

高强钢高温下泊松比的云纹干涉法测量

黄永东¹, 王毅², 龙厚民², 谭睿楠², 王卫永^{2*}

(1. 中冶建工集团有限公司, 重庆 400084; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 在进行高强钢结构抗火性能分析和设计时, 泊松比是一个重要指标。为了精确获得高强钢在高温下的泊松比并对比高强钢和普通钢的差异, 采用云纹干涉法, 分别测量普通 Q355 钢、高强 Q460、Q690 和 Q960 钢在 25 °C、200 °C、300 °C、500 °C 下的泊松比, 并与已有的其他钢材的试验结果进行了对比。结果表明: 随着温度的升高, 同一种钢材的泊松比小幅度上升; 将四种钢材的试验结果进行比较, 发现不同种类钢材高温下的泊松比随温度升高的变化程度基本相同; 与耐火钢相比, 普通 Q355 钢和高强钢的泊松比偏低, 大约低 10% 左右。试验结果可为相关研究提供参考。

关键词: 高强钢; 弹性模量; 泊松比; 云纹干涉; 高温下

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)04-0024-06

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240620001

Measurement of Poisson's Ratio on High-Strength Steel at Elevated Temperature by Moiré Interferometry

HUANG Yongdong¹, WANG Yi², LONG Houmin², TAN Ruinan², WANG Weiyong^{2*}

(1. China Metallurgical Construction Engineering Group Co., Ltd., Chongqing 400084, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: wywang@cqu.edu.cn

Abstract: When analyzing and designing the fire resistance of high-strength steel structures, the Poisson's ratio of high-strength steel is an important index. In order to accurately obtain the Poisson's ratio of high-strength steel at elevated temperatures and compare the difference between high-strength steel and ordinary steel, the moiré interferometry method was used to measure the Poisson's ratio of ordinary Q355 steel, high-strength Q460 steel, Q690 steel, and Q960 steel at 25 °C, 200 °C, 300 °C, and 500 °C. The test data were compared with available results in the literature for other types of steel. The results show that as the temperature increases, the Poisson's ratio increases slightly. Comparison of the test results for the four types of steel indicates that the degree of change in Poisson's ratio under high temperature is basically the same for different types of steel. The Poisson's ratio of mild Q355 steel and high-strength steel is lower than that of fire-resistant steel by about 10%. The test results can provide a reference for relevant research.

Keywords: high-strength steel; elastic modulus; Poisson's ratio; moiré interferometry; at elevated temperature

高强钢因具有较高的强度和良好的可加工性能, 在 建筑结构中具有广阔的应用前景。高强钢和普通钢都不

收稿日期: 2024-06-20

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2021JCYJ-JQX0021)

作者简介:

黄永东(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑工程施工技术及管理方面的工作。E-mail: 350204107@qq.com。

通信作者:

王卫永(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构防灾减灾方面的研究。E-mail: wywang@cqu.edu.cn。

耐火,火灾下结构的强度和刚度急剧降低,因此研究高强钢结构耐火性能对确保房屋火灾下的结构安全十分关键^[1]。

在进行高强钢结构抗火性能分析和设计时,材料的高温力学性能指标是必要的基础数据,力学性能指标主要包括屈服强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比等,此外,应力-应变关系也是重要参考之一。其中,屈服强度、抗拉强度、弹性模量和应力-应变关系可以通过钢材高温拉伸试验获得,目前已有较多的试验对高强钢的这些力学性能指标进行了评估和测量^[2-4]。

对钢材进行拉伸时,钢材会产生纵向线应变和横向线应变,泊松比为横向线应变与轴向线应变的比值,是材料的固有属性,与钢材的化学成分和环境温度都有关系。泊松比是结构抗火分析时必不可少的参数,其误差大小直接影响结构中应力、应变的计算精度。目前通常情况下钢材的泊松比被默认为常数,取值为0.3,并不随钢种和温度的变化而变化,这种做法是基于COOKE^[5]和CLARK^[6]针对普通钢材的研究成果,然而对高强钢是否适用尚缺乏理论依据和试验支撑,鉴于此,本文对高强钢高温下的泊松比进行了测定,并与普通钢材和耐火钢高温下的泊松比进行了对比。

高温下测量泊松比的方法有很多,例如通过高温下拉扭试验来测量试件的拉伸应变和剪切应变,从而获得弹性模量和剪切模量,并进一步换算得到泊松比。王连庆等^[7]通过高温扭转试验对460 MPa耐火钢高温下的泊松比进行了研究。此外还可采用云纹干涉法来测量泊松比^[8],该方法是在20世纪80年代被提出并逐渐发展成熟的一种现代非接触光测力学方法,将两束同频激光照射在构件表面格纹上并发生干涉形成光栅,通过观察单位长度光栅条数的变化计算拉伸时的纵横向线应变,进而计算弹性模量和泊松比。该方法测量精度较高,位移测量精度可达0.1 μm,分辨率和对比度也较高,能测出试件各点的精确位移,尤其是微小区域的位移,该方法在测量高温下弹性模量和泊松比方面已有较多应用^[9-10]。

本文采用云纹干涉法对Q355钢、高强Q460、Q690和Q960钢分别在25℃、200℃、300℃、500℃下,进行激光衍射并拍摄光栅干涉图,得到钢构件高温下的应力-应变曲线、弹性模量和泊松比等参数,并基于试验数据,分析泊松比与温度的变化关系。

1 激光云纹干涉原理

激光云纹干涉法是通过激光器发出的准直光垂直照射在试件表面,通过试件表面的光栅产生正负一级衍射光,进而在试件表面产生干涉条纹,再利用干涉条纹级数与荷载之间的关系,绘制应力-应变曲线,从而计算出相应的弹性模量和泊松比。

在进行试验前,需制作好一定频率的交叉栅纹,即在试件表面的径向和轴向分别制作大量等宽等间距的平行狭缝。试验采用的试件栅频率为600线·mm⁻¹,对应的位移测量灵敏度为1/(2×600) mm=0.833 μm,即每一级条纹代表0.833 μm的位移量。根据光栅与激光的相互作用方式,试件栅可分为透射式试件栅和反射式试件栅,本次试验使用的是反射式试件栅。采用双光束对称入射光路进行试验,试件表面预制光栅的频率为 f ,两束相干准直光源A、B以相同入射角 α 沿 xz 平面入射到试件的表面,如果入射角 α 的大小满足式(1),即称为光栅的一级衍射方程。

$$\sin \alpha = \lambda f \quad (1)$$

式中: α 表示入射角; λ 表示波长; f 表示光栅的频率。此时光束A、B的正负一级衍射光与法线平面重合,且会沿着垂直试件栅的方向进行传播。当两束准直光(平面波阵面) $A(x)_{+1}$ 和 $A(x)_{-1}$ 以 α 角对称入射到未受力试件光栅表面时,正负一级衍射光与法线重合,且仍为平面波阵面。试件受力变形后,正负一级衍射光由平面波前变成与表面位移相关的翘曲波前,位相也发生相应变化,如图1所示,进而产生波前干涉条纹。

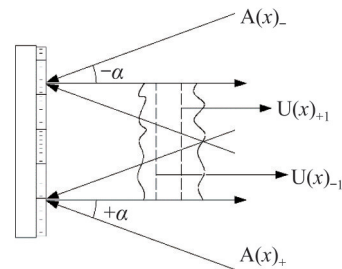


图1 双光束波前干涉原理

Fig. 1 Dual-beam wavefront interference principle

当试件由于荷载作用产生拉伸或压缩变形时,试件栅会同时产生沿 x 方向的位移 $u(x,y)$,该位移与云纹图中干涉条纹级数 N_x 的关系为:

$$u(x,y) = N_x \lambda / (2 \sin \alpha) = N_x / (2f) \quad (2)$$

式中: N_x 表示 x 轴方向条纹数。

如果将试件栅线的长度方向和光学成像系统同时旋转90°,就可以得到 y 方向上的位移 $v(x,y)$,该位移与云纹图中的干涉条纹级数 N_y 的关系为:

$$v(x,y) = N_y \lambda / (2 \sin \alpha) = N_y / (2f) \quad (3)$$

式中: N_y 表示 y 轴方向条纹数。

测量弹性模量和泊松比时只需测量 ϵ_x 和 ϵ_y 应变,其中:

$$\epsilon_x = (x_2 - x_1) / m_x \quad (4)$$

$$\epsilon_y = (y_2 - y_1) / m_y \quad (5)$$

式中: x_1 表示横向初始条纹中心坐标; x_2 表示横向末条纹

中心坐标; m_x 表示横向每毫米像素点数; y_1 表示纵向初始条纹中心坐标; y_2 表示纵向末条纹中心坐标; m_y 表示纵向每毫米像素点数。

测量应变后,根据传感器测试出的荷载以及试件中心的横截面面积,可计算得出应力,进而得到应力-应变曲线。由应力-应变曲线的斜率可得到弹性模量和泊松比。

2 试验设计

2.1 试件尺寸和数量

Q355钢、高强Q460、Q690和Q960钢的钢板厚均为2 mm。参考《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[11],沿轧制方向将钢板切割成尺寸如图2所示的试件。每种钢材设置两个相同试件进行平行试验,共计8个试件。为确保材料强度的准确性,先对钢板进行拉伸,测得常温下的应力-应变曲线。

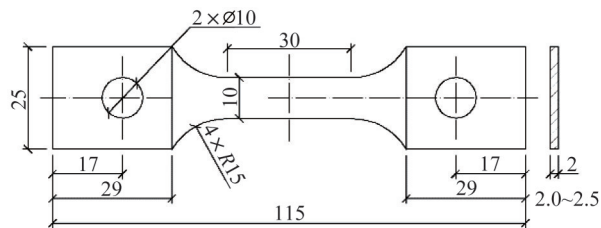


图2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions of specimen (unit:mm)

2.2 试件栅制作

试件栅的制作方法主要有两种:一是光栅复制法,二是直接制栅法。本试验采用直接制栅法,该方法直接将栅纹刻在试件表面,相较于光栅复制法中使用表面光敏胶制作的胶栅,该方法可以抵抗高温氧化,从而可以用云纹干涉法来测量温度高于200℃时物体的变形。

直接制栅法的主要流程如下:将试件的一个表面经W15、W7、W3.5和W1.5的研磨粉研磨后,用W0.5的抛光膏制成镜面。在离心甩胶机上均匀涂覆光致腐蚀剂层(光敏胶),胶膜层厚约1 μm。烘干后将构件涂有光敏胶层的一面扣在600线·mm⁻¹的母栅上,紫外线照射母栅约30~40 s后浸入弱碱性溶液清洗15~20 s,此时通过紫外光透过母栅照射分解后的光敏胶溶于弱碱性溶液,得到“光敏胶-镜面金属-光敏胶”的连续交替胶栅,称之为“胶栅光栅”。将“胶栅光栅”通电进行电化学刻蚀,刻蚀时试件接在直流恒压刻蚀电源的正极,同时以铅板为负极,酸性腐蚀液用浓磷酸、浓硫酸、柠檬酸、柠檬酸胺等按一定比例混合,在50 mA电流作用下进行刻蚀,刻蚀0.5 min后,试件表面金属镜面的部分腐蚀。由于光敏胶特性为易溶于碱性溶液而难溶于酸性溶液,此时试件表面将形成“光敏胶-非镜面金属-光敏胶”的连续交替光

栅。最后再次将整个试件浸入强碱性溶液15~20 s,洗去表面光敏胶,此时将形成“镜面金属-非镜面金属-镜面金属”的连续交替光栅,即为试件栅。试件栅制作的具体流程如图3所示,制作成的试件栅如图4所示。

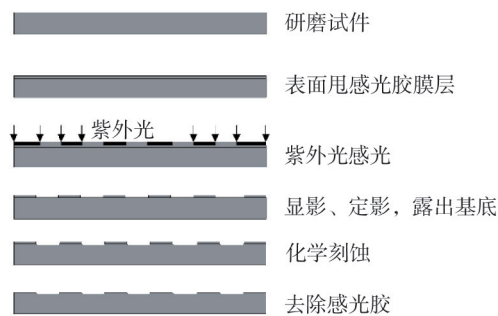


图3 试件栅制作工艺

Fig. 3 Process for the fabrication of specimen grating



图4 光栅试样

Fig. 4 Specimen of grating

2.3 试验装置和试验过程

云纹干涉试验设备装置由四部分组成:光学系统、加载系统、图像采集系统和高温实验炉,如图5、6所示。光学系统主要包含光源和光路传输系统。光源为发射波长为632 nm准直光的氦氖激光发射器;光路传输系统包含数个全反射镜、一个扩束镜、一个非球面透镜、一个U、V场光束分离装置。加载系统由测力仪、荷载传感器和加载设备组成。本次试验按加载质量100 kg、200 kg、300 kg、400 kg、500 kg逐级加载。对应的应力水平范围在50 MPa~250 MPa之间。图像采集系统为CCD摄像机和计算机。高温炉包含升温 and 控温系统,可快速升温 and 精确控温。

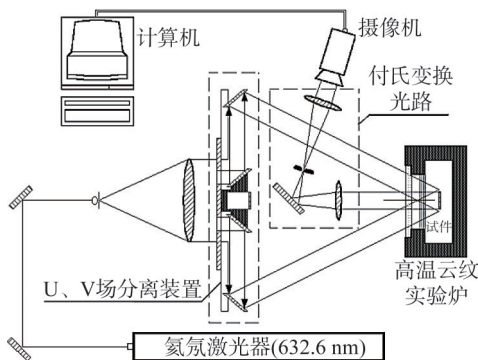


图5 云纹干涉法试验装置

Fig. 5 Moiré Interferometry test setup

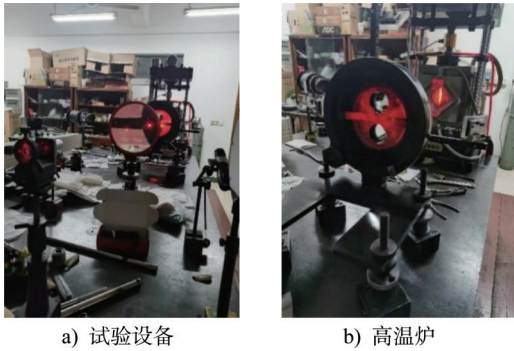


图6 试验设备

Fig. 6 Test device

从激光发射器产生出来的准直光经过光路传输系统后获得大面积的均匀平行光,通过U、V分离场装置后,使得满足式(1)的两束光线同时入射到试件表面发生干涉,所形成的干涉条纹通过CCD云纹摄影机记录后传输给数据处理系统,完成计算机对干涉条纹数据的直接存储。

3 试验结果及分析

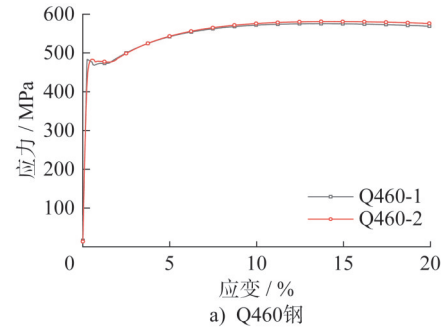
3.1 常温拉伸试验

文献[12]~[14]中采用与本文强度等级及钢材厂家相同的钢材试件进行拉伸试验,获得的应力-变曲线见图7。从图中可以得到高强钢Q460、Q690和Q960的屈服强度分别为481 MPa、760 MPa和1 024 MPa;弹性模量分别为203 GPa、205 GPa和201 GPa,材料强度满足规范《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—2018)^[15]的相关要求。

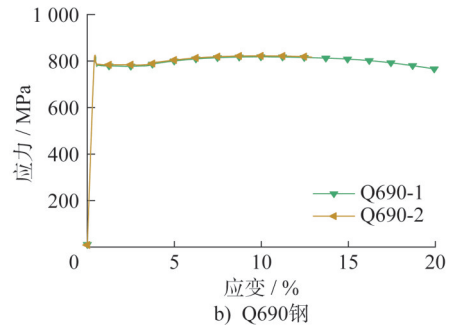
3.2 高温试验数据

通过CCD云纹摄影机拍摄试件在温度升高时加载过程中的云纹干涉图。图8为500℃时Q690钢试件在不同荷载作用下的云纹干涉图。通过加载系统及计算机得到应力-应变数据。图9为200℃时高强Q690钢试件的应力-应变曲线,从图中可以看出,试件的应力和应变呈线性关系,由应力-应变关系可得到弹性模量为200.2 GPa,由横向应变可以得到泊松比为0.306。由图可知,通过云纹干涉法测量的弹性模量及泊松比结果线性规律良好,测量结果可靠,且精度较高。

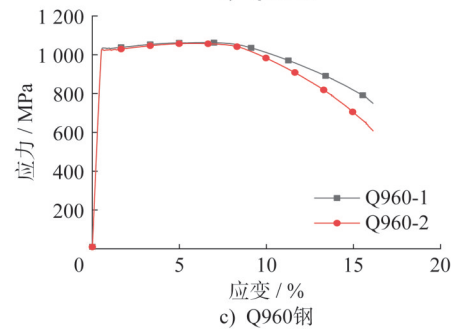
由试验测量结果计算得出的不同钢材弹性模量和泊松比见表1、2,从表中数据可以看出,每一种钢材两组弹性模量和泊松比的试验结果相差不大,可靠度较高,故分别取其平均值作为每组钢材弹性模量和泊松比的代表值。



a) Q460钢



b) Q690钢



c) Q960钢

图7 钢材应力-应变关系

Fig. 7 Stress-strain relationships of steels

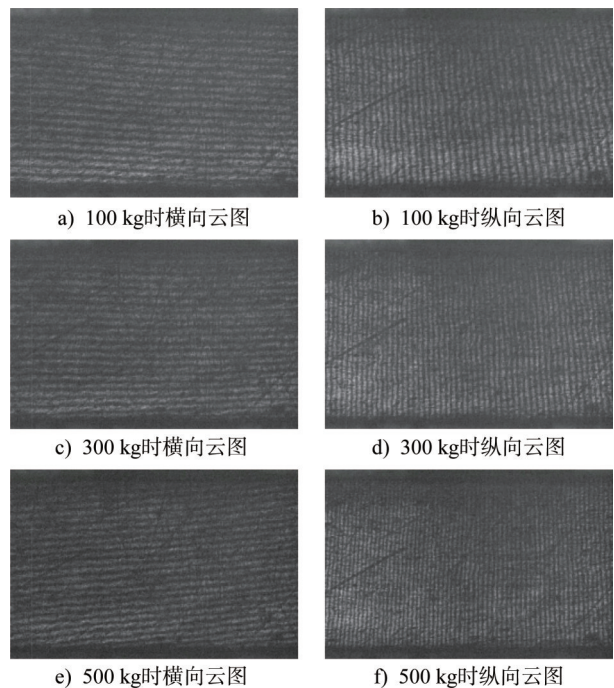


图8 Q690钢500℃时的干涉云图

Fig. 8 Interferometry contour of Q690 steel at 500℃

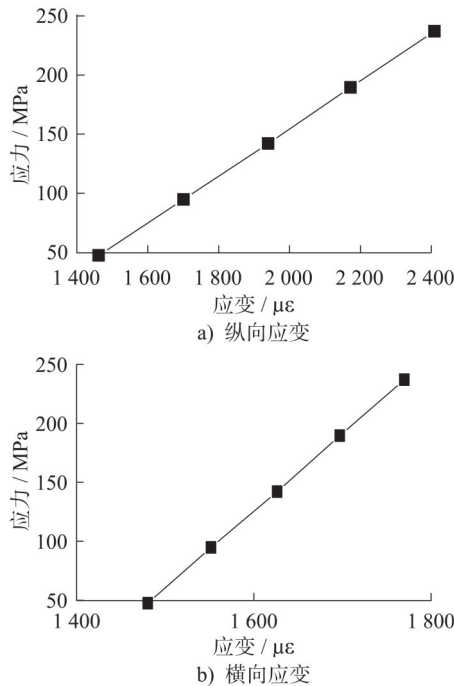


图9 Q690钢 200 °C 时的应力-应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves of Q690 steel at 200 °C

表1 钢材在不同温度下的弹性模量

Table 1 Elastic modulus of steels at different temperatures

试件	温度/°C			
	25	200	300	500
Q355-1	213.4	195.2	191.5	179.8
Q355-2	214.3	195.7	191.0	180.7
平均值	213.9	195.5	191.3	180.3
Q460-1	218.6	197.2	193.5	186.1
Q460-2	217.9	197.6	193.8	185.3
平均值	218.3	197.4	193.7	185.7
Q690-1	214.3	200.2	187.2	175.9
Q690-2	214.4	199.6	186.7	175.3
平均值	214.4	199.9	187.0	175.6
Q960-1	217.3	212.4	206.1	180.1
Q960-2	216.9	211.1	205.2	181.2
平均值	217.1	211.8	205.7	180.7

3.3 试验结果对比分析

将不同强度等级钢材高温下的弹性模量测量结果和泊松比测量结果进行对比,如图10~11所示。从图10中可以看出,随着温度的升高,同一种钢材的弹性模量逐步下降,在温度达到500°C时,弹性模量下降到常温下弹性模量的85%左右。值得注意的是,采用云纹干涉法测量

表2 钢材在不同温度下的泊松比

Table 2 Poisson's ratios of steels at different temperatures

试件	温度/°C			
	25	200	300	500
Q355-1	0.278	0.305	0.308	0.314
Q355-2	0.282	0.303	0.307	0.314
平均值	0.280	0.304	0.308	0.314
Q460-1	0.284	0.302	0.305	0.312
Q460-2	0.284	0.303	0.307	0.315
平均值	0.284	0.303	0.306	0.314
Q690-1	0.289	0.306	0.310	0.317
Q690-2	0.288	0.303	0.308	0.316
平均值	0.289	0.304	0.309	0.316
Q960-1	0.291	0.294	0.298	0.304
Q960-2	0.293	0.295	0.297	0.302
平均值	0.292	0.295	0.298	0.303

得出的弹性模量与采用拉伸试验得到的弹性模量具有一定的差异,但最大差异在8%以内,这主要是由于两种试验方法均存在一定的系统误差。

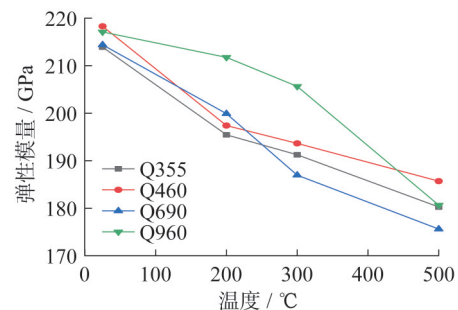


图10 弹性模量随温度的变化曲线

Fig. 10 Variation of elastic modulus with temperature

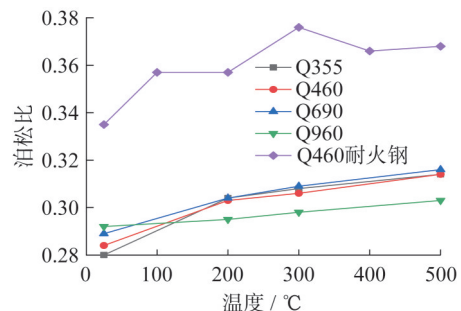


图11 泊松比随温度的变化曲线

Fig. 11 Variation of Poisson's ratio with temperature

图11中将本文的测量结果与王连庆等^[7]测量的耐火Q460钢泊松比进行了对比,从图11中可以看出,钢材的

泊松比随温度的变化趋势与弹性模量相反,即随着温度的升高泊松比逐渐升高,且不同等级的钢材具有一定的差异,Q960钢的上升幅度最小,如Q355钢从常温到500℃时,泊松比升高12%,而Q960钢从常温到500℃时,泊松比仅升高3%。与耐火Q460钢相比,高强钢的泊松比偏低,大约低10%左右。

4 结论

通过对四种钢材在高温下的泊松比进行测定,得到如下结论:

(1) 采用云纹干涉法测量的弹性模量及泊松比结果线性规律良好,测量结果可靠,且精度较高。

(2) 在20~500℃之间,高强钢弹性模量随温度上升呈减小的趋势,与Q355、Q460和Q690钢相比,Q960钢在200~300℃时弹性模量下降的幅度最小。在温度达到500℃时,弹性模量平均下降到常温下弹性模量的85%左右。

(3) Q355、Q460、Q690和Q960钢的泊松比随着温度的上升逐渐升高,Q960钢的泊松比上升幅度最小。与耐火Q460钢相比,高强钢的泊松比偏低,大约低10%左右。

参考文献:

- [1] 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)
- [2] WANG W Y, ZHANG Y H, XU L, et al. Mechanical properties of high-strength Q960 steel at elevated temperature [J]. Fire Safety Journal, 2020, 114: 103010. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103010.
- [3] ZHOU X H, YANG J J, WANG W Y, et al. Mechanical properties and creep strain of Q355 cold-formed steel at elevated temperature [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 180: 106577. DOI:10.1016/j.jcsr.2021.106577.
- [4] HUANG D, ZHANG L B, WANG W Y, et al. Test on post-fire residual mechanical properties of high strength Q690 steel considering tensile stress in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 194: 107340. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107340.
- [5] COOKE G M E. An introduction to the mechanical properties of structural steel at elevated temperatures[J]. Fire Safety Journal, 1988, 13(1): 45-54. DOI: 10.1016/0379-7112(88)90032-X.
- [6] CLARK C L. High temperature alloys [M]. London: London Pitman Publishing Corporation, 1953.
- [7] 王连庆,王红缨,马文江.460 MPa耐火钢高温泊松比试验研究[J].工业建筑,2021,51(3):176-179. DOI:10.13204/j.gyjzG20072607.
WANG Lianqing, WANG Hongying, MA Wenjiang. Experimental research on Poisson's ratios of 460 megapascal heat-resisting steel at high temperature [J]. Industrial Construction, 2021, 51(3): 176-179. DOI: 10.13204/j.gyjzG20072607. (in Chinese)
- [8] POST D. Moiré interferometry: Handbook on experimental mechanics [M], New York: Prentice-Hall, 1987.
- [9] CHANG W Y, CHEN K H, CHEN D C, et al. Heterodyne moiré interferometry for measuring corneal surface profile[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54: 232-235. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.013.
- [10] 赵澎涛,于慧臣,何玉怀.单晶高温合金弹性模量和泊松比测试方法的现状分析[J].航空材料学报,2019,39(3):25-34.
ZHAO Pengtao, YU Huichen, HE Yuhuai. Current situation of research on test methods for elastic modulus and Poisson's ratio of single crystal superalloys [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(3): 25-34. (in Chinese)
- [11] GB/T 228.1—2010 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2010 Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)
- [12] 王卫永,丁勇.考虑约束效应的Q460钢梁耐火性能研究[J].建筑结构学报,2023,44(6):47-58,70. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0196.
WANG Weiyong, DING Yong. Study on fire resistance of Q460 steel beam considering restraint effect [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(6): 47-58, 70. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0196. (in Chinese)
- [13] AL-AZZANI H, WANG W Y, ZHANG Y H, et al. Experimental study on behavior of restrained high strength Q690 steel beams exposed to fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 197: 107463. DOI:10.1016/j.jcsr.2022.107463.
- [14] WANG W Y, LI Y M, WANG Z, et al. Experimental and numerical study on the behavior of high strength Q960 steel columns after fire exposure [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 198: 111748. DOI:10.1016/j.tws.2024.111748.
- [15] GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢[S].
GB/T 1591—2018 High strength low alloy structural steels [S]. (in Chinese)