

铝合金圆管柱基于连续强度法的轴心受压承载力性能研究

陈向荣¹,李红平¹,李刚²,卢小松³,连鸣¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055;2. 西安建筑科技大学设计研究院,陕西 西安 710055;3. 西安工业大学建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘要 目的 基于连续强度法(CSM)提出适用于圆管铝合金柱的强度设计公式,解决传统有效截面法在构件承载力设计中结果不连续且偏保守问题。方法 收集大量国产铝合金材料的材性试验数据对CSM进行修正,提出适用于国产铝合金圆管柱的CSM强度设计公式;对55个不同径厚比的铝合金轴心受压圆管柱进行有限元参数分析,研究径厚比对承载力性能的影响;通过72个铝合金圆管短柱有限元计算结果与各国规范、建议CSM承载力设计公式进行对比分析,验证了建议CSM承载力设计公式的有效性和可靠性。结果 铝合金圆管截面的径厚比限值为58; N_{FE}/N_{CSM} 、 N_{FE}/N_{GB} 、 N_{FE}/N_{AA} 和 N_{FE}/N_{EC3} 的均值分别为1.114、1.252、1.195和1.199,CSM的设计值相较于欧规、美规和中国规范的设计值精度更高。结论 修正的CSM承载力设计公式表现出较好的精度,且总体偏于安全,可为工程设计提供参考。

关键词 国产铝合金;轴心受压;连续强度法;承载力;有限元分析

中图分类号 TU395

文献标志码 A

Research on Axial Compression Loading Capacity of Aluminum Alloy Tubular Column Based on Continuous Strength Method

CHEN Xiangrong¹, LI Hongping¹, LI Gang², LU Xiaosong³, LIAN Ming¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055; 2. Architectural Design and Research Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055; 3. School of Civil Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, China, 710021)

Abstract: Based on the continuous strength method (CSM), the strength design formula suitable for the round tube aluminum alloy column was proposed to solve the problem that the results of the traditional effective area method in the member loading capacity design were discontinuous and

收稿日期:2021-01-21

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708444)

作者简介:陈向荣(1972—),女,副教授,博士,主要从事钢结构、轻型钢结构等方面研究。

conservative. The CSM strength design formula suitable for the domestic aluminum alloy round pipe string was proposed by revising the CSM based on the material property test data collected from a large number of domestic aluminum alloy materials. The influence of diameter-thickness ratio on loading capacity of 55 aluminum alloy axial compression round pipe strings with different diameter-thickness ratios was studied by finite element analysis. The validity and reliability of the proposed CSM loading capacity design formula were verified by comparing the finite element calculation results of 72 aluminum alloy round tube short columns with the national codes and recommended CSM loading capacity design formulas. The results show that the limiting value of diameter-thickness ratio of aluminum alloy round tube section is 58. The mean values of N_{FE}/N_{CSM} , N_{FE}/N_{GB} , N_{FE}/N_{AA} and N_{FE}/N_{EC9} are 1.114, 1.252, 1.195 and 1.199, respectively. The design values of CSM are more accurate than those of European code, American code and Chinese code. The modified CSM loading capacity design formula shows good accuracy and is generally safe, which can be used as a reference for engineering design.

Key words: domestic aluminum alloy; axial compression; continuous strength method; bearing capacity; finite element analysis

铝合金结构是一种新型结构形式,其构件力学性能与不锈钢相似,且具有其独特的力学性能^[1]。铝合金的材料应力-应变曲线体现了非线性,具有明显的应变硬化效应和合理的延展性《中国铝合金设计规范》(GB50429—2007)^[2]针对铝合金独特的力学性能,采用有效截面法充分利用板件屈曲后强度,考虑了板件屈曲对承载力的影响。在计算有效截面面积时采用更加简便、高效的有效厚度法。然而中国规范使用的有效厚度法和现有的传统设计方法^[3]大部分是基于理想弹塑性本构模型,以铝合金材料的名义屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 作为应力上限,忽略了材料应变硬化后强度的提高,导致结果偏保守。因此研究学者提出了一种更加简便且贴近实际受力情况的设计方法—连续强度法(Continuous Strength Method, CSM)^[4]。

连续强度法最初是为不锈钢和碳素钢的承载力设计开发的。2006年至今, L. Gardner 等^[5-11]基于 CSM 对不锈钢、碳素钢和高强钢等构件进行了一系列研究。而 CSM 在铝合金结构中的应用始于 2014 年, M. N. Su 等^[12]将 CSM 扩展到铝合金构件的承载力设计中,并对方形空心型材(SHS)、矩形空心型材(RHS)和带有内部横向加劲肋的 SHS/RHS 等铝合金构件进

行试验研究,提出了适用于铝合金结构轴压构件承载力的 CSM 计算公式,但此公式仅适用于非薄柔截面。M. N. Su 等^[13]对 CSM 进行了改进,提出了适用于薄柔截面的 CSM 计算式,使得 CSM 在铝合金构件的承载力设计中更加完整。Zhao Yuanzheng 等^[14]将 CSM 运用于多种截面 6082-T6 铝合金构件的力学性能研究中。以上所述 CSM 在铝合金结构构件中的研究大部分是基于国外铝合金材料的材性特点出发,为使 CSM 更好地运用于国产铝合金构件的设计中,还需对 CSM 进行部分修正。因此,笔者收集了大量试验数据对 CSM 进行修正,并结合有限元软件 ABAQUS,基于 CSM 对国产铝合金圆管柱的轴心受压极限承载力性能进行研究。结果表明,修正的 CSM 承载力设计公式可以很好地预测国产铝合金圆管柱的轴心受压极限承载力,且总体偏于安全,可为工程设计提供参考。

1 有限元模型的验证及参数分析

1.1 材料模型

铝合金圆管柱有限元模型的材料本构模型采用双线性模型(见图1)。验证模型和参

数分析模型均采用文献[15]中材性拉伸试验的实测值。屈服应力 f_y 为253.77 MPa,极限应力 f_u 为273.19 MPa,杨氏模量 E 为72 570 MPa,强化模量 E_{sh} 为320 MPa。由于试验并未记录极限应变 ε_u 的值, ε_u 采用文献[16]中一种预测最终材料应变的方法:

$$\varepsilon_u = 0.3 - 0.22(f_y/400).$$

(1)

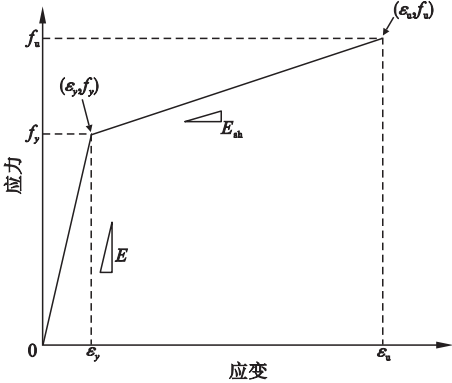


图1 双线性模型

Fig. 1 The bi-linear model

1.2 单元选取、边界条件及网格划分

由于铝合金构件的厚度远小于其他方向的尺度,并可忽略沿厚度方向的应力,故笔者采用4节点四边形壳单元(S4R)。对构件进行网格划分,网格尺寸取周长的1/20。在圆管两端中心处各设置一个参考点,采用“运动”耦合将参考点和两端表面进行耦合。对耦合点的下端约束为 $U1 = 0$ 、 $U2 = 0$ 、 $U3 = 0$ 、 $UR3 = 0$;上端约束为 $U1 = 0$ 、 $U2 = 0$ 、 $UR3 = 0$ 。通过控制耦合点的位移来施加荷载。

1.3 初始缺陷

铝合金圆管柱有限元模型的初始缺陷主要包括几何缺陷和力学缺陷。初始几何缺陷主要考虑圆管柱的初弯曲,初始力学缺陷主要考虑残余应力。我国和欧美国家关于铝合金挤压型材的残余应力的研究表明^[17],铝合金挤压型材截面的应力分布比较均匀,且残余应力一般小于20 MPa,对铝合金构件的承载力影响很小,可忽略不计。因此笔者在有限元建模过程中不考虑残余应力的影响,仅

输入几何缺陷作为初始缺陷,缺陷幅值为文献[15]中的初弯曲实测值。

在有限元计算时,轴心受压状态下的低阶奇数波形的屈曲模态能够反映出构件真实的几何缺陷分布形态,故采用特征值屈曲分析得出构件的多个屈曲模态,且以第一阶屈曲模态作为构件的初始缺陷模态(见图2)。并采用ABAQUS中*IMPERFECTION命令施加到模型上。



图2 初始几何缺陷模态

Fig. 2 Initial geometric defect mode

1.4 有限元模型验证

利用有限元计算结果与18组6061-T6圆管柱轴心受压试件试验结果进行对比,验证有限元模拟方法及模型的可靠性。试件的截面尺寸和材性数据均取自于文献[15]。18个有限元模型均产生弯曲失稳破坏,未出现局部屈曲现象,与试验破坏形态一致(见图3)。对比试件YG4-5的荷载-应变曲线,有限元结果和试验结果具有较好的一致性(见图4)。模型的具体初始缺陷,极限承载力有限元计算结果 $N_{u,FE}$ 和试验承载力 $N_{u,test}$ 的对比见表1。

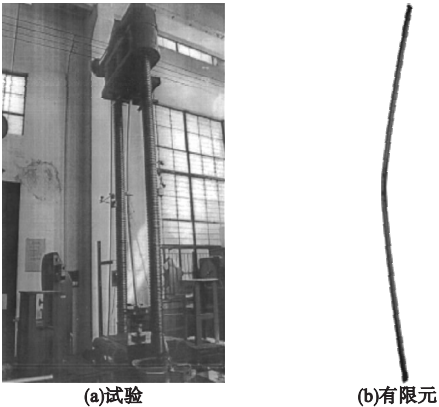


图3 试验与有限元破坏形态

Fig. 3 Failure mode of test and finite element

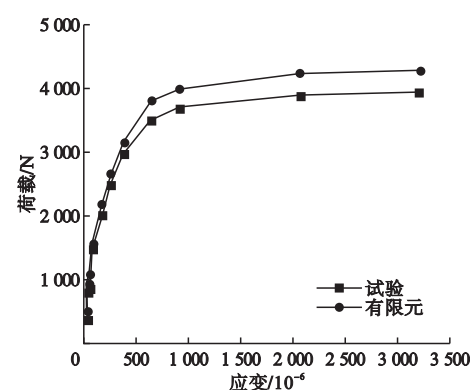


图4 试件 YG4-5 荷载-应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of specimen YG4-5

表1 试验和有限元结果对比

Table 1 Comparison of test results and finite element results

试件 编号	初始缺陷/ mm	$N_{u,test}/$ N	$N_{u,FE}/$ N	$\frac{N_{u,test}}{N_{u,FE}}$
YG1-1	1.0	1 400	1 542	0.908
YG1-5	0.8	1 760	1 917	0.918
YG1-7	0.65	2 640	2 697	0.979
YG1-9	0.5	3 750	4 144	0.905
YG3-1	1.35	2 090	2 252	0.928
YG3-4	2.7	2 700	2 941	0.918
YG3-6	1.95	2 500	2 580	0.969
YG3-8	1.0	4 250	4 432	0.959
YG3-9	0.65	5 500	5 796	0.949
YG4-2	0.75	2 700	2 758	0.979
YG4-4	1.65	3 751	3 766	0.996
YG4-5	1.8	3 930	4 328	0.908
YG4-8	0.85	6 000	6 067	0.989
YG4-9	0.55	9 240	9 438	0.979
YG5-3	1.35	4 100	4 275	0.959
YG5-6	1.65	4 600	4 694	0.980
YG5-7	1.9	6 750	7 517	0.898
YG5-10	1.25	10 820	11 916	0.908

由表1可知, $N_{u,test}/N_{u,FE}$ 的均值为0.946, 方差为0.011, 有限元结果均大于试验值, 分析原因可能是模拟的材性较为理想、试验误差和构件的尺寸差异造成。有限元模型计算结果与试验承载力较为吻合, 验证了有限元模型的合理性和准确性。

1.5 有限元参数分析

笔者以径厚比为主要变化参数, 对55个铝合金短柱进行数值分析, 研究铝合金板件之间的相互作用对构件轴心受压承载力的影响, 并验证文献[1]中关于单一板件的薄柔界限的准确性。所有短柱径厚均为2 mm, 柱长为3倍的外径, 径厚比($D/(t\varepsilon)$)变化范围为15~150。承载力有限元结果 N_{FE} 与文献[2]中截面承载力设计值 $f_y A$ 的比值 $N_{FE}/(f_y A)$ 变化情况如图5所示。

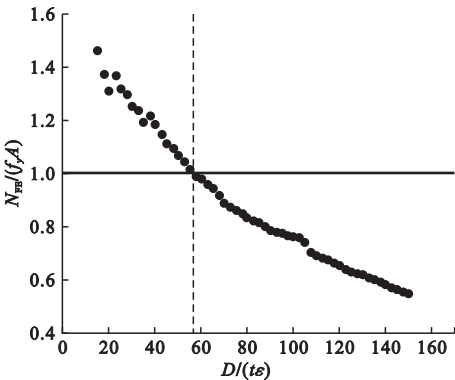


图5 $N_{FE}/(f_y A)$ 与 $D/(t\varepsilon)$ 关系

Fig. 5 Relationship between $N_{FE}/(f_y A)$ and $D/(t\varepsilon)$

文献[2]对6061-T6型号的圆管截面受压板件的径厚比限值定义为48.62, 规定当圆管截面的外径与壁厚之比小于48.62时, 板件应全截面有效。由图5可知, 随着径厚比的增大, 构件的轴心受压承载力逐步降低。图中的薄柔界限约为58, 故文献[2]中将单一板件的薄柔界限定为48.62偏保守, 未能考虑到板件之间相互作用对构件承载力的提高。图中径厚比小于58(非薄柔截面)的圆管柱, $N_{FE}/(f_y A)$ 比值均大于1, 最大 N_{FE} 约为 $1.5f_y A$, 应变硬化现象对承载力影响较大。

2 铝合金圆管轴心受压构件的连续强度设计方法

连续强度法是一种由截面变形能力来确定截面承载能力的设计方法, 可允许应变硬化的有益影响。连续强度法主要由两个部分组成: 一条定义了截面正则化宽厚比与截面

可承受的应变水平之间函数关系的基础曲线;一个包括了材料应变硬化的本构模型。通过基础曲线和材料模型预测极限应变应力 f_{CSM} ,最后由式(2)计算构件的极限承载力 N_{CSM} :

$$N_{\text{CSM}} = f_{\text{CSM}} A.$$

(2)

式中: A 为毛截面面积。

2.1 CSM 基础曲线

L. Gandner^[8]和 S. Afshan^[9]收集大量不锈钢、碳素钢短柱和梁的试验数据,拟合得到了早期 CSM 基础曲线的方程式。M. N. Su 等^[12-13]和 L. Gandner 等^[8]加入铝合金短柱及梁试验数据对 CSM 基础曲线重新调整,拟合得到了适用于铝合金材料的 CSM 基础曲线(见图6)。

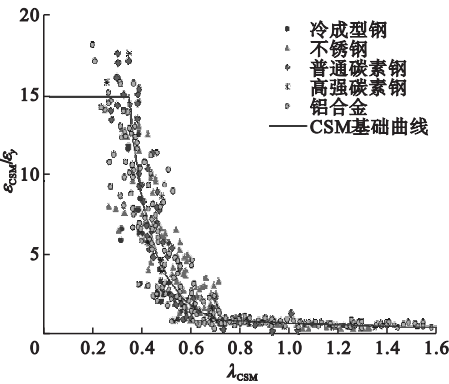


图6 CSM 基础曲线
Fig. 6 CSM base curve

连续强度法中的截面正则化宽厚比由式(3)计算:

$$\lambda_{\text{CSM}} = \sqrt{f_y / \sigma_{\text{cr}}}.$$

(3)

式中: f_y 为屈服强度; σ_{cr} 为截面的弹性屈曲应力。

笔者使用有限元软件 CUFSM^[18]计算截面弹性屈曲应力 σ_{cr} ,考虑了板件之间的相互作用,有效节约设计的时间成本,也使计算结果更加准确。

连续强度法采用无量纲的应变比 $\varepsilon_{\text{CSM}}/\varepsilon_y$ 定义构件的变形能力。其中 ε_{CSM} 为构件在达到极限承载能力时所对应的应变, ε_y 为屈服应变。

在非薄柔截面($\lambda_{\text{CSM}} \leq 0.68$)的 CSM 基础曲线中, $\varepsilon_{\text{CSM}}/\varepsilon_y$ 与 λ_{CSM} 的关系见式(4)、式(5):

$$\frac{\varepsilon_{\text{CSM}}}{\varepsilon_y} = \frac{0.25}{\lambda_{\text{CSM}}^{3.6}}.$$

(4)

$$\frac{\varepsilon_{\text{CSM}}}{\varepsilon_y} \leq \min\left(15, \frac{0.5\varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right).$$

(5)

式(5)中 CSM 应变的两个上限值,即 15 和 $0.5\varepsilon_u/\varepsilon_y$,分别与限制塑性变形和避免材料断裂有关,在图6中反映为 λ_{CSM} 在区间 0~0.3 左右时 $\varepsilon_{\text{CSM}}/\varepsilon_y$ 的值保持为 15 不变。

在薄柔截面($\lambda_{\text{CSM}} > 0.68$)的 CSM 基础曲线中, $\varepsilon_{\text{CSM}}/\varepsilon_y$ 与 λ_{CSM} 的关系见式(6):

$$\frac{\varepsilon_{\text{CSM}}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0.222}{\lambda_{\text{CSM}}^{1.05}}\right) \frac{1}{\lambda_{\text{CSM}}^{1.05}}.$$

(6)

2.2 材料本构模型

笔者采用文献[19]附录C中给出的 CSM 材料模型(见图7),该模型考虑了应变硬化现象。M. N. Su 和 B. Young 等^[12-13]的研究也验证了线弹性硬化模型拥有足够的精度,可以较好地与铝合金材料的应力-应变曲线吻合。

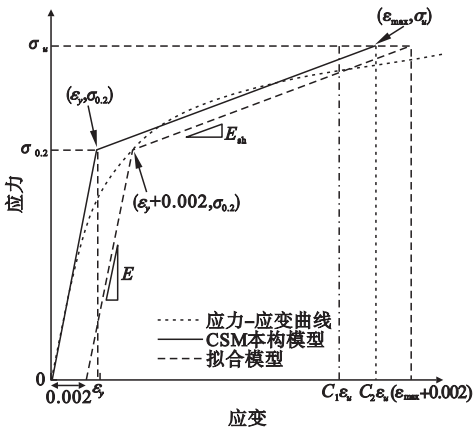


图7 CSM 材料模型
Fig. 7 Material models of CSM

2.2.1 应变强化模量

线性强化模型中的强化模量 E_{sh} 由两个坐标确定: (ε_y, f_y) 和 $(\varepsilon_{\text{max}}, \sigma_{\text{max}})$ 。其中屈服应变 $\varepsilon_y = f_y/E$,最大应力值 σ_{max} 取极限应力 f_u , E_{sh} 由式(7)计算:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_1 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \tag{7}$$

M. N. Su 等^[13]参考 X. Yun^[20]的分析方法,以大量的铝合金材性试验数据拟合强化模量 E_{sh} ,得到 $C_1 = 0.5$ 。

2.2.2 极限应变修正

极限应变在计算应变强化模量时是一个必不可少的数据,但在大多数情况下设计者不容易获得。且线性强化模型的最大应变值 ε_{max} 不能直接取为极限拉伸应变值 ε_u ,直接取 ε_u 会使得 E_{sh} 比真实的强化模量小,低估材料的应变能力。故需用应力值对材料的最大应变值 ε_{max} 进行修正,得到更加精确的应变强化模量 E_{sh} 。

研究者 X. Yun 等^[20-22]研究发现具有光滑的应力-应变曲线的金属,如不锈钢、铝合金等,其 ε_u 主要取决于屈服应力与极限拉伸应力的比值 f_y/f_u (简称“屈强比”),且两者存在负相关的关系。笔者搜集了 208 组国产铝合金材料拉伸试验数据^[23],数据库包括了 6082-T6、6061-T4、6061-T6 等型号的铝材。观察数据的总体分布规律,由于数据库仅包含 3 种铝合金型号,故数据点主要分布在直线两端,但极限应变 ε_u 与屈强比 f_y/f_u 的关系仍存在类似的趋势,故使用最小二乘回归得到式(8)。极限应变 ε_u 随屈强比 f_y/f_u 的变化情况见图 8。

$$\varepsilon_u = 0.16(1 - f_y/f_u) + 0.0568. \tag{8}$$

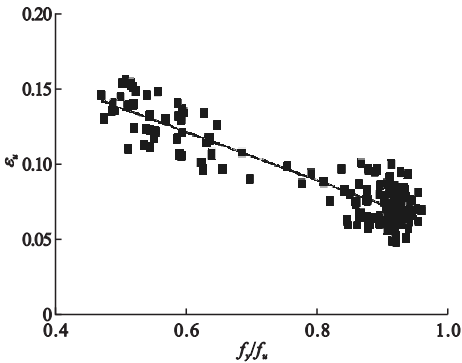


图 8 ε_u 与 f_y/f_u 关系图
Fig. 8 Relationship between ε_u and f_y/f_u

3 结果对比分析

将 72 个铝合金短柱有限元结果 N_{FE} 与连续强度法设计值 N_{CSM} 、中欧规^[16]设计值 N_{EC9} 、美规^[24]设计值 N_{AA} 以及中国规范^[2]设计值 N_{GB} 进行对比,有限元试件的正则化宽厚比变化为 0.1~2,对比结果见表 2 和图 9。

表 2 有限元结果与各国规范设计值对比

Table 2 Comparison of finite element results with design values of national codes

比值	均值	方差
$\frac{N_{FE}}{N_{CSM}}$	1.114	0.011 7
$\frac{N_{FE}}{N_{AA}}$	1.195	0.024 8
$\frac{N_{FE}}{N_{EC9}}$	1.199	0.018 0
$\frac{N_{FE}}{N_{GB}}$	1.252	0.021 9

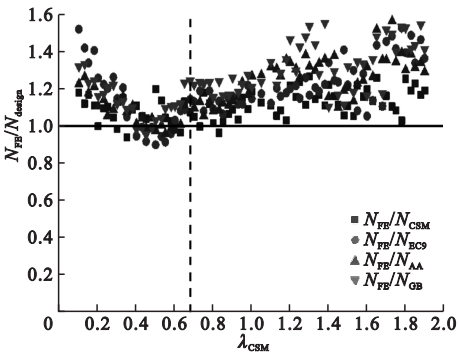


图 9 各国规范设计值与有限元结果对比

Fig. 9 Comparison of finite element results with design values of national codes

由表 2 和图 9 可知,CSM 的设计值相较于 3 个规范的设计值精度更高。 N_{FE}/N_{GB} 、 N_{FE}/N_{AA} 和 N_{FE}/N_{EC9} 的均值分别为 1.252、1.195 和 1.199,对应的方差为 0.021 9、0.024 8 和 0.018 0。中国规范相比于美国规范和欧洲规范,低估了薄柔截面的承载力。

4 结 论

(1)随着径厚比的增大,铝合金圆管柱的轴心受压承载力逐步降低。

(2) 中国铝合金设计规范对薄柔界限的取值及薄柔截面的承载力计算偏保守。

(3) 结合国产铝合金材料力学性能对CSM进行修正,对比分析结果表明,修正的CSM设计公式表现出较好的精度,且总体偏于安全,可为工程设计提供参考。

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(6):100-109.
(SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of building structures, 2007(6):100-109.)
- [2] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范: GB50429—2007 [S]. 北京:中国计划出版社,2008.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for design of aluminium structures: GB50429—2007 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.)
- [3] 王元清,常婷,石永久,等. 各国规范铝合金轴压构件局部稳定设计方法对比[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(6):961-968.
(WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjun, et al. Comparison on design codes for local buckling of aluminium alloy columns under uniform compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013,29(6):961-968.)
- [4] GARDNER L, NETHERCOT D A. Structural stainless steel design: A new approach [J]. Engineering structures, 2004, 82(21):21-28.
- [5] GARDNER L, ASHRAF M. Structural design for non-linear metallic materials [J]. Engineering structures, 2006, 28(6):926-934.
- [6] GARDNER L. The continuous strength method [J]. Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings, 2008, 161(3):127-133.
- [7] GARDNER L, THEOFANOUS M. Discrete and continuous treatment of local buckling in stainless steel elements [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(11):1207-1216.
- [8] GARDNER L, WANG F, LIEW A. Influence of strain hardening on the behavior and design of steel structures [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2011, 11(5):855-875.
- [9] AFSHAN S, GARDNER L. The continuous strength method for Structural stainless steel design [J]. Thin-walled structures, 2013, 68:42-49.
- [10] YANG Jing, CAI Zhoupeng, RAN Hongdong. The continuous strength method of cold-formed stainless steel equal-leg angle section stubs [J]. Science discovery, 2019, 7(5):323.
- [11] LAN Xiaoyi, CHEN Junbo, TAK-MING Chan,

et al. The continuous strength method for the design of high strength steel tubular sections in bending [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 160:499-509.

- [12] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. Testing and design of aluminum alloy cross sections in compression [J]. Engineering structures, 2014, 140(9):04014047.
- [13] SU M N, YOUNG B, GARDNER L. The continuous strength method for the design of aluminum alloy structural elements [J]. Engineering structures, 2016, 122:338-348.
- [14] ZHAO Yuanzheng, ZHAI Ximei. Bending strength and design methods of the 6082-T6 aluminum alloy beams with circular hollow sections [J]. Structures, 2020, 26:870-887.
- [15] 李新忠. 轴心受压铝合金圆管构件稳定承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
(LI Xinzong. Stability analysis of axially loaded aluminum alloy pipe [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.)
- [16] CEN. EN 1999-1-1; 2007 Eurocode 9: Design of aluminium structures-part 1-1: general structural rules [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [17] MAZZOLANI F M. 铝合金结构[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.
(MAZZOLANI F M. Aluminum alloy structure [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.)
- [18] LI Z, SCHAFER B W. Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods [C]//Recent Research and Developments in Cold-Formed steel design and Construction. Beijing: Environmental Engineering, 2010.
- [19] CEN. EN 1993-1-5; 2006 Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-5: Plated structure elements [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [20] YUN X, GARDNER L. Stress-strain curves for hot-rolled steels [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 133:36-46.
- [21] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. Journal of constructional steel research, 2003, 59(1):47-61.
- [22] ARRAYAGO I, REAL E, GARDNER L. Description of stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. Materials & design, 2015, 87(15):540-552.
- [23] 郑秀梅. 铝合金轴心受压构件试验及设计方法研究[D]. 福州:福建工程学院,2017.
(ZHENG Xiumei. Study on aluminum alloy axial compression test and the design method [D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, 2017.)
- [24] The Aluminum Association. Aluminum design manual [S]. Arlington: Aluminum Association inc, 2010.

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)