模型具有较高的准确性。

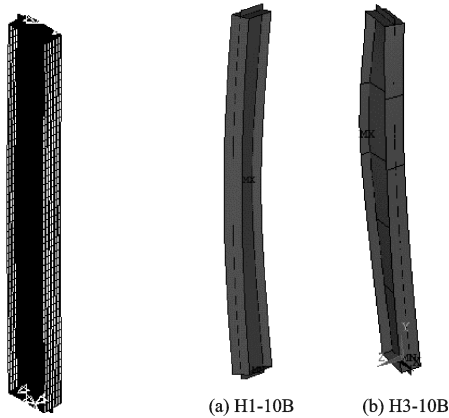


图 10 有限元模型 Fig.10 FE model
图 11 有限元破坏模式 Fig.11 FE failure modes

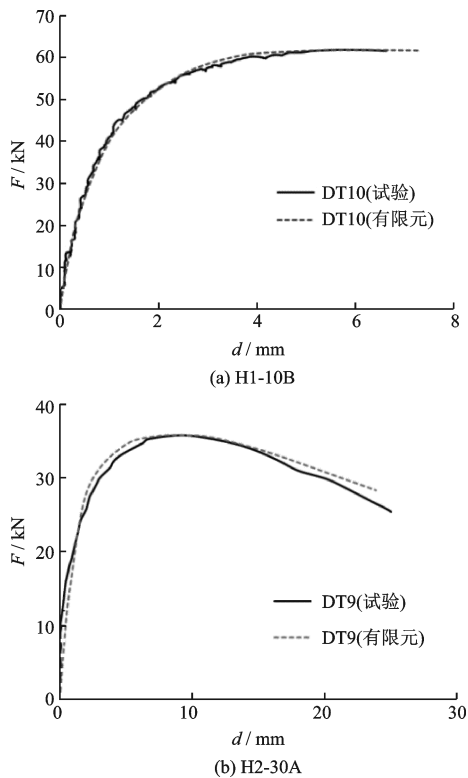


图 12 荷载—跨中位移曲线对比
Fig.12 Comparison on load-displacement curves

表 3 承载力汇总

Table 3 Bearing capacity summary

试件	e/mm	$T/^\circ\text{C}$	P_u/kN	P_{FE}/kN	误差/%
H1-10A	10	20	60.17	60.39	-0.36
H1-10B	10	20	61.82	61.86	-0.07
H1-30A	30	20	47.70	46.70	2.10
H1-30B	30	20	46.92	46.69	0.50
H2-10A	10	200	46.09	46.18	-0.19
H2-10B	10	200	43.13	42.90	0.53
H2-30A	30	200	35.71	35.22	1.37
H2-30B	30	200	34.09	33.61	1.41
H3-10B	10	300	22.71	23.54	-3.64
H3-10C	10	300	21.93	20.09	8.38
H3-30B	30	300	17.86	16.78	6.03
H3-30C	30	300	18.19	17.56	3.47
平均值					1.63

3.3 参数分析

3.3.1 等效初弯曲的确定

由于铝合金挤压型材的残余应力很小,因此在计算铝合金构件时一般不考虑残余应力的影响,而是采用某个合理的初始弯曲来代表构件的初始缺陷。参考文献 [6],本文选取 $L/1\ 000$ 的初始弯曲作为数值模型的等效初始缺陷,其中 L 为试件长度。

3.3.2 典型截面的确定

郭小农等 [6] 的研究表明,圆管、方管截面构件以及 H 型、C 型截面绕弱轴弯曲时几乎不可能发生弯扭失稳;L 型截面构件绕弱轴弯曲时,仅当构件长细比很小时才有可能发生弯扭失稳。综上,在常用铝合金构件截面类型中,仅有双轴对称 H 型截面和 T 型截面的构件在平面外支撑不足时较容易发生弯扭失稳,其中荷载均沿强轴偏心。基于这两种截面类型,选择了 9 种截面规格和多种正则化长细比 $\bar{\lambda}$ 的偏压构件进行大规模参数分析,具体参数分析方案见表 4。

3.3.3 数值计算结果

共分析了 2 种铝合金牌号、2 种截面类型、9 种截面规格和 3 个温度点的偏压构件,得到了 532 条偏压相关曲线。图 13 给出了 100 °C 下牌号为 6061-T6 的不同规格截面构件的相关曲线簇。图 13 表明,构件的长细比对偏压相关曲线的影响较小,相关曲线簇并未呈现明显的梭子状,而是分布在一个较宽的带状范围内。

表4 截面和长细比选取

Table 4 Selection of section and slenderness

截面类型	材料牌号	T/°C	截面规格	$\bar{\lambda}$
双轴对称 H型截面	6061-T6 6063-T5	100 200 300	I200×150×10×12	0.25、0.5、0.75、1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
			I300×150×10×12	1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
			I400×150×10×12	1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
			I200×150×10×16	0.25、0.5、0.75、1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
			I200×150×10×20	0.25、0.5、0.75、1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
			I102×66×6×6	0.25、0.5、0.75、1.00、1.25、1.75、2.25、2.75
T型截面	6061-T6 6063-T5	100 200 300	T100×60×8×10	1.00、1.25、1.50、1.75、2.00、2.25、2.50、2.75
			T150×60×8×10	1.50、1.70、1.90、2.10、2.30、2.50、2.70、2.75
			T150×60×8×16	1.00、1.25、1.50、1.75、2.00、2.25、2.50、2.75

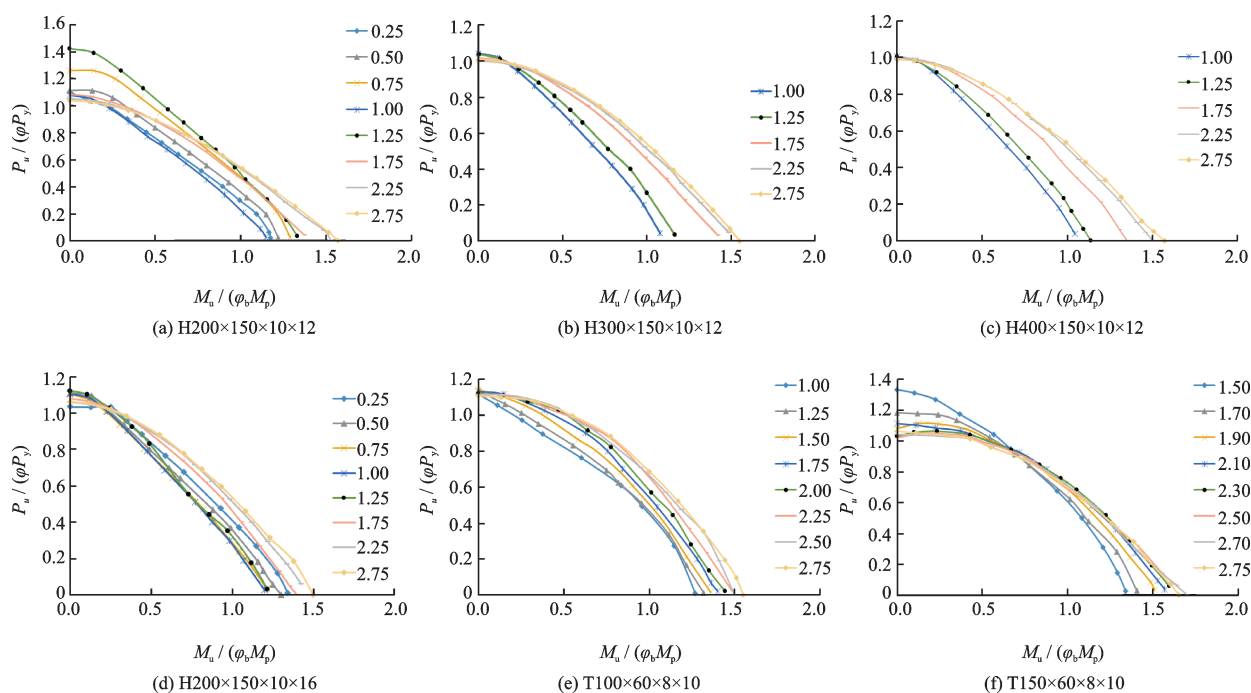


图13 100 °C下部分截面相关曲线

Fig.13 Interaction curves of sections under 100 °C

4 高温下偏压构件承载力计算方法

4.1 常温承载力计算方法

最常用的偏压构件弯扭失稳相关计算公式是直线相关公式,其表达式如下:

$$\frac{P}{\varphi P_y} + \frac{M}{\varphi_b M_p} = 1 \quad (3)$$

式中, P 和 M 分别为构件的轴压力和平面内最大弯

矩; P_y 为理想轴压构件屈服时的轴压力, $P_y = A f_{0.2}$, A 为毛截面面积, $f_{0.2}$ 为铝合金的名义屈服强度; M_p 为纯弯构件全截面屈服时的弯矩, $M_p = Z f_{0.2}$, Z 为构件截面的全塑性抗弯模量; φ 和 φ_b 分别为轴压和受弯稳定系数。

各国规范在计算常温下偏压构件平面外整体稳定承载力时大多采用基于式(3)修正的相关公式计算。其中EC9^[9]采用椭圆形式,GB50429^[12]直接采用直线形式。与EC9相比,GB50429的直线相关

公式形式更为简单,工程应用更为方便。

4.2 高温承载力计算方法

黄玮嘉^[18]通过试验和数值研究表明,式(3)中的轴压稳定系数 φ 和受弯整体稳定系数 φ_b 在高温下均会发生改变。因此,在高温下,偏压构件弯扭失稳的直线相关公式可表达为:

$$\frac{P}{\varphi_T P_{yT}} + \frac{M}{\varphi_{bT} M_{pT}} = 1 \quad (4)$$

式中, P_{yT} 为高温下理想轴压构件屈服时的轴压力, $P_{yT}=Af_{0.2T}$, $f_{0.2T}$ 为高温下铝合金的名义屈服强度; M_{pT} 为高温下纯弯构件全截面屈服时的弯矩, $M_{pT}=Zf_{0.2T}$; φ_T 和 φ_{bT} 分别为高温下轴压和受弯稳定系

数^[18]。

根据数值计算结果,下面讨论基于式(4)的相关公式在高温下的适用性。图14给出了不同温度点下所有通过数值计算获得的偏压相关曲线,其坐标轴含义与图13相同。其中灰色曲线为数值计算曲线,黑色曲线为由式(3)绘制的直线相关曲线。由图14可知,各温度点下偏压构件弯扭失稳的相关曲线簇呈带状,且其下边缘基本呈直线状。由于弯扭失稳的复杂性,构件长细比、截面类型和相关曲线之间的规律并不明显,但各温度点下的全部数值计算曲线均落在直线相关公式之上。鉴于直线相关公式的简洁性,建议铝合金偏压构件高温弯扭承载力仍采用式(4)进行计算。

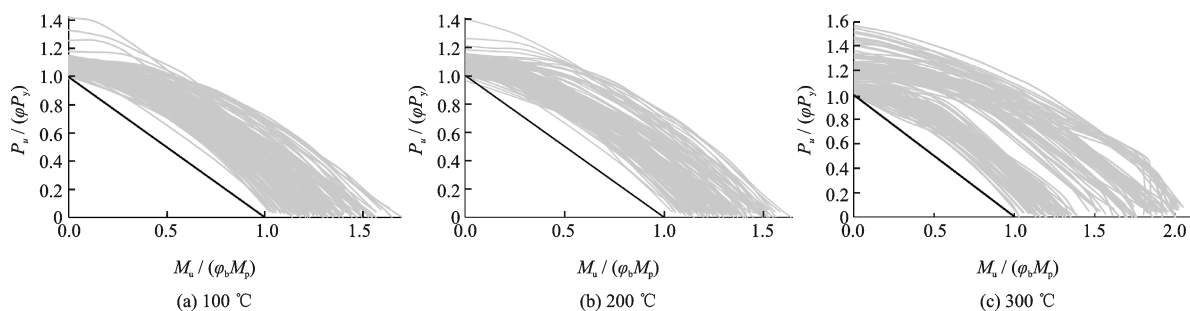


图14 各温度点下偏压相关曲线汇总

Fig.14 Summary of the interaction curves under various temperatures

4.3 试验结果与所建议计算方法的对比

将试验结果分别采用本文和EC9中所建议的相关公式进行计算,计算结果分别记为sum和sum',表达式如下:

$$\text{sum} = \frac{P_{uT}}{\varphi_T P_{yT}} + \frac{M_{uT}}{\varphi_{bT} M_{pT}} \quad (5)$$

$$\text{sum}' = \left(\frac{P_{uT}}{\varphi_T P_{yT}} \right)^{0.8} + \frac{M_{uT}}{\varphi_{bT} M_{pT}} \quad (6)$$

图15和表5给出了本文完成的试验点数据、GB50429和EC9建议的偏压相关公式的对比情况。图15表明,所有试验数据点均落在直线相关公式之上。由表5亦可知,所提出的直线相关公式在计算高温下构件承载力时,仍有一定安全余量。因此,所提出的直线相关公式可以较准确地计算铝合金偏压构件在300℃以下构件偏压弯扭的承载力。

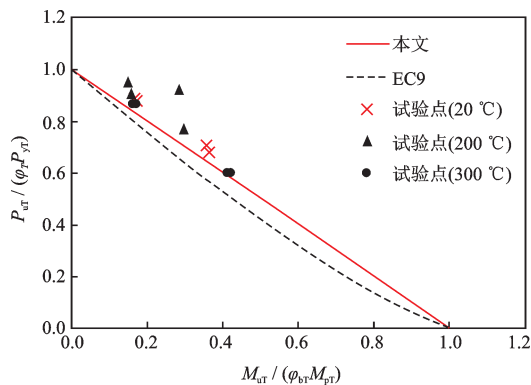


图15 试验结果 $M_{uT}/(\varphi_{bT}M_{pT})$ 与规范对比

Fig.15 Comparison on test results and the codes

5 结论

(1)完成了14根H型截面铝合金偏心受压构件的试验,得到共计12个有效数据点。所有试件均发生以弯曲变形为主的弯扭失稳破坏。

(2)采用ANSYS建立了铝合金偏压构件的有

表5 试验结果的规范验算

Table 5 Validation of the test results

		20 °C	200 °C	300 °C	全部试件
sum	平均值	1.054	1.109	1.025	1.063
	最大值	1.066	1.206	1.041	1.206
	最小值	1.044	1.066	1.011	1.011
sum'	平均值	1.131	1.185	1.101	1.139
	最大值	1.147	1.288	1.113	1.288
	最小值	1.126	1.136	1.091	1.091

有限元模型,有限元与试验结果吻合良好。基于此有限元模型,对2种牌号、2种截面类型、9种截面规格、多种长细比的国产铝合金偏压构件进行了大规模参数分析,共得到532条相关曲线。

(3)基于参数分析结果,提出GB50429中所建议的直线相关公式仍可较准确地计算300 °C以下高温下的铝合金偏压构件承载力,并有一定安全储备。

参考文献:

[1] Hill H N, Hartmann E C, Clark J W. Design of aluminum alloy beam-columns[J]. ASCE Trans, 1953, 121: 1-21.

[2] Clark J W. Eccentrically loaded aluminum columns[J]. ASCE Trans, 1953, 120:1 116-1 132.

[3] Frey F. Lateral buckling and eccentric buckling of aluminum columns, beams, and beam-columns [J]. ECCS Committee, 1977, 16:16-77.

[4] Chapuis J, Galambos T. Restrained crooked aluminum columns [J]. ASCE ST3, 1982, 3:511-24.

[5] 张 铮, 张其林. H形截面铝合金偏压构件平面内稳定承载力的试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5):9-15.
Zhang Zh, Zhang Q L. Experimental and theoretical research on in-plane stability capacity of H-section aluminum beam-columns[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5):9-15. (in Chinese)

[6] 郭小农, 沈祖炎, 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.
Guo X N, Shen Z Y, et al. Theoretical and experimental research on aluminum alloy members under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):136-146. (in Chinese)

[7] 孙丽娟. 6082-T6铝合金箱形与L形截面偏压构件稳定承载力研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2014.
Sun L J. Stability bearing capacity research of 6082-T6 aluminum alloy beam-column with box-type and L-type sections[D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)

[8] 翟希梅, 孙丽娟, 赵远征. 6082-T6铝合金箱形与L形

截面偏压构件稳定承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9):10-19.
Zhai X M, Sun L J, Zhao Y Zh. Stability bearing capacity research of 6082-T6 aluminum alloy beam-column with box-type and L-type sections[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9):10-19. (in Chinese)

[9] EN1999-1-1: 2000 Eurocode 9: Design of aluminum structures-General rules and rules for buildings[S]. London: BSI Group, 2007.

[10] Specifications for aluminum structures[S]. Washington D.C.: The Aluminum Association, 2005.

[11] Aluminum structures Part 1: Limit state design, Australian/New Zealand Standard AS/NZS 1664.1: 1997 [S]. Sydney, Australia: Standards Australia, 1997.

[12] 铝合金结构设计规范:GB50429—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
Code for design of aluminium structures: GB50429—2007[S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)

[13] 韩 川. 铝合金偏压构件抗火性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
Han Ch. Experimental research on structural behavior of aluminum alloy members at elevated temperature [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)

[14] 黄力才. 高温下铝合金梁和柱构件承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
Huang L C. Research on load-bearing capacity of aluminum alloy beams and columns at elevated temperatures [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)

[15] 林维春. 高温下铝合金构件极限承载力实用计算方法[D]. 上海: 同济大学, 2016.
Lin W Ch. Practical methods for the ultimate bearing capacity of aluminum alloy members at elevated temperature [D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese)

[16] 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 X N, Shen Z Y, Li Y Q. Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):110-117. (in Chinese)

[17] Design of aluminum alloy structures-Part 1-2: Structural fire design: EN1999-1-2 Eurocode 9[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.

[18] 黄玮嘉. 铝合金偏压构件高温承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
Huang W J. Research on bearing capacity of aluminum alloy members under eccentric compression at elevated temperatures [D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)

(本文责编:赵 霞)