

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.012

高强度 Q460 钢梁抗火性能研究(II)——理论验证

王卫永¹, 周一超¹, 于宝林², 彭川³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 密歇根州立大学 土木与环境工程系, 美国 密歇根 48824;
3. 重庆理工大学 资产管理公司, 重庆 400050)

摘要:系列文章的第 1 篇已经对高强度 Q460 钢梁高温下的抗火性能进行了理论分析,给出了高强度 Q460 钢梁的温度分布和极限承载力、临界温度和稳定系数的计算方法。该文采用有限元分析对高强度 Q460 钢梁的温度分布和极限承载力进行了计算,并将计算结果与理论分析和试验结果进行了对比,验证了理论分析的正确性。对高强度 Q460 钢梁和普通 Q235 钢梁的抗火性能进行了对比,得到两者在抗火性能方面的区别。提出了高强度 Q460 钢梁抗火设计的简化方法,并通过一个算例演示了简化设计方法的使用。

关键词:有限元;高强钢;抗火性能;钢梁

中图分类号:TU392 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0072-08

Fire Resistance Analysis of High Strength Q460 Steel Beams-Part II: Theory Validation

Wang Weiyong¹, Zhou Yichao¹, Yu Baolin², Peng chuan³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045, P. R. China;

2. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, Michigan 48824, USA;

3. Assets Management Company, Chongqing, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract:In the previous companion paper, the fire resistance of high strength steel beams made from Q460 was theoretically studied. The methods to obtain temperature distribution, critical moment, critical temperature and stability coefficient were presented. The temperature distribution and load bearing capacity was analyzed by finite element method, and the validation was evaluated by comparison of results between theoretical computation and finite element analysis as well as experimental results. The comparison was made between Q460 steel beam and mild Q235 steel beam and the difference on fire resistance was obtained. A simplified approach for fire resistance of high strength Q460 steel beams was proposed and an example was given to show the application and reference of the approach.

Key words: finite element; high strength steel; fire resistance; steel beam

系列文章的第 1 篇^[1]已经对高强度 Q460 钢梁高温下的抗火性能进行了理论分析,采用有限差分法给出了高强度 Q460 钢梁的温度分布函数表达式,并结合 Q460 钢材的高温力学性能参数得到了温度均匀分

布和不均匀分布下的 Q460 钢梁极限承载力、临界温度和稳定系数。本文将对理论结果进行有限元验证,并将普通 Q235 钢梁和高强度 Q460 钢梁的抗火性能进行对比,得到他们的区别。最后提出了温度不均匀

收稿日期:2013-06-14

基金项目:重庆市博士后特别资助(渝 xm201103007);中国博士后科学基金(20110490811,2012T50765);

作者简介:王卫永(1982.12-),男,副教授,博士,主要从事结构抗火性能研究,Email:wywang@cqu.edu.cn.

分布的 Q460 钢梁简化设计方法。

1 有限元验证

系列文章的第 1 篇^[1]给出了钢梁各个组件温度的计算方法和临界弯矩的计算理论,为了验证其正确性,采用有限元软件 ANSYS 对高强度 Q460 钢梁进行了有限元分析,包括热分析和结构分析两部分。在传热分析中,采用有限元分析的结果验证了有限差分法得到的钢梁各组件的温度分布,并对分析结果产生偏差的原因进行了分析;在结构分析中,采用有限元方法计算了高强度 Q460 钢梁的临界弯矩,并将有限元分析的结果与等效刚度法计算的结果进行了对比,据此判断该理论的可靠性。

1.1 高强度 Q460 钢梁热分析

钢梁的截面尺寸为 $\text{HN}400 \times 200 \times 8 \times 13$,温度计算考虑三面受火的情况,求解该钢梁的温度场分布。结构分析中,将热分析得到的结果作为体荷载施加到结构上。热分析单元类型选取 SOLID70,该单元可用于三维稳态或瞬态热分析,每个单元有 8 个节点,每个节点仅有温度自由度。在对钢梁进行网格划分时,为了适应几何形状比较复杂的实体模型,该单元可以自动蜕化为四面体与棱柱体。

进行有限元热分析时,钢梁周围的空气温度按照 ISO 834 标准升温曲线确定,初始温度设定为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,钢梁的传热边界条件根据实际情况确定,即上翼缘上边界为绝热状态,其他受火的边界设置对流和辐射参数。分析中假定结构产生的变形对受热边界条件没有影响。有限元热分析中用到的钢梁的热工性能参数,例如:比热、导热系数、热膨胀系数和密度等,按照 EC3^[2]中的规定取值。

有限元分析的结果和有限差分法计算结果的对比见图 1。从图 1 中可以看出,二者吻合较好,验证了采用有限差分法计算 Q460 钢梁各个部件温度的正确性。

为了进一步对热分析模型进行验证,将文献[3]抗火试验中的温度测量结果和该模型分析的结果进行了对比。试验中在 3 个不同的截面(1/4、1/2 和 3/4 高度)测试了约束 Q460 钢柱的温度分布,约束钢柱截面尺寸为 $\text{H}200 \times 195 \times 8 \times 8$,空气升温为试验中实测的温度曲线,分析结果和试验结果的对比见图 2。从图 2 中可以看出,二者吻合较好,最大误差控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

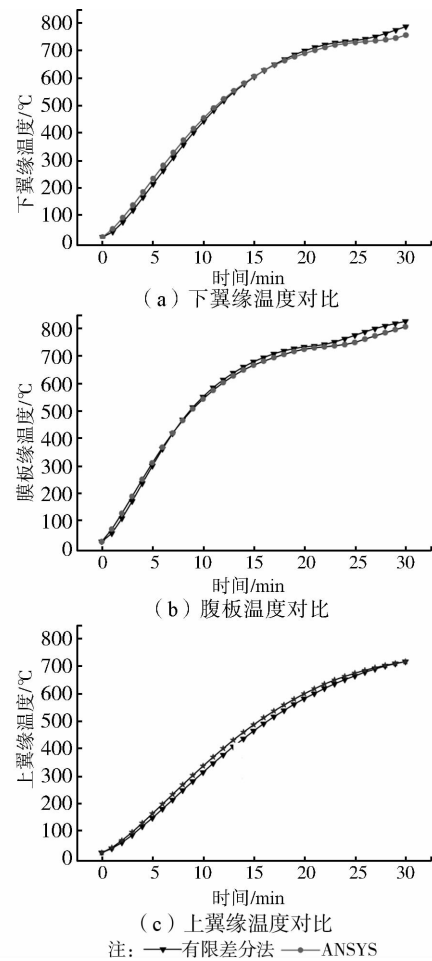


图 1 有限差分法与 ANSYS 分析温度结果的比较

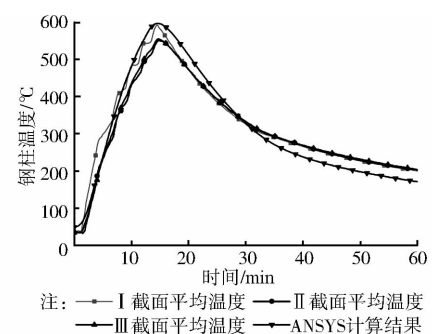


图 2 有限元分析和试验结果的对比(温度)

1.2 结构分析

钢梁承受横向荷载作用时,当荷载不大时,一般情况下可保持在平衡状态。随着荷载的增大并达到某一临界值时,如果此时在钢梁侧向施加一个微小的作用力,钢梁的平衡位置被打破,产生较大弯曲变形并伴随着扭转,这种现象称为梁的弯扭屈曲,该弯矩临界值定义为临界弯矩。采用有限元软件 ANSYS 对高强度 Q460 钢梁的整体稳定承载力进行计算。对构件进行分析时,采用的单元类型为 SHELL181 单元,该单元具有 4 个节点,每个节点有 4 个自由度,可以

分析材料的塑性、大变形和大应变。在结构分析中,需要设置材料参数,主要有钢材高温屈服强度、高温弹性模量、泊松比、应力-应变关系等。其中高温下的强度和弹性模量取值按照系列文章第 1 篇中的式(1)和式(2)计算得到。应力应变关系采用双线性弹塑性模型。钢梁的有限元模型和网格划分见图 3(a)。

需要指出的是,当利用壳单元对 H 型钢梁进行有限元分析时,翼缘或腹板板件在钢梁发生整体屈曲之前可能会出现局部屈曲和畸变屈曲,这样就不能得到钢梁的弯扭屈曲临界弯矩。为了避免局部屈曲和畸变屈曲的出现,在有限元模型中,可以通过设置“特殊加劲肋”的方法来实现。一般来讲,沿梁的跨度方向设置 5~7 道特殊加劲肋即可避免出现局部屈曲和畸变屈曲。特殊加劲肋的设置方法是让加劲肋与钢梁的腹板相连,而与翼缘的连接仅耦合加劲肋平面内的位移,通过这种方法可以保证加劲肋支撑翼缘和腹板不发生屈曲,同时也不增加钢梁的抗扭刚度和抗弯刚度。钢梁端部的约束条件为夹支铰接,即约束端部截面内节点在平面内的位移和一个节点的纵向位移,加劲肋设置和约束条件见图 3(b)。

采用有限元分析钢梁的临界弯矩时,分两个步骤。第 1 步进行钢梁的静态分析,分析时需要设置激活预应力效应和设定两个荷载步,第 1 个荷载步中设置初始温度和参考温度,设定为 20 °C,并将前面分析得到的钢梁温度分布数据作为体荷载施加到钢梁上。第 2 个荷载步施加作用在钢梁上的横向荷载,考虑均布荷载和集中荷载两种情况,分析求解直至结束。第 2 步进行结构的特征值屈曲分析,首先设置屈曲模型和特征值提取方式,然后求解。求解完成后,可以在后处理中画出钢梁发生弯扭屈曲的屈曲模态。临界弯矩的数值即为施加的荷载和屈曲荷载系数的乘积。图 3(c)为钢梁的弯扭屈曲模态。

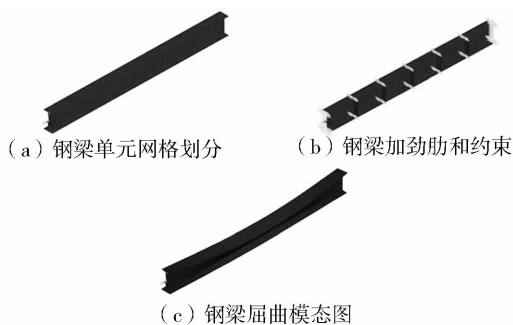


图 3 钢梁网格划分和约束情况

根据可以查到的文献,尚未发现有 Q460 钢梁的抗火性能试验。为了验证有限元模型的正确性,

采用普通钢梁的抗火性能试验^[4]对有限元模型进行验证。试验中,钢梁截面尺寸为 H200×150×6×9,钢材为 Q235B,测量的屈服强度为 330 MPa,极限强度 415 MPa。荷载为 5 分点加载,荷载大小为 17.5 kN。构件按标准升温曲线 ISO834 进行升温,材料高温下的屈服强度和应力应变关系按照 EC3^[2]中的值给出,有限元分析得到的跨中挠度和试验结果的对比见图 4,从图 4 可以看出,二者总体吻合较好,得到的临界温度相差很小,但升温过程梁的变形和达到临界温度后试件的变形有些差异,这主要是因为试验中随着挠度的增大,荷载很难保持恒定,通过手动调节油泵控制千斤顶荷载,其次是试验测量

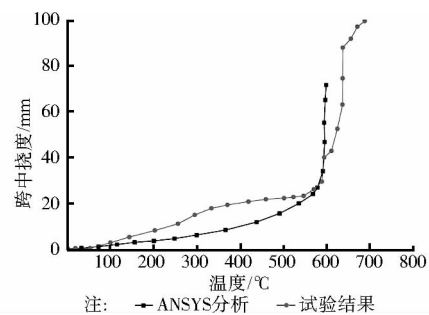
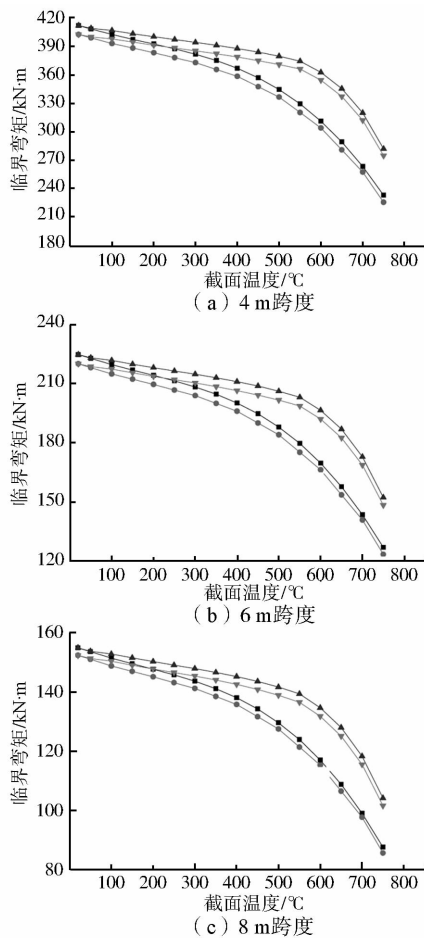


图 4 有限元分析和试验结果的对比(挠度)

的试件温度分布和有限元分析得到的温度分布有差异。为了验证系列文章的第 1 篇中温度修正公式与等效刚度法用于分析温度不均匀分布的钢梁受力性能的可靠性,对截面为 HN400×200×8×13,跨度分别为 4、6、8 m 的高强度 Q460 钢梁进行了分析,该梁无侧向支撑,三面受火,考虑了温度的均匀分布和不均匀分布。采用有限元分析得到的温度分布作为温度荷载值施加到结构模型上,将 ANSYS 得到的结果与理论计算结果进行对比,如图 5 所示,图 5 中横坐标温度值,对于温度均匀分布的钢梁为截面平均温度,对于温度不均匀分布的钢梁,该数值是腹板的温度值。从图中可见,整体吻合较好,通过等效刚度法计算得到的高强度 Q460 钢梁的高温下承载力,其数值略大于 ANSYS 分析得到的结果。原因可能是由于温度修正公式具有一定误差,以及采用有限元模型与理想铰接模型具有一定差异等。总体来看,理论分析结果与 ANSYS 分析结果吻合较好。

为了验证系列文章的第 1 篇提出的等效刚度法计算温度不均匀分布的钢梁的临界弯矩的可靠性,考虑钢梁截面温度的不均匀分布,并选取腹板温度为 300 和 600 °C 两个温度值以及 4、6、8 m 3 个跨度,分别采用等效刚度法和有限元法对临界弯矩进



注: —●—理论结果-温度均匀分布 —■—ANSYS结果-温度均匀分布
—▲—理论结果-温度不均匀分布 —◆—ANSYS结果-温度不均匀分布

图5 均布荷载作用下等效刚度法和有限元法的比较

行计算,计算结果对比见表1。从表1可以看出,ANSYS分析计算结果与等效刚度法计算结果相差较小,不超出2.5%。

表1 稳定承载力结果对比

跨度 L/m	等效刚度法计算 结果/(kN·m)		ANSYS 计算 结果/(kN·m)		结果偏差 对比/%	
	300 °C	600 °C	300 °C	600 °C	300 °C	600 °C
4	394.09	362.48	385.25	354.2	2.24	2.28
6	214.72	196.41	210.29	192.01	2.06	2.24
8	147.87	134.64	145.37	131.79	1.69	2.12

此外,还分别采用等效刚度法和有限元分析法对钢梁的临界温度结果进行了计算和对比,计算时考虑了钢梁截面温度的不均匀分布,选择两个荷载比 $R=0.7$ 和 0.9 以及4、6、8 m 3个跨度,两种方法计算结果的对比见表2。从表中可以看出,等效刚度法和ANSYS有限元分析结果吻合较好,二者差异均在6%以内。

表2 临界温度结果对比

跨度 L/m	等效刚度法 计算结果/°C		ANSYS 计算结果/°C		结果偏差 对比/%	
	0.7	0.9	0.7	0.9	0.7	0.9
4	750	601	744	575	0.80	4.33
6	747	589	732	557	2.01	5.43
8	742	575	728	542	1.89	5.74

从有限元分析过程可以看出,对考虑不均匀温度分布的高强度Q460钢梁进行承载力分析时,相比理论计算方法,有限元分析过程较复杂,理论方法更便于进行数据计算和分析,从而得到简化的设计方法。采用上文的理论分析方法对Q460钢梁是否考虑温度的不均匀分布的承载力和临界温度以及和普通Q235钢梁的稳定承载力和临界温度进行对比,从而得到高强度Q460钢梁和普通钢梁抗火性能的差异。

2 高强度 Q460 钢梁与普通 Q235 钢梁的对比

以H型高强度Q460钢梁和普通Q235钢梁为例,截面尺寸均为 $HN400 \times 200 \times 8 \times 13$,无侧向支撑;截面面积为 85.76 cm^2 ,绕强轴的惯性矩 $I = 24\,300 \text{ cm}^4$,截面模量 $W = 1\,215 \text{ cm}^3$,考虑钢梁的三面受火,即上翼缘上表面绝热,假设常温下钢梁的整体稳定系数为 φ'_b ,钢梁上的荷载比为 R ,考虑两种荷载类型:梁上翼缘作用有沿弱轴方向的均布荷载 Q 和集中荷载 P 。

2.1 分析假定

系列文章第1篇中式(10)的温度修正根据《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200:2006)^[5]的式(4.10)得到,为了便于对比,在对比温度均匀分布的钢梁和温度不均匀分布的钢梁时,钢梁的腹板温度保持相同,当考虑上翼缘和下翼缘的温度与腹板温度不同时,才能得到钢梁温度的不均匀分布对其稳定承载力的影响。所以算例中涉及的温度数值,对温度均匀分布的钢梁指的是截面温度,也是平均温度,对温度不均匀分布的钢梁指的是钢梁的腹板温度。

2.2 稳定承载力的比较

2.2.1 高强度Q460钢梁是否考虑温度不均匀分布的比较 钢梁跨度选择了4、6、8 m共3种,荷载类型为均布荷载和集中荷载,在是否考虑温度不均匀分布的前提下,计算每种跨度每个作用荷载类型钢梁的临界弯矩随腹板温度的变化趋势。根据系列

文章第 1 篇的计算方法,即采用等效刚度法得到不同温度不同跨度的两种荷载类型的临界弯矩,如图 6 所示。由图 6 可以看出,对于温度均匀分布和不均匀分布的高强度 Q460 钢梁,临界弯矩的大小都随温度的升高而逐渐降低。这是由于钢梁的弯扭屈曲稳定承载力主要由钢材的强度和刚度决定,而在高温下,二者皆受温度的影响,随着温度的升高而降低。从图 6 还可以看出,当腹板温度相同时,对于温度均匀分布的高强 Q460 钢梁和温度不均匀分布的钢梁,临界弯矩随温度升高的变化具有差异,表现在温度不均匀分布时,腹板温度相同的条件下,临界弯矩高于温度均匀分布的钢梁。并且,腹板温度越高时,这种差异越明显。当腹板温度达到 650 °C 左右时,差值达到最大值,随着腹板温度的继续增加,二者的差异开始降低。发生这种现象的原因是高温下截面的温度差不同,在温度较低时温差小,从而钢梁的临界弯矩差异较小。但随着温度的升高,对于温度不均匀分布的钢梁,上下翼缘的温度差增大,临界弯矩提高效应开始变得明显,造成与温度均匀分布的钢梁相比临界弯矩差值又逐渐增大。而当温度较高时,虽然温差仍然存在,但钢梁的材料力学性能下降严重,造成临界弯矩的差异又逐渐降低。

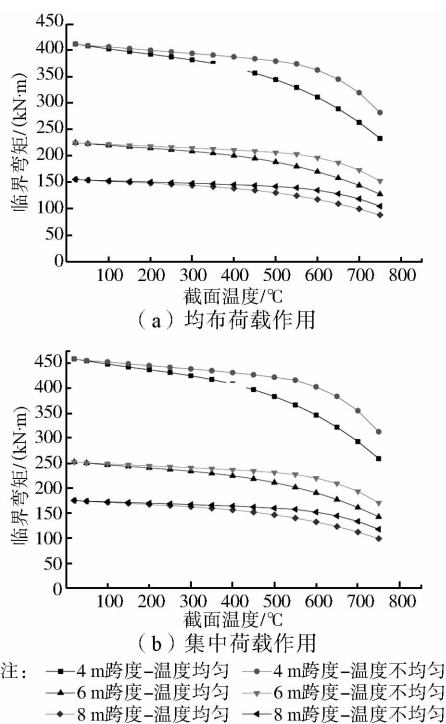


图 6 温度分布对高强度 Q460 钢梁临界弯矩的影响

2.2.2 高强度 Q460 钢梁与普通 Q235 钢梁的比较 为了对比高强度 Q460 钢梁与普通 Q235 钢梁抗火性能的差异,采用系列文章的第 1 篇中提出的

等效刚度法,分别对高强 Q460 钢梁和普通 Q235 钢梁在高温下的临界弯矩进行了计算,结果对比见图 7。从图 7 可以看出,对于温度不均匀分布的钢梁, Q460 钢梁比 Q235 钢梁在温度分布相同的条件下,前者的临界弯矩大于后者,在 400 °C 之前,差异不是很明显,随着温度的升高,两者的临界弯矩都急剧降低, Q460 钢梁下降的幅度明显低于 Q235 钢梁,温度越高二者的差异越明显。原因是高强度 Q460 钢材的高温力学性能优于普通钢,尤其是弹性模量数值,在同样的温度下,比普通钢高很多^[6]。对不同跨度的钢梁,考虑温度的不均匀分布时,随着跨度的增大,腹板温度相同的高强度 Q460 钢梁或普通 Q235 钢梁,临界弯矩均降低,这是因为临界弯矩的大小和自由支撑的长度有关,该长度越大,钢梁越易于发生侧向弯扭屈曲。从图 7 中还可以看出,承受集中荷载作用钢梁的临界弯矩要大于承受均布荷载作用的钢梁,这是因为钢梁的临界弯矩除了和最大弯矩有关,还与弯矩的分布有关,均布荷载下比集中荷载下分布更加饱满。

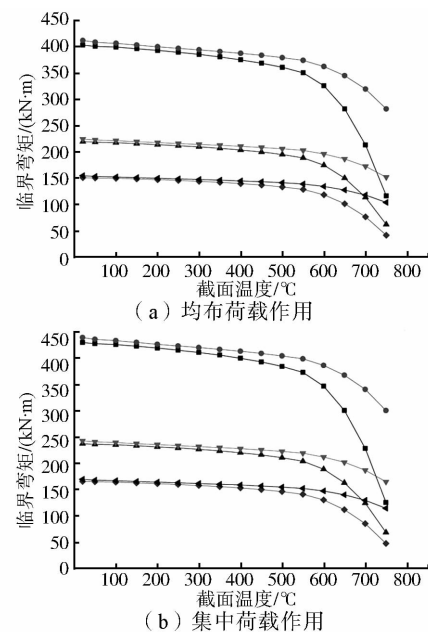


图 7 不均匀温度下高强钢与普通钢临界弯矩的对比

图 7 不均匀温度下高强钢与普通钢临界弯矩的对比

2.3 临界温度的比较

2.3.1 考虑温度不均匀分布的高强度 Q460 钢梁的临界温度 依据系列文章的第 1 篇中临界温度的计算方法得到不同稳定系数下高强 Q460 钢梁的临界温度随荷载比的变化情况,如图 8(a)所示。从该图中可以看出,对于相同的稳定系数,随温度的升

高, Q460 钢梁的临界温度逐渐降低。荷载比越大, 临界温度降低得越多。在相同的荷载比下, 随着稳定系数的增加, 临界温度逐渐升高。稳定系数对临界温度的影响仅当荷载比较大时 ($R > 0.9$), 才比较明显, 当荷载比达到 0.95 时, 稳定系数为 0.5 和 1.0 的钢梁相比, 临界温度的差值已达 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.3.2 高强度 Q460 钢梁是否考虑温度不均匀分布对临界温度的影响 为了得到温度不均匀分布对高强度 Q460 钢梁临界温度的影响, 考虑两个稳定系数: 0.6 和 0.9, 采用系列文章第 1 篇中给出的临界温度计算方法, 计算高强度 Q460 钢梁的临界温度随荷载比变化的规律, 如图 8(b) 所示。从该图中可以看出, 对于温度不均匀分布和温度均匀分布的 Q460 钢梁, 随着钢梁上荷载比的增大, 其临界温度均不同程度下降。对温度均匀分布的 Q460 钢梁, 临界温度的下降较为平缓; 但是对于温度不均匀分布的 Q460 钢梁, 临界温度下降则相对较快。对于相同的稳定系数, 温度不均匀分布的 Q460 钢梁临界温度要高于温度均匀分布的临界温度, 并且临界温度的差值随荷载比的升高逐渐降低。主要是因为考虑钢梁的温度不均匀分布之后, 当钢梁的腹板温度保持相同的条件下, 钢梁的上下翼缘温度较低, 尤其是对于上翼缘, 温度更低, 从而造成钢梁上、下翼缘的弹性模量稍大, 因而临界弯矩较高, 相应的临界温度就稍高。在相同的荷载比下, 温度均匀分布的 Q460 钢梁的临界温度随稳定系数的增加而降低; 而温度不均匀分布的钢 Q460 梁的临界温度随稳定系数的提高而略微增加。

2.3.3 温度不均匀分布的高强度 Q460 钢梁与普通 Q235 钢梁的比较 钢材种类可能会对钢梁的抗火性能产生影响, 为了对比高强度 Q460 钢梁和普通 Q235 钢梁抗火性能的差异, 根据提出的等效刚度法对两种钢梁的抗火性能进行了对比。对比结果见图 8(c)。从图中可以看出, 对两种钢梁, 稳定系数对临界温度的影响不大, 普通 Q235 钢梁的临界温度随荷载比的提高而降低, 荷载比小于 0.8 时近似线性相关。而对于 Q460 钢梁, 临界温度随着荷载比的变化表现出折线性变化, 而且其临界温度数值明显高于同等条件下的普通 Q235 钢梁。因而, 高强度 Q460 钢梁的抗火性能与普通钢梁相比具有较大的差异。

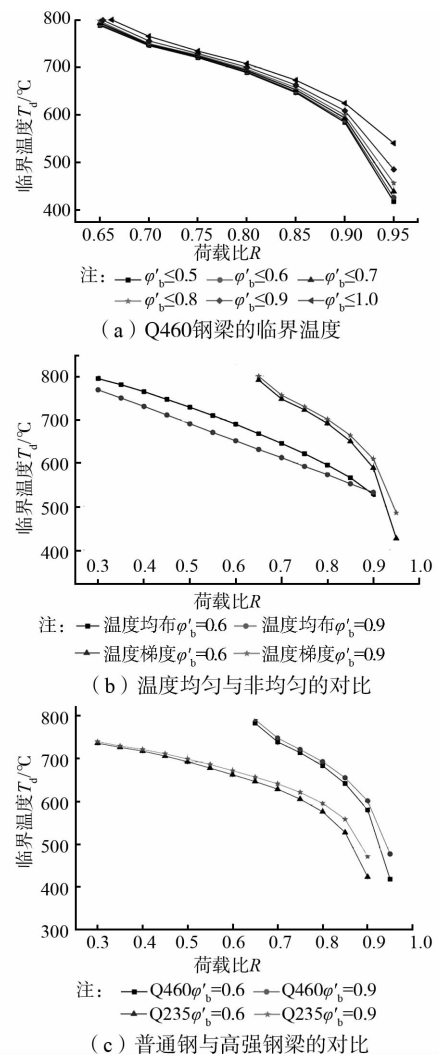


图8 临界温度的对比

3 简化设计方法

为了简化计算过程并方便设计人员使用, 根据前面推导的原理和方法, 采用等效刚度法对多个不同截面的钢梁, 考虑温度的不均匀分布后, 计算了其稳定承载力和临界温度, 计算结果以表格的形式给出, 从而可以直接查找使用。

3.1 稳定系数

由系列文章的第 1 篇的理论推导易知, 考虑温度不均匀分布的高强度 Q460 钢梁的整体稳定系数 φ_{bT}^{eq} 受钢梁上作用的荷载类型、钢梁的横截面尺寸等参数的影响。表 3 给出了按 Q460 高强钢梁的自由长度、荷载情况和截面类型计算得到的 φ_{bT}^{eq} , 以直接查用, 由于篇幅有限, 仅给出了部分数据, 对于其他荷载情况和截面类型以及其他温度下的整体稳定系数, 可见参考文献[7]。

表 3 上翼缘作用均布荷载下 Q460 钢梁不均匀温度分布下的整体稳定系数

截面尺寸	温度/℃	自由长度/m							
		3	4	5	6	7	8	9	10
200×100×5.5×8	400	0.386	0.275	0.216	0.180	0.154	0.135	0.121	0.109
	800	1.000	1.000	0.815	0.674	0.577	0.505	0.450	0.406
250×125×6×9	400	0.480	0.325	0.248	0.202	0.171	0.149	0.133	0.120
	800	1.000	1.000	0.943	0.765	0.646	0.562	0.498	0.448
300×150×6.5×9	400	0.574	0.367	0.269	0.213	0.177	0.152	0.134	0.120
	800	1.000	1.000	1.000	0.812	0.672	0.575	0.505	0.451
350×175×7×11	400	0.762	0.476	0.342	0.266	0.219	0.186	0.163	0.145
	800	1.000	1.000	1.000	1.000	0.838	0.711	0.620	0.550
400×200×8×13	400	0.973	0.599	0.424	0.326	0.266	0.225	0.195	0.173
	800	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.860	0.745	0.659
450×200×9×14	400	0.940	0.578	0.407	0.313	0.254	0.215	0.186	0.165
	800	1.000	1.000	1.000	1.000	0.978	0.822	0.712	0.629
500×200×10×16	400	0.937	0.578	0.409	0.315	0.257	0.217	0.189	0.168
	800	1.000	1.000	1.000	1.000	0.987	0.832	0.721	0.638
600×200×11×17	400	0.869	0.530	0.372	0.284	0.229	0.193	0.167	0.147
	800	1.000	1.000	1.000	1.000	0.884	0.740	0.638	0.562

表 4 上翼缘作用均布荷载下 Q460 钢梁的临界温度

℃

截面尺寸	荷载比 R	自由长度/m							
		3	4	5	6	7	8	9	10
200×100×5.5×8	0.7	744	737	728	737	743	748	752	758
	0.8	686	675	658	674	685	693	700	704
250×125×6×9	0.7	747	743	739	733	727	733	738	742
	0.8	690	685	677	667	656	668	678	685
300×150×6.5×9	0.7	752	749	748	746	743	739	735	730
	0.8	698	695	693	689	685	679	671	663
350×175×7×11	0.7	750	747	745	743	740	737	734	730
	0.8	696	692	688	684	680	675	668	661
400×200×8×13	0.7	751	748	746	744	742	739	736	733
	0.8	697	693	689	685	682	677	672	666
450×200×9×14	0.7	752	748	746	744	742	739	736	733
	0.8	698	693	689	685	682	677	672	667
500×200×10×16	0.7	750	747	744	741	738	735	732	728
	0.8	696	690	685	681	676	671	665	658
600×200×11×17	0.7	751	747	744	741	739	736	733	729
	0.8	697	691	686	681	676	671	666	660

3.2 临界温度

对温度不均匀分布的高强度 Q460 钢梁,采用数值计算方法,并考虑了荷载种类(均布荷载或集中荷载)与荷载作用点位置(上翼缘或下翼缘),计算得到多个截面尺寸的 H 型钢在多个荷载比及自由长度下的临界温度 T_c^a ,见表 4。对于表中未给出的其他截面和荷载比下的临界温度,可见参考文献[7]。

4 算例

为了清楚的说明该理论的使用过程,设计了一个算例,对其进行抗火性能验算。该算例中,钢梁为 Q460 焊接 H 形简支梁,截面尺寸为 H350×175×7×11,跨度为 5 m,没有侧向支撑,按照三面受火确定钢梁各个板件的温度,并考虑温度不均匀分布的影响,已知常温下该梁的整体稳定系数为 $\varphi'_b = 0.401$,梁上作用有均布荷载 $q = 25$ kN/m,作用位

置在上翼缘;耐火极限为 20 min,验算该梁是否满足抗火要求。

4.1 临界温度法

1) 计算钢梁的临界温度 T_d^{eq}

$$\text{钢梁的荷载比: } R = \frac{M}{\varphi_b W_f} = \frac{1}{8} \cdot \frac{q l^2 \gamma_R}{\varphi_b W_f} = \frac{1}{8} \cdot \frac{25 \times 5^2 \times 10^6 \times 1.1}{0.401 \times 782 \times 10^3 \times 503} = 0.545$$

则根据表 4 可得构件的临界温度: $T_d^{eq} = 787^\circ\text{C}$

2) 计算钢梁受火 20 min 时刻的腹板温度 T_{wb}

三面受火下截面形状系数: $F/V = 190.23 \text{ m}^{-1}$

由系列文章第 1 篇中式(3),得到钢梁受火 20 min 时刻的温度: $T_s = 721.9^\circ\text{C}$

再由系列文章第 1 篇中式(10)得此时刻腹板温度: $T_{wb} = 742.7^\circ\text{C}$

故有 $T_{wb} < T_d^{eq}$

因此,钢梁满足抗火要求。

4.2 高温极限承载力法

1) 计算钢梁受火 20 min 时刻的腹板温度 T_{wb}

由 4.1 节中的计算结果可知 $T_{wb} = 742.7^\circ\text{C}$

2) 计算钢梁在腹板温度 T_{wb} 时的稳定承载力

M_{crT}^{eq}

根据表 3 线性插值可得 $\varphi_{bT}^{eq} = 0.838$;

由系列文章第 1 篇中式(1)可计算腹板温度为

$$T_{wb} \text{ 时 Q460 钢材的强度折减系数为 } \eta_T = \frac{f_{yT}}{f_y} = 0.308;$$

则钢梁腹板温度为 T_{wb} 时的稳定承载力为:

$$M_{crT}^{eq} = \varphi_{bT}^{eq} W^{eq} f_{yT} \approx \varphi_{bT}^{eq} W \eta_T f_y = 0.838 \times 782 \times 10^3 \times 0.308 \times 503 \times 10^{-6} = 101.52 \text{ (kN} \cdot \text{m)};$$

钢梁所承受的弯矩 M 为 $M = q l^2 / 8 = 25 \times 5^2 / 8 = 78.13 \text{ (kN} \cdot \text{m)}$;

故有 $M_{crT}^{eq} > M$, 因此,钢梁满足抗火要求。

5 结 论

采用有限元分析对高强度 Q460 钢梁的温度分布和极限承载力进行了计算,将计算结果和系列文章第 1 篇的理论分析的结果进行对比,验证了理论

分析的正确性。采用理论计算方法对高强度 Q460 钢梁和普通 Q235 钢梁的抗火性能进行了对比,得到以下结论:

1) 同一荷载下,温度均匀分布的 Q460 钢梁的临界温度随稳定系数的增加而降低;而温度不均匀分布的 Q460 钢梁的临界温度随稳定系数的增加而略微上升。

2) 在同样的稳定系数和荷载比下,高强度 Q460 钢梁的临界温度结果与普通 Q235 结构钢梁相差较大。

参考文献:

- [1] 王卫永,周一超,于宝林,等. 高强度 Q460 钢梁抗火性能研究(I)——理论分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3):64-71.
Wang W Y, Zhou Y C, Yu B L, et al. Fire resistance study on high strength Q460 steel beams-Part I: Theoretical analysis [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(3):64-71.
- [2] European Committee for Standardization. EN 1993-1-1, Eurocode 3, Design of Steel Structures-Part 1-1 General Rules and rules for buildings[S]. 2005.
- [3] 葛勇. 约束高强度 Q460 钢柱抗火性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [4] 丛术平,董毓利,梁书亭. 柔性连接钢梁火灾行为的试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(7):61-62, 42.
Cong S P, Dong Y L, Liang S T. Experimental study on behaviors of steel beams with flexible connections under fire [J]. Journal of Building Structures, 2008, 38(7):61-62, 42.
- [5] 中国工程建设标准化协会. 建筑钢结构防火设计规范 CECS200:2006[S]. 北京:中国计划出版社, 2006.
- [6] Wang W Y, Liu B, Kodur V R. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high strength steel [J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(2): 174-182.
- [7] 周一超. 高强度钢梁抗火性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.

(编辑 胡英奎)