

高强度 Q460 钢高温蠕变性能

王卫永^{1,2}, 闫守海¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 为了研究高强度 Q460 钢的高温蠕变对钢结构抗火性能的影响, 采用高温蠕变试验装置测试了高温下高强度 Q460 钢材在不同应力水平下的蠕变应变随时间的变化曲线。根据试验数据, 在现有蠕变模型的基础上拟合了高强度 Q460 钢材的高温蠕变模型。在有限元结构分析中引入钢材高温材料力学性能和蠕变参数, 分析了考虑高温蠕变后轴心受力 Q460 钢柱的抗火性能。研究表明, 高强度 Q460 钢材在高温和应力作用下具有明显的蠕变变形, 在同一温度和时间下, 蠕变应变随应力水平的提高明显增加; 考虑蠕变效应后, 在标准(ISO-834)的升温条件下, 钢柱的耐火极限明显降低; 在恒定温度下, 钢柱的极限承载力随着时间的增加急剧降低, 因而结构的抗火承载力设计需要考虑受火时间的影响。

关键词: 高强度 Q460 钢; 蠕变; 抗火性能; 有限元分析
中图分类号: TU392 **文献标志码:** A

Creep Behavior in High Strength Q460 Steel

WANG Weiyong^{1,2}, YAN shouhai¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area of China Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to investigate the effect of creep in high strength Q460 steel on the fire resistance of structures, creep-time curves for high strength Q460 steel under various temperature and stress was tested by using creep testing set-up. According to the test data, creep models for high strength Q460 steel were proposed based on current creep models. The fire resistance of axially compressed high strength Q460 steel column was analyzed by employing finite element modeling after taking material properties and creep at elevated temperatures into consideration. The study shows that the creep deformation under the action of temperature and stress in high strength Q460 steel is significant, and at the same temperature and time, the creep increase obviously with rise of stress. After considering the effect of creep, fire duration

of steel column decrease seriously under the fire exposure to ISO - 834 standard temperature curve. At a certain temperature, there is a pronounced reduction in load bearing capacity of steel column with the increase of time for fire exposure. Therefore, in the design of load bearing capacity of steel column, the time lasting in fire should be taken into consideration.

Key words: high strength Q460 steel; creep; fire resistance; finite element analysis

近年来关于钢材高温力学性能的研究成果很多^[1-5], 主要研究了材料的高温屈服强度、极限强度、弹性模量及应力-应变关系等。钢材在高温和应力作用下, 变形随时间而增大的现象称为蠕变。研究表明^[6-7], 蠕变对钢结构的抗火性能有较大的影响。目前关于钢材高温蠕变的研究成果还不多, 主要有以下一些研究: Brinc 等^[8-9]通过试验研究了高强度低合金钢 ASTM A618 和不锈钢 AISI 316Ti 在高温下的蠕变性能, 并采用 Burger 蠕变模型对 ASTM A618 钢试验数据进行了拟合。Schneider 等^[10]对 S460 钢进行了材料力学性能和蠕变试验, 得到了蠕变曲线的 3 个阶段, 并从其中分离出与时间有关的应变分量, 根据温度补偿时间的概念, 提出试验蠕变法则, 能够在任意升温过程的应力应变关系中清楚地考虑蠕变效应, 非线性分析表明, 蠕变效应对结构的承载能力有显著的影响。Morovat 等^[11]对美国 ASTM A992 钢的高温蠕变性能进行了试验研究, 得到了不同温度下的蠕变曲线。Kodur 等^[12]对美国 ASTM A572 钢的高温蠕变性能进行了拉伸试验研究, 得到了不同温度下的蠕变曲线和断裂破坏模式。近年来, 国内也开始有学者开展钢材的高温蠕变研究, 张昊宇等^[13]对 1770 级钢丝进行了高温蠕变和应力松弛试验研究, 周焕廷等^[14]对 1860 级预应力钢绞

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费(CDJZR12200004); 重庆市自然科学基金(cstc2013jcyjA30010)

第一作者: 王卫永(1982—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为结构抗火性能. E-mail: wywang@cqu.edu.cn

线进行了高温蠕变试验研究,目前尚未发现关于高强度 Q460 钢高温蠕变方面的研究报道。

高强度钢具有较高的强度,在火灾高温下强度和刚度急剧降低;研究发现,高强度钢与普通钢在高温下的强度和弹性模量折减系数不同,一般而言,相同温度下高强度钢的折减系数稍低^[5]。本文进行了高强度 Q460 钢材的高温蠕变试验研究,得到了不同温度和不同应力下钢材的蠕变应变与受火时间的关系曲线,并在已有模型的基础上拟合了适用于 Q460 钢材的高温蠕变模型,可供结构抗火分析采用。最后采用 ANSYS 有限元软件建立钢柱的分析模型,考虑蠕变的影响分析了高强度 Q460 钢柱的抗火承载力和临界温度,通过与不考虑蠕变分析结果的对比得到了蠕变对高强度 Q460 钢柱抗火性能的影响。

1 蠕变曲线

钢材的高温蠕变是指钢材在高温和应力作用下随着时间而增大的变形。在高温下给金属加载,在金属内部产生变形、位错和移动等现象。钢材高温下的蠕变可以分为 3 个阶段,见图 1 所示。图中, ε 为应变, ε_{cr} 为蠕变, t 为时间。第 I 阶段是瞬时蠕变阶段,对应曲线的 AB 部分,其应变速率随着时间增长而减小。第 II 阶段是稳态蠕变阶段,对应曲线中的 BC 部分,在该阶段应变速率大体保持恒定,蠕变速率最小,又称为最小蠕变阶段。第 III 阶段是加速蠕变阶段,对应曲线上的 CD 部分,在该阶段蠕变增长速率急剧增大。

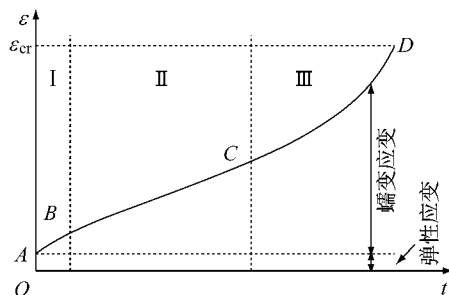


图 1 蠕变曲线 3 个阶段示意

Fig.1 Diagram of three stages in creep curve

2 高温蠕变试验

为了得到高强度 Q460 钢的蠕变数据,采用高温蠕变试验机进行了高温下的蠕变试验,得到了不同温度、不同应力水平下蠕变应变-时间曲线。本文试

验采用恒温加载的模式,即先将温度连续升高至设定温度值并保持恒定,然后连续加载至设定应力水平并保持恒定,采集恒定温度和应力下的蠕变应变。

2.1 试件设计

蠕变试验试件取自 20 mm 厚高强度 Q460 钢板,加工蠕变试件前进行了材料的拉伸试验,得到了 Q460 钢材的力学性能指标,其中屈服强度为 492 MPa、极限强度为 621 MPa、极限伸长率为 15.3%、弹性模量为 202 GPa。根据蠕变试验装置并按照国家标准 GB/T2975—1998^[15]和 GBT 4338—2006^[16]的有关规定,蠕变试件设计尺寸如图 2 所示。试件数量为 35 个,温度范围为 400~900 °C。

2.2 试验装置

高温蠕变试验机为电子式高温蠕变持久强度试验机,型号为 RMT-D5,最大试验荷载为 50kN,试验荷载控制精度在±0.5%以内,变形测量范围为 0~10 mm,速率调整范围为 0~50 mm·min⁻¹,变形分辨率 0.001 mm,高温炉控温范围为 200~1 100 °C,均热带长为 150 mm,温度控制精度:低于 900 °C 时,温度波动度为±3 °C,900~1 100 °C 时,温度波动度为±4 °C。试验装置照片见图 3 所示。本试验在升温过程中试件处于无应力状态,因此试件可自由膨胀,而高温蠕变是在温度和应力共同作用下变形随时间增加,因此升温速率对蠕变没有影响。在加载过程中试件会产生一定程度的弹性变形,这些变形很难从总应变中分离出来,温度和应力恒定后,由于蠕变是随时间变化的量,因此通过尽量缩短加载时间来减小弹性变形对测量蠕变应变的影响。

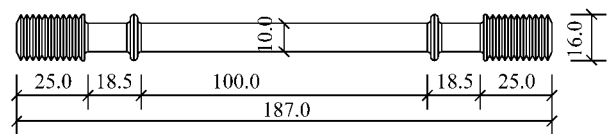


图 2 蠕变试验试件尺寸(单位:mm)

Fig.2 Dimensions of creep test specimen(unit:mm)



图 3 蠕变试验机照片

Fig.3 Photo of creep test set-up

2.3 试验结果

在加载过程中试件会产生弹性变形和蠕变,在采集过程中很难将二者精确分离,可以根据高温下弹性模量和加载的大小计算出弹性变形并从采集结果中扣除,但处理后发现,加载过程中的蠕变很小,因此忽略加载过程中的蠕变,即认为在加载过程中试件的变形为弹性变形,恒载保持恒定后试件的变形为蠕变变形。

试验得到了不同温度和不同应力水平下蠕变应变随时间的变化曲线,见图 4 所示.其中符号“⊗”代表发生在蠕变第Ⅲ阶段末期的断裂,符号“⊕”代表蠕变第Ⅱ、Ⅲ阶段分界点.从图 4 中可以看出,温度较低时(400 °C),大部分蠕变-时间曲线可分为 2 个阶段:第Ⅰ阶段蠕变和第Ⅱ阶段蠕变.第Ⅱ阶段蠕变随着时间的增长与温度和应力有关,持续时间可达 10 h 以上,应力水平较高时才出现第Ⅲ阶段。

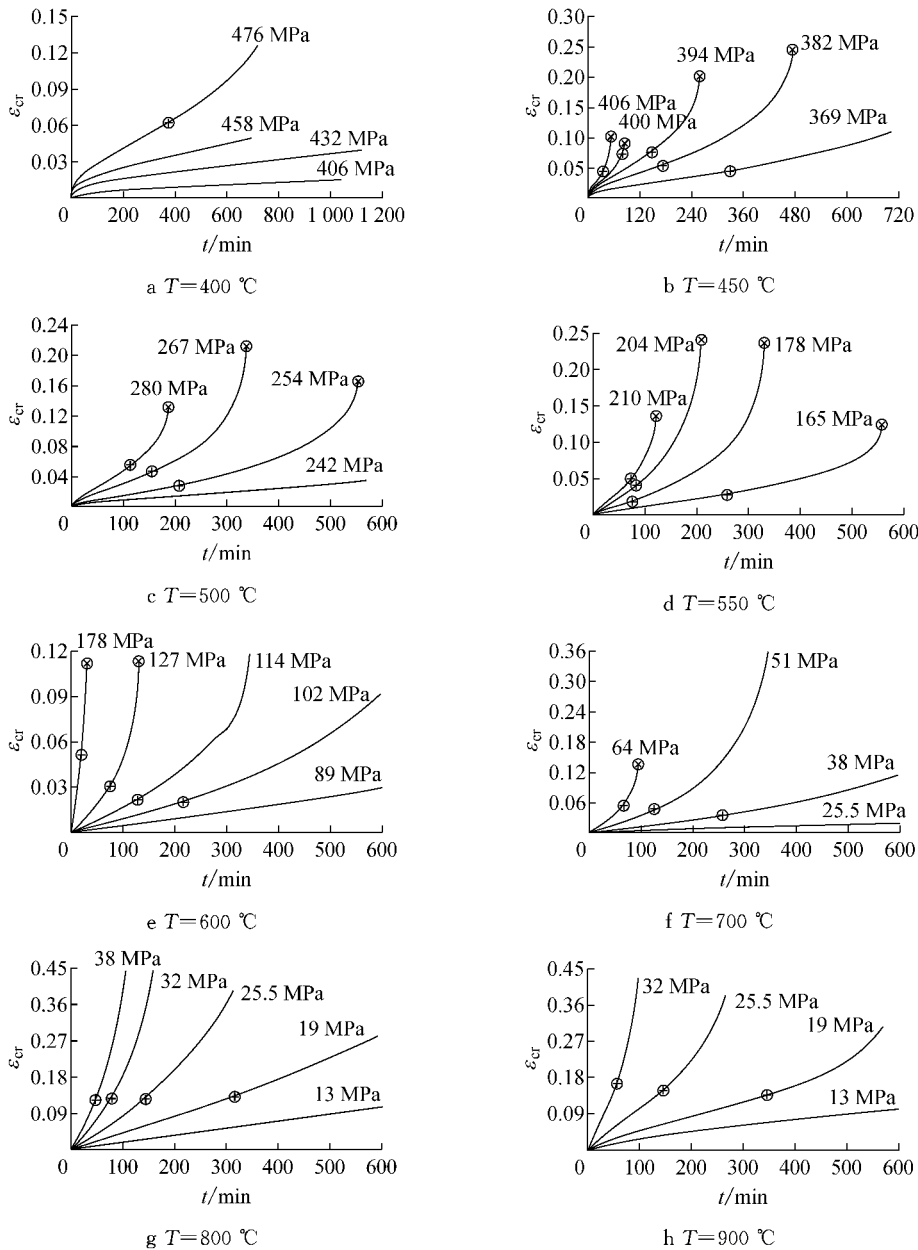


图 4 不同温度和应力下蠕变应变-时间曲线

Fig.4 Creep strain-time curves at various temperature and stress

在 450 °C~550 °C 中等温度下,第Ⅰ阶段蠕变随着应力水平的提高逐渐变短,第Ⅱ阶段蠕变和第Ⅲ阶段蠕变增长速度很快,大部分试样断裂;当应力

很大的时候,断裂之前的蠕变应变相对较小,而相对较低的应力在断裂时的蠕变应变却很大.例如 450 °C,在断裂的试样中,应力为 382MPa 的试样极限蠕

变应变比应力为 394, 400, 406 MPa 的大得多, 在 500 °C, 550 °C 情况下有相同的趋势。

在 600~900 °C 较高温下, 蠕变曲线主要是由第 II 阶段蠕变和第 III 阶段蠕变组成, 第 I 阶段蠕变得很短, 在几分钟之内完成; 由于受热软化, 造成了第 II 阶段蠕变的快速增长, 其影响着整个蠕变响应, 被认为是火灾情况下非常重要的阶段, 其随着时间保持着恒定的增长速率; 在第 III 阶段蠕变中, 试样发生明显的颈缩, 导致横截面上出现很大的应力, 增长速率明显加快。同时可以发现 600~800 °C 试样随着温度的升高表现出了很好的塑性, 蠕变很大。在 900 °C 时, 其蠕变和 800 °C 的蠕变大小很接近。

3 蠕变模型

用以描述金属蠕变的模型很多, 比较著名的有 Dorn 模型^[17]、Harmathy 模型^[18]、Fields 模型^[19]、Burger 模型^[20]等。但由于应力历史、温度历史均对蠕变有影响, 目前还没有一种理论和模型能全面地描述和解释蠕变中的种种现象。对于高温下结构钢

瞬态蠕变的预测与计算, 一般是在大量试验基础上通过统计分析的方法来得到一些回归公式。

ANSYS 有限元软件内置了 13 种隐式蠕变模型可用于试验拟合, ANSYS 自身也具有强大的非线性拟合功能。为了便于在有限元分析中直接引入钢材高温蠕变模型, 本文选择 ANSYS 中的复合时间强化模型和 Norton 模型进行数据拟合, 两者均不考虑时间和应力或钢材温度的耦合效应, 可用于预测蠕变应变。

3.1 复合时间强化模型

复合时间强化模型可考虑初始蠕变阶段和第 II 蠕变阶段, 方程中有 7 个拟合参数, 其基础理论根据 Zienkiewicz 等^[21]关于塑性和蠕变的统一理论。复合时间强化模型给出的蠕变 ϵ_{cr} 的表达式为

$$\epsilon_{cr} = c_1 \sigma^{c_2} \frac{1}{c_3 + 1} t^{c_3 + 1} e^{\left(-\frac{c_4}{T_s}\right)} + c_5 t \sigma^{c_6} e^{\left(-\frac{c_7}{T_s}\right)} \quad (1)$$

式中: ϵ_{cr} 为钢材的蠕变; $c_1 \sim c_7$ 为拟合参数, 其中 $c_1 > 0, c_5 > 0; \sigma$ 为应力; t 为时间; T_s 为钢材温度。

根据试验数据进行了非线性拟合, 得到了不同温度下的拟合参数, 见表 1 所示。

表 1 复合时间强化蠕变模型参数

Tab.1 Coefficients of creep combined time hardening model

温度/°C	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
400	3.30×10^{-12}	10.85	-0.50	18 800	1.30×10^{-12}	4.75×10^{-4}	40 000
450	6.33×10^{-13}	14.05	-0.45	28 000	1.03×10^{-12}	18.00	40 000
500	3.45×10^{-2}	6.50	-0.80	20 300	6.95×10^{-12}	14.35	31 500
550	3.50×10^{-5}	3.35	-0.50	8 600	1.75×10^{-11}	7.50	12 600
600	2.47×10^{-11}	4.35	-0.05	2 900	1.70×10^{-10}	16.55	40 000
700	1.63×10^{-8}	3.25	-0.04	1 900	3.20×10^{-9}	6.00×10^{-3}	32 500
800	2.85×10^{-4}	4.75	-0.05	12 500	6.75×10^{-6}	1.98	1 450
900	1.68×10^{-6}	3.85	-0.20	4 835	2.40×10^{-4}	0.04	600

由于该模型中不同温度下参数不连续, 不易直接分析升温情况下的结构抗火性能, 可以用于恒定温度下的构件承载力分析及结构响应分析。为了验

证拟合的精度, 选择 600 °C 和 800 °C 下模型计算的结果和试验结果进行对比, 见图 5 所示。从图中可见, 结果吻合较好, 验证了拟合的准确性。

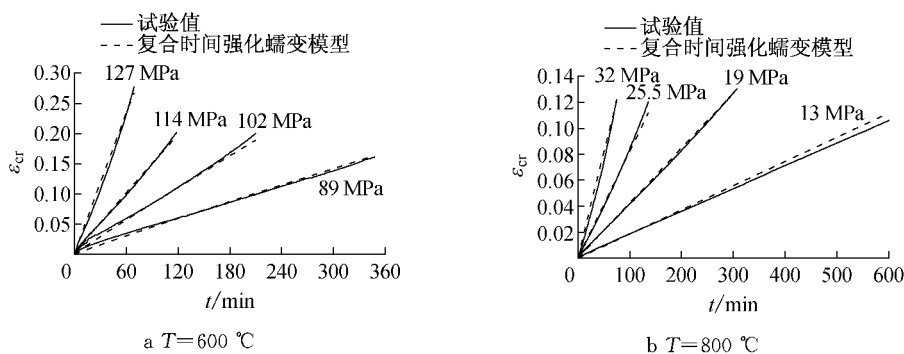


图 5 复合时间强化蠕变模型和试验数据的对比

Fig.5 Comparison of creep strain between test data and combined time hardening creep model

3.2 诺顿模型

Norton 模型仅考虑第 II 蠕变阶段, 方程中仅 3 个拟合参数, Norton 模型主要理论依据是 Norton 理论^[22]. Norton 模型给出的蠕变率 ϵ'_{cr} 的函数表达式为

$$\epsilon'_{cr} = m_1 \sigma^{m_2} e\left(-\frac{m_3}{T}\right) \quad (2)$$

式中: $m_1 \sim m_3$ 为拟合参数, 其中 $m_1 > 0$.

由于温度较低时蠕变较小, 为了便于拟合, 未考虑 400 °C 下的数据, 根据其余试验数据对 Norton 蠕变模型进行了非线性拟合, 得到了一组拟合参数, $m_1 = 2.8186 \times 10^{-11}$, $m_2 = 1.42$, $m_3 = 11890$. 该组参数的适用温度范围为 450~900 °C. 由于试验数据较大, 拟合难度大, 该组参数能吻合试验的部分数据, 涵盖了大部分试验温度值. 为了验证拟合的精度, 选择 4 个温度下模型拟合的结果和试验结果进行对比, 见图 6 所示, 从图中可以看出, 数据基本吻合. 由于该模型中不同温度下参数为同一组, 可以直接用于分析升温情况下的结构抗火性能.

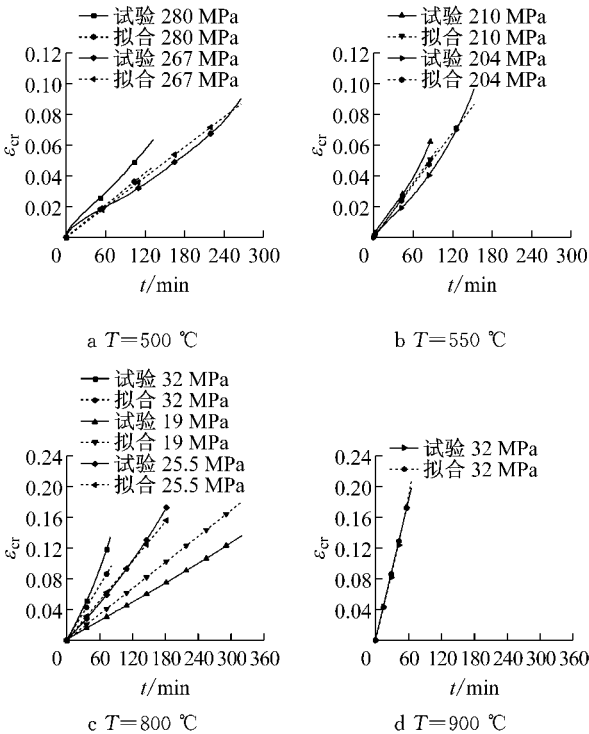


图 6 Norton 蠕变模型和试验数据的对比

Fig. 6 Comparison of creep strain between test data and Norton creep model

4 蠕变对 Q460 钢柱抗火性能的影响

为了考察钢材的高温蠕变对 Q460 钢柱抗火性能的影响, 采用上节提出的蠕变模型, 使用 ANSYS

有限元软件分析了考虑蠕变后 Q460 钢柱的抗火性能, 并对是否考虑蠕变得到的结果进行了对比. 关于高温蠕变模型在有限元分析中的应用, 仅是在普通抗火分析的基础上, 在材料参数设置里定义蠕变模型即可, 只要有限元模型正确, 蠕变模型参数可靠, 即可进行考虑蠕变的结构抗火性能分析, 此方法已被多位学者^[6]采用.

4.1 有限元模型简介

单元类型采用 BEAM188, 自定义截面尺寸. 根据钢柱的截面几何尺寸, 先采用 PLANE82 单元将柱截面几何模型划分平面单元. 截面划分及钢柱有限元模型见图 7 所示. 分析时考虑残余应力和初始几何缺陷, 残余应力根据文献^[23]对 Q460 焊接 H 形截面的测试结果施加, 残余应力施加在每个单元的 4 个积分点上. 几何缺陷根据长度的 0.1% 施加于绕弱轴方向. 材料的高温力学性能参数根据文献^[5]对 Q460 钢材进行的高温试验值确定, 应力-应变关系采用理想弹塑性模型. 进行恒定温度下的承载力分析时, 温度直接作为荷载施加在结构上, 蠕变模型采用复合时间强化模型. 进行标准升温条件下的临界温度分析时, 温度值根据规范^[24]中的计算方法计算出来后采用表格的方法输入.

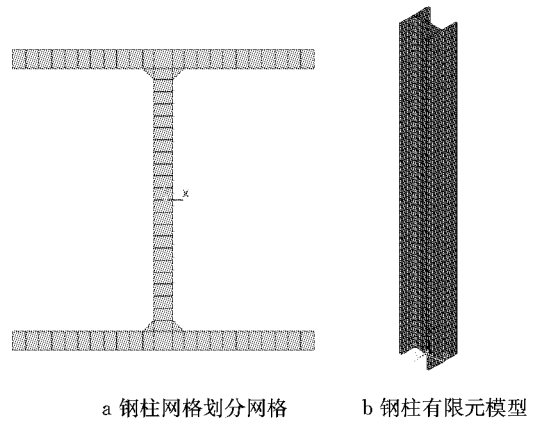


图 7 钢柱截面划分和有限元模型

Fig. 7 Section division and finite element model of steel column

4.2 有限元验证

目前尚未发现高温下 Q460 轴心受压钢柱的试验数据, 为了验证上述模型的正确性, 采用文献^[25]常温下 10 根焊接 H 型钢柱的轴心受压试验数据进行有限元模型的验证. 在有限元分析中, 屈服强度和弹性模量取试验实测值, 截面高度为 160 mm, 宽度为 10 mm, 翼缘和腹板厚度为 10 mm, 焊脚尺寸为 6 mm, 钢柱几何长度为 3.3 m.

采用弧长法施加预测稳定承载力的 110% 使荷

载位移曲线平稳通过最高点并得到下降段,试验得到的钢柱承载力 P_{EXP} 和分析结果 P_{FEM} 的对比如表 2 所示. 从表中可以看出,两者之间差别很小(负号表示有限元分析结果小于试验结果),分析误差 e 均在 9% 以内,证明了有限元模型正确性,其中 $e = \frac{P_{FEM} - P_{EXP}}{P_{EXP}}$.

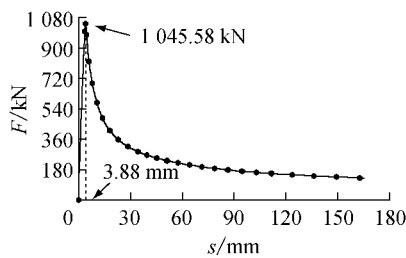
表 2 钢柱承载力试验结果和分析结果对比

Tab. 2 Comparison of load bearing capacity of steel columns between finite element analysis and experiment

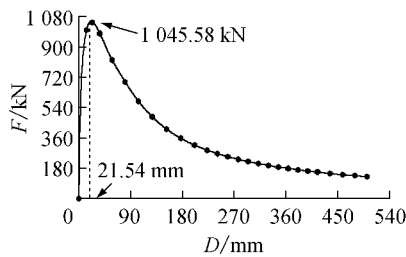
试件编号	P_{EXP}/kN	P_{FEM}/kN	$e/\%$
Z1-1	1 078	994	-7.79
Z1-2	1 039	994	-4.33
Z1-3	1 039	994	-4.33
Z2-1	867	870	0.35
Z2-2	843	870	3.20
Z2-3	882	870	-1.36
Z3-2	784	715	-8.93
Z4-1	647	607	-6.18
Z4-2	602	607	0.08
Z4-3	655	607	-7.33

4.3 考虑蠕变的稳定承载力

采用验证的有限元模型,首先分析了 Q460 钢柱常温下的极限承载力,钢柱的长度为 3.3 m、截面高度为 160 mm、宽度为 10 mm、翼缘和腹板厚度为 10 mm,分析得到的钢柱的荷载位移曲线见图 8 所示,从图 8 中得到极限承载力 $F_{cr,0}$ 为 1 045.6 kN. 然后引入高强度 Q460 钢材的高温力学参数及复合时间强化蠕变模型,分析了恒定温度下钢柱的稳定承载



a 荷载-轴向位移曲线

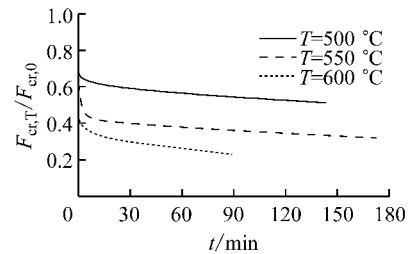


b 荷载-跨中挠度位移曲线

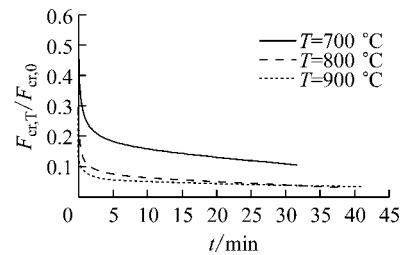
图 8 Q460 钢柱荷载位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of Q460 steel column

力 $F_{cr,T}$ 随时间的变化,分析结果见图 9 所示. 从图 9 中可以看出,随着温度升高,钢柱的承载力明显降低;在某一温度下,并且随着受火时间的延长,钢柱的承载力也明显降低;高温持续时间较短时下降迅速,随着持续时间的进一步增加,承载力降低的幅度有所降低. 产生这种现象的原因是,在高温持续的初始阶段,蠕变以第 I 阶段蠕变为主,在这个阶段,蠕变率较大,且随持续时间逐渐降低. 当蠕变到达第 II 阶段时,蠕变率保持恒定不变. 温度达到 600 °C 及以上时,其耐高温时间明显变短,荷载水平越高,承载力降低越快. 由于高强度 Q460 钢主要用于一些重要的结构构件中,往往其应力水平较高,在火灾下,高温蠕变对结构的耐火时间影响较大,故而在使用高强度钢材时应该着重考虑蠕变对结构的影响.



a T 为 500~600 °C



b T 为 700~900 °C

图 9 Q460 钢柱的承载力随时间的变化曲线

Fig. 9 Variation of load bearing capacity of Q460 steel column with time

4.4 考虑蠕变的临界温度

采用 Norton 模型进行考虑高温蠕变后 Q460 钢柱的恒载升温分析,空气升温按照 ISO-834 标准升温曲线进行,计算得到的临界温度和规范计算结果的对比见图 10 所示. 从图中可以看出,考虑蠕变影响的有限元分析的临界温度普遍低于 CECS200:2006^[24] 计算结果,最低温差为 13 °C,最高温差为 42 °C,最大相对温差为 9.6%. 由于现行结构抗火设计规范^[24] 未充分考虑蠕变的影响,可能造成临界温度的计算结果偏于不安全. 是否考虑蠕变的有限元计算结果差异甚大,最低温差为 27 °C,最高温差为 154 °C,相对温差高达 17.3%. 可见蠕变对临界温度影响较大.

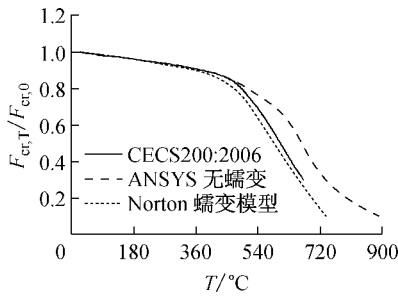


图 10 有限元分析和规范得到的临界温度对比
Fig.10 Comparison of critical temperature obtained by finite element analysis and code

4.5 是否考虑蠕变的分析结果对比

为了定量对比考虑蠕变与否对 Q460 钢柱承载力的影响,在规范 ISO-834 升温条件下,对不同荷载比下是否考虑蠕变的钢柱轴向位移 s 和跨中挠度 D 随时间的变化进行了分析,分析结果见图 11 所示,从图 11 中可以看出,蠕变的影响主要是通过增大变形、减小刚度来降低构件的临界温度. 荷载比较低时,考虑蠕变后的耐火极限降低很多,例如荷载比 R 为 0.3 时,耐火极限从 25 min 降为 15 min,降低了 40%. 荷载比较大时,考虑蠕变后的耐火极限降低幅度下降.

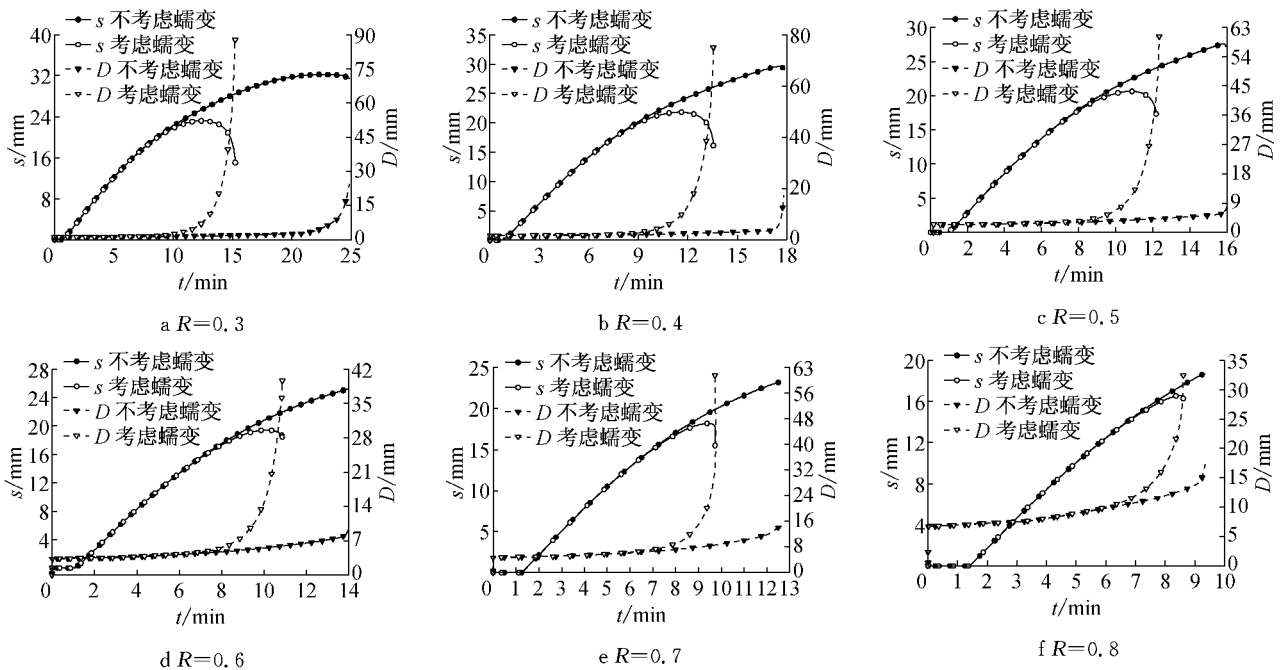


图 11 考虑蠕变与否的分析结果对比
Fig.11 Comparison of analytical results with and without creep

5 结论

通过对 Q460 钢材进行高温蠕变试验和对轴心受压 Q460 钢柱进行考虑蠕变后的抗火性能有限元分析,主要得到了以下几个结论:

(1) 高强度 Q460 钢材高温下蠕变变形显著,温度低于 400 °C 时,蠕变主要表现为瞬态蠕变阶段,温度介于 600~900 °C 时,以稳态蠕变和加速蠕变阶段为主.

(2) 考虑蠕变后,温度高于 400 °C 时,随着温度升高,Q460 钢柱的承载力明显降低;并且随着受火时间的延长,钢柱的承载力也明显降低,刚开始受热时下降迅速,随着受热时间的进一步增加,承载力降

低的幅度有所降低.

(3) 在规范 ISO-834 升温条件下考虑蠕变后 Q460 钢柱的临界温度低于现行结构抗火设计规范的计算结果,由于规范中未充分考虑蠕变的影响,导致计算结果偏于不安全.

(4) 当荷载比较低时,对于 Q460 钢柱,考虑蠕变后的耐火极限与不考虑蠕变相比降低很多,荷载比较大时,考虑蠕变后的耐火极限降低幅度下降.

参考文献:

[1] 屈立军,李焕群,王跃琴,等. 国产钢结构用 Q345(16Mn) 钢在恒载升温条件下的应变-温度-应力材料模型[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 41.
QU Lijun, LI Huanqun, WANG Yueqin, et al. Strain-

- temperature-stress material model of Q345 (16Mn) steel under elevated temperature and constant loading [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2008, 41(7): 41.
- [2] 杨秀英, 赵金城. 不同路径对 Q235 钢材高温性能的影响[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(1): 29.
YANG Xiuying, ZHAO Jincheng. The effect of multi-paths on mechanical properties of Q235 steel at elevated temperature [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2010, 43(1): 29.
- [3] 陈伟, 叶继红. G550 高强度冷成型钢高温力学性能瞬态试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(7): 56.
CHEN Wei, YE Jihong. Transient state experimental investigation of G550 high strength cold-formed steel material at elevated temperatures [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2012, 45(7): 56.
- [4] 陈伟, 叶继红. Q345 冷成型钢高温力学性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(2): 41.
CHEN Wei, YE Jihong. Experimental investigation on mechanic behavior of Q345 cold-formed steel material at elevated temperatures [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(2): 41.
- [5] Wang W Y, Liu B, Kodur V K R. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high strength steel [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(2): 174.
- [6] Kodur V K R, Dwaikat M. Response of steel beam-columns exposed to fire [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(2): 369.
- [7] Kodur V K R, Dwaikat M M S. Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams [J]. *Materials and Structures*, 2010, 43(10): 1327.
- [8] Brnic J, Turkalj G, Canadija M, *et al.* Creep behavior of high-strength low-alloy steel at elevated temperatures [J]. *Material Science and Engineering A*, 2009, 499(1/2): 23.
- [9] Brnic J, Turkalj G, Canadija M, *et al.* AISI 316Ti (1.4571) steel-mechanical, creep and fracture properties versus temperature [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(12): 1948.
- [10] Schneider R, Lange J. Constitutive equations and empirical creep law of structural steel S460 at Elevated temperatures [J]. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2011, 2(3): 217.
- [11] Morovat M A, Lee J, Engelhardt M D, *et al.* Creep properties of ASTM A992 steel at elevated temperatures [J]. *Advanced Material Research*, 2012, 446-449: 786.
- [12] Kodur V K R, Aziz E M. Effect of temperature on creep in ASTM A572 high-strength low-alloy steels [J]. *Material and Structures*, 2014; 10.1617/s11527-014-0262-2.
- [13] 张昊宇, 郑文忠. 高温下 1770 级 φ -P5 钢丝蠕变及应力松弛性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(8): 7.
ZHANG Haoyu, ZHENG Wenzhong. An experimental study on the creep and stress relaxation properties of 1770- φ -P5 prestressing steel wires at high temperatures [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2006, 39(8): 7.
- [14] 周焕廷, 聂河斌, 李国强, 等. 高温作用下 1860 级预应力钢绞线蠕变性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6): 123.
ZHOU Huanting, NIE Hebin, LI Guoqiang, *et al.* Experimental research on creep properties of prestressed steel strand in 1860 MPa at high temperature [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6): 123.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T2975—1998 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T2975—1998 Steel and steel products—Location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4338—2006 金属材料高温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 4338—2006 Metallic materials—Tensile testing at elevated temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [17] Dorn J E. Some fundamental experiments on high temperature creep [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1955, 3(2): 85.
- [18] Harmathy T Z. A comprehensive creep model [J]. *Journal of Basic Engineering, Transactions of ASME*, 1967, 89(3): 496.
- [19] Fields B A, Fields R J. Elevated temperature deformation of structural steel [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1989.
- [20] Findley W N, Lai J S, Onaran K. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials [M]. New York: Dover Publications, 1989.
- [21] Zienkiewicz O C, Corneau I C. Visco-plasticity-plasticity and creep in elastic solids—A unified numerical solution approach [J]. *International Journal for Numerical Method in Engineering*, 1974, 8(4): 821.
- [22] Norton F H. The creep of steel at high temperatures [M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1929.
- [23] 王彦博, 李国强, 陈素文, 等. Q460 钢焊接 H 形柱轴心受压极限承载力试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(6): 58.
WANG Yanbo, LI Guoqiang, CHEN Suwen, *et al.* Experimental study on the ultimate bearing capacity of axially compressed high strength steel of H-section columns [J]. *Journal of Civil Engineering*, 2012, 45(6): 58.
- [24] 中国工程建设标准化协会. CECS200:2006 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
China Engineering Construction Standardization Society. CECS200:2006 Technical code for fire safety of steel structures in buildings [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [25] 崔佳. 残余应力对焰切边焊接工形柱承载力影响的研究[D]. 重庆: 重庆建筑工程学院, 1983.
CUI Jia. Influence of residual stress on load bearing capacity of welded I-shaped section columns with flame cutting edges [D]. Chongqing: Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1983.