

火灾后高强螺栓连接预拉力松弛试验

陈建锋,周天华

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:针对火灾后高强螺栓预拉力松弛现象,通过对 81 个受力状态下的高强螺栓试件模拟过火试验,分别加热至不同高温,再经不同方式冷却后测定螺栓预拉力。研究了高温冷却后高强螺栓预拉力松弛变化规律。基于试验数据分析,提出了经高温自然冷却以及消防喷水冷却至常温后,高强螺栓预拉力松弛系数计算公式。研究结果表明:高强螺栓经历 300 ℃ 高温冷却后预拉力损失大约 15%~40%,500 ℃ 高温后高强螺栓预拉力损失大约 90%;自然冷却后螺栓比喷水冷却螺栓预拉力松弛程度大,且随螺栓杆径的增大这种差距越大;螺栓型号的不同,对自然冷却后高强螺栓预拉力松弛影响不明显,对高温喷水冷却后高强螺栓预拉力松弛影响表现为螺栓杆直径越小,高温喷水冷却后预拉力损失越大。

关键词:桥梁工程;高强螺栓连接;火灾后;预拉力松弛;实用计算公式

中图分类号:U448.36

文献标志码:A

Experiment on pretension force relaxation of high-strength bolt connections after fire

CHEN Jian-feng, ZHOU Tian-hua

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Aimed at pretension force relaxation phenomenon of high-strength bolt after fire, 81 specimens under pretension state were heated to different temperatures respectively and cooled down to room temperature by different ways to test their pretension forces and study the change regulations of pretension force relaxation. Based on the analysis of experiment results, the formula for pretension force relaxation coefficient after high temperature was put forward. The results indicate that pretension force of high-strength bolt loses about 15%~40% after heated to 300 ℃ and cooled and 90% after heated to 500 ℃ and cooled; Pretension force relaxation degree of high-strength bolt after natural cooled is larger than that of injecting water cooling. With the increase of bolt rod diameter, this gap is bigger. Different bolts have not obvious difference on pretension force relaxation for natural cooling, instead, for injecting water cooling the smaller the bolt diameter, the more the pretension force relaxation. 1 tab, 7 figs, 16 refs.

Key words: bridge engineering; high-strength bolt connection; post fire; pretension force relaxation; practical calculation formula

0 引言

高强螺栓连接由于其构造简单、施工方便、承载力高、便于拆卸等优点,已成为现代钢结构连接的一种重要形式,广泛应用于工业与民用建筑、桥梁工程、水利水电工程等。与普通螺栓不同,高强度螺栓工作原理是通过连接副施以设计预拉力,将被连接板件紧固连接在一起,连接刚度大,承载力高。预拉力对螺栓副起紧固作用,通常又称预紧力,其大小会影响连接的安全可靠性,尤其对高强螺栓摩擦型连接,预拉力的大小直接关系到连接的承载力^[1]。火灾作为一种多发灾害,对钢结构损伤尤为严重。高强螺栓连接的损伤乃至失效是钢结构遭受火灾作用常见的损伤破坏形式。高温火灾作用使得高强螺栓连接材料机械性能、受力以及紧固状态发生复杂的非线性变化,直接影响其安全承载性能^[2-3]。目前国内外对高强螺栓力学性能的研究主要针对常温 and 高温下,以及非受力状态高强螺栓火灾后力学性能研究^[4-13]。Kirby 等研究了高强螺栓高温下的力学响应^[4];中国学者李国强等研究了高温下高强螺栓栓材性变化,并结合数值分析,提出火灾下高强螺栓的临界温度计算公式^[7-8];王小平等通过试验及大量数值模拟研究了不同受力状态下高强螺栓高温极限承载力^[10]。虽然现有研究成果对钢结构抗火设计起到很好的指导作用,但火灾后高强螺栓由于缺乏系统的研究,工程中常常对高强螺栓连接过火后,即要求更换螺栓,或只要螺栓无松动,即认为是安全;反之,则予以更换的简单处理方式。前者偏保守,将造成浪费;后者偏不安全,会造成安全隐患^[13]。因此,研究高强度螺栓连接火灾后的受力性能十分必要与迫切。

实际火灾中,高强螺栓处于受力状态,经历火灾高温作用后,预紧的高强螺栓在高应力状态下,经历升降温交替作用,会因塑性变形产生应力松弛,导致预紧力损失,降低连接的安全可靠性,从而严重影响螺栓的连接性能。为此,本文在高强螺栓受力状态下,模拟过火试验,使螺栓经历不同高温,再采用不同降温方式进行冷却后,探讨其预紧力松弛规律,为钢结构火灾后安全性能评估及加固处理提供参考依据。

1 试验方案

考虑钢结构发生火灾后,有消防喷水灭火和无法实施消防灭火燃烧材料燃尽自然灭火 2 种方式,本次试验先在测试装置上将高强螺栓预紧力加至规范要

求值,再进行过火试验^[14]。由文献[8]可知,螺栓的临界温度大约为 600 ℃,超出此温度,在高温状态下连接已失效破坏,研究其火灾后性能已无现实意义。为此,分别设定高强螺栓达到不同的高温(300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃)时,然后自然冷却和喷水冷却至常温(20 ℃),观测冷却后螺栓松弛情况,测定螺栓高温后剩余预紧力。

试件选取工程常用的 10.9 s 高强度大六角头螺栓连接副,为考虑尺寸效应的影响,选取 3 种型号的螺栓 M16、M20、M22。根据试验的温度设计和冷却方式要求,设计了 9 组试件(其中包括 1 组常温温试验试件),每组 9 个(每种型号螺栓各 3 个试件),总计 81 个。

2 测试装置

本次试验研究受力状态下高强螺栓连接先经历高温再冷却后的预紧力损失,加载螺栓副需经历过火试验,传统轴力计无法实现。为此设计图 1 装置,用于测定高温后高强螺栓连接损伤情况。图 1 中 L1~L4 具体尺寸根据所选高强螺栓定。

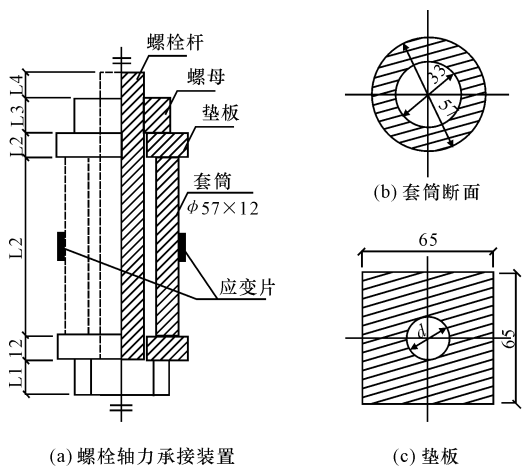


图 1 高温后高强螺栓预紧力测试装置构造
Fig. 1 Pretension force testing device structure
for high-strength bolt after heating

预紧力损失测定系统由 3 部分组成:扭矩加载装置、螺杆轴力测试装置、应变采集装置。扭矩加载利用电子数显扭力扳手。应变采集利用 DH3818 静态应变测试仪。螺杆轴力测试装置如下页图 2 所示,包括 2 块刚性垫板,1 个弹性钢套筒,粘贴于套筒两侧的应变片。

扭矩通过电子数显式扭矩扳手施加并采集。施加扭矩后,螺杆上产生预紧力,由螺母传递给两端 12 mm 的刚性垫板,再由垫板均匀传递至弹性套



图2 螺杆轴力测试装置实物

Fig. 2 Bolt axial force testing devices

筒。弹性套筒的轴力即等于螺杆上的预紧力。弹性套筒的轴力采集通过贴于套筒两侧的应变片电测法得到。

以上测试装置中弹性套筒与待测试螺栓形成了自反力平衡体系,即弹性钢套筒上的轴力与待测试螺栓上的轴力大小相等且方向相反。实时检测弹性钢套筒产生的轴向应变,就能够实时记录待测试螺栓在火灾后的预紧力大小,进一步得到待测试螺栓在火灾后的预紧力松弛量。

3 测定方法及步骤

3.1 预紧力松弛试验测定方法及步骤

高温后高强螺栓预紧力松弛试验测定方法及步骤如下。

(1) 常温扭矩系数 K_0 测定。

扭矩系数 K_0 、扭矩 T 与轴力 P 的关系如式

(1) [14], 轴力与应变 ϵ 满足式(2), 即

$$T = PdK_0 \quad (1)$$

$$P = EA\epsilon \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得式(3)

$$K_0 = \frac{T}{EA\epsilon d} \quad (3)$$

式中: E 为套筒钢材的弹性模量; A 为套筒横截面面积; d 为受测螺栓杆公称直径。

采用图2装置, 分级加载。根据实测扭矩 T 和对应的轴向应变 ϵ 带入式(3), 即可求得常温扭矩系数 K_0 。

(2) 螺栓过火后松弛状态标记。

将高强螺栓置于套筒中, 按《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)对螺栓副预紧力值 P_0 的要求, 并结合公式 $T_0 = P_0 dK_0$, 计算得到需要对螺栓副施加的初始扭矩 T_0 。然后将紧固后的螺栓副实施过火试验, 冷却至常温, 在钢套筒侧壁粘贴应变片, 标记螺栓过火后应变初始状态。

(3) 二次转角法测定高温后高强螺栓剩余预紧

力 P_T 。

所谓二次转角法, 即火灾后标记了初始状态的高强螺栓经卸载, 再二次加载的过程。通过二次加载, 记录高温后高强螺栓轴力与扭矩对应关系, 继而求得高强螺栓剩余预紧力 P_T 及扭矩系数 K_T 。

二次转角法中螺栓卸载后, 再次分级加载, 则扭矩 T_i 与轴力有如下关系

$$(P_T - \Delta P_i) dK_T = T_i \quad (4)$$

将 $\Delta P_i = EA\epsilon_i$, 代入式(4) 可得

$$T_i = (-EAdK_T)\epsilon_i + P_T dK_T \quad (5)$$

式中: T_i 为二次加载过程中第 i 级加载扭矩; ΔP_i 为第 i 级加载对应轴力的变化量; ϵ_i 为第 i 级扭矩 T_i 下, 钢套筒相对于高温冷却后标记零应变状态的轴向应变。

高温前后钢材弹性模量 E 没有明显变化, 通常高温后其弹性模量可取常温值 [3]。

式(5)是关于 T_i 、 ϵ_i 的直线方程。采用最小二乘法对各加载扭矩和对应的弹性钢套筒的轴向应变数据进行直线拟合, 得到式(5)所表示直线的斜率与截距, 分别记做 k 、 b 。用式(6)和式(7)表示, 即

$$k = -EAdK_T \quad (6)$$

$$b = P_T dK_T \quad (7)$$

联立式(6)和式(7)求解, 得高温后螺栓轴力 P_T 为

$$P_T = \frac{b}{dK_T} = -\frac{EAb}{k} \quad (8)$$

(4) 高温后螺栓预紧力松弛 P_s 。

高温前高强螺栓预紧力 P_0 、对应初始扭矩 T_0 , 二者关系为

$$P_0 = \frac{T_0}{dK_0} \quad (9)$$

高温后预紧力松弛 P_s 为

$$P_s = P_0 - P_T = \frac{T_0}{dK_0} + \frac{EAb}{k} \quad (10)$$

3.2 二次转角法适用性验证

以 M20 为例, 利用图2装置配合上述方法测定螺栓经历 300 °C 高温冷却后高强螺栓扭矩系数 K_T 及剩余预紧力 P_T 。采用二次转角法, 通过 2 次静力卸载、加载历程, 2 次测试结果见下页表 1。

对比 2 次测定结果, 相对于第一次测试结果, 采用二次转角复拧后测得扭矩系数偏差为 1.5%, 预紧力松弛测试结果偏差为 0.56%, 可见复拧对扭矩系数及高温后预紧力松弛测定影响不大, 此结论与文献 [15] 研究结论一致。因此, 本文提出的二次转角法用于火灾后高强螺栓预紧力松弛的测定是可行的。

表 1 M20 高强螺栓二次转角法复测结果对比

Tab. 1 Results comparison of wringing repeatedly method of M20

测试批 次/次	分级加载扭矩/(N·m)				分级加载应变				测试结果	
	T_1	T_2	T_3	T_4	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	K_T	P_T/N
1	210	240	301	361	100	64	7	-49	0.138 6	111 585
2	270	333	389	410	37	-28	-83	-101	0.136 5	112 207

4 试验结果与分析

经历火灾高温后,高强螺栓受到损伤,扭矩系数和预紧力均有较大变化。每组内 3 个试件试验结果差距不大。以下分析中取同组 3 个试件的平均值作为试验结果代表值。并以预紧力松弛系数 β 表示高温后高强螺栓松弛程度。 $\beta=(P_0-P_T)/P_0$,其中 P_0 、 P_T 分别为高温前、后螺杆预紧力。高温后高强螺栓预紧力损失变化规律如图 3、图 4 所示。

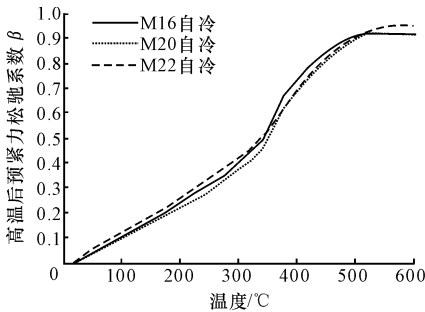


图 3 高强螺栓高温自然冷却预紧力松弛

Fig. 3 Pretension relaxation of natural cooling

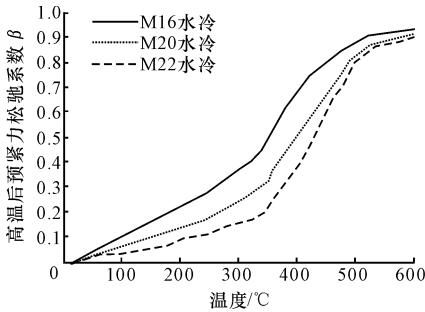


图 4 高强螺栓高温喷水冷却预紧力松弛

Fig. 4 Pretension force relaxation of injecting water cooling

4.1 火灾温度的影响

图 3、图 4 分别表示高强螺栓高温自然冷却和喷水冷却后预紧力松弛系数 β 随火灾温度 T_w 的变化规律。20 °C~600 °C 以内,高强螺栓高温后预紧力松弛系数 β 随火灾温度 T_w 升高而增大。20 °C~300 °C,曲线上 升,自然冷却和喷水冷却预紧力松弛系数 β 的最大值 分别为 0.419、0.368;400 °C~500 °C,曲线陡增,自 然冷却和喷水冷却预紧力松弛系数 β 最大值分别增 至 0.918、0.890;500 °C~600 °C,曲线趋于平缓,随

温度增大,预紧力松弛系数 β 变化不大。可见,300 °C 高温后可使高强螺栓预紧力损失大约 40%,500 °C 高温后高强螺栓预紧力损失大约 90%,预紧力丧 失殆尽。

4.2 螺栓型号的影响

试验中为考虑不同型号螺栓对结果的影响,分 别对比了 M16、M20、M22 这 3 种型号高强螺栓的 试验,结果如图 5~图 7 所示。

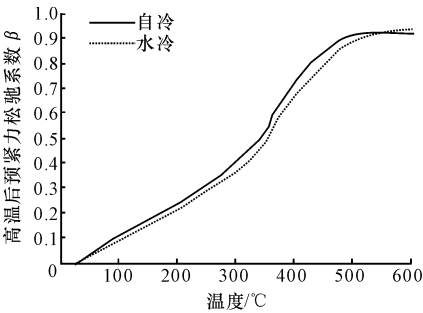


图 5 M16 高强螺栓高温后预紧力松弛系数

Fig. 5 Pretension force relaxation coefficients of M16 bolts after heating

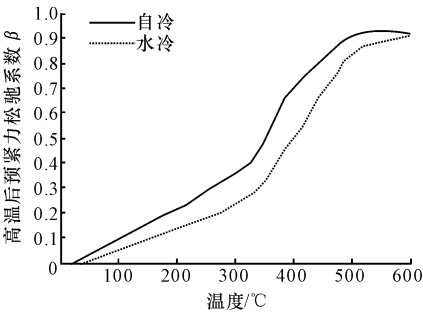


图 6 M20 高强螺栓高温后预紧力松弛系数

Fig. 6 Pretension force relaxation coefficients of M20 bolts after heating

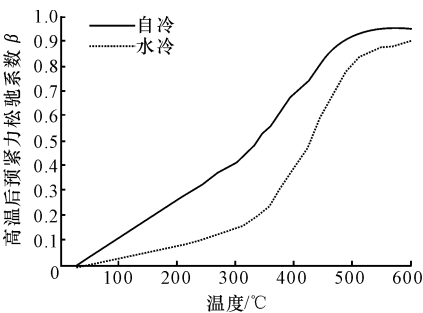


图 7 M22 高强螺栓高温后预紧力松弛系数

Fig. 7 Pretension force relaxation coefficients of M22 bolts after heating

由图 5 可见,螺栓型号的不同,对高温自然冷却后高强螺栓预紧力松弛影响不明显。相反图 6 表明,螺栓型号的不同,对高温喷水冷却后高强螺栓预紧力松弛影响明显,由图直观可见,螺栓杆直径越小,高温喷水冷却后预紧力损失越大。

4.3 冷却方式的影响

试验中采用了自然冷却、喷水冷却 2 种冷却方式。由图 5~图 7 可见,3 种型号螺栓都表现出经历相同,高温自然冷却后预紧力松弛比喷水冷却螺栓预紧力松弛系数大,且随螺栓杆径的增大这种差距越大。

4.4 试验结果分析

试验结果表明,预紧状态下的高强螺栓在经历火灾后有明显的预紧力松弛现象。火灾温度及冷却方式对高强螺栓预紧力松弛影响明显,表现为火灾温度越高,高强螺栓预紧力损失越大;相同火灾温度下,自然冷却比喷水冷却松弛系数大。此外,螺栓型号对高强螺栓高温自然冷却后预紧力松弛系数无明显影响。相反,螺栓型号对高强螺栓高温喷水冷却后预紧力松弛系数影响较为明显,表现为相同温度下,螺栓杆直径越小,高强螺栓高温喷水冷却后预紧力松弛系数越大。

由于螺栓、螺母在火灾升、降温过程中经历类似于钢材退火和淬火过程,故预紧的螺栓副在高应力状态下经历火灾,整个过程中螺栓会产生塑性变形,造成螺栓轴力松弛。随火灾温度升高,钢材在火灾过程中屈服强度下降越大,螺栓副塑性变形越大,从而呈现出随火灾温度的增大,预紧力损失增大, β 变大;此外相关研究表明,钢材在火灾升温阶段随温度升高屈服强度下降很大,降温段屈服强度有一定恢复,且水冷后屈服强度恢复较自然冷却大,随火灾温度越高,这种淬火效应越明显,冷却方式对过火后钢材屈服强度影响表现为自然冷却比水冷屈服强度下降大^[2,3,16]。因此,对螺栓副而言,经历火灾自然冷却后塑性残余变形也大,从而表现出螺栓高温自然冷却后预紧力松弛比喷水冷却预紧力松弛大;螺栓型号对高强螺栓高温自然冷却后预紧力松弛系数无明显影响,对高强螺栓高温喷水冷却后预紧力松弛系数有一定影响。对经历相同火灾温度喷水冷却后的高强螺栓副,螺栓杆径越小,螺栓外露表面积也越小,高温喷水冷却淬火影响随之减小,降温段钢材屈服强度恢复变小,火灾后塑性残余变形量大,对应螺栓副预紧力损失也越明显。因此,螺栓杆型号越小,高强螺栓高温喷水冷却后预紧力松弛系数越大。

5 高强螺栓火灾后 β 的实用计算

根据试验结果,分以下几种情况,分别给出高温后高强螺栓预紧力松弛系数计算模型,如式(11)~式(14)。

自然冷却

$$\beta = 1.5 \times 10^{-3} T_w - 0.03 \quad (T_w \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (11)$$

$$\beta = -7 \times 10^{-6} T_w^2 + 8.2 \times 10^{-3} T_w - 1.39 \quad (300 \text{ } ^\circ\text{C} < T_w \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (12)$$

喷水冷却

$$\beta = 1.3 \times 10^{-3} T_w - 0.026 \quad (T_w \leq 300 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (13)$$

$$\beta = (-1.24 \times 10^{-8} T_w^3 + 1.72 \times 10^{-5} T_w^2 - 7.62 \times 10^{-3} T_w + 1.04)(d-16) - 6.45 \times 10^{-6} T_w^2 + 7.74 \times 10^{-3} T_w - 1.38 \quad (300 \text{ } ^\circ\text{C} < T_w \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (14)$$

考虑到相同温度下,螺栓杆径越小,高强螺栓高温喷水冷却后预紧力松弛系数越大,且实际工程中使用的高强螺栓通常不小于 M16,为便于评估分析和偏于安全,实际工程中经历火灾高温喷水冷却后的高强螺栓,可不予区分螺栓型号,统一按 M16 高强螺栓考虑,简化计算螺栓火灾高温喷水冷却后预紧力松弛系数。

6 结 语

(1)高强螺栓连接经历了火灾升温 and 降温冷却过程后,预紧力有明显松弛现象。经历 300 $^\circ\text{C}$ 高温冷却后预紧力损失大约 15%~40%,500 $^\circ\text{C}$ 高温后高强螺栓预紧力损失大约 90%;对过火温度超过 500 $^\circ\text{C}$ 时,建议更换高强螺栓。

(2)高强螺栓经历相同高温自然冷却后预紧力松弛比喷水冷却螺栓预紧力松弛程度大,且随螺栓杆径的增大这种差距越大。

(3)螺栓型号的不同,对自然冷却后高强螺栓预紧力松弛影响不明显,对高温喷水冷却后高强螺栓预紧力松弛影响表现为,螺栓杆径越小,高温喷水冷却后预紧力损失越大。

(4)提出了经高温自然冷却以及消防喷水冷却至常温后,高强螺栓预紧力松弛系数计算公式,可为火灾后钢结构损伤评估和加固分析提供参考依据。

(5)受试螺栓连接试件初始预拉力严格按照现行《钢结构施工规范》(GB 5077-2012)规定的施工预拉力施加并进行相关试验研究。实际工程中往往存在高强螺栓过拧、欠拧,以及在役螺栓应力松弛等现象。因此,螺栓工作状态下的实际预拉力并不全

等于规定施工预拉力。火灾前螺栓应力状态的不同对经历火灾后其预拉力松弛变化规律有何影响,尚需进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
CHEN Shao-fan. Principles of steel structural design [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [2] 闵明保, 李延和, 高本立, 等. 建筑物火灾后诊断与处理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994.
MIN Ming-bao, LI Yan-he, GAO Ben-li, et al. Diagnosis and treatment of existing build after fire [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology, 1994. (in Chinese)
- [3] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢筋混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
LI Guo-qiang, HAN Lin-hai, LOU Guo-biao, et al. Fire resistance design of steel structure and concrete reinforced structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. (in Chinese)
- [4] Kirby B R. The behavior of high-strength grade 8, 8 bolts in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 33(1): 3-38.
- [5] Theodorou Y. Mechanical properties of grade 8, 8 bolts at elevated temperatures [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2001.
- [6] Yura J A, Ergelhard M D, Becher E B. Behavior of bolted connections during and after a fire [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2006.
- [7] 李国强, 李明菲, 殷颖智, 等. 高温下高强度螺栓 20MnTiB 钢的材料性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 100-104.
LI Guo-qiang, LI Ming-fei, YIN Ying-zhi, et al. Experimental studies on the behavior of high-strength bolts made of 20MnTiB steel at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 100-104. (in Chinese)
- [8] 李国强, 殷颖智. 钢结构高强度螺栓连接抗火性能的有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 18-25.
LI Guo-qiang, YIN Ying-zhi. Fire-resistant behavior of high-strength bolted connections for steel structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 18-25. (in Chinese)
- [9] 陈禄如. 高温下高强度螺栓连接性能的试验研究 [J]. 钢结构进展, 2003, 5(2): 24-31.
CHEN Lu-ru. Experimental study on performance of high-strength bolt connection under high temperature [J]. Progress in Steel Building Structure, 2003, 5(2): 24-31. (in Chinese)
- [10] 王小平, 胡春宇, 陈 华. 高强度螺栓连接在高温下极限承载力的试验研究 [J]. 钢结构, 2005, 20(3): 89-91.
WANG Xiao-ping, HU Chun-yu, CHEN Hua. Experimental study on high strength bolts of ultimate bearing capacity of the connection under high temperature [J]. Steel Construction, 2005, 20(3): 89-91. (in Chinese)
- [11] 俞 珊. 高强度螺栓高温过火自然冷却后的力学性能 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
YU Shan. Mechanical properties of high-strength bolts after natural cooling [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [12] 王 锐. 高强度螺栓高温过火泼水冷却后的力学性能 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
WANG Rui. Mechanical properties of high-strength bolts after natural cooling [D]. Shanghai: Tongji University, 2009. (in Chinese)
- [13] 俞 珊, 楼国彪, 张 成. 高强度螺栓摩擦型连接火灾后抗剪试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(1): 6-14.
YU Shan, LOU Guo-biao, ZHANG Cheng. Test study on resisting shear of high strength bolt connection of after fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(1): 6-14. (in Chinese)
- [14] GB 50205—2001, 钢结构工程施工质量验收规范 [S].
GB 50205—2001, Code for acceptance of constructional quality of steel structure [S]. (in Chinese)
- [15] 于 翔, 陈绪宏, 杨章程. 高强度大六角头螺栓联接副的扭矩系数和抗滑移系数的测定方法 [J]. 理化检验: 物理分册, 2008, 44(9): 475-478.
YU Xiang, CHEN Xu-hong, YANG Zhang-cheng. Measuring method of torque coefficient and slip coefficient of high strength large six hexagon head bolts [J]. Physical Testing and Chemical Analysis: Physical Testing 2008, 44(9): 475-478. (in Chinese)
- [16] 陈建锋, 曹平周. 高温后结构钢力学性能试验 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2010, 11(3): 328-333.
CHEN Jian-feng, CAO Ping-zhou. Experimental investigation into mechanical properties of steel post high temperatures [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 11(3): 328-333. (in Chinese)

