

文章编号: 1000-5013(2011)03-0317-05

薄壁 U 型钢混凝土梁 火灾-结构耦合的 ANSYS 分析

高轩能, 黄文欢, 张惠华

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用在空间上运用有限单元法与在时间上运用有限差分法相结合的方法, 建立组合梁的火-结构耦合 ANSYS 分析模型; 编制组合梁 ANSYS 热分析程序和全过程受火非线性分析程序, 对组合梁在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾的温度场和挠度-时间曲线进行分析和计算. 数值计算结果表明: 在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾下, 试验梁测点的温度与 ANSYS 理论计算结果高度吻合, 试验梁位移-受火时间曲线与理论计算结果符合良好.

关键词: 薄壁 U 型钢; 组合梁; 火灾; 火-结构耦合; ANSYS 模拟

中图分类号: TU 352.5; TU 398.9

文献标志码: A

U 型钢-混凝土组合梁由冷弯薄壁 U 型钢填充混凝土组成, 是一种正在发展的新型构件. U 型钢-混凝土组合梁能够充分利用薄壁型钢和混凝土两种材料, 外形整洁、施工快捷、无需模板、易于浇灌混凝土, 并且具有降低楼层高度、节能省材、符合低碳经济发展趋势等优点, 应用前景广阔. 国内外学者^[1-3]已有不少有关其在常温下静力承载性能的研究, 但对于其在火灾高温下的温升特性及耐火性能, 迄今研究不多^[4-6]. 然而, 火灾高温下 U 型钢-混凝土组合梁的传热, 是在非稳态环境下多介质及复杂边界条件下的非线性二维传热问题, 不仅受到静力荷载的作用, 还要受到温度荷载的作用, 理论分析的难度很大. 这是因为结构构件在环境温度变化的情况下形成了动态的不均匀温度场, 高温使材料的强度和变形性能严重劣化, 又使结构构件产生剧烈的内(应)力重分布; 而且, 温度和荷载(应力)有显著的耦合作用效应, 使材料的本构关系和构件的温度-荷载路径有较大变化. 本文建立分析组合梁构件的火-结构耦合模型, 了解高温下 U 型钢-混凝土组合梁的受力性能及其变化规律.

1 火-结构耦合分析的 ANSYS 模型

1.1 火-结构耦合场

为便于计算, 许多研究通常假设构件均匀受热, 构件截面温度线性分布及构件处于稳态温度场中, 但这与构件受火的实际工况不符, 使得构件的耐火性能分析结果误差较大. 要准确模拟火灾条件下构件的反应, 就必须考虑温度场及材料热工性能和热边界条件随时间的变化, 即对构件进行瞬态非线性热分析. 为此, 采用间接耦合法建立火-结构耦合分析模型, 利用 ANSYS 通用软件对构件内力和变形进行分析. 即通过传热分析得到构件随时间变化的温度场, 再计算在此温度场下构件的受力, 然后与静力荷载叠加求解. 具体流程如图 1 所示.

1.2 传热分析及假定

设 U 型钢-混凝土组合梁为室内受火, 可视为连续、各向同性、无内热源的无限长梁, 为二维温度场

收稿日期: 2010-09-29

通信作者: 高轩能(1962-), 男, 教授, 主要从事钢结构稳定及工程结构灾害控制的研究. E-mail: gaoxn@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008133); 福建省科技计划重点项目(2006H0030); 国务院侨办科研基金资助项目(07QZR04); 福建省厦门市科技计划项目(3502Z20073036)

问题,传热方式按对流换热和辐射换热考虑.采用国际标准 ISO 834 规定的标准的温度-时间曲线描述构件的火灾环境^[7],其升温段($t \leq t_h$, t_h 为火灾持续时间)表达式为

$$\theta_g - \theta_g(0) = 345 \lg(8t + 1).$$

(1)

式(1)中: t 为时间; θ_g 为 t 时刻的空气温度; $\theta_g(0)$ 为初始空气温度.

单位时间内,空气向构件对流传热的热量为

$$q_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_b).$$

(2)

式(2)中: α_c 为对流传热系数; θ_b 为构件表面(或保护层)温度.

单位时间内,空气向构件辐射传递的净热量为

$$q_r = \phi \epsilon_r \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_b + 273)^4].$$

(3)

式(3)中: ϕ 为形状系数; ϵ_r 为综合辐射系数, $\epsilon_r = \epsilon_f \epsilon_m$, ϵ_f 与着火房间有关, ϵ_m 与构件表面特性有关; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 56.7 \text{ nW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1}$.

构件内部主要以导热方式传递热量,其截面的导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (l \frac{\partial \theta}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (l \frac{\partial \theta}{\partial y}).$$

(4)

式(4)中: ρ 为介质密度; c 为介质比热; l 为介质的导热系数; θ 为截面(x, y)处在时刻 t 的温度.

为便于分析计算,分析时做如下 5 个假定^[8]:

- (1) 构件截面的温度场与材料的应力、应变及是否开裂无关,即不考虑混凝土开裂或表层脱落后的截面局部变化引起的温度重分布;
- (2) 构件截面的温度场是二维的,沿构件的轴线不变;
- (3) 忽略钢材与混凝土之间接触热阻对组合梁构件传热的影响;
- (4) 忽略钢筋体积对构件截面温度场的影响;
- (5) 一般情况下,不考虑水分蒸发对温度场的影响.

1.3 参数选取

根据研究对象特性,在热分析中将辐射传热与对流传热分开考虑,并参考已有文献^[9]的边界条件假定和边界参数取值.热分析参数的具体取值,如表 1 所示.表 1 中:对流传热系数为 α_c ,综合辐射系数为 ϵ_{res} ,形状系数为 ϕ .

2 模型验证及应用

图 2 为一榀 3 层 3 跨连续框架,柱脚刚接,层高 3 m,柱间距 5.5 m,柱顶集中荷载 P 为 151 kN,横梁上的均布荷载 q 为 $25.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.梁为工字型钢截面 $\text{H}303.8 \text{ mm} \times 165 \text{ mm} \times 6.1 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$,柱为工字型钢截面 $\text{H}206.2 \text{ mm} \times 203.9 \text{ mm} \times 8.3 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm}^{[10]}$.在底层左侧防火间发生国际标准 ISO 834 规定的标准火灾.防火间具有防止火灾蔓延和隔绝热量传递的作用.

为了准确模拟截面的非均匀温度分布和捕捉局部屈曲等现象,防火间的梁和柱采用实体单元,其余部分采用梁单元,两者接合处采用约束方程以保证变形协调.图 3 为梁和柱的热边界条件.柱内部砌有砖墙,仅面向防火间的翼缘受火,梁上部有混凝土楼板,上翼缘上表面不受火.热量以对流和辐射的形式从热空气传递到结构表面,又以传导的形式在结构内部传播.防火间受火框架采用实体单元 Solid 70,防火间外的框架梁柱采用梁单元 Beam 188,梁柱节点自由度耦合及接合处截面约束,如图 4 所示.

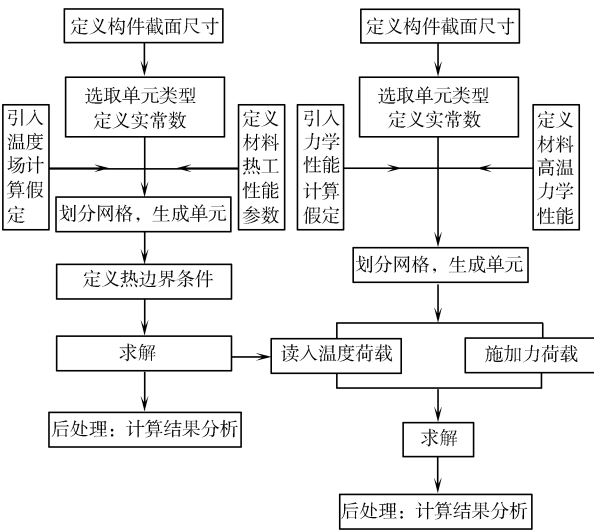


图 1 ANSYS 热-结构间接耦合合法分析流程图
Fig. 1 ANSYS analysis flow chart of thermal-structure indirect coupling method

表 1 热分析系数

Tab. 1 Coefficients of thermal analysis

部位	系数		
	α_c	ϵ_{res}	ϕ
背火面的混凝土板	9	0	1.0
受火面的混凝土板	25	0.56	1.0
翼缘和其保护层	25	0.496	1.0
腹板和其保护层	25	0.496	0.5

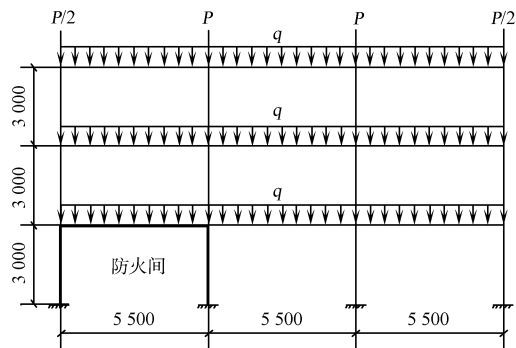


图2 受火框架结构(mm)

Fig. 2 Frame structure exposed to fire(mm)

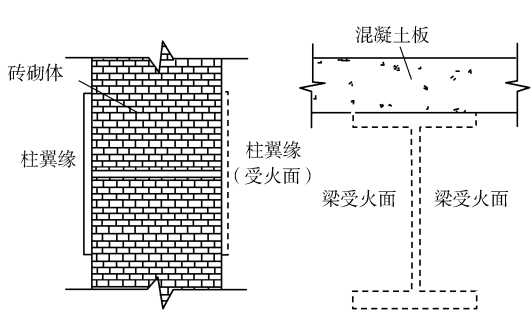
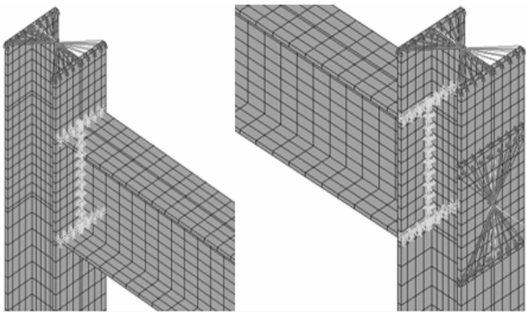


图3 梁柱受火面

Fig. 3 Boundaries exposed to fire of beam and column

在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾作用下,框架梁跨中位移(y)随受火时间(t)的 ANSYS 计算变化曲线(负值表示向下凸曲),如图 5 所示.从图 5 中可以看出,钢框架在受火 13 min 时,梁跨中位移为 118.36 mm;受火 14 min 时,梁跨中位移急剧增加到 190.14 mm. 这表明框架在当前荷载水平下,耐火极限可确定为 14 min. 另一方面,根据文献[7]可知,在进行整体结构分析时,可取跨中位移达到 $L/30$ 为 183.33 mm(L 为框架梁的跨度)作为结构构件达到耐火极限的判据.在计算中,位移值对应的受火时刻为 13.92 min(约等于 14 min).由此可见,应用 ANSYS 进行火-结构耦合分析不仅是可行的,而且具



(a) 左端节点 (b) 右端节点
图4 梁柱节点单元耦合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of joint element coupling

有良好的准确性.

U 型钢-混凝土组合梁试件^[11]在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾炉中进行受火试验,其温度测试点如图 6 所示. 组合梁试件参数:U 型钢梁宽为 150 mm;翼缘宽为 50 mm; 混凝土板宽为 600 mm;混凝土板高为 80 mm;U 型钢梁高为 300 mm;钢梁腹板及翼缘板厚均为 3 mm. 混凝土材料为硅质混凝土,厚涂型防火涂料,厚度为 6 mm,导热系数为 $0.116 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,比热为 $1.047 \text{ J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$,密度为 $(400 \pm 20) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.按上述方法建模,编制火-结构耦合 ANSYS 分析程序进行计算,得到的组合梁截面在 30, 90, 120 和 150 min 时的温度场,如图 7 所示.

组合梁试件(UL3)测点 1 的试验温度与 ANSYS 温度的比较,以及跨中位移-受火时间曲线,分别如图 8 所示.从图 8 中可以看出,理论计算结果与试验实测结果高度一致,特别是在测点 1 测得的温度,其受火试验的全过程中都与 ANSYS 计算结果吻合,而且跨中位移-受火时间曲线也符合很好. 这表明火-结构耦合的 ANSYS 分析模型可用于结构构件受火全过程的数值模拟计算,计算结果具有良好的可靠性.

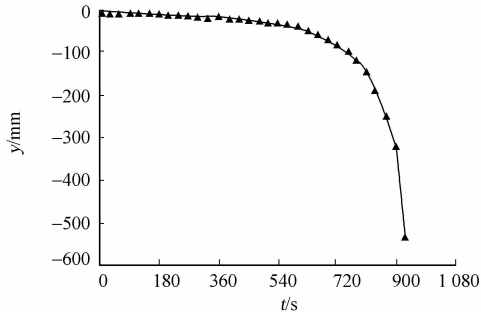


图5 防火间梁跨中位移随受火时间的变化曲线
Fig. 5 Curve between mid-span deflection and exposed-to-fire time of beam in fire compartment

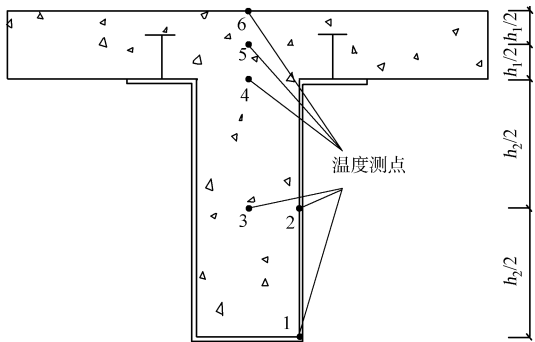


图6 U型钢-混凝土梁温度测试点(mm)
Fig. 6 Temperature test points of U-section steel concrete beam(mm)

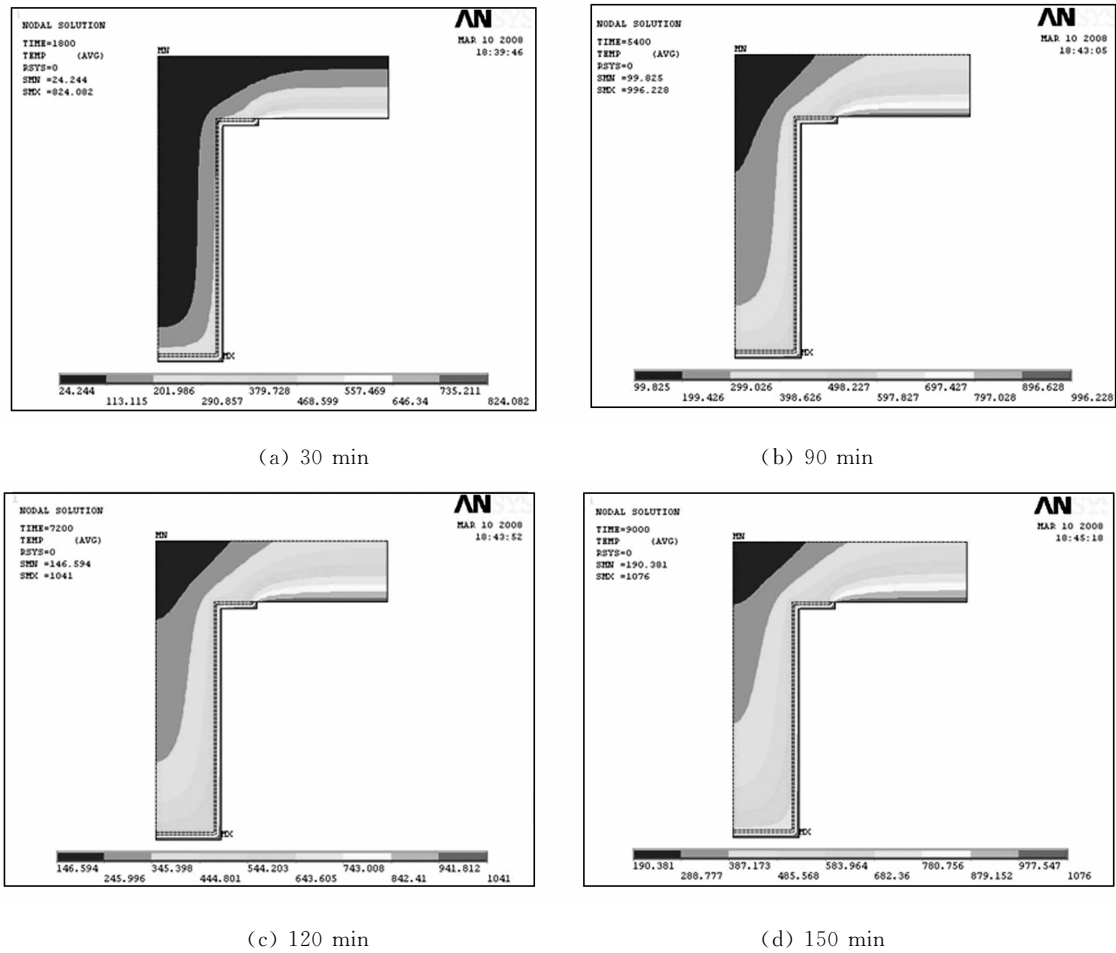


图 7 U 型钢-混凝土梁截面的温度场分布(°C)

Fig. 7 Temperature fields of U-section steel concrete beam(°C)

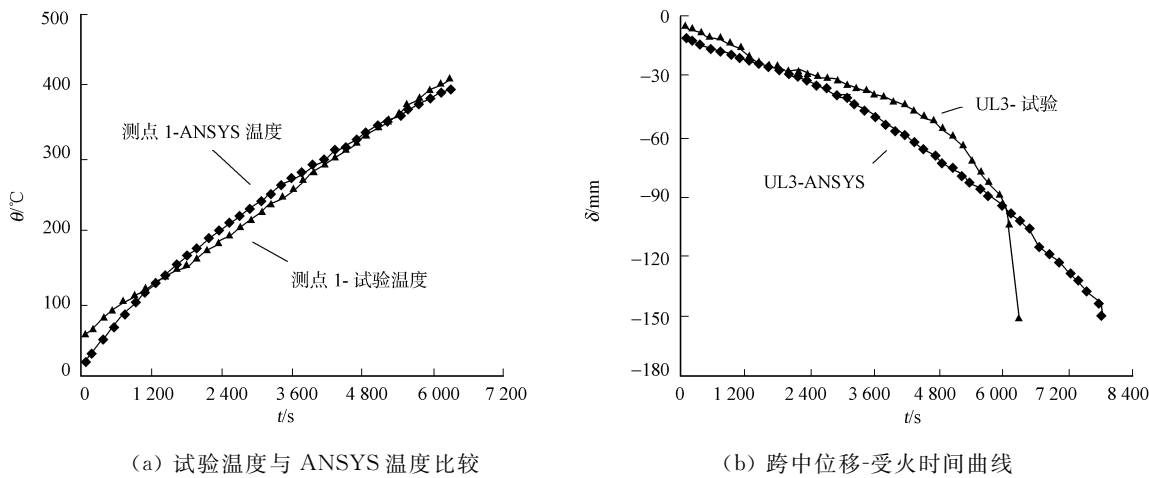


图 8 受火 U 型钢-混凝土梁理论与试验结果的比较

Fig. 8 Comparison between simulation results and test results of U-section steel-concrete beam under fire

3 结论

通过分析和计算 U 型钢-混凝土组合梁试件在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾下载面的温度场和梁的挠度-受火时间曲线,并将其与试验结果进行比较验证,可以得到如下 3 点结论.

(1) 在国际标准 ISO 834 规定的标准火灾下,试验梁测点的温度与 ANSYS 理论计算结果在受火试验全过程高度吻合,试验梁跨中位移-受火时间曲线也与理论计算结果符合良好. 表明,模拟分析薄壁型钢混凝土组合结构的耐火性能是可行的,所建立的火-结构耦合 ANSYS 分析模型是合适的.

(2) 火-结构耦合 ANSYS 模拟计算结果与试验结果符合良好, 应用于结构构件耐火性能受火全过程的数值模拟计算不仅是可行性的, 而且具有良好的准确性和可靠性。

(3) 应用火-结构耦合 ANSYS 分析模型, 可对不同条件下 U 型钢-混凝土组合梁的耐火性能进行评判与分析, 不仅节省了大量试验费用, 而且可为构件的耐火试验方案提供依据。

参考文献:

- [1] 张耀春, 毛小勇, 曹宝珠. 轻钢-混凝土组合梁的试验研究及非线性有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 26-33.
- [2] 周天华, 何保康, 李鑫全, 等. 帽型冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁的试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(1): 48-50, 14.
- [3] 沈建华, 高轩能, 周期源. 滑移对薄壁 U 型钢-混凝土组合梁挠度的影响[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(5): 557-562.
- [4] 李国强, 吴波, 韩林海. 结构抗火进展与趋势[J]. 建筑结构进展, 2006, 8(1): 1-13.
- [5] 毛小勇, 肖岩. 标准升温下轻钢-混凝土组合梁的抗火性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2006, 32(2): 64-70.
- [6] 高轩能, 陈明华, 王进. 薄壁槽型钢-混凝土梁在标准火灾下的温升特性[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2008, 36(3): 430-435.
- [7] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [8] 陈明华. 薄壁型钢-混凝土组合梁抗火性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2007.
- [9] KRUPPA J, ZHAO B. Fire resistance of composite beams to eurocode 4: Part 1. 2[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 33(1/2): 51-69.
- [10] 张波, 盛合太. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [11] 黄文欢. 薄壁型钢-混凝土组合梁抗火性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2008.

ANSYS Simulation for Fire-Structure Coupling of Thin-Walled U-Section Steel-Concrete Beam

GAO Xuan-neng, HUANG Wen-huan, ZHANG Hui-hua

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: To research the fire-resistant behavior of the composite beam in fire, an ANSYS model for fire-structure coupling analysis was established, by the method combining finite element method in space and finite difference method in time, and the temperature fields and the deflection-time curves of the composite beams under ISO 834 fire were numerically simulated and analyzed with the thermal-analysis ANSYS program and the nonlinear whole process analysis ANSYS program. The numerical results show: under ISO standard fire, the temperature of measuring point in tested beam is highly consistent with the ANSYS simulation result, and the curve between mid-span deflection and exposed-to-fire time of the tested beam is in good agreement with the theoretical result.

Keywords: thin-walled U-section steel; composite beam; fire; fire-structure coupling; ANSYS simulation

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)