

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.178

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



高温下不锈钢螺栓的材料性能试验研究

张筠, 林辉, 胡鹰, 杨成博

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:为了给建筑钢结构螺栓连接的抗火性能分析与抗火设计提供依据,对不锈钢螺栓高温下的力学性能进行试验研究,开展了两组不同等级不锈钢螺栓高温下的拉伸试验,得到了不同温度下不锈钢螺栓的全应力-应变曲线。对不锈钢螺栓高温下的弹性模量、屈服强度和极限强度进行分析,将试验结果与不锈钢母材和耐火钢螺栓在高温下力学性能进行了对比,并对比相关规范关于不锈钢母材的推荐值,提出了不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度的折减模型。研究结果表明:不锈钢螺栓高温下的极限强度折减系数与欧洲规范 EC3 中对不锈钢母材的推荐值相近,弹性模量折减系数差距较大。温度低于 650 °C 时,不锈钢螺栓相比不锈钢母材屈服强度下降更慢;温度在 500~900 °C 时,不锈钢螺栓相比耐火钢螺栓强度和弹性模量下降更慢。

关键词: 不锈钢; 螺栓; 高温; 弹性模量折减; 强度折减

中图分类号: TU317.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)02-0143-06

Mechanical properties of stainless steel bolts at elevated temperatures

Zhang Jun, Lin Hui, Hu Ying, Yang Chengbo

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: To provide the basis for the analysis and design of fire-resistance of bolt connections in steel building, the mechanical properties of the stainless steel bolt at elevated temperature were studied. Two groups of stainless steel bolts with different grades were tested to obtain the full stress-strain curve of stainless steel bolts at different temperatures. The Young's modulus, 0.2% proof strength and tensile strength of stainless steel bolts were derived. The test results were compared with the mechanical properties of the parent materials and fire-resistant bolts at elevated temperatures, and the recommended values for parent materials in relevant design standards. Based on the experimental data, reduction factors models for tensile strength, Young's modulus and 0.2% proof strength are proposed in this paper for stainless steel bolts at elevated temperatures. The test results shows that the tensile strength degradation of stainless steel bolts at elevated temperatures are found to be rather close to those recommended by Eurocode 3 for their parent materials, but the reduction factors of Young's modulus are of great discrepancy. When temperatures lower than 650 °C, the 0.2% proof strength of stainless steel bolts decreases more slowly than that of their parent materials. In the temperature range of 500 to 900 °C, the stainless steel bolts retain

收稿日期: 2019-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51578092); 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2016jcyjA1097)

作者简介: 张筠(1965-), 女, 主要从事金属材料性能研究, E-mail: zhang_jun99@163.com.

胡鹰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: y. hu@cqu.edu.cn.

Received: 2019-09-24

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578092); Chongqing Science and Technology for Fundamental Science and Leading Technology (No. cstc2016jcyjA1097)

Author brief: Zhang Jun (1965-), main research interest: mechanical properties of metal material, E-mail: zhang_jun99@163.com.

Hu Ying (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: y. hu@cqu.edu.cn.

their tensile strength, Young's modulus and 0.2% proof strength better than fire-resistant bolts.

Keywords: stainless steel; bolts; elevated temperatures; stiffness degradation; strength degradation

不锈钢是指以不锈、耐腐蚀性为主要特征,且铬(Cr)含量至少为10.5%,碳(C)含量最大不超过1.2%的钢^[1]。不锈钢构件的抗火性能较碳钢构件要好很多,相同条件下的约束柱,不锈钢的抗火性能能够达到碳钢的两倍^[2]。此外,不锈钢结构由于其突出的建筑美学优势、良好的耐腐蚀性能和较低的全寿命周期成本,迅速在建筑结构领域得到广泛应用,取得了很好的社会效益和经济效益,成为最得到认可的建筑材料^[3]。

螺栓连接是钢结构建筑最常见的连接方式之一,作为节点的基本组成部分,螺栓通常承受着火灾等灾害产生的附加荷载,对结构的承载安全至关重要。不锈钢螺栓可以由各种不锈钢合金制得,其极限强度可以达到480~1500 MPa。虽然高强度碳钢螺栓以其更高的强度及新的设计方法得到了广泛应用,如8.8级和10.9级螺栓,但其在火灾中的力学性能下降速度比普通碳钢螺栓更快^[4]。Cen^[5]肯定了不锈钢螺栓在建筑钢结构中潜在的实用价值,为不锈钢螺栓的大力发展埋下了伏笔。目前,对螺栓高温下力学性能的研究,主要针对高强度螺栓。Kodur等^[6]对美国的高强螺栓A325、A490在火灾下的性能劣化进行了研究,随后Lange等^[7]研究了10.9级高强螺栓高温下的力学性能。Ohlund等^[8]尝试从微观结构上探讨不同类型的超高强螺栓的物理性能。而有关不锈钢螺栓高温下力学性能的研究,仅有Moreno等^[9]关于M12不锈钢螺栓抗火性能的报道,其研究重点是螺栓的极限强度及其失效机制,报道中涉及强度和弹性模量的折减数据十分有限。为了给

建筑结构节点火灾下的性能分析提供依据,有必要加强不锈钢螺栓高温下的力学性能研究。

Hanus等^[10]对8.8级高强度螺栓火灾下的性能进行了试验研究,试验涉及加热和冷却两个阶段,以模拟“自然火灾”情况。其中,冷却阶段很重要,因为在冷却时,建筑结构中受到轴向约束的构件会产生拉应力。笔者研究的目的是不锈钢螺栓在特定温度下强度和弹性模量的折减情况,所以,只进行恒温条件下的试验研究。为了获得高温下不锈钢螺栓的弹性模量和强度折减数据,给不锈钢螺栓高温下的材料性能分析提供依据,进行了不锈钢螺栓高温下的单向拉伸试验,获得了不锈钢螺栓不同温度下完整的应力-应变曲线,提取出了强度和弹性模量折减系数,并对比了其他文献报道的试验结果和相关规范的推荐值。基于试验结果,提出了不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度的折减模型。

1 试验研究

1.1 试件设计

试验采用A4-70级和A4-80级^[11]不锈钢螺栓,螺栓直径均为20 mm,两组螺栓均按ISO 4014标准^[12]加工制造。螺栓原材料化学成分见表1。螺栓主要由若干铁基合金制成,如EN 1.4401和EN 1.4404奥氏体钢。这些铁基合金含有钼、镍和铬元素,使螺栓具有耐腐蚀性和可焊性。同时,通过冷锻,提高了两组螺栓的极限强度。

原材料力学性能见表2。

表1 不锈钢螺栓原材料化学成分

Table 1 Chemical composition of stainless steel bolts

螺栓等级	原材料	化学成分(质量分数)/%								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
A4-70	316L	0.018	0.38	1.17	0.033	0.001	16.21	2.03	10.18	0.31
A4-80	316L	0.03	0.39	1.04	0.028	0.001	16.06	2.03	10.02	

表2 螺栓原材料力学性能和试验温度

Table 2 Material properties at room temperature and testing temperatures

螺栓等级	原材料	螺栓直径	屈服强度	极限强度
		D/mm	$f_{0.2}$ /MPa	f_u /MPa
A4-70	316L	20	620	810
A4-80	316L	20	650	880

试件均由不锈钢螺栓按欧规EN 10002-5^[13]规范或美规E21-92^[14]制备。对于高温下材料的力学性能试验研究,这两个规范中明确规定了金属材料拉伸试验试件的形状和尺寸。试样的原始标距 L_0 与原始横截面积 S_0 应符合

$$L_0 = 5.65 \sqrt{S_0}$$

试件的详细尺寸如图1所示。试验温度变化范

围为 20~900 °C, 每组试验温度包括 20、100、200、300、400、500、600、700、800、900 °C 共 10 个目标温度点, 每个性能等级和每个目标温度测试 3 个试件。因此, 两组性能等级共测试 60 个试件。

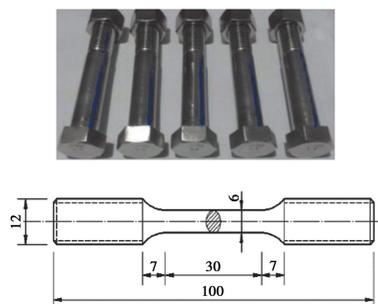


图 1 试件尺寸

Fig. 1 Geometry of tension coupon specimens

1.2 试验装置和试验方法

试验采用 INSTRON8862 电液伺服万能试验机, 最大加载荷载为 300 kN。加热炉最高加热温度为 1 500 °C。为了控制加热炉内的升温速率, 将 3 对热电偶丝连接到加热炉上。试验装置如图 2 所示。试验时, 每分钟升温 50~80 °C。虽然相对较快的升温速率在较低的温度范围内可能会导致“温度过冲”问题^[15], 但在接近目标温度时, 通过数字控制系统稍微降低输入功率, 可以防止这种情况的发生。

每个试件的两端都有用于夹持的螺纹, 试件下端在拉伸试验开始前加热时可以自由膨胀。

试验采用位移控制进行加载。在达到极限强度之前, 加载速率为 0.03 mm/min。达到极限强度之后, 将加载速率提高到 0.75 mm/min, 直至断裂。试验采用的高温引伸计标距为 12.5 mm, 测量量测为 ±2.50 mm。根据 Chen 等^[15]的研究, 在测试过程中, 当引伸计达到量程上限时, 应将引伸计重置并重新开始测量, 循环往复, 得到一个完整的应力-应变曲线。

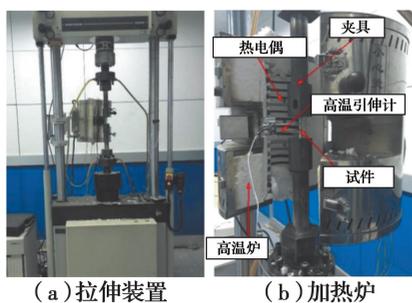


图 2 试验装置

Fig. 2 Tensile test set-up

由于笔者的目的是研究不锈钢螺栓在高温下强度和弹性模量的折减情况, 因此, 仅进行稳态试验, 即每个试件在加热至目标温度后, 继续恒温 15 min, 以确保整个试件均匀地达到目标温度, 然后再加载至破坏。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

图 3 列出了各温度下材性试件拉伸破坏后的形式(从左至右分别为 20~900 °C 的材性试件), 由图 3 可以看出, 在 100~300 °C 温度范围内, 试件拉伸形变量随温度的升高而降低, 而在温度超过 300 °C 后, 形变量随温度的升高而增大。另外, 当温度达到 300 °C 时, 由于强氧化作用, 材性试件的断口颜色开始改变并逐渐加深, 且随着温度的升高, 试件颈缩现象逐渐明显。

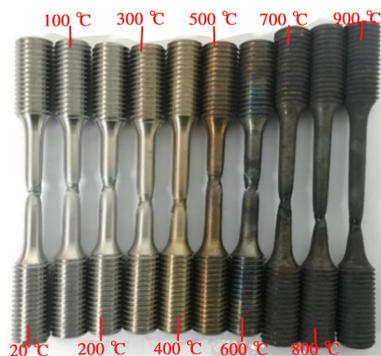


图 3 高温材性试件破坏

Fig. 3 Failure modes of test specimens

2.2 应力-应变曲线

图 4 为两个性能等级的螺栓在各个目标温度下的应力-应变曲线(图中数据为 3 个试件的平均值)。由图 4 可以看出, 在屈服之前, 不锈钢螺栓的应力-应变曲线都表现为线弹性, 屈服后便呈现出明显的非线性行为。两组不锈钢螺栓在高温下仍然表现出良好的变形能力, 且延性变化相似, 均是随着温度的升高有明显的下降, 而 300 °C 后则显著上升。

2.3 弹性模量

试验得到的各个温度下不锈钢螺栓弹性模量折减系数变化情况如图 5 所示(不锈钢螺栓的弹性模量 E 为应力-应变曲线线性弹性范围的斜率)。其中, 弹性模量折减系数定义为某一特定温度下的弹性模量与常温下弹性模量之比。由于两个等级的不锈钢螺栓实测弹性模量折减情况差距极小, 因此, 取 A4-70 和 A4-80 两个等级不锈钢螺栓的均值。

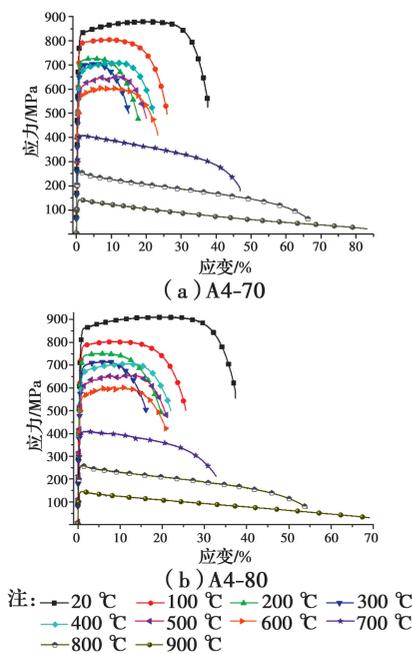


图4 不锈钢螺栓的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of stainless steel bolts

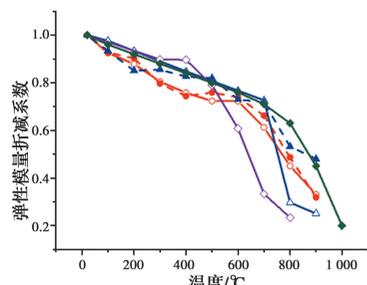


图5 弹性模量折减系数

Fig. 5 Reduction factors of Young's modulus at elevated temperatures

图5将试验结果与其他学者的报道进行了对比。由图5可以看出,温度大于600℃时,不锈钢螺栓的弹性模量急剧下降,这与 Sakumoto 等^[16]和 Ala-Outinen^[17]关于 SUS316 (EN 1. 4401) 和 SUS316Ti (EN 1. 4571) 不锈钢母材的高温试验结果相似。温度超过500℃时,相比于不锈钢螺栓, Sakumoto 等^[18]试验用耐火钢螺栓的弹性模量下降更为迅速。因此,在火灾发生时,相比耐火钢螺栓,不锈钢螺栓可以更好地维持弹性模量。

图5还将试验结果与相关规范推荐值进行了对比。从整体上看,欧洲规范 EC 3^[19]中对于不锈钢母材高温弹性模量折减系数推荐值偏大,推荐值不能很好地适用于不锈钢螺栓。

2.4 屈服强度

试验得到的各个温度下不锈钢螺栓屈服强度折减系数变化情况如图6所示。可以看到,对于不锈钢螺栓,屈服强度折减系数趋势与弹性模量相似,两者都在温度超过600℃时出现大幅度下降。

图6将试验结果与其他学者的报道和规范推荐值进行了对比。由图6可以发现, Sakumoto 等^[16]和 Ala-Outinen^[17]关于 SUS316 (EN 1. 4401) 和 SUS316Ti (EN 1. 4571) 不锈钢母材的高温试验结果与试验结果基本一致。但是,在温度低于650℃的较低范围内,不锈钢螺栓相比不锈钢母材屈服强度退化更慢。与不锈钢螺栓不同的是,当温度超过500℃时,耐火钢螺栓的屈服强度再次表现出更大幅度的下降。

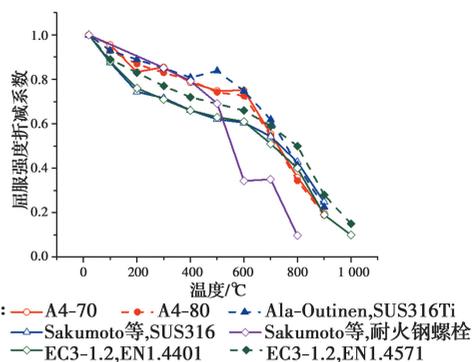


图6 屈服强度折减系数

Fig. 6 Reduction factors of 0.2% proof strength at elevated temperatures

2.5 极限强度

图7将试验结果与其他研究结果和规范推荐值进行了对比。与弹性模量和屈服强度的试验结果一样,在温度超过600℃时,不锈钢螺栓的极限强度剧烈下降。而耐火钢螺栓的极限强度在500℃或者更低温度时便发生剧烈下降,且下降速度更快。同时,虽然耐火钢螺栓在几乎整个温度范围内具有比高强度螺栓更高的极限强度,但温度超过500℃时,耐火钢螺栓的极限强度不如不锈钢螺栓。不锈钢螺栓高温下极限强度折减系数与欧洲规范 EC3^[19]给出的不锈钢母材推荐值基本相同。

3 折减模型

试验得到的不锈钢螺栓高温下弹性模量折减系数比欧洲规范 EC3^[19]给出的关于不锈钢母材屈服强度折减系数的推荐值小。另一方面,在温度低于600℃时,屈服强度的折减系数明显大于欧洲规范 EC3^[19]给出的关于不锈钢母材屈服强度折减系数的

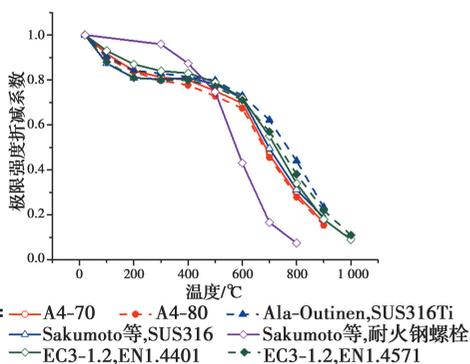


图 7 极限强度折减系数

Fig. 7 Reduction factors of tensile strength at elevated temperatures

推荐值,但在更高温度时则相反。因此,有必要提出新的折减模型。

基于 Chen 等^[20]的研究成果,提出了改进的不锈钢螺丝高温下的折减模型。

根据不同试验温度下的折减系数,利用最小二乘法对拟合公式中系数 a 、 b 、 c 和 n 进行拟合,得到不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度的折减模型

$$E_{\theta}/E_{20} = \alpha - (\theta - b)^n / c$$

$$f_{0.2,\theta}/f_{0.2} = \alpha - (\theta - b)^n / c$$

$$f_{u,\theta}/f_u = \alpha - (\theta - b)^n / c$$

由拟合结果发现,在温度低于 600 °C 时,可以使用共同的系数对不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度折减系数进行拟合,如表 3 所示。但当温度大于 600 °C 时,则需要不同的系数进行拟合,如表 4 所示。

表 3 600 °C 以下折减模型拟合系数

Table 3 Common coefficients for the reduction models for temperatures up to 600 °C

系数	20 °C ≤ θ ≤ 600 °C
a	1.35
b	-58.0
c	9.6
n	0.28

图 8 给出了不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度折减模型与试验结果以及欧洲规范 EC3^[19]推荐值的对比。由图 8 可以看出,对于试验所用的不锈钢螺栓,相比新提出的预测模型,欧洲规范 EC3^[19]关于弹性模量折减系数的推荐值偏于保守,而关于极限强度折减系数的推荐值在 700 °C 之前则偏于不安全。对于极限强度折减系数,折减模

型的预测值与欧洲规范 EC3^[19]推荐值相当接近。

表 4 600 °C 以上折减模型拟合系数

Table 4 Coefficients for the reduction models for temperatures above 600 °C

物理量	a	b	c	n
弹性模量($E_{\theta}/E_{20}, \theta > 600$ °C)	1.60	-11.0	720	1.0
屈服强度($f_{0.2,\theta}/f_{0.2}, \theta > 600$ °C)	2.35	-24.9	75.7	0.746
极限强度($f_{u,\theta}/f_u, \theta > 600$ °C)	3.92	-2.24	3.34	0.372

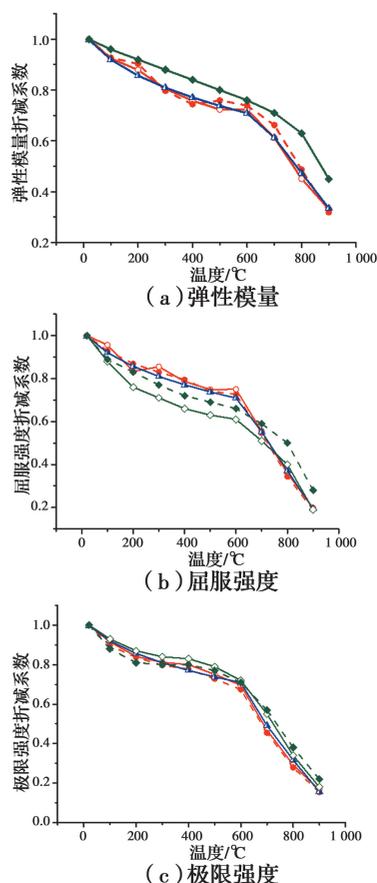


图 8 折减模型与试验折减系数以及欧规的对比

Fig. 8 Comparison among proposed, experimental and EC3's reduction factors

4 结论

研究了 A4-70 级和 A4-80 级不锈钢螺栓在 20~900 °C 温度范围内相关性能试验结果,包括弹性模量、屈服强度和抗拉强度。共测试了 60 个试件,得到了以下结论:

1) 温度高于 500 °C 时,相比于耐火钢螺栓,不锈钢螺栓可以更好地维持弹性模量、屈服强度和极限强度。

2)温度低于 650 °C 时,与欧洲规范关于不锈钢母材的推荐值相比,不锈钢螺栓的屈服强度折减系数偏大。

3)不锈钢螺栓高温下极限强度折减系数与欧洲规范关于不锈钢母材的推荐值基本保持一致。

4)不锈钢螺栓高温下弹性模量的折减趋势与欧洲规范关于不锈钢母材的推荐值基本相同,但折减速度比较缓慢。

5)温度低于 600 °C 时,不锈钢螺栓高温下弹性模量、屈服强度和极限强度折减系数相同,可以使用同样的折减模型。

参考文献:

- [1] 不锈钢和耐热钢牌号及化学成分:GB/T 20878—2007 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
Stainless and heat-resisting steels-Designation and chemical composition:GB/T 20878-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [2] RODRIGUES J P C, LAÍM L. Comparing fire behaviour of restrained hollow stainless steel with carbon steel columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 153:449-458.
- [3] BADDON N R. Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(11):1199-1206.
- [4] HU Y, SHEN L, NIE S D, et al. FE simulation and experimental tests of high-strength structural bolts under tension [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 126:174-186.
- [5] CEN. Design of Steel Structures-Part 1-4:General rules-supplementary rules for stainless steels; Eurocode 3: [S]. Brussels:European Committee for Standardization, 2006.
- [6] KODUR V, KAND S, KHALIQ W. Effect of temperature on thermal and mechanical properties of steel bolts [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(6):765-774.
- [7] LANGE J, GONZÁLEZ F. Behavior of high-strength grade 10.9 bolts under fire conditions [J]. Structural Engineering International, 2012, 22(4):470-475.
- [8] OHLUND C E I C, LUKOVIC M, WEIDOW J, et al. A comparison between ultra-high-strength and conventional high-strength fastener steels; mechanical properties at elevated temperature and microstructural mechanisms [J]. ISIJ International, 2016, 56(10): 1874-1883.
- [9] MORENO E N, BADDON N R. Stainless steel in fire [M]. United Kingdom, Silwood Park, Ascot: The Steel Construction Institute, 2007.
- [10] HANUS F, ZILLI G, FRANSSSEN J M. Behaviour of Grade 8.8 bolts under natural fire conditions: Tests and model [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(8):1292-1298.
- [11] CEN. Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners-Part 1: Bolts, screws and studs; BS EN ISO 3506-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1998.
- [12] ISO. Hexagon head bolts-Products Grades A and B, MOD: ISO 4014 [S]. Switzerland : International Organization for Standardization, 2011.
- [13] CEN. Tensile testing of metallic materials - Part 5: Method of test at elevated temperatures; EN 10002 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1992.
- [14] ASTM. Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials; E21-92 [S]. West Conshohocken(PA): American Society for Testing and Materials, 1998.
- [15] CHEN J, YOUNG B. Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1):96-110.
- [16] SAKUMOTO Y, NAKAZATO T, MATSUZAKI A. High-temperature properties of stainless steel for building structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4):399-406.
- [17] ALA-OUTINEN T. Fire Resistance of Austenitic Stainless Steels Polarit 725 (EN 1. 4301) and Polarit 761 (EN 1. 4571) [M]. Finland: Technical Research Centre of Finland, 1996.
- [18] SAKUMOTO Y, KEIRA K, FURUMURA F, et al. Tests of fire-resistant bolts and joints [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(11):3131-3150.
- [19] CEN. Design of steel structures-Part 1-2:General rules-Structural fire design; Eurocode 3 [S]. European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [20] CHEN J, YOUNG B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2):229-239.