

文章编号:1005-0930(2023)02-0428-008 中图分类号:TU391 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.02.015

高强度螺栓高温后材料性能试验研究

黄炳生¹, 陈涛¹, 荆海仓²

(1.南京工业大学土木工程学院,江苏南京211816;2.江苏省工程咨询中心,江苏南京210003)

摘要:为考察高强度螺栓高温后材料力学性能,对10.9级M22大六角头高强度螺栓高温冷却后试样进行拉伸试验,研究了不同加热温度、不同冷却方式下高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度和弹性模量的变化规律.结果表明,两种冷却方式下,高强度螺栓材料力学性能的变化规律基本一致,当加热温度不超过400℃时,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度基本不受加热温度的影响;当温度不超过300℃时,弹性模量基本不变.随着温度升高,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量迅速下降,当温度达到600℃时,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量下降到常温的70%~78%.根据试验结果,拟合得到高强度螺栓高温后材料的屈服强度、抗拉强度和弹性模量的折减系数计算公式.屈服强度、抗拉强度的折减系数结果与部分文献的结果一致,但弹性模量折减系数相差较大,有待进一步研究.

关键词:高强度螺栓;力学性能;高温;冷却方式;折减系数

20世纪80年代以来,我国的钢结构建筑蓬勃发展并逐步赶上世界领先水平.钢结构具有材料强度高、塑性和韧性强、材质均匀、符合力学计算假定的优点,但是钢材耐腐蚀性差、耐火性差^[1].钢结构建筑一旦发生火灾,结构很容易发生破坏,甚至倒塌^[2-4].大多数火灾并未造成钢结构根本性破坏,鉴定其火灾后的安全性,并对其进行加固和修复,对减小火灾发生后的经济损失具有重大意义.高强度螺栓连接是钢结构的基本连接方式,在钢结构中广泛应用.高强度螺栓材料高温后的力学性能,对整体结构火灾后的承载安全至关重要.

目前,高温后的钢材力学性能研究多针对结构钢^[5-7],对高强度螺栓材料高温后的力学性能研究较少.Kodur等^[8]进行了8.8级高强度螺栓加热-冷却循环过程中残余应力性能的试验研究,得到了8.8级高强度螺栓在过火后的强度折减系数和弹性模量折减系数的拟合公式,并探讨了螺栓在过火后的断裂模式和裂纹发展模式.楼国彪等^[9]对常用的8.8级和10.9级高强度螺栓进行了高温过火冷却后材料性能试验研究,得到了不同过火温度、不同冷却方式对高强度螺栓材料的屈服强度、极限强度和弹性模量的影响规律.唐圣林^[10]进行了8.8级和10.9级高强度螺栓过火后的拉伸试验研究,结果表明,当过火温

收稿日期:2021-08-02;修订日期:2022-08-08

作者简介:黄炳生(1962—),男,教授.E-mail:hsah8@126.com

度超过 400℃ 时,高强度螺栓的强度开始下降,过火温度超过 700℃ 时,冷却方式对高强度螺栓的性能有较大影响,并且以此建立了高强度螺栓过火冷却后的应力-应变模型。

目前国内外对高强度螺栓高温后材料的力学性能的研究并不充分,不同学者研究的结果并不一致.通过对我国常用的 10.9 级 M22 大六角头高强度螺栓高温后的材料性能开展试验研究,得到不同加热温度、不同冷却方式下的高强度螺栓高温后材料的屈服强度、抗拉极限强度和弹性模量的变化规律。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验采用 10.9 级 M22 大六角头高强度螺栓.根据江苏省土木工程与防灾减灾重点实验室试验设备的具体情况,制作高强度螺栓标准试件,试件标距 50mm,截面直径为 10mm,具体尺寸见图 1,共设计 22 个试件,其中 2 个试件用于常温试验作对比,其余试件分别加热至 200℃、300℃、400℃、500℃、600℃,分别使用自然冷却和泼水冷却两种方法,每种情况两个试件,试件详情见表 1。

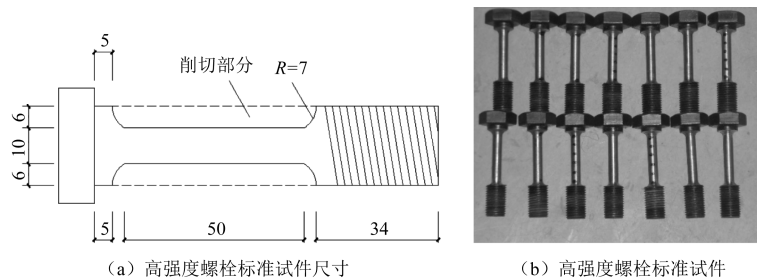


图 1 标准试件(单位:mm)

Fig.1 Standard specimens (unit:mm)

表 1 试件详情

Table 1 Details of specimens

试件	加热温度/℃	冷却方式	d/mm	试件	加热温度/℃	冷却方式	d/mm
L-1	20	—	10.06	L-4P2	400	泼水	9.92
L-2	20	—	9.82	L-4Z1	400	自然	10.10
L-2P1	200	泼水	10.10	L-4Z2	400	自然	10.00
L-2P2	200	泼水	10.06	L-5P1	500	泼水	10.04
L-2Z1	200	自然	10.00	L-5P2	500	泼水	10.08
L-2Z2	200	自然	10.00	L-5Z1	500	自然	9.98
L-3P1	300	泼水	9.86	L-5Z2	500	自然	9.86
L-3P2	300	泼水	10.06	L-6P1	600	泼水	10.08
L-3Z1	300	自然	9.92	L-6P2	600	泼水	10.10
L-3Z2	300	自然	10.06	L-6Z1	600	自然	9.92
L-4P1	400	泼水	10.00	L-6Z2	600	自然	10.00

1.2 试验装置及加载方法

加热装置采用定制电炉,自带温控设备,如图 2 所示.试验加载在江苏省土木工程与防灾减灾重点实验室的 1 000kN 电液伺服万能试验机上进行,高强度螺栓试件采用自制

夹具固定,如图3所示,试验机配有数据采集系统.

首先对试件进行加热,模拟高温过火作用,加热至指定温度后,保温 30min,再用强磁取出试件,然后分别进行自然冷却和泼水冷却.试验开始先进行预加载,速率为 0.8kN/s,加载到 5kN 稳定 1min,然后按照 1.2kN/s 的速率正式加载,直至破坏.



图2 自制电炉

Fig.2 Homemade electric furnace



图3 加载设备

Fig.3 Loading equipment

1.3 试验现象与结果

高强度螺栓标准试件加载至破坏时会发出“嘭”的一声脆响,试件破坏处出现紧缩,如图4所示,不同加热温度对高温后试件的破坏模式没有明显的影响.

通过数据采集系统得到了高温后试件的荷载-位移曲线,高强度螺栓高温后材料的屈服荷载、抗拉极限荷载如表2所示.结合高强度螺栓标准试件的实测截面积和标距得到高温后高强度螺栓试件拉伸过程的应力-应变曲线,如图5所示,由于试件夹持的滑移导致 500℃ 曲线初始段比较平缓.



(a) 高温后试件

(b) 常温试件

图4 试件破坏状态

Fig.4 Failure modes of specimens

表2 试验结果

Table 2 Results of test

试件	加热温度/℃	冷却方式	屈服荷载/kN		抗拉荷载/kN	
L1	20	—	89	86	91.6	88.1
L-2P	200	泼水	88	90	91	92.8
L-2Z	200	自然	88.6	86	90.4	87.3
L-3P	300	泼水	87	87	88.7	91.4
L-3Z	300	自然	87.6	89	89.3	91
L-4P	400	泼水	87	87.3	88.3	88.5
L-4Z	400	自然	90	89.3	91.2	90.5
L-5P	500	泼水	89.6	90	90.7	90.9
L-5Z	500	自然	87	84.7	88	85.2
L-6P	600	泼水	60.8	62	65	66.3
L-6Z	600	自然	61.7	61.8	66	66.6

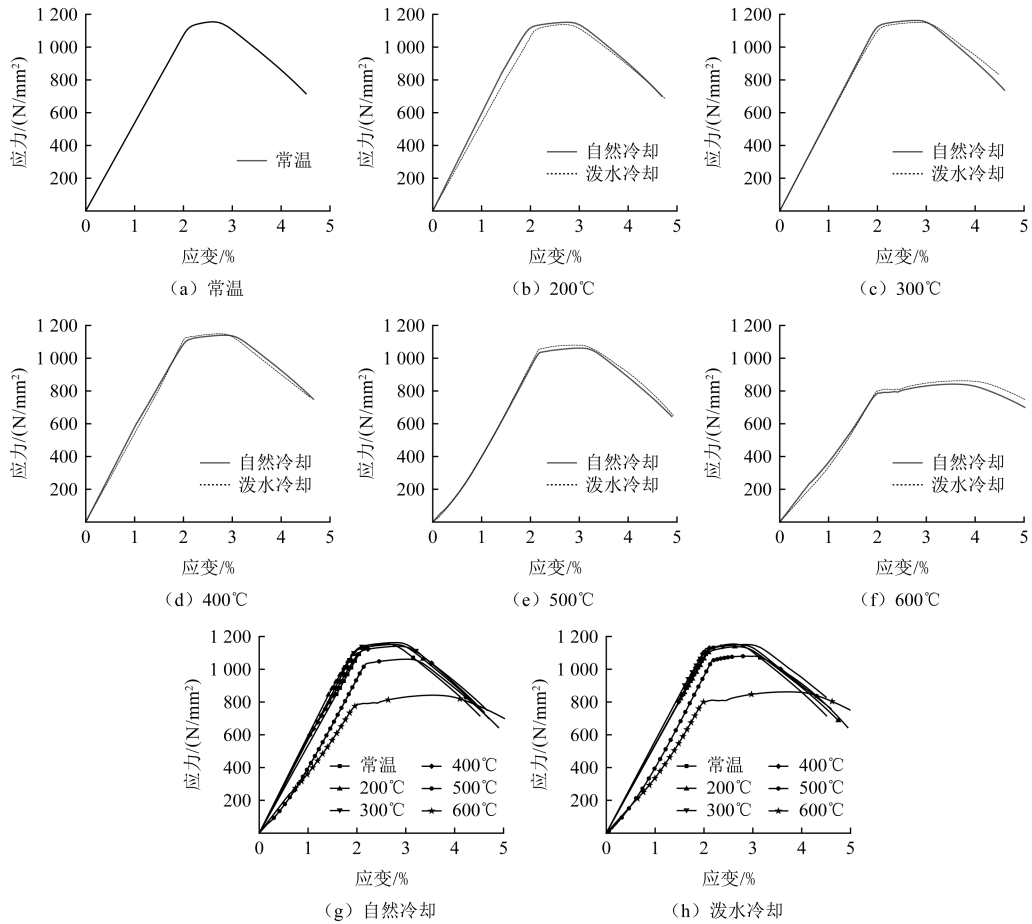


图5 应力-应变关系曲线

Fig.5 Stress-strain curves

2 试验结果分析

从图5(a)~(f)可以看出,各试件在相同温度下,两种冷却方式的应力-应变曲线基本重合,说明冷却方式对高温后高强度螺栓材料性能的影响不大,这是因为高强度螺栓已经经过热处理。从图5(g)~(h)可以看出,加热温度在400℃以内,高强度螺栓材料的应力-应变关系变化不明显;随着温度进一步升高,应力-应变曲线弹性段斜率减小,曲线最高点下降;当温度达到500℃,应力最大值比400℃时分别低了4.8%、7.3%,温度达到600℃时,应力最大值比500℃时分别降低了16.4%、19.8%,自然冷却比泼水冷却曲线略低。

根据试验结果,分析计算得出高温后高强度螺栓材料的屈服强度、屈服强度折减系数、抗拉强度、抗拉强度折减系数、弹性模量以及弹性模量折减系数,如表3、图6所示。

从图6可看出,当加热温度不超过400℃时,自然冷却和泼水冷却下,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度基本都不受加热温度的影响,上下相差不超2%。而对弹性模量,当温度不超过300℃时基本不受加热温度的影响,上下相差不超2%。随着温度升高,高强

度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量迅速下降,温度达到 600℃时,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量下降到常温的 70%~78%,自然冷却比泼水冷却下降略多.通过对加热温度超过 400℃试件的屈服强度和抗拉强度折减系数及超过 300℃试件的弹性模量折减系数的拟合,得到两种冷却方式下高温后高强螺栓材料的屈服强度、抗拉强度和弹性模量的折减系数公式.

表 3 高强度螺栓高温后材料性能折减系数

Table 3 Reduction factors of mechanical properties of high-strength bolts material after high temperature

加热温度 $T/^\circ\text{C}$	屈服强度 $f_{0.2,T}/$ (N/mm^2)		屈服强度 折减系数 $f_{0.2,T}/f_{0.2}$		抗拉强度 $f_{b,T}/(\text{N}/\text{mm}^2)$		抗拉强度 折减系数 $f_{b,T}/f_b$		弹性模量/ ($10^5\text{N}/\text{mm}^2$)		弹性模量 折减系数 E_T/E	
	泼水 冷却	自然 冷却	泼水 冷却	自然 冷却	泼水 冷却	自然 冷却	泼水 冷却	自然 冷却	泼水 冷却	自然 冷却	泼水 冷却	自然 冷却
	20	1 128	1 128	1	1	1 158	1 158	1	1	2.25	2.25	1
200	1 116	1 111	0.98	0.98	1 152	1 131	0.99	0.98	2.23	2.22	1	0.98
300	1 136	1 105	1.01	0.98	1 204	1 146	1.02	0.99	2.27	2.21	1.01	1.01
400	1 119	1 131	0.99	1	1 135	1 145	0.98	0.99	2.10	2.14	0.93	0.95
500	1 053	1 032	0.93	0.91	1 080	1 061	0.93	0.91	1.95	1.89	0.87	0.84
600	814	793	0.72	0.70	903	851	0.78	0.73	1.62	1.58	0.75	0.7

注:屈服强度、抗拉强度、弹性模量均取自两个试件试验数据的平均值.

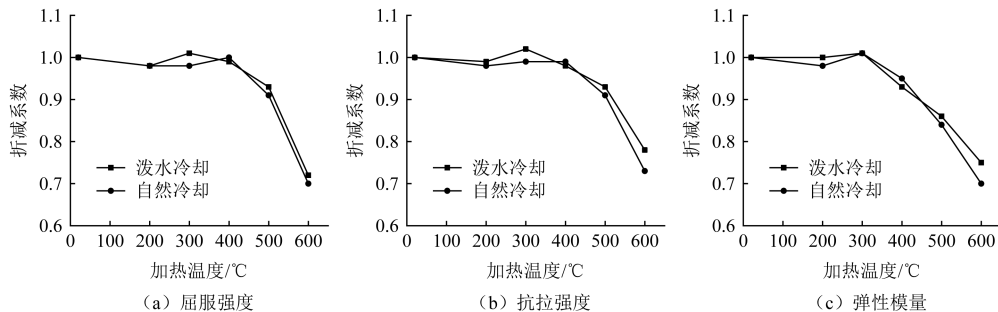


图 6 高强度螺栓高温后材料性能折减系数

Fig.6 Reduction factors of mechanical properties of high-strength bolts material after high temperature

(1) 高温后高强螺栓材料的屈服强度折减系数拟合公式

$$T \leq 400^\circ\text{C} \quad \eta_{y1} = 1.0, \eta_{y2} = 1.0 \quad (1)$$

$$400^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$\eta_{y1} = f_{yz}/f_y = 0.0045 \times T - 6 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.16 \quad (2)$$

$$\eta_{y2} = f_{yp}/f_y = 0.0056 \times T - 7 \times 10^{-6} \times T^2 - 0.12 \quad (3)$$

式中: η_{y1} 、 η_{y2} 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后屈服强度折减系数; f_{yz} 、 f_{yp} 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后屈服强度, N/mm^2 ; f_y 为高强度螺栓常温下的屈服强度, N/mm^2 ; T 为高强度螺栓过火温度, $^\circ\text{C}$.

(2) 高温后高强螺栓材料的抗拉强度折减系数拟合公式

$$T \leq 400^\circ\text{C} \quad \eta_{u1} = 1.0, \eta_{u2} = 1.0 \quad (4)$$

$$400^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$\eta_{u1} = f_{uz}/f_t = 0.00315 \times T - 4.5 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.46 \quad (5)$$

$$\eta_{u2} = f_{up}/f_t = 0.0029 \times T - 4 \times 10^{-6} \times T^2 + 0.48 \quad (6)$$

式中: η_{u1} 、 η_{u2} 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后抗拉强度折减系数; f_{uz} 、 f_{up} 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后抗拉强度, N/mm^2 ; f_t 为高强度螺栓常温下的抗拉强度, N/mm^2 ; T 为高强度螺栓过火温度, $^\circ\text{C}$.

(3) 高温后高强螺栓材料的弹性模量折减系数拟合公式

$$T \leq 300^\circ\text{C} \quad \mu_{e1} = 1.0, \mu_{e2} = 1.0 \quad (7)$$

$$300^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$$

$$\mu_{e1} = E_z/E = 0.00395 \times T - 9 \times 10^{-6} \times T^2 + 5 \times 10^{-9} \times T^3 + 0.49 \quad (8)$$

$$\mu_{e2} = E_p/E = -0.00383 \times T + 8 \times 10^{-6} \times T^2 - 6.6667 \times 10^{-9} \times T^3 + 1.61 \quad (9)$$

式中: μ_{e1} 、 μ_{e2} 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后弹性模量折减系数; E_z 、 E_p 分别为高强度螺栓自然冷却、泼水冷却后弹性模量, N/mm^2 ; E 为高强度螺栓常温下的弹性模量, N/mm^2 ; T 为高强度螺栓过火温度, $^\circ\text{C}$.

将该试验结果、楼国彪等试验结果^[9]、唐圣林试验结果^[10]和拟合公式计算结果进行对比,如图7所示.

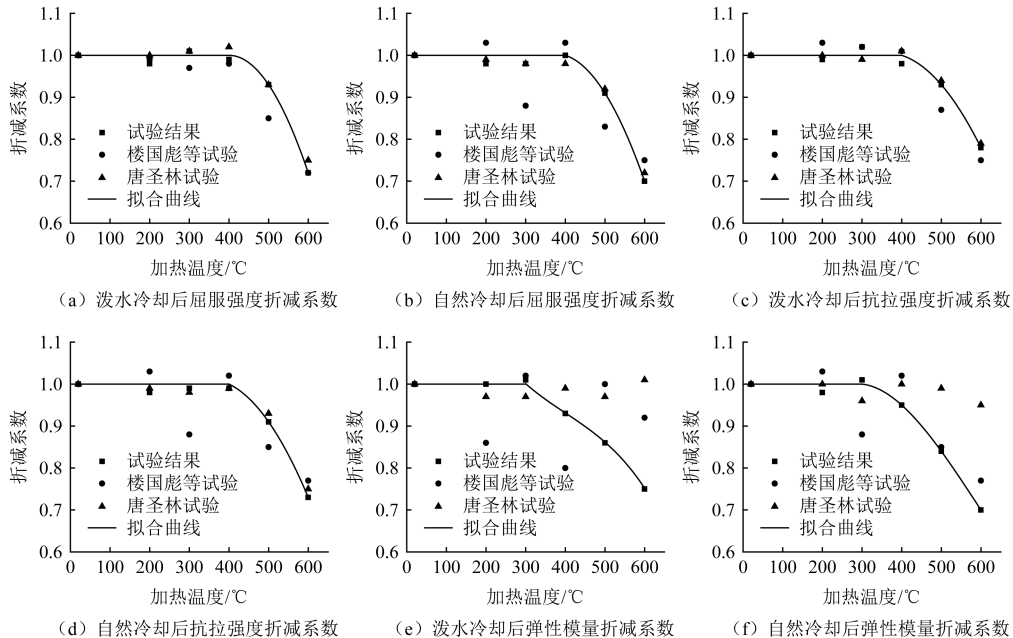


图7 不同试验结果对比

Fig.7 Comparison of different test results

由图7可以看出,本文试验与楼国彪等试验和唐圣林试验的屈服强度和抗拉强度折减系数变化规律基本一致.与楼国彪等试验相比,泼水冷却下,除500 $^\circ\text{C}$ 时屈服强度折减系

数相差约 8% 外,其他相差不到 5%;自然冷却下,除 300℃ 时相差约 10%、500℃ 时相差约 8% 外,其他相差不到 5%。泼水冷却下,400℃ 之前抗拉强度折减系数小于楼国彪等试验,400℃ 以后折减系数较大,但二者相差不到 5%;自然冷却下,除 300℃ 时相差约 10% 外,其他相差不到 5%。与唐圣林试验相比,在泼水冷却和自然冷却下二者屈服强度和抗拉强度折减系数均相差不到 3%。此外,本文试验与楼国彪等试验的弹性模量折减系数相比,泼水冷却下,除 300℃ 时相差约 1% 外,其他相差较大,200℃、400℃ 时约为 14%,500℃ 时约 10%,600℃ 时约 16%;自然冷却下,除 300℃ 时相差约 12%、400℃ 和 600℃ 相差约 7% 外,其他相差不到 5%。与唐圣林试验相比,泼水冷却下,除 400℃ 之前相差不到 4% 外,其他相差较大,分别为 500℃ 时约 18%,600℃ 时约 25%;自然冷却下,除 400℃ 之前相差不到 5% 外,其他相差较大,分别为 500℃ 时约 15%,600℃ 时约 25%。由此可见,三者弹性模量折减系数结果相差较大,有待进一步研究。

3 结论

通过 10.9 级 M22 大六角头高强度螺栓高温后自然冷却和泼水冷却下材料力学性能的试验,得到如下结论:

(1) 不同冷却方式下,高强度螺栓高温后材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量基本一致;

(2) 当加热温度不超过 400℃ 时,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度基本不受加热温度的影响,当温度不超过 300℃ 时,弹性模量基本不变,上下相差不超 2%。随着温度升高,高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量迅速下降,自然冷却比泼水冷却下降略多;

(3) 根据试验结果,拟合得到高强度螺栓材料的屈服强度、抗拉强度、弹性模量折减系数计算公式;

(4) 本文试验屈服强度折减系数、抗拉强度折减系数结果与部分文献结果比较一致,但弹性模量折减系数结果相差较大,有待进一步研究。

参考文献

- [1] 陈绍蕃,顾强.钢结构基础[M].北京:中国建筑工业出版社,2005
Chen Shaofan, Gu Qiang. Steel structural foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005
- [2] 鞠竹,王振清,韩玉来,等.火灾高温作用下钢结构倒塌分析[J].工程力学,2014,31(增1):121-124
Ju Zhu, Wang Zhenqing, Han Yulai, et al. Structure collapse analysis of steel frame under fire condition [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (S1): 121-124
- [3] 蒋亚强,王良伟,钟波.真实火灾下单层门式钢架倒塌性能研究[J].建筑结构学报,2020,41(4):51-58
Jiang Yaqiang, Wang Liangwei, Zhong Bo. Full scale test on anti-collapse performance of a single-story steel portal frame in real fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(4): 51-58
- [4] 赵前程,陈永强,刘奕,等.火灾作用下体育馆结构破坏数值分析[J].应用基础与工程科学学报,2008,16(6):854-862
Zhao Qiancheng, Chen Yongqiang, Liu Yi, et al. Numerical analysis on fire induced structure failure of gymnasium [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(6): 854-862
- [5] Outinen J, Mkelinen P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down [J]. Fire and Materials, 2004, 28: 237-251

- [6] Wang W, Liu T, Liu J. Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 100-109
- [7] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后 Q235 钢材力学性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 245-249
Ding Faxing, Yu Zhiwu, Wen Hailin. Experimental research on mechanical properties of Q235 steel after high temperature treatment [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 245-249
- [8] Kodur V, Yahyai M, Rezaeian A, et al. Residual mechanical properties of high strength steel bolts subjected to heating-cooling cycle [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 131: 122-131
- [9] 楼国彪, 俞珊, 王锐. 高强度螺栓过火冷却后力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 33-40
Lou Guobiao, Yu Shan, Wang Rui. Mechanical properties of high-strength bolts after fire [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 33-40
- [10] 唐圣林. 高强度螺栓和不锈钢螺栓在高温下与过火后的性能研究及其应力-应变模型的建立 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019
Tang Shenglin. The investigation on the properties and stress-strain model of high-strength bolts and stainless steel bolts during and after fire [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019

Mechanical Properties of High-strength Bolts Material after High Temperature

HUANG Bingsheng¹, CHEN Tao¹, JING Haicang²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2. Jiangsu Engineering Consulting Center, Nanjing 210003, China)

Abstract

In order to investigate the mechanical properties of high-strength bolts after high temperature, the tensile test of the specimen of 10.9 grade M22 big six angle high-strength bolts after high temperature was carried out. The variation rules of yield strength, tensile strength and elastic modulus of high-strength bolts material under different heating temperatures and cooling methods were studied. The results show that the mechanical properties of high-strength bolts material are basically the same under the two different cooling methods. When the heating temperature is not more than 400°C, the yield strength and tensile strength of high-strength bolts material are basically not affected by the heating temperature. When the temperature does not exceed 300°C, the elastic modulus is nearly unchanged. With the increase of temperature, the yield strength, tensile strength and elastic modulus of high-strength bolts material decrease rapidly. When the temperature reaches 600°C, the yield strength, tensile strength and elastic modulus of high-strength bolts material decrease to 70% ~ 78% of normal temperature. According to the test results, the formulas of reduction factors of yield strength, tensile strength and elastic modulus of high-strength bolts material after high temperature are obtained by fitting. The results of yield strength reduction factors and tensile strength reduction factors in this paper are consistent with those of some scholars, but the results of elastic modulus reduction factors of different scholars are quite different, which need to be studied further.

Keywords: high-strength bolt; mechanical properties; high temperature; cooling method; reduction factor