

火灾后摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数变化规律 试验研究

张菊¹, 赵东拂^{1,2,3,4,5}, 刘育民^{6*}, 符演¹, 熊海江¹

(1.北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 100044; 2.北京建筑大学大型多功能振动台阵实验室,北京 100044; 3.北京建筑大学工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心,北京 100044; 4.北京建筑大学北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心,北京 100044; 5.北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心,北京 100044; 6.中电投工程研究检测评定中心有限公司,北京 100142)

摘要: 抗滑移系数是影响摩擦型高强螺栓连接承载力的主要因素之一。为研究火灾后摩擦型高强螺栓连接的剩余承载力,本文设计了由10.9级M20摩擦型高强螺栓和Q355B钢板组成试件的受剪试验,研究了钢板不同表面处理方式、不同加热温度自然冷却后摩擦型高强螺栓的抗滑移系数及其折减系数的变化规律。研究结果表明:钢板表面处理方式会影响摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数,且这种影响会随着加热温度的升高有所增大,加热温度相同时采用喷砂表面处理方式螺栓连接的抗滑移系数比采用金属去毛刺打磨表面处理方式螺栓连接的抗滑移系数更大;当加热温度不超过300℃时,高温冷却过程对摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数影响不大,超过300℃后,高温冷却过程对螺栓连接的抗滑移系数有显著提高作用,且对采用金属去毛刺打磨表面处理方式螺栓连接的抗滑移系数的提高作用比采用喷砂表面处理方式螺栓连接的抗滑移系数的提高作用大。根据试验结果采用双折线模型对试件的抗滑移系数折减系数进行拟合,给出了采用金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式的摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数折减系数的计算公式和拟合曲线。

关键词: 摩擦型高强螺栓; 火灾; 金属去毛刺打磨; 喷砂; 抗滑移系数; 折减系数

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0070-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240703002

Experimental Study on the Variation Law of Anti-slip Coefficient of Friction-Type High-Strength Bolts after Fire

ZHANG Ju¹, ZHAO Dongfu^{1,2,3,4,5}, LIU Yumin^{6*}, FU Yan¹, XIONG Haijiang¹

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 4. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 5. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044,

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 北京建筑大学研究生创新项目(PG2024029)

作者简介:

张菊(1999—),女,硕士研究生,主要从事钢结构抗火性能方面的研究。E-mail: zjyx1010@163.com。

赵东拂(1967—),男,博士,教授,主要从事结构理论及工程应用和公共安全方面的研究。

通信作者:

刘育民(1979—),男,硕士,正高级工程师,主要从事钢结构抗火性能方面的研究。E-mail: lymsfjd@163.com。

China; 6. C+E Center for Engineering Research Test and Appraisal Co., Ltd., Beijing 100142, China)

*Corresponding author: lymsfd@163.com

Abstract: Anti-slip coefficient is one of the main factors affecting the bearing capacity of friction-type high-strength bolted connections. In order to study the residual bearing capacity of such connections after fire, a specimen composed of 10.9 grade M20 friction-type high-strength bolt and Q355B steel plate was designed for shear test, and the change rules of anti-slip coefficient and its reduction factor of the friction-type high-strength bolts were investigated after the natural cooling of the steel plate with different surface treatments and heating temperatures. The results show that the steel plate surface treatment will affect the anti-slip coefficient of friction-type high-strength bolt connection, and this effect will increase with the rise of the heating temperature. Under the same temperature condition, the connection with sandblasted surface treatment exhibits a higher anti-slip coefficient than that with metal deburring grinding surface treatment. When the heating temperature is not more than 300 °C, the high temperature natural cooling process has little effect on the anti-slip coefficient. When the temperature is more than 300 °C, the high temperature natural cooling process has a significant enhancing effect on the anti-slip coefficient. According to the test results, the reduction factors of the anti-slip coefficient for the specimens were fitted using a bilinear model. Calculation formulas and fitting curves of the reduction factors were proposed for friction-type high-strength bolted connections with both metal deburring grinding and sandblasted surface treatments.

Keywords: friction-type high-strength bolt; fire; metal deburring and grinding; sandblasting; anti-slip coefficient; reduction factor

近年来,钢结构因其自重轻、安装便捷等优点得到快速发展,高强螺栓连接作为钢结构中构件连接的主要方式之一,被广泛应用于各类建筑中。然而,钢材耐火性较差,当钢结构发生火灾时,高温可能会改变高强螺栓连接件摩擦面的粗糙程度,影响高强螺栓连接的可靠性。不同钢板表面处理方式具有不同的表面粗糙度,会直接影响钢板接触面的摩擦系数,进而影响连接的抗滑移性能。我国火灾频发^[1],大量火灾案例表明,钢结构建筑在火灾后部分连接节点仍能工作或经修复加固后可继续使用。因此,研究火灾后高强螺栓连接的剩余力学性能,对钢结构建筑火灾后安全性鉴定及修复加固工作具有重要意义。

国内外学者通过高温加热方式模拟火灾,对高温下及高温后高强螺栓的力学性能和剩余承载力进行了广泛研究^[2-12]。REZAEIAN等^[13]通过稳态拉伸试验研究了10.9级高强螺栓在高温加热和冷却阶段的力学性能,结果表明,10.9级高强螺栓在温度超过400 °C时强度迅速下降,温度为600 °C和800 °C时强度分别为原始强度的40%和5%。陈桥等^[14]通过恒温拉伸试验研究了10.9级高强螺栓在火灾全过程下的力学性能,并通过试件断口电镜扫描研究了其微观断裂机理,结果表明,火灾全过程下高强螺栓表现为韧性断裂,断裂应变随温度升高而增大。王卫永等^[15]利用有限元软件研究了单个高强螺栓连接节点在高温下预紧力的变化规律,结果表明温度对螺栓预紧力变化影响较大。黄炳生等^[16-17]研究了10.9级M22大六角头高强螺栓高温后的材料性能及其在不同加热温度、不同冷却方式、不同高温荷载下的受剪连接性能,并给出了高温后高强度螺栓受剪连接滑移荷载折减系数和极限荷载折减系数的计算公式。

国内现行规范《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[18]并未对火灾后高强螺栓连接的抗滑移系数折减系数进行规定。国内外学者针对高强螺栓连接抗滑移系数的研究较少,对不同过火温度、不同钢板表面处理方式等高强螺栓连接的研究仍有待补充。张超^[19]和余晨岗等^[20]研究了100 °C~300 °C高温下采用钢丝刷表面处理方式的摩擦型高强螺栓连接的摩擦系数,研究表明,温度在300 °C以内时,钢板的摩擦系数基本表现为线性下降。LOU等^[21]研究了200 °C~700 °C高温后两种表面处理方式的高强螺栓连接的抗滑移系数,结果表明,火灾后抗滑移系数随温度升高而增加,采用鼓风清洗表面处理方式的螺栓连接抗滑移系数增幅远大于采用鼓风清洗后涂覆无机锌漆表面处理方式的螺栓连接抗滑移系数的增幅。陈禄如^[22]研究了200 °C~450 °C高温下和高温后经砂轮机打磨和钢丝刷处理的高强螺栓连接的性能,发现抗滑移系数和抗滑移荷载均随温度的升高而降低。目前国内针对高温后高强螺栓连接抗剪性能的研究集中于极限承载力及抗滑移承载力折减系数的研究,而对高温后高强螺栓连接抗滑移系数变化规律的研究较少。基于此,本文通过试验研究了采用金属去毛刺打磨、喷砂两种不同表面处理方式的Q355B钢板和10.9级M20摩擦型高强螺栓组成的连接件,分析了在经历300 °C~700 °C高温自然冷却后抗滑移系数及其折减系数的变化规律,并给出了抗滑移系数折减系数的计算公式和拟合曲线。

1 试验概况

1.1 试件设计

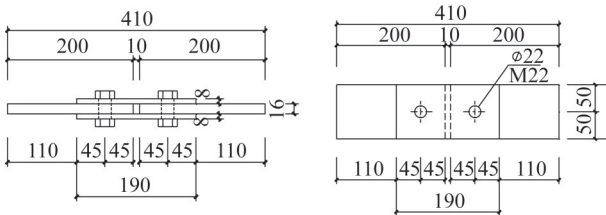
螺栓连接试件由4块Q355B钢板及2个10.9级M20

摩擦型高强螺栓组成,螺栓及钢板的力学性能如表1所示,试件尺寸及组装后试件实物如图1所示。试验钢板采用工程中常用的金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式,共设计了5组加热温度:300℃、400℃、500℃、600℃、700℃,室温(20℃)为对照温度,每组温度2个试件,共24个试件。试验根据钢板表面处理方式的不同分为两组,试件分组及编号见表2。

表1 螺栓及钢板材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of bolt and steel plate

类别	等级	表面处理方式	抗拉强度 f_u /MPa	屈服强度 f_y /MPa
螺栓	10.9	—	1 154	986
钢板	Q355B	金属去毛刺打磨	535	411
		喷砂		



a) 试件尺寸示意图(单位: mm)



b) 组装试件实物

图1 高强螺栓试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-strength bolt specimen

表2 试件编号及分组

Table 2 Specimen numbers and groups

试件编号	温度/℃	试件编号	温度/℃
KJ-20-1	20	KP-20-1	20
KJ-20-2		KP-20-2	
KJ-300-1	300	KP-300-1	300
KJ-300-2		KP-300-2	
KJ-400-1	400	KP-400-1	400
KJ-400-2		KP-400-2	
KJ-500-1	500	KP-500-1	500
KJ-500-2		KP-500-2	
KJ-600-1	600	KP-600-1	600
KJ-600-2		KP-600-2	
KJ-700-1	700	KP-700-1	700
KJ-700-2		KP-700-2	

注:试件编号中“KJ”表示钢板采用金属去毛刺打磨表面处理方式,“KP”表示钢板采用喷砂表面处理方式。

1.2 试验装置

试验在北京市中电投工程研究检测评定中心有限公

司材料所进行。加热装置采用SX4-10箱式电阻炉及配套KSW电阻炉温度控制器,炉内尺寸为300 mm×300 mm×200 mm,升温范围为0~1 000℃,加热装置如图2a)所示。试验使用普朗德PLD-T700A电动定扭矩扳手对螺栓施加预拉力,施加预拉力时使用YAW4306微机控制电液伺服压力试验机对钢板进行固定,如图2c)、图2d)所示。加载装置采用SHT4106-G微机控制电液伺服万能试验机,荷载限值为1 000 kN,加载装置如图2b)所示。



图2 试验加热设备及加载装置

Fig. 2 Heating equipments and loading devices

1.3 加载制度及测量方案

试验采用电阻炉加热的方式模拟不同温度下的火灾。试件加热前,先将电炉在300℃下预热5 h,排出电炉内水分。本试验以10℃·min⁻¹的速度匀速升温,待加热至指定温度后保温30 min,确保试件充分、均匀受热,升温曲线如图3所示。加热完成后,将试件置于电炉内冷却至室温。

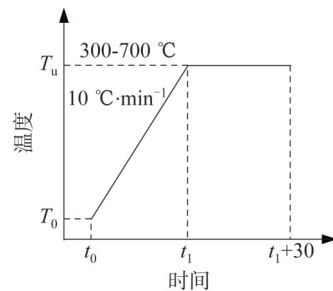


图3 试验升温曲线

Fig. 3 Test heating curve

根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[23],采用电动扭矩扳手对试件施加170 kN的螺栓预拉力,初拧扭矩约为终拧扭矩一半。施加螺栓预拉力后,采用传感器

对5组螺栓连接副进行实测,取其平均值作为试验预拉力值,预拉力实测值如表3所示。

表3 螺栓连接副预拉力实测值

Table 3 Actual measured value of pretension force of bolt connection pair

预拉力设计值/kN	预拉力实测值/kN					
155	1	2	3	4	5	平均值
	156	162	159	158	153	158

加载前使用记号笔在试件侧面画两条垂直直线,以便观察螺栓接头的滑移情况。采用合适的夹具将试件安装至万能试验机,先进行预加载,加载至15 kN后停1 min,然后以0.000 83 s⁻¹的应变速率平稳加载至试件破坏,由试验机配套系统输出荷载-位移曲线。试验中发生以下任一情况:(1) 试验机出现回针现象;(2) 试件侧面

产生错动;(3) 试件突然发出“嘭”的声音;(4) 荷载-位移曲线发生突变,可认定此时对应的荷载为试件滑移荷载。

2 试验结果及分析

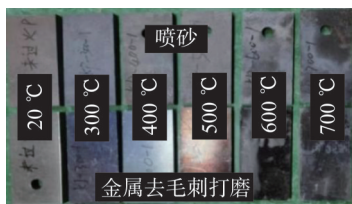
2.1 试验现象

常温下,两种表面处理方式的摩擦型高强螺栓连接试件均呈现灰色,经历高温冷却后,两种试件表面颜色均发生了明显变化,但经金属去毛刺打磨表面处理的试件颜色变化比经喷砂处理的试件颜色变化更大。在加热温度超过500 °C后,经金属去毛刺打磨表面处理的试件冷却后表面存在可擦除的黑色附着物,而经喷砂处理的试件则在加热温度达到600 °C后,表面出现可擦除的黑色附着物,且表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的粗糙度变化比表面采用喷砂处理方式的试件的粗糙度变化更明显。高温冷却后试件钢板表面情况如表4和图4所示。因此,在实际工程检测鉴定过程中,可以通过观察经历火灾后螺栓连接颜色变化来初步判断构件的最高受热温度。

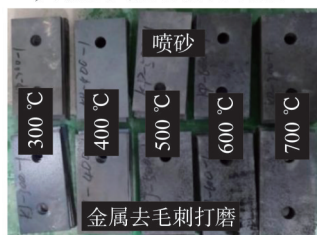
表4 高温冷却后试件表面情况

Table 4 Surface of specimens after heating and cooling

加热温度/°C	冷却后表面状态	
	金属去毛刺打磨	喷砂
常温(20)	灰色,有金属光泽	灰色
300	深蓝色	灰蓝色
400	浅蓝色	灰色,表面更粗糙
500	棕色,表面有可擦除的棕色附着物	灰色,表面更粗糙
600	灰白色,表面有可擦除的黑色附着物,附着物较喷砂方式处理试件的表面附着物更多	灰白色,表面有可擦除的黑色附着物
700	灰白色,表面有可擦除的黑色附着物,附着物较喷砂方式处理试件的表面附着物更多	灰白色,表面有可擦除的黑色附着物



a) 高温冷却后芯板表面状态



b) 高温冷却后盖板表面状态

图4 高温冷却后试件中钢板表面状态

Fig. 4 Surface state of steel plates in specimens after cooling at high temperatures

加载试验中试件出现了螺栓被剪断、钢板端部被剪坏和孔壁承压破坏三种破坏模式,如图5所示。螺栓被剪断主要发生在加热温度不低于600 °C的表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件,原因为高温导致螺栓软化,抗剪强度降低,且摩擦系数较小,螺栓承受更大的剪力时被剪断。在相同温度下,表面采用喷砂处理方式的试件出现钢板端部被剪坏或孔壁承压破坏,由于采用喷砂处理方式增加了表面粗糙度,增大了摩擦系数,减小了螺栓所承受的剪力,导致剪力主要集中在钢板端部或孔壁。在加热温度不高于400 °C时,螺栓尚未软化,两种表面处理方式的试件均出现钢板端部被剪坏现象。在加载过程中,当试件发生第一次滑移时,试件产生连续较小的“嘭”声,随着试件滑移增加,声音逐渐减弱,当螺栓被剪断或钢板端部被剪坏时,试件发出巨大的“嘣”声,而当试件仅发生孔壁承压破坏时,试件未产生巨响。



图5 试件破坏模式

Fig. 5 Failure modes of specimens

2.2 荷载-位移曲线

该试验荷载-位移曲线通过万能试验机配套的数据采集系统获得。为减小试验数据随机性,试验结果取每个温度工况下2个试件的平均值,经处理后绘制出各试件的荷载-位移曲线,如图6所示。

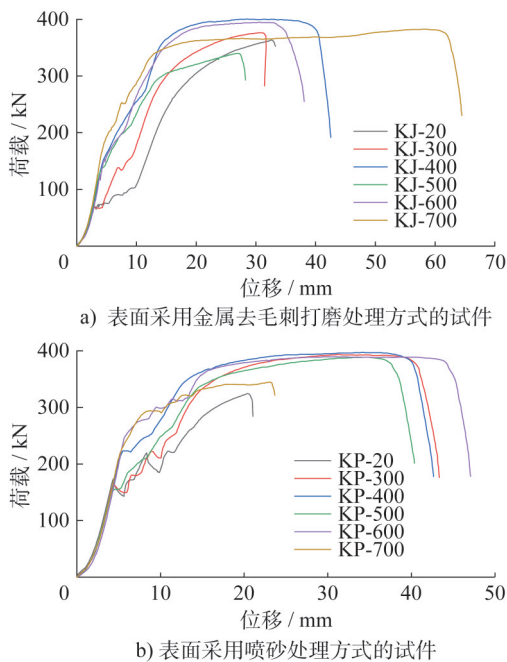


图6 试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of specimens

根据荷载-位移曲线可得摩擦型高强螺栓连接受剪过程分为4个阶段:(1)摩擦传力阶段。螺栓接头开始受剪直至钢板出现第一次滑移前,剪力完全由静摩擦力克服;(2)滑移阶段。随着施加荷载增大,试件中的芯板开始发生错动,即螺栓开始发生滑移,此时荷载-位移曲线第一次出现平滑段或下降段;当芯板与螺栓产生接触时,荷载开始上升随后带动栓杆与盖板间发生滑移,荷载-位移曲线出现第二次平滑段与下降段;(3)螺栓受剪阶段。随着施加荷载的继续增大,栓杆与盖板产生接触,此后持续增长的力主要通过螺栓受剪和栓、板间承压来传递;

(4)破坏阶段。最终,试件承载力达到极限状态,荷载下降,试件发生破坏。

2.3 抗滑移系数

将经历不同高温后试件的抗滑移系数 μ_T 与常温下试件抗滑移系数 μ_{20} 的比值定义为高温后摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数折减系数 k ,即 $k=\mu_T/\mu_{20}$ 。螺栓预拉力 P_{20} 取传感器实测值的平均值,滑移荷载 N_T 通过荷载-位移曲线得到。各试件抗滑移系数及其折减系数如表5及图7所示。可以发现:与常温试件抗滑移系数相比,表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件当加热温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数有所增大,增大幅度为 18.6% ;当加热温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数急剧增大,增幅达到 106.5% ;当加热温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数逐渐减小,减小幅度为 11.0% ;当加热温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数继续减小,减小幅度不超过 2.0% ;当加热温度为 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数又快速增大,增大了 51.0% ,此时抗滑移系数达到试验值中的最大值。对于表面采用喷砂处理方式的试件,当加热温度为 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数略有提高;当加热温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数增大较明显,增幅为 29.0% ;当加热温度为 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时,抗滑移系数开始减小,减小幅度为 27.0% ;当加热温度超过 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 后,抗滑移系数不断增大,当在加热温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时其增幅为 57.0% , $700\text{ }^\circ\text{C}$ 时其增幅为 18.5% 。

经历相同加热温度时,表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数比表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的抗滑移系数大。当加热温度不超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数比表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件大 2.5 倍左右,超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 后大 1.5 倍左右。

当加热温度不超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 时,金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式试件的抗滑移系数折减系数受加热温度影响较小,试件的抗滑移系数与常温试件的抗滑移系数基本相同。当加热温度高于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 后,随着加热温度的增大,两种表面处理方式试件的抗滑移系数折减系数均呈现先增后减再增的趋势,具体表现为:二者抗滑移

表 5 抗滑移系数及其折减系数计算结果

Table 5 Calculation results of anti-slip coefficients and corresponding reduction factors

试件编号	P_{20}/kN	$N_{J,T}/\text{kN}$	$\mu_{J,T}$	$\bar{\mu}_{J,T}$	k_j	试件编号	P_{20}/kN	$N_{P,T}/\text{kN}$	$\mu_{P,T}$	$\bar{\mu}_{P,T}$	k_p
KJ-20-1	158	60.5	0.191	0.194	1.00	KP-20-1	158	169.9	0.538	0.531	1.00
KJ-20-2		62.4	0.197			165.7		0.524			
KJ-300-1	158	67.1	0.212	0.230	1.19	KP-300-1	158	166.3	0.526	0.533	1.00
KJ-300-2		78.2	0.247			170.3		0.539			
KJ-400-1	158	151.3	0.479	0.475	2.45	KP-400-1	158	224.3	0.710	0.688	1.30
KJ-400-2		148.2	0.470			210.2		0.665			
KJ-500-1	158	135.1	0.427	0.421	2.17	KP-500-1	158	156.6	0.496	0.502	0.95
KJ-500-2		130.9	0.414			160.1		0.507			
KJ-600-1	158	124.0	0.392	0.416	2.14	KP-600-1	158	248.5	0.786	0.789	1.49
KJ-600-2		138.7	0.439			250.4		0.792			
KJ-700-1	158	202.5	0.641	0.630	3.25	KP-700-1	158	293.4	0.928	0.935	1.76
KJ-700-2		195.4	0.618			297.3		0.941			

注:表格中 P_{20} 表示螺栓预拉力; $N_{J,T}$ 表示表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的滑移荷载; $\mu_{J,T}$ 表示表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的抗滑移系数, $\bar{\mu}_{J,T}$ 为同一加热温度下两组试件抗滑移系数的平均值; k_j 表示表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的抗滑移系数折减系数。 $N_{P,T}$ 表示表面采用喷砂处理方式的试件的滑移荷载; $\mu_{P,T}$ 表示表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数, $\bar{\mu}_{P,T}$ 为同一加热温度下两组试件抗滑移系数的平均值; k_p 表示表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数折减系数。

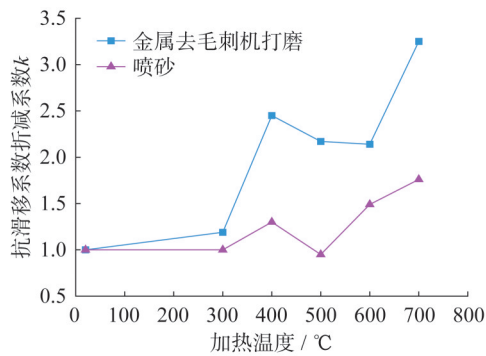


图 7 抗滑移系数折减系数

Fig. 7 Reduction factor for anti-slip coefficient

系数折减系数均在加热温度为 400 °C 前开始增大, 加热温度为 400 °C 后有所下降, 表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件的抗滑移系数折减系数在加热温度超过 600 °C 后再次增加, 而表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数折减系数在加热温度超过 500 °C 后再次增加。出现这种变化趋势的原因可能是: “先增” 阶段高温导致螺栓和钢板表面产生了一层氧化膜, 增加了接触面的粗糙程度, 摩擦系数增大; “后减” 阶段材料强度下降, 氧化膜松散或脱落, 导致摩擦系数降低; “再增” 阶段钢材软化使螺栓与钢板间的咬合力增加, 同时, 在高温作用下氧化膜厚度增加, 且更为稳定不易脱落, 从而增加了钢板之间的摩擦力。

3 抗滑移系数折减系数拟合

根据试验抗滑移系数折减系数的变化规律, 考虑钢板采用不同的表面处理方式, 针对高温后的摩擦型高强螺栓连接提出了一种双折线模型, 用于计算火灾后摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数折减系数, 计算公式如下:

表面处理方式为金属去毛刺打磨时, 有:

$$k_j = \frac{\mu_{J,T}}{\mu_{J,20}} = \begin{cases} 1 & (20^\circ\text{C} \leq T_s \leq 300^\circ\text{C}) \\ 1 + 4.65 \times 10^{-3}(T_s - 300) & (300^\circ\text{C} < T_s \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (1)$$

表面处理方式为喷砂时, 有:

$$k_p = \frac{\mu_{P,T}}{\mu_{P,20}} = \begin{cases} 1 & (20^\circ\text{C} \leq T_s < 500^\circ\text{C}) \\ 1 + 4.02 \times 10^{-3}(T_s - 500) & (500^\circ\text{C} \leq T_s \leq 700^\circ\text{C}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_j 、 k_p 分别表示高温后摩擦型高强螺栓连接试件采用金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式下的抗滑移系数折减系数; $\mu_{J,T}$ 、 $\mu_{P,T}$ 分别表示当加热温度为 T_s 时, 高温后表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件和表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数; $\mu_{J,20}$ 、 $\mu_{P,20}$ 分别表示常温 (20 °C) 时表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试

件和表面采用喷砂处理方式的试件的抗滑移系数; T_s 表示螺栓连接试件的加热温度。

采用双折线模型对试验数据进行拟合,拟合曲线如图8、图9所示。抗滑移系数折减系数在加热温度为400℃时增幅较大,但由于该试验未在300℃~500℃温度区间内进行更小温度区间的划分,因此为了取值更偏向于安全,拟合时未考虑加热温度为400℃时对拟合曲线的影响。

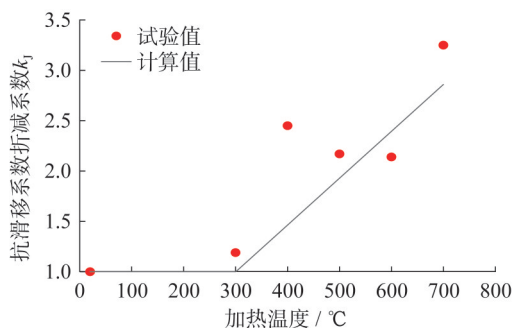


图8 表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件抗滑移系数折减系数与加热温度的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between anti-slip coefficient reduction factor and heating temperature of metal deburred and polished specimens

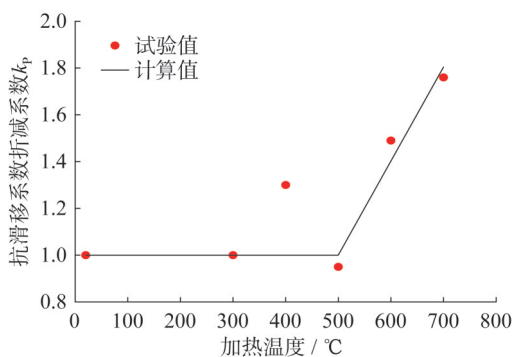


图9 表面采用喷砂处理方式的试件抗滑移系数折减系数与加热温度的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between anti-slip coefficient reduction factor and heating temperature of sandblasted specimens

分析拟合曲线可知,当表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件加热温度不高于300℃、表面采用喷砂处理方式的试件加热温度低于500℃时,折减系数拟合公式计算值与试验值基本相同,且加热后试件的抗滑移系数与常温试件的抗滑移系数基本相同,因此,实际工程中在此种情况下可以不考虑高温后摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数的提高。当表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件加热温度高于300℃、表面采用喷砂处理方式的

试件加热温度高于500℃时,两种表面处理方式的摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数折减系数均呈增大趋势,拟合情况较好,可采用公式(1)、(2)计算相应的抗滑移系数折减系数。

4 结论

对采用不同表面处理方式的10.9级M20摩擦型高强螺栓连接试件进行了高温冷却后的抗滑移系数试验研究,得到如下结论:

(1) 当加热温度相同时,采用喷砂表面处理方式的试件比采用金属去毛刺打磨表面处理方式试件的抗滑移系数更大。因此,工程中应优先采用喷砂等使表面粗糙度较大的表面处理方式,更有利于提高高强螺栓连接的抗滑移性能。

(2) 与常温试件相比,随着加热温度的提高,金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式试件的抗滑移系数均有所增大,二者均在加热温度为700℃时达到试验中抗滑移系数的最大值,分别增大了225.0%和76.0%。高温后钢材表面产生了氧化物,增大了钢板之间接触面的粗糙程度,使得摩擦系数增大,提高了高强螺栓连接的抗滑移性能。

(3) 高温冷却过程对表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件抗滑移系数的影响比对表面采用喷砂处理方式的试件抗滑移系数的影响大。表面采用金属去毛刺打磨处理方式的试件抗滑移系数在加热温度为400℃时增幅最大,较加热温度为300℃时增加106.0%;表面采用喷砂处理方式的试件抗滑移系数在加热温度为600℃时增幅最大,较加热温度为500℃时增加57%。

(4) 当加热温度不高于300℃时,加热温度对高温冷却后摩擦型高强螺栓连接抗滑移系数的影响较小;当加热温度高于300℃时,摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数显著增大。因此,当火灾最高温度不高于300℃时,可不对摩擦型高强螺栓连接进行更换,当火灾最高温度高于300℃后,应综合考虑抗滑移系数增大的积极影响,再决定是否更换螺栓。

(5) 结合试验结果对火灾后摩擦型高强螺栓连接的抗滑移系数折减系数进行了拟合,给出了采用金属去毛刺打磨和喷砂两种表面处理方式时高强螺栓连接抗滑移系数折减系数的拟合公式,为火灾后钢结构中摩擦型高强螺栓连接的安全鉴定、修复加固提供依据。

参考文献:

- [1] 国家消防救援局. 2020年全国火灾及接处警情况[EB/OL]. (2021-02-01)[2024-07-03]. <https://www.119.gov.cn/gk/sjtj/2022/13721.shtml>.
National Fire and Rescue Administration. 2020 National Fire

- and Emergency Response Situation [EB/OL]. (2021-02-01) [2024-07-03]. <https://www.119.gov.cn/gk/sjtj/2022/13721.shtml>. (in Chinese)
- [2] 李国强, 吴波, 韩林海. 结构抗火研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(1): 1-13.
LI Guoqiang, WU Bo, HAN Linhai. Development of the research on fire-resistance of structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1): 1-13. (in Chinese)
- [3] 鲁永贵, 尤洋, 张文超, 等. 火灾下螺纹锚固螺栓 T 形连接承载力设计方法[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(9): 54-60. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.09.007.
LU Yonggui, YOU Yang, ZHANG Wenchao, et al. A design method for thread-fixed one-side bolted T-stub connections at high temperatures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(9): 54-60. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.09.007. (in Chinese)
- [4] 李国强, 李明菲, 殷颖智, 等. 高温下高强度螺栓 20 MnTiB 钢的材料性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 100-104.
LI Guoqiang, LI Mingfei, YIN Yingzhi, 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)
- [5] 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 Guoqiang, YIN Yingzhi. Fire-resistant behavior of high-strength bolted connections for steel structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(6): 18-25. (in Chinese)
- [6] 冯绍攀, 幸坤涛, 王新泉, 等. 钢网架螺栓球节点用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, 2021, 42(2): 198-205. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.c071.
FENG Shaopan, XING Kuntao, WANG Xinquan, et al. Experimental study on mechanical properties of high strength bolts used in steel grid bolted spherical joints after fire [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2): 198-205. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.c071. (in Chinese)
- [7] HANUS F, ZILLI G, FRANSSSEN J M. Experimental tests and analytical models for welds and grade 8.8 bolts under heating and subsequent cooling [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2011, 2(3): 181-194. DOI: 10.1260/2040-2317.2.3.181.
- [8] 强旭红, 罗永峰, 何佳琴, 等. 高强螺栓连接节点火灾后性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(8): 83-87. DOI: 10.19701/j.jzjg.2010.08.018.
QIANG Xuhong, LUO Yongfeng, HE Jiaqin, et al. Experimental study on the behavior of high-strength bolted connection after fire [J]. Building Structure, 2010, 40(8): 83-87. DOI: 10.19701/j.jzjg.2010.08.018. (in Chinese)
- [9] 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(增刊1): 6-14. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2012.s1.002.
YU Shan, LOU Guobiao, ZHANG Cheng. Experimental study on shear behavior of bolted friction-type high-strength connections after fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(Suppl. 1): 6-14. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2012.s1.002. (in Chinese)
- [10] LIANG Y. Behavior of bolted connections during and after a fire [D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2006.
- [11] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.001.
LOU Guobiao, YU Shan, WANG Rui. Mechanical properties of high-strength bolts after fire [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 33-40. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.001. (in Chinese)
- [12] KAWOHL A, LANGE J. Experimental study of post fire performance of high-strength bolts under combined tension and shear [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2016, 7(1): 58-68. DOI: 10.1108/jsfe-03-2016-005.
- [13] REZAEIAN A, SHAFIEI M, ESKANDARI M. Effect of temperature on mechanical properties of steel bolts [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(9): 04020239. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003314.
- [14] 陈桥, 姜健, 蔡文玉, 等. 火灾全过程下 10.9 级高强螺栓断裂性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(7): 55-68. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.22020141.
CHEN Qiao, JIANG Jian, CAI Wenyu, et al. Experimental study on fracture behavior of grade 10.9 high-strength bolts in whole process of fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(7): 55-68. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.22020141. (in Chinese)
- [15] 王卫永, 张亿发. 高温下高强钢连接的高强螺栓预紧力研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(6): 51-57, 74. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.006.
WANG Weiyong, ZHANG Yifa. A study on the preload in high-strength bolts for high-strength steel connection at elevated temperatures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 51-57, 74. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.006. (in Chinese)
- [16] 黄炳生, 陈涛, 荆海仓. 高强度螺栓高温后材料性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 428-435. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.02.015.
HUANG Bingsheng, CHEN Tao, JING Haicang. Mechanical properties of high-strength bolts material after high temperature [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 428-435. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2023.02.015. (in Chinese)
- [17] 黄炳生, 陈涛, 荆海仓, 等. 高温后高强度螺栓受剪连接性能试验[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(10): 234-242. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0229.
HUANG Bingsheng, CHEN Tao, JING Haicang, et al. Test of high-strength bolt shear connection after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(10): 234-242. DOI: 10.

- 14006/j.jzjgxb.2022.0229.(in Chinese)
- [18] 中国工程建设标准化协会标准.火灾后工程结构鉴定标准:T/CECS 252—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for Appraisal of Engineering Structures After Fire:T/CECS 252—2019[S].Beijing: China Architecture & Building Press,2019. (in Chinese)
- [19] 张超.高温环境下摩擦型高强螺栓连接节点受力性能的试验研究[D].扬州:扬州大学,2012.
ZHANG Chao. Experimental study for the performance of friction high strength bolt connection nodes in high temperature environment [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2012. (in Chinese)
- [20] 余晨岗,刘雁,张超,等.高强螺栓连接节点高温摩擦系数试验研究[J].钢结构,2013,28(2):75-77,49.DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2013.02.018.
SHE Chengang, LIU Yan, ZHANG Chao, et al. Experimental study on high temperature friction coefficient of high-strength bolt connection[J]. Steel Construction, 2013, 28(2):75-77, 49. DOI:10.3969/j.issn.1007-9963.2013.02.018. (in Chinese)
- [21] LOU G B, ZHU M C, LI M, et al. Experimental research on slip-resistant bolted connections after fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104:1-8. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.09.018.
- [22] 陈禄如.高温下高强度螺栓连接性能的试验研究[J].建筑钢结构进展,2003,5(2):24-32.
CHEN Luru. Experimental study on connection property of high-strength bolts at high temperature [J]. Progress in Steel Building Structures, 2003, 5(2):24-32. (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)