

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201610101

耐火钢-混凝土简支组合梁抗火性能

蒋翔, 童根树, 张磊

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要: 为研究耐火钢-混凝土简支组合梁在火灾下的变形性能和耐火极限, 基于有限元软件 ABAQUS 建立的分析模型分别对采用防火涂料和防火板保护的耐火钢-混凝土简支组合梁标准升温下的抗火性能进行模拟. 分析了荷载比、防火保护层、材料强度、截面尺寸、混凝土楼板中纵向钢筋等因素对组合梁耐火极限的影响. 结果表明: 荷载比和防火保护层厚度是影响耐火钢-混凝土简支组合梁抗火性能最重要的两个因素. 钢梁板件厚、翼缘宽等对耐火钢-混凝土组合梁的抗火性能有一定有利影响. 材料强度、钢梁高和楼板厚、楼板宽和楼板中纵向钢筋直径对耐火钢-混凝土简支组合梁的耐火极限影响不大. 同等条件下防火板比防火涂料具有更好的防火保护效果. 当荷载比为 0.5~0.7 时, 使用耐火钢替换普通钢后耐火钢-混凝土简支组合梁的耐火极限提高 35%~40%, 可减小防火涂料厚度 30% 左右. 采用中国规范 (CECS 200:2006) 中的方法计算耐火钢-混凝土简支组合梁的耐火极限, 和有限元计算结果相比荷载比较小时偏保守.

关键词: 耐火钢; 组合梁; 参数分析; 抗火性能; 耐火极限

中图分类号: TU352.5; TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)12-0068-07

Fire-resistance performance of simply supported fire-resistant steel-concrete composite beams

JIANG Xiang, TONG Genshu, ZHANG Lei

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To study the fire performances of the simply supported fire-resistant steel-concrete composite beams (FRSCCB), the simply supported FRSCCB with fireproof coating and fire-proof board under standard fire were simulated by the finite element (FE) software ABAQUS. The effects of the load-ratio, the fire-insulation of the steel beam, the strength of materials, the section profiles and the diameter of longitudinal rebars in the concrete slab on the fire performance of the simply supported FRSCCB were analyzed. It is shown that the two most important factors, which influence the fire resistance for the simply supported FRSCCB, are the load-ratio and the fire-insulation thickness of the steel beam. The thicknesses of the beam plates and the width of the beam flange have favorable effect on the FRSCCB performance, but the strength of materials, the height of the beam, the thickness of the slab and diameter of the rebars have less influence. The fire-proof board has better fire-proof protection effect than the fire-proof coating under the same condition. When load ratio is 0.5~0.7, the fire-resistance limitation is increased by over 35% and the fire-insulation thickness can be decrease by 30% when the FRSCCB is used. The simplified calculation method for predicting the fire resistance limit according to Chinese code (CECS 200:2006) is conservative compared with the FE results when the load-ratio is small.

Keywords: fire-resistant steel; composite beam; parameter analysis; fire resistance performance; fire resistance limit

钢-混凝土组合结构具有承载力高、塑性韧性好、抗震性能好、施工方便以及造价经济合理等优点, 近年来在高层建筑结构中广泛应用^[1]. 钢材和混凝土都不耐火, 普通钢的强度和弹性模量在高温下迅速下降, 混凝土在高温下可能会发生爆裂, 强度和弹性模量也会降低. 一旦发生火灾, 建筑结构很容易遭到破坏甚至倒塌. Cardington 试验中约束钢-混凝土

组合梁抗火试验^[2]开启了整体组合梁抗火性能的研究, 国内学者^[3-7]也对组合梁的抗火性能进行试验研究.

耐火钢 600 °C 时屈服强度高于室温时的 2/3, 弹性模量在 700 °C 时仍能保持室温时的 75% 以上, 且室温力学性能及其他质量指标均满足普通建筑用钢使用标准^[8], 是提高钢结构防火性能的一种方案, 使用耐火钢能减少防火涂料用量. 文献^[9]综述了国内外学者对耐火钢的开发应用以及耐火钢构件抗火性能进行的一些研究. 文献^[10-11]对耐火钢-钢管混凝土柱进行研究. 文献^[12]采用有限元软件建立耐火钢-混凝土组合梁标准升温下的分析模型, 通过试验校验

收稿日期: 2016-10-24

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAJ13B04)

作者简介: 蒋翔 (1989—), 男, 博士研究生;

童根树 (1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 童根树, tonggs@zju.edu.cn

了模型的有效性和可靠性,但对影响耐火性能的参数分析不多.本文基于耐火钢-混凝土组合梁抗火试验^[13]中的舞钢耐火钢 Q345-FR 钢板的高温材性,采用有限元软件 ABAQUS 分别对采用防火涂料和 ALC 防火板进行防火保护的耐火钢-简支组合梁的抗火性能进行模拟,分析荷载比、防火保护层厚度、混凝土楼板、钢梁参数和楼板中钢筋等对其抗火性能的影响.此外,根据中国规程(CECS 200:2006)^[14]中普通钢组合梁抗火设计方法对高温下耐火钢组合梁的耐火极限进行计算,考察规范方法对耐火钢-混凝土组合梁的抗火设计是否适用.

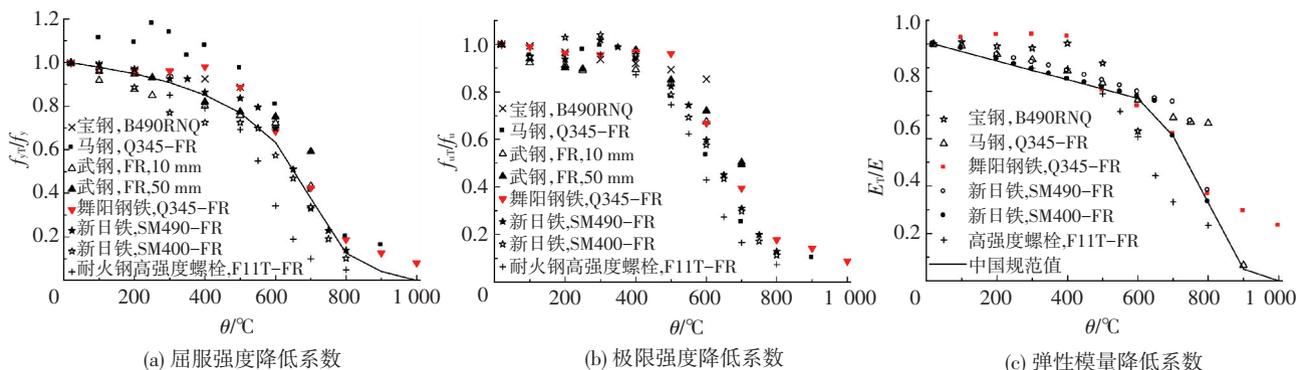


图 1 耐火钢高温力学性能参数折减系数曲线

Fig.1 Mechanical property curves of FR-steel

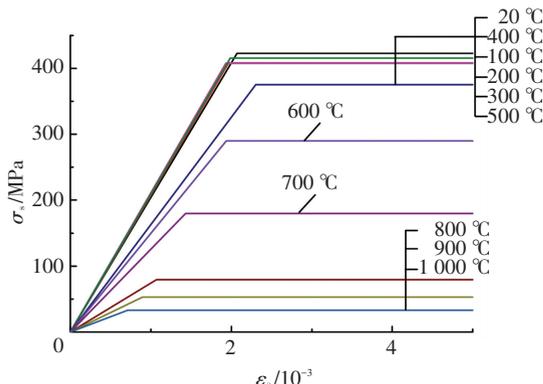


图 2 舞钢耐火钢各温度下的应力-应变曲线

Fig.2 Idealized stress-strain curves of FR steel

耐火钢的热工性能与普通钢材相差不大.高温下耐火钢的导热系数(λ_s)、比热(c_s)和热膨胀系数(α_s)选取参考文献[8],混凝土、钢筋等材料高温下的热工、力学性能参数及本构关系等选取参见文献[12].

防火涂料和防火板的热工参数^[14-15]取值为:导热系数可取 $\lambda = 0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;比热及密度分别可取 $c = 1000 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $\rho = 400 \text{ kg}/\text{m}^3$.

1.2 有限元模型

采用 ABAQUS 的顺序热-力耦合分析方法模拟标准升温下三面受火的耐火钢-混凝土简支组合梁(简称组合梁)的抗火性能.组合梁截面传热模型见图 3.不考虑防火涂料和防火板的脱落和变形等对组

1 分析方法

1.1 材料高温特性

在上海交通大学疲劳断裂试验室对舞钢生产的 Q345-FR 热轧 10 mm 厚钢板进行高温拉伸试验,测得其高温下的力学性能指标,且和其他耐火钢高温材性的试验结果对比见图 1.其中, f_{yT} 、 f_y 表示高温和常温时屈服强度, f_{uT} 、 f_u 表示高温和常温时极限强度, E_T 、 E 表示高温和常温时弹性模量, θ 为温度.舞钢耐火钢在各温度下的应力-应变关系曲线见图 2,其中 σ_s 、 ε_s 分别为应力和应变.

合梁防火保护效果的影响.热-力耦合分析时假定钢梁与混凝土之间没有剪切滑移.有限元模型的建立参数及试验验证参见文献[12].

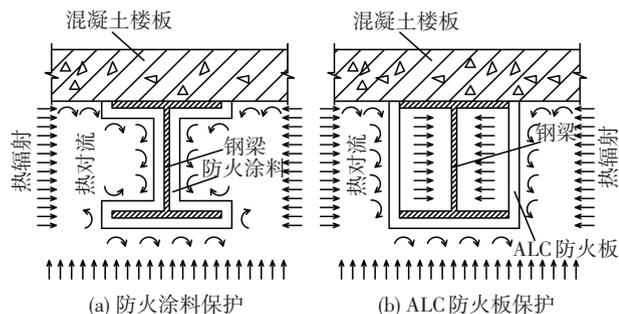


图 3 组合梁截面传热方式

Fig.3 Heat transfer model of composite beams

2 参数分析

标准升温条件下,分析荷载比、防火保护层、混凝土板、钢梁相关参数、楼板中纵向钢筋等对组合梁抗火性能的影响.模型基本参数:混凝土强度 $f_{cu} = 20 \text{ MPa}$,楼板厚 100 mm、宽 1500 mm;钢梁截面 $350 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,耐火钢常温屈服强度 $f_y = 345 \text{ MPa}$;防火保护层厚度 10 mm;梁跨 4.2 m,两端简支.计算时取跨中挠度达到跨度的 1/30 作为组合梁达到耐火极限的判别标准^[13],即 $\delta = 140 \text{ mm}$ 时,组合梁达到耐火极限状态.

2.1 荷载比

荷载比 μ 定义为组合梁受火情况下施加荷载与其常温时的极限荷载之比,算例常温下的极限荷载通过 ABAQUS 有限元分析模型位移加载计算得到.荷载的大小、分布、梁跨等参数对组合梁抗火性能的影响都可以转化为荷载比的形式加以反映.

防火保护层厚度 $d_i = 10$ mm 时不同荷载比下组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 4,图中曲线实心为涂料,空心为防火板.荷载比越小,组合梁耐火极限时间越长,荷载比对组合梁抗火性能的影响相当显著.

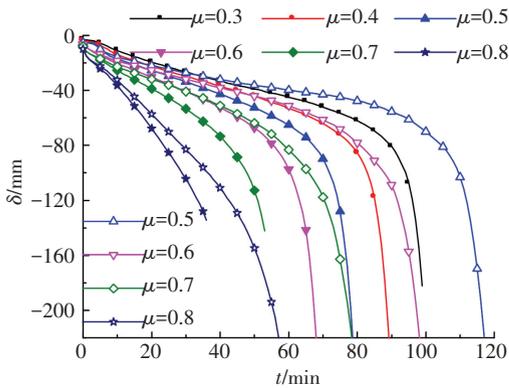


图 4 不同荷载比条件下跨中挠度-时间曲线

Fig.4 Time-vertical deflection at mid-span with different load-ratio

2.2 防火保护层厚度

$\mu = 0.7$ 时,防火保护层厚度不同时组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 5.增大防火保护层的厚度,组合梁的耐火极限显著增加.其中,防火涂料厚度从 5 mm 增加到 10、15、20 mm,耐火极限时间从 33 min 分别提高到 53、73、94.5 min,增幅明显.防火保护层厚度 d_i 是影响组合梁抗火性能的一个重要因素.

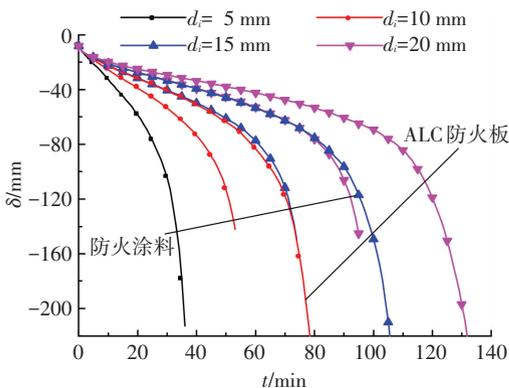


图 5 钢梁防火保护层厚度 d_i 不同时跨中挠度-时间曲线

Fig.5 Time-vertical deflection at mid-span with different fire-insulation thickness

2.3 混凝土楼板相关参数

2.3.1 混凝土强度

$\mu = 0.7$ 时,混凝土强度 f_{cu} 为 20、30 和 40 MPa 的组合梁跨中挠度-受火时间曲线见图 6.混凝土强度

不同时组合梁耐火极限相差很小,整个受火过程中变形非常相近,耐火钢组合梁的抗火性能不受混凝土强度等级的影响.

2.3.2 混凝土楼板厚度

$\mu = 0.7$ 时,楼板厚度 h_c 为 100、120 和 150 mm 时组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 7.随着受火时间增长,楼板越厚组合梁跨中挠度变形越大,但差别不大,耐火极限相差也很小.主要是楼板厚度增加,组合梁常温下极限承载力增大,相同荷载比下楼板越厚的组合梁钢梁承担的荷载越大.楼板厚度对钢梁截面的升温影响不大,受火过程中钢梁截面温度分布基本相同,故荷载越大组合梁变形就越大.达到耐火极限附近时,钢梁基本失去承载力,楼板厚对截面抵抗变形能力的影响很小,故耐火极限相差不大.所以楼板厚度对组合梁的耐火极限影响不大.

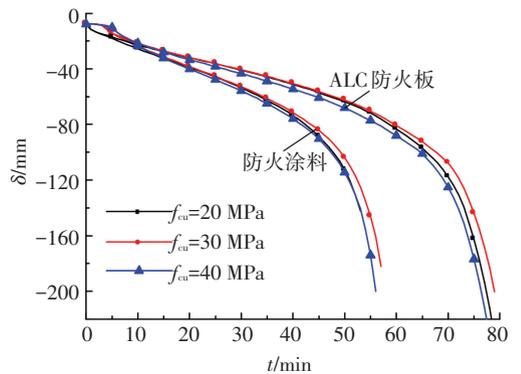


图 6 混凝土强度等级不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 6 Time-vertical deflection at mid-span with different concrete strength

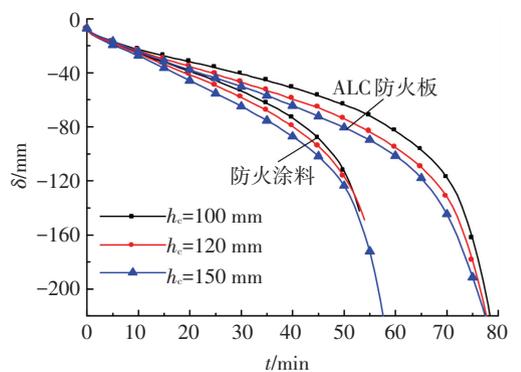


图 7 混凝土楼板厚度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 7 Time-vertical deflection at mid-span with different concrete slab thickness

2.3.3 混凝土楼板宽度

$\mu = 0.7$ 时,混凝土楼板宽度为 1 200、1 500、1 800 mm 的组合梁跨中挠度-受火时间曲线见图 8.

当楼板宽度小于有效翼缘宽度(基本模型为 1 350 mm)时,相同荷载比下增大楼板宽度,组合梁耐火极限减小;而楼板宽度超过有效宽度时,继续增大板宽对组合梁的抗火性能影响很小.主要是由于钢梁

对组合梁的抗火性能有着决定性的影响.增大楼板宽度,组合梁常温下抗弯承载力提高,相同荷载比下荷载更大,而钢梁的承载能力不变,则组合梁的高温下抵抗变形的能力变差.而当楼板宽度超过有效翼缘宽度时,继续增大对组合梁常温下和高温下的承载力影响都不大,所以对耐火极限的影响也不大.

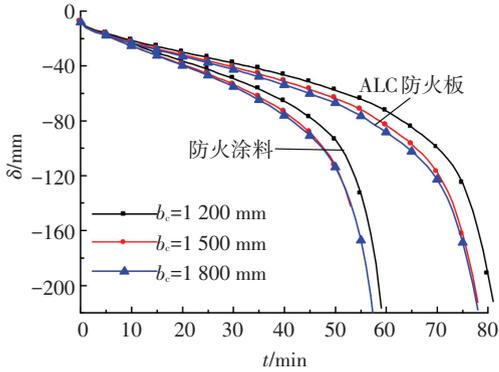


图 8 混凝土楼板宽度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 8 Time-vertical deflection at mid-span with different concrete slab effective width

2.4 钢梁相关参数

2.4.1 钢梁材料强度

$\mu = 0.7$ 下,耐火钢强度不同时组合梁跨中挠度-受火时间曲线见图 9.耐火钢常温屈服强度对组合梁抗火性能影响较小.

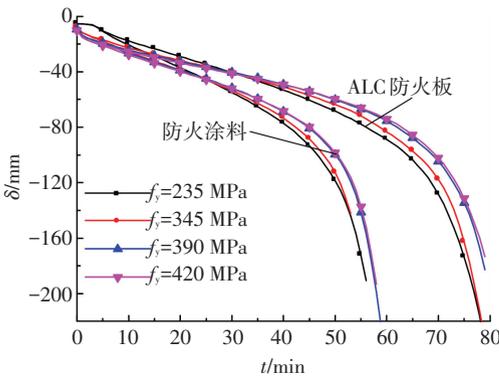


图 9 不同屈服强度钢材时跨中挠度-时间曲线

Fig. 9 Time-vertical deflection at mid-span with different steel strength

2.4.2 钢梁截面尺寸

1) 腹板高度. $\mu = 0.7$ 下,钢梁腹板高度不同时组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 10.增加钢梁腹板高度,组合梁高温下抵抗变形的能力增加,但耐火极限相差不大.主要是钢梁腹板截面形状系数 (F_i/V) 随板件厚度变化,在相同升温曲线下升温过程类似.钢梁越高截面抗弯刚度越大,受火前期变形越小,而受火后期钢梁截面基本失去承载能力,组合梁的耐火极限相差不大.甚至由于腹板高度更大的组合梁相同荷载比下荷载更大,其在高温下截面抗弯刚度削弱更快,接近耐火极限时的变形速率更快,变形更加突然.

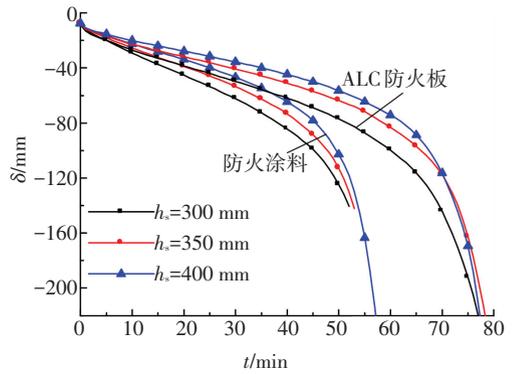


图 10 钢梁腹板高度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 10 Time-vertical deflection at mid-span with different web height of steel beam

2) 腹板厚度. $\mu = 0.7$ 下,钢梁腹板厚度不同时组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 11.相同荷载比下,增加钢梁腹板厚度,组合梁的耐火极限时间增加,但幅度不大.

3) 翼缘宽度. $\mu = 0.7$ 下,改变钢梁翼缘宽度时组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 12.相同荷载比条件下,增加钢梁翼缘宽度,组合梁的耐火进行时间有一定增加.

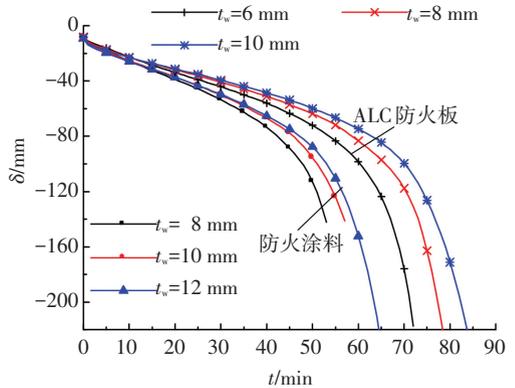


图 11 钢梁腹板厚度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 11 Time-vertical deflection at mid-span with different web thickness of steel beam

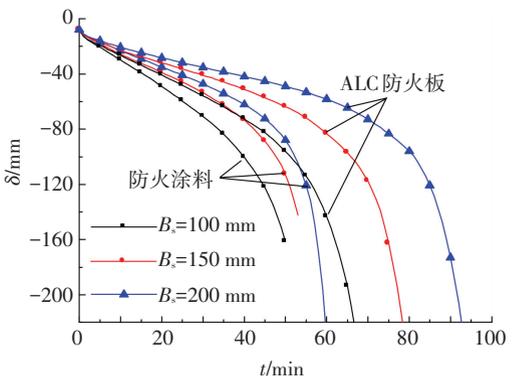


图 12 型钢梁翼缘宽度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 12 Time-vertical deflection at mid-span with different flange width of steel beam

4) 翼缘厚度. $\mu = 0.7$ 下,钢梁翼缘厚度不同时组合梁跨中挠度-受火时间曲线见图 13.相同荷载比下,

增加钢梁翼缘厚,组合梁的耐火时间增加.

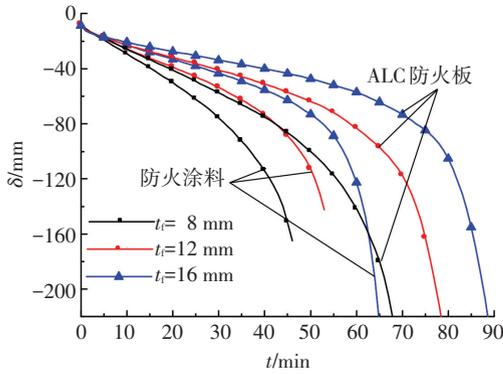


图 13 型钢梁翼缘厚度不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 13 Time-vertical deflection at mid-span with different flange thickness of steel beam

2.5 混凝土板中纵向钢筋

荷载比 $\mu = 0.7$ 时,改变楼板中纵向钢筋直径(配筋率),组合梁跨中挠度随受火时间的变化见图 14.相同荷载比下,增大纵向钢筋直径,组合梁耐火极限时间变小.原因和楼板宽度类似,增大钢筋直径,组合梁常温下极限承载力增加,相同荷载比下荷载更大.但钢筋直径增加对高温下组合梁截面抗弯能力的影响不大,反而变相增大了荷载比.钢筋直径增加到一定值后,继续增大组合梁高温下的变形性能和耐火极限相差很小.所以,背火面钢筋并不是组合梁抗火性能的主要影响参数.

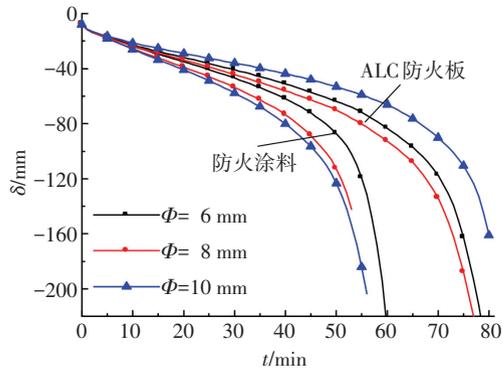


图 14 背火面纵向钢筋不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 14 Time-vertical deflection at mid-span with different diameter of longitudinal reinforcements

3 两种钢-混凝土组合梁抗火性能比较

比较防火涂料保护下采用相同强度等级耐火钢和普通钢的组合梁在不同条件下的抗火性能,普通钢高温力学性能指标按 BS 5950^[16] 选取.

防火涂料厚度为 10 mm 时,不同荷载比下耐火钢组合梁和普通钢组合梁的跨中挠度随受火时间的变化见图 15.荷载比较小时,火灾下耐火钢组合梁变形性能明显好于普通钢组合梁.其中,当荷载比分别为 0.5、0.6、0.7、0.8 时,耐火钢-混凝土组合梁的耐

火极限比普通钢组合梁分别提升了 40.7%、36.8%、34.2%、34.6%.随着荷载比的增大,耐火钢组合梁耐火极限的提高程度降低.

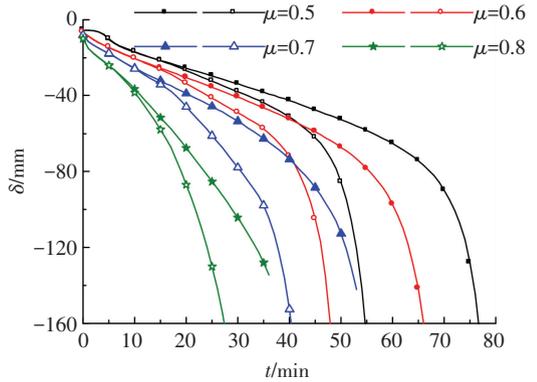


图 15 荷载比不同时跨中挠度-时间曲线

Fig. 15 Time-vertical deflection at mid-span with different load-ratio 而相同荷载比下,防火涂料厚度不同时耐火钢、普通钢-组合梁的耐火极限时间的比较见表 1.

表 1 耐火钢和普通钢组合梁耐火极限比较

Tab.1 Comparison of the fire resistance time

荷载比	涂料厚度/ mm	耐火极限/min		提高幅度/%
		普通钢	耐火钢	
$\mu = 0.5$	10	54.0	76.0	40.7
	15	75.5	105.0	39.1
	20	97.5	135.5	38.9
$\mu = 0.7$	10	39.5	53.0	34.2
	15	54.0	73.0	35.2
	20	70.0	94.5	35.0

从表 1 可看出,荷载比为 0.5,涂料厚度分别为 10、15 和 20 mm 时,耐火钢组合梁的耐火极限比普通钢组合梁提升了 40% 左右.此时,若耐火极限为 1.5 h,耐火钢组合梁所需涂料厚度约为 12.4 mm,而采用普通钢的话,涂料厚度约为 18.3 mm,使用耐火钢涂料厚度减小 5.9 mm.若耐火极限为 2 h,耐火钢组合梁所需涂料厚度约为 17.5 mm,而采用普通钢则至少需要 25.1 mm,使用耐火钢涂料厚度减小 7.6 mm.荷载比为 0.7,涂料厚度分别为 10、15 和 20 mm 时,耐火钢组合梁的耐火极限比普通钢组合梁提升了 35% 左右.此时,若耐火极限达到 1.5 h,耐火钢组合梁需涂料厚度约为 18.9 mm,而普通钢组合梁约为 26.3 mm,使用耐火钢后涂料厚度减小 7.4 mm.若要耐火极限达到 2 h,耐火钢组合梁所需涂料厚约 25.9 mm,而采用普通钢的话至少要 35.6 mm,使用耐火钢涂料厚减小 9.7 mm.

4 和规程方法耐火极限的比较

建筑钢结构防火技术规范(CECS 200:2006)中给出中国组合梁抗火设计的方法.根据其中承载力法计算本文有限元分析中的耐火钢-混凝土组合梁

的耐火极限,和有限元计算结果的对比见图 16。

荷载比小于 0.6 时规程方法计算的耐火极限结果偏小,荷载比越小结果越保守;随着防火涂料厚度的增加,规范计算结果与有限元结果的偏差增大。荷载比大于 0.6 时,有限元法按跨中竖向变形达到 $l/30$ 确定的耐火极限低于规范结果。

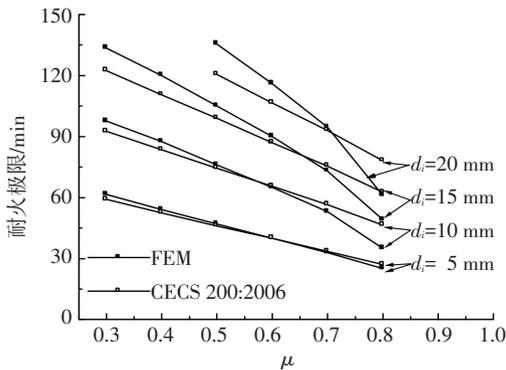


图 16 耐火极限计算值比较

Fig.16 Comparison of the fire resistance time between the code method and the FEM

高温下,材料的强度和弹性模量降低使构件的承载力下降。中国规程和欧洲规范(EC4)中承载力法计算组合梁的耐火极限时在构件温度和承载力的计算上都基于相同的理论,但某些参数的取值不同,比如钢梁温度的计算。欧洲规范建议钢梁腹板和下翼缘的温度分开计算,中国规范是将腹板和下翼缘组成的 \perp 型构件按照四面受火考虑。当腹板厚度和翼缘厚度相同时,计算所得的腹板和下翼缘温度结果差别不大,但翼缘较厚时,一体计算的下翼缘温度则比分开计算时偏高。因此采用欧洲规范的方法对耐火钢组合梁可能更为适合。

5 结 论

1) 荷载比和钢梁防火保护层厚度对耐火钢-混凝土组合梁抗火性能影响显著,荷载比越小,保护层厚度越大,耐火性能越好。

2) 相同荷载比下,钢梁板件厚、翼缘宽等对耐火钢-混凝土组合梁的抗火性能有一定有利影响。材料强度、钢梁高和楼板厚、楼板宽和楼板中纵向钢筋直径则对耐火钢-混凝土组合梁的耐火极限影响不大。

3) 同等条件下,防火板比防火涂料具有更好的防火保护效果。

4) 对比普通钢-混凝土组合梁,一定火灾条件下,耐火钢-混凝土组合梁的抗火性能更好。本文算例中,荷载比为 0.5~0.7,使用耐火钢替换普通钢组合梁的耐火极限可提高 35%~40%;当耐火极限为 1.5~2 h 时,可节约防火涂层用量 30%左右。

5) 采用中国规范中组合梁抗火计算方法对耐火

钢-混凝土组合梁进行抗火计算,荷载比较小时偏保守。

参 考 文 献

- [1] 余志武,丁发兴.钢-混凝土组合结构抗火性能研究与应用[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):96-109.
YU Zhiwu, DING Faxing. Fire performance research and application on steel-concrete composite structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 96-109.
- [2] ROSE P S, BAILEY C G, BURGESS I W, et al. The influence of floor slabs on the structural performance of the Cardington frame in-fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 1(46): 310-311. DOI: 10.1016/S0143-974X(98)00131-X.
- [3] 李国强,周宏宇.钢-混凝土组合梁抗火性能试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(10):19-26.DOI:10.15951/j.tmgxb.2007.10.008.
LI Guoqiang, ZHOU Hongyu. Experimental study on the fire-resistance of steel-concrete composite beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(10): 19-26. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2007.10.008.
- [4] 吕俊利,董毓利,杨志年.单跨组合梁火灾变形性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):16-20.DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2011.08.004.
LÜ Junli, DONG Yuli, YANG Zhinian. Deformation investigation of single-span composite beam subjected to fire[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8): 16-20. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2011.08.004.
- [5] 高轩能,黄文欢,朱皓明.冷弯薄壁槽钢-混凝土组合梁受火试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(5):141-149.DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.05.017.
GAO Xuanneng, HUANG Wenhuan, ZHU Haoming. Experimental research on cold-formed thin-walled channel steel concrete beam exposed to fire[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(5): 141-149. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.05.017.
- [6] 王卫永,李国强,陈玲珠,等.钢筋桁架楼承板钢组合梁抗火性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015(9):67-75.DOI: 10.15951/j.tmgxb.2015.09.008.
WANG Weiyong, LI Guoqiang, CHEN Lingzhu, et al. Experimental study on fire resistance of steel bar truss slab and steel composite beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(9): 67-75. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2015.09.008.
- [7] 姚伟发,黄侨,张娟秀.火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究[J]. 工程力学,2016,33(8):58-65.DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.1000.
YAO Weifa, HUANG Qiao, ZHANG Juanxiu. Experimental study on mechanical performance of steel-concrete girders under fire loading[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(8): 58-65. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.11.1000.
- [8] DING Jun, LI Guoqiang, SAKUMOTO Y. Parametric studies on fire resistance of fire-resistant steel members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60: 1007-1027. DOI: 10.1016/j.jcsr.2003.09.007.
- [9] GARCÍA H, BIEZMA M V, CUADRADO J, et al. Study of historical developments in the use of fire resistant steels[J]. Materials at High Temperatures, 2013, 30(4): 313-319. DOI: 10.3184/096034013X13809016785943.
- [10] 刘逸祥,董根树,张磊.耐火钢-圆钢管混凝土柱耐火极限和承载力[J]. 浙江大学学报(工学版),2015,49(2):208-217. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.02.003.

LIU Yixiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Fire resistance and load-bearing capacity of concrete filled fire-resistant steel tubular columns with circular cross-section[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(2): 208-217. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.02.003.

[11] 刘逸祥,童根树,张磊. 耐火钢-钢管混凝土柱的防火保护层厚度[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(12): 2387-2396. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.12.019.

LIU Yixiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Fire protection thickness of concrete filled fire resistant steel tubular columns[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(12): 2387-2396. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.12.019.

[12] 蒋翔,童根树,张磊. 耐火钢-混凝土组合梁抗火性能非线性有限元分析[J]. 钢结构, 2016, 31(3): 29-34. DOI: 10.13206/j.gjg.201603006.

JIANG Xiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Nonlinear FEM modeling of fire-resistance of fire-resistant steel-concrete composite beams [J]. Steel Construction, 2016, 31(3): 29-34. DOI: 10.13206/j.gjg.201603006.

[13] 蒋翔,童根树,张磊. 耐火钢-混凝土组合梁抗火性能试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(8): 1463-1470. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.08.006.

JIANG Xiang, TONG Genshu, ZHANG Lei. Experimental study on the fire-resistance of fire-resistant steel-concrete composite beams [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(8): 1463-1470. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2016.08.006.

[14] 建筑钢结构防火技术规范:CECS 200:2006 [S].北京:中国计划出版社, 2006.

Technical Code for fire safety of steel structure in buildings: CECS200:2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.

[15] 蒸压加气混凝土板:GB 15762-2008 [S].北京:中国标准出版社, 2008.

Autoclaved aerated concrete slabs: GB 15762-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[16] The structural use of steelwork in buildings, part 8: code of practice for fire resistant design: BS 5950 [S]. London: British Standards Institution (BSI), 1990.

(编辑 赵丽莹)

近期结构工程类会议简讯

1.“《建筑结构学报》创刊 40 周年纪念暨第五届建筑结构基础理论与创新实践论坛”将于 2018 年 12 月在重庆召开.本次会议由中国建筑学会、《建筑结构学报》杂志社、重庆大学主办,会议主题为“建筑结构基础理论研究”与“结构设计创新与实践”.

2.“第十届全国地震工程学术会议”将于 2018 年 8 月 22-25 日在上海市召开.本次会议由同济大学承办,由恢先地震工程学基金会(中国)、美中地震工程学基金会(美国)和《建筑结构》杂志社协办.全国地震工程学术会议是中国地震工程和工程抗震防灾方面最高层次的学术会议.首届会议于 1984 年在上海召开,之后每 4 年一次.会议宗旨为:交流地震工程领域的科技成果,促进地震工程理论和实践的进步与发展,加强地震工程学科与相关学科的相互促进与共同提高,推动中国地震工程事业的发展 and 重大工程技术难题的解决.

3.“第七届国际计算风工程会议”(The 7th International Symposium on Computational Wind Engineering-CWE2018)将于 2018 年 6 月 18-22 日在韩国首尔举行.会议由韩国风工程协会承办.该系列会议始于 1992 年,每隔 4 年一次,是国际上计算风工程领域的最高级别会议,宗旨是致力于探讨计算风工程领域的最新研究进展和工程应用.

4.国际壳体与空间结构协会 2018 年年会(IASS-2018)将于 2018 年 7 月 16-20 日在美国波士顿举行.会议由麻省理工大学(MIT)承办.本次会议以“Creativity in Structural Design”为主题,意指伴随着材料、分析技术和建造技术的飞速发展,使得空间结构的设计更具创造力,而且更加体现了多学科融合,以及工程与环境的融合.