

典型局部火灾场景下钢梁的CFD-FEM耦合研究

周靖罡¹, 王伟^{1*}, 周晷毅¹, 丛北华²

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 对于局部火灾, 需要考虑建筑物构件在不均匀受热情况下的热学与力学响应。以方钢管梁为研究对象, 模拟其不同高度处承受底部火羽流冲击作用的热力学现象。不同于应用绝热表面温度概念来实现流固传热的单向迭代耦合, 提出一种新的计算流体力学-有限元数值 (computational fluid dynamics-finite element method, CFD-FEM) 模拟手段, 通过采用CFD方法统一分析火灾模块与热模块来实现流固传热界面的双向直接耦合。首先通过典型局部火灾试验验证了该数值方法的准确性。继而在火灾模块中探究了空间速度场与温度场的分布规律, 在热模块中探究了不同高度处钢梁壁面热流的变化规律, 以及辐射与对流热流随时间的变化规律。最后以固体温度为边界条件完成了结构模块分析, 实现了固体域热力耦合, 探讨了在此局部火灾场景下不同高度处钢梁的力学响应, 探讨了其在受热后出现的屈服强度退化现象。

关键词: 计算流体力学; 局部火灾; 流固传热; 钢梁; 热力耦合; 热流

中图分类号: TU312.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0038-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240111001

Coupled CFD-FEM Simulation Methodology for Steel Beams Under Typical Localized Fire

ZHOU Jinggang¹, WANG Wei^{1*}, ZHOU Xuanyi¹, CONG Beihua²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: weiwang@tongji.edu.cn

Abstract: For localized fire, it is necessary to consider the thermal and mechanical response of building elements under uneven heating. The object of this paper is a square steel tube beam, simulating its thermomechanical phenomena under the flame impact on its bottom at different heights. Instead of applying the concept of adiabatic surface temperature to realize the one-way iterative coupling of fluid-solid heat transfer, this paper proposes a new computational fluid dynamics-finite element method (CFD-FEM) simulation methodology to realize the two-way direct coupling of fluid-solid heat transfer. In this direct coupled form, the fire model and the thermal model are addressed together by CFD method. Firstly, the accuracy of the numerical method is verified by a typical local fire test. Then, the distribution of the velocity and temperature fields is investigated in the fire model. The variation of the surface heat flux of the steel beams at different heights and the variation of the radiative and convective heat flux with time are investigated in the thermal model. Following this, the structural model

收稿日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(52078380, 51820105013), 土木工程I类高峰学科建设经费(2022-3-YB-18)

作者简介:

周靖罡(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事结构抗火方面的研究。E-mail: 1910320@tongji.edu.cn。

通信作者:

王伟(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构抗震与抗倒塌、钢结构多灾害防御与韧性提升等方面的研究。

E-mail: weiwang@tongji.edu.cn。

analysis is completed using the solid temperature as the boundary condition to achieve thermal-mechanical coupling in the solid domain. The mechanical response of steel beams at different heights in this local fire condition is discussed, and the degradation of yield strength after heating is found.

Keywords: computational fluid dynamics; localized fire; fluid-solid heat transfer; steel beam; thermal-mechanical coupling; heat flux

建筑室内火灾的发展过程一般可分为点燃、初期增长、轰燃前期、轰燃、充分发展或轰燃后期、衰减熄灭等多个阶段。根据室内火灾能否发生轰燃,将其分为轰燃前火灾和轰燃后火灾。轰燃前火灾在室内局部区域发展,因此又称为局部火灾^[1];轰燃后火灾不再局限于室内局部,而是迅速扩散至整个空间,此时气体性质近似均匀,室内环境温度可由时间-温度曲线近似确定(如ISO-834曲线^[2],EC3欧洲规范所建议的曲线^[3]),将火灾曲线代入简化传热模型即可获得构件温度^[4],从而避免了复杂的计算燃烧学分析。有研究指出,这种思路的构件受热方式与真实火灾场景下的构件受热方式相似之处较少,力学行为也无法代表真实火灾中可能发生的行为^[5]。此外,在如机场航站楼、大型商场与体育场等开阔空间中往往无法达到轰燃发生的条件,这种传统抗火方法更加无法适用。

对于局部火灾分析,数值模拟涉及三种分析过程的耦合,依次为:火灾模块、热模块和结构模块^[5]。在火灾模块中,气相燃烧的模拟通常采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法;在热模块中完成结构的热传导模拟,可以用CFD方法或有限元方法(finite element method, FEM)进行求解^[6];在结构模块中,往往采用FEM对结构的力学响应进行模拟。

目前典型的局部火灾研究思路为将热模块与结构模块采用FEM进行求解,也可统称为顺序耦合热应力分析。因此局部火灾的数值模拟过程需在CFD和FEM计算模块之间传递边界条件数据,即在火灾模块(气相)与热模块(固相)的耦合界面传递气体温度、入射辐射热流和对流换热系数等参数的信息。由于CFD和FEM两种方法涉及到网格尺寸、时间步长等诸多参数的变化,上述过程是非常复杂的。基于此,WICKSTRÖM^[7]提出了一个新的变量——绝热表面温度(adiabatic surface temperature, AST),可以将复杂的对流和辐射边界条件描述为单一标量,如图1a)所示。在这种方法中,常采用NIST开发的火灾动力学求解器(fire dynamic simulator, FDS)^[8]进行火灾模块计算,热模块与结构分析往往采用有限元方法在有限元软件,ANSYS^[9]或ABAQUS^[10]中顺序进行。利用标量AST和对流换热系数,可以将火灾模块分析中考虑对流和辐射过程的热流信息转移到有限元分析中,从而进行后续的热模块与结构模块分析。一些学者^[11-12]采用该思路对局部火灾条件下的结构进行了基于性能的分析。

本质上来说这套应用AST参数的方法属于多物理场耦合研究体系下的迭代耦合思路,只实现了单向耦合,且具有迭代耦合手段的固有缺陷,如操作困难、收敛性差等。此外,限于FDS软件的固相计算假定为一维热传导^[8],这套方法不得不舍弃CFD方法得到的固体温度信息,而在FEM分析中重复进行传热计算,因此在运算效率上有待提高。

鉴于以往的局部火灾数值模拟研究大多采用单向迭代耦合形式来解决流固传热耦合,而另一种采用直接耦合形式^[13]的方法应用较少。如图1b)所示,本文尝试采用CFD方法来统一分析火灾模块与热模块,从而实现流固传热的双向直接耦合。基于此研究思路,本文对典型局部火灾场景下的不同高度处钢梁开展了数值模拟研究。通过CFD模拟手段,首先对该场景下的火灾模块展开分析,讨论了空间速度场、温度场分布,继而详细分析了采用直接耦合方法获得的钢梁壁面热流情况。最终在结构模块分析中探讨了钢梁受热后的力学响应特性,阐述了距离火源不同高度对梁结构造成的危害。

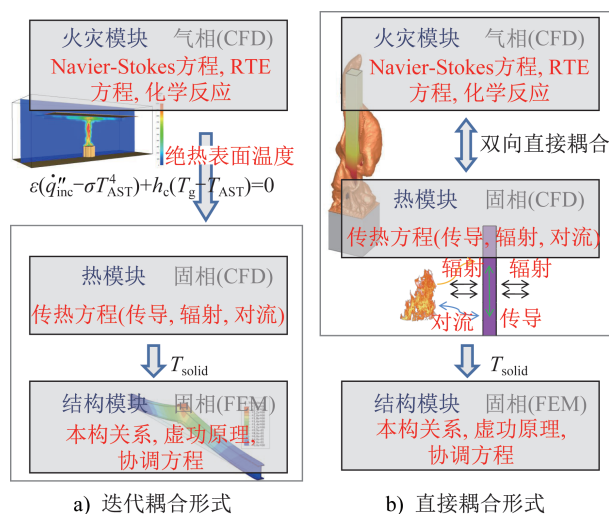


图1 火灾-结构分析的CFD-FEM

Fig. 1 CFD-FEM for fire-structural analysis

1 方法

1.1 仿真方案

本文采用的CFD-FEM耦合方法思路如图1b)所示,基于CFD模拟方法对火灾模块和热模块进行耦合分析,即采用同一种离散化方法,将整个计算域(包括流体和固体区域)内多组方程统一进行求解,同时加入了

流固交界面的辐射、对流热流计算方程,实现了两模块间的双向耦合。继而将热模块分析得到的固体温度信息作为结构模块的边界条件,传输到结构模块中开展有限元分析。

1.2 控制方程

火灾模块需要满足的方程包括流体力学控制方程

(质量、动量、能量守恒方程)、基于简单概率模型的混合分数传输方程以及一些辅助方程(辐射输送方程、炭黑生成方程等),具体如表1所示。热模块与结构模块分析着眼于固体域,需要满足的方程包括热传导方程、平衡方程、几何协调方程及本构方程等。其中平衡方程与几何协调方程可合并为虚功原理,如表1所示。

表1 方程汇总

Table 1 Equation summary

区域	方程	形式
流体域	连续性方程	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0$
	动量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla(\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nabla \left[(\mu + \mu_t) \left(\nabla V + \nabla V^T - \frac{2}{3} \nabla V I \right) \right] + \rho g_i$
	能量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla(\rho V H) = \nabla \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{c_p} \nabla H \right) + S_h$
	组分输运方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho f) + \nabla(\rho V f) = \nabla(\rho D_{\text{eff}} \nabla f)$
	辐射输送方程	$(\Omega \nabla) I(r, \Omega) = -(\alpha + \sigma_s) I(r, \Omega) + \alpha \frac{\sigma T_g^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega, \Omega') d\Omega'$
	炭黑生成方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{\text{soot}}) + \nabla(\rho V Y_{\text{soot}}) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\text{soot}}} \nabla Y_{\text{soot}} \right) + R_{\text{soot, form}} - R_{\text{soot, comb}}$
固体域	热传导方程	$\rho c_p \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T + \dot{q}_{\text{net}}''$
	虚功原理	$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV - \left(\int_V \bar{F}_i \delta u_i dV + \int_{S_p} \bar{T}_i \delta u_i dS_p \right) = 0$
	本构方程	$\sigma_{ij} = E \epsilon_{sT} = E(\epsilon_{ij} - \epsilon_{ij}^0)$

表1中出现的方程各参数具体解释详见文献[14-16],在此不一一赘述。选取其中部分关键参数进行阐述。能量守恒方程中, H 为混合物的总绝对焓,包括各组分的生成焓和显焓,如式(1)所示。

$$H = \sum Y_i (h_{f,i}^0 + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,i} dT) \quad (1)$$

式中: Y_i 为组分*i*的质量分数; $h_{f,i}^0$ 为组分*i*的生成焓; $c_{p,i}$ 为组分*i*的比热容; T 为组分的温度; T_{ref} 为参考温度,通常为25℃。

组分输运方程中*f*表示非预混燃烧分析中的常用参数——混合分数^[14],*f*的运用基于一系列简化假设,即认为流体的瞬时热化学状态可由该守恒量*f*表示。

1.3 流固传热耦合

在直接耦合方法中,多个物理场的数学描述方程在相同离散格式下统一求解,故可以通过单一单元矩阵形式实现耦合。本文中火灾模块与热模块之间的耦合界面即由此实现双向耦合,因此在CFD分析中可以直接获得

结构表面的热流情况,其中总热通量 \dot{q}_{tot}'' 包括净辐射通量 \dot{q}_{rad}'' 与对流热通量 \dot{q}_{conv}'' ,具体计算如式(2)~(3)所示。

$$\dot{q}_{\text{rad}}'' = \epsilon(\dot{q}_{\text{inc}}'' - \dot{q}_{\text{emi}}'') \quad (2)$$

$$\dot{q}_{\text{conv}}'' = h_c(T_g - T_s) \quad (3)$$

式中: ϵ 为发射率; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数; h_c 为对流换热系数,常取为 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1[2]}$; T_g 与 T_s 分别为气体与固体表面温度;入射辐射通量 $\dot{q}_{\text{inc}}'' = \int_{4\pi} I_{\text{in}} \text{snd}\Omega$,钢构件作为热源向外发出的辐射通量计算式为 $\dot{q}_{\text{emi}}'' = \epsilon \sigma T_s^4$ 。

2 研究对象

以方钢管梁为研究对象,模拟其在底部火羽流冲击作用下的热力学行为。方钢管梁长为2.5 m,截面为140 mm×80 mm×5 mm。下部放置圆形火盆,高为0.2 m,直径*D*为0.5 m,梁体位于火盆上方正中央。如图2所示,梁体底面与火源表面间的距离为 H_b ,设置为0.4 m、0.7 m与1.0 m三种情况。底部火源燃料为丙烷,火源热释放速率为120 kW(约为小型沙发的燃烧场景)。

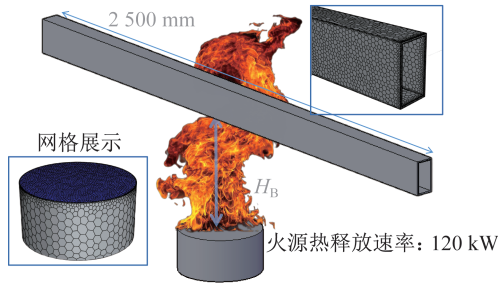


图2 研究模型

Fig. 2 Research model

3 数值模型

3.1 研究对象与计算域

CFD模型的计算域尺寸为 $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 10\text{ m}$ 。采用非结构化网格,经过网格敏感性分析后,最终选取网格如图2所示。计算域共包含780 328个多面体网格,钢梁与火盆的网格如图2所示。为了模拟钢梁模型周围的边界层,在构件表面设置了12层棱柱单元网格,总厚度为 0.02 m ,延展变化率为1.06,使钢梁表面满足无量纲壁面距离 $y^+ < 3^{[17]}$ 。

在结构模块分析中,采用ABAQUS软件对钢梁进行有限元建模,采用三维8节点六面体单元C3D8R来模拟钢梁单元。

3.2 研究方法 with 设置

采用计算流体力学软件FLUENT进行了火灾模块与热模块的耦合分析^[18]。由于火灾是随时间变化的,因此采用瞬态、压力基求解器方法来计算。模拟过程中考虑了重力的影响。本文选用大涡模拟(large eddy simulation, LES)法描述湍流行为。当采用合适的亚格子模型时,应用LES方法能够捕捉动态的中等尺度以上的主要含能涡结构,从而较好地模拟湍流和浮力的相互作用并得到真实燃烧场景的瞬态流场。采用离散坐标DO模型模拟辐射传热。将燃烧过程考虑为丙烷与空气的湍流扩散而非预混燃烧。采用简单概率密度函数对湍流与燃烧的相互作用进行统计描述,并利用非预混平衡化学模型进行计算。影响钢材升温的导热系数和比热容采用了EC3规范中的规定^[3]。火盆表面为质量进口边界条件,乙烷的质量流量为 $0.0012\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,湍流强度为5%。钢梁表面采用耦合热边界条件^[13],具体模型设置细节如表2所示。

结构模块分析中,通过设定梁端部的位移(U_x, U_y, U_z)和转动自由度(R_x, R_y, R_z)来保证两端为固接约束边界条件,上表面则考虑承受典型的均布荷载作用。钢构件高温下的材料力学性能是有限元分析模型的关键参数。针对牌号为Q235的钢材,根据EC3规范^[3],泊松比

表2 模型设置

Table 2 Model settings

仿真模型、计算设置及边界条件	形式
求解器	基于压力,隐式,瞬态
湍流模型	大涡模拟法 标准 Smagorinsky-Lilly 模型
辐射传热	离散坐标 DO 模型
燃烧	化学平衡非预混燃烧模型 (采用简单概率密度函数方法)
炭黑生成	一步 Khan and Greeves 模型
速度压力耦合/时间推进	SIMPLE 算法
动量方程离散化方案	有界中心差分格式
压力离散化方案	二阶迎风格式
混合材料(丙烷-空气)	不可压缩理想气体
火灾气体吸收系数	WSGGM 模型
时间步长/s	0.05
模拟时长/s	900
边界条件:燃料入口	质量流率为 $0.0012\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 湍流强度为 5% 平均混合分数为 1
地面	热状态:绝热 剪切条件:无滑移
顶面及侧面	压力出口
钢梁表面	耦合热边界条件 发射率为 0.85 剪切条件:无滑移

为0.3,屈服强度和塑性应变值采用塑性各向同性模型,具体参数详见文献^[19]。

本文采用单向迭代耦合手段处理固体热力耦合,只需将热模块分析得到的温度数据转移到结构模块作为边界条件进行受力分析。因此CFD分析中获得的固体温度必须映射到有限元分析所采用的数值网格上,具体操作如图3所示。

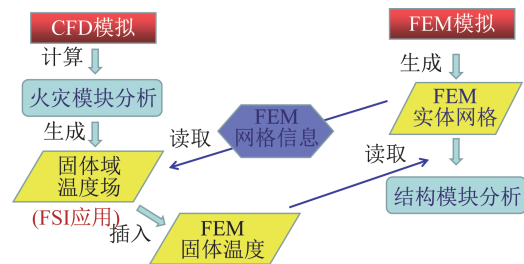


图3 CFD-FEM 温度场信息传输方案

Fig. 3 CFD-FEM temperature field transmission scheme

3.3 数值模型的验证

基于 YOKOBAYASHI 等^[20]开展的局部火灾试验验证数值模型的可靠性,对比上述数值模拟方法所得结果与试验结果,其中下翼缘中轴线壁面温度的对比结果如图4所示,二者吻合良好,验证了数值模型的可靠性。

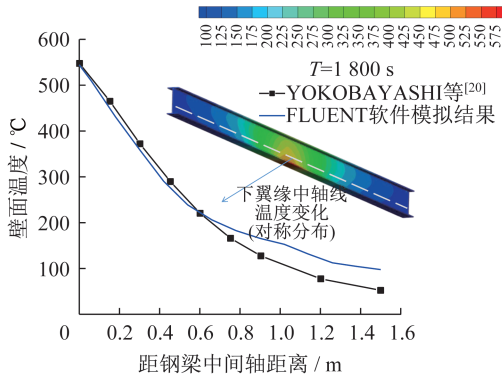


图4 钢梁表面中轴线温度曲线
Fig. 4 Temperature curve of steel beam surface central axis

4 分析与讨论

模型的可靠性得到验证后,考虑三种不同 H_B 情况下的局部火灾场景,分析方钢管梁的热学与力学响应。

4.1 火灾模块分析

数值模拟所得的三个特征时刻流体域的温度分布云图,如图5所示,火焰最高温度接近 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$,且可明显观察到燃烧过程中湍流带来的随机性。当 $H_B=400\text{ mm}$ 时,燃烧过程产生的高温气体基本环绕在钢梁中段,钢梁中段周围大部分区域的气体温度超过 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 。随着 H_B 增大,冲击钢梁的气体温度趋于降低,当 $H_B=1\ 000\text{ mm}$ 时,环绕钢梁的高温气体温度约为 $600\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 。

数值模拟所得的某时刻流体域的速度分布云图如图6所示。由图可知,在强烈浮力羽流作用下,燃烧产生的高温气体向上流动的速度最大约为 $4.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中心气流向上运动,冲击梁体底部后沿侧壁继续向上流动。此外向上运动的羽流还会引发四周空气产生卷吸效应。

4.2 热模块分析

通过将火灾模块与热模块统一采用 CFD 方法求解来实现流固传热的双向耦合,可直接获得钢梁温度。不同高度处的三段梁体受热 900 s 时刻的表面温度云图如图7所示,其中钢梁底部端面的中心点为 A 点。为观察瞬时变化情况,钢梁底部 A 点的壁面温度 T_s 随时间变化曲线如图7所示。钢梁底部的中间区域因直接受到火焰热量的作用,故其温度最高。在受热的前 300 s 内升温较快,当受热超过 600 s 后,温度升高速度趋于平缓。

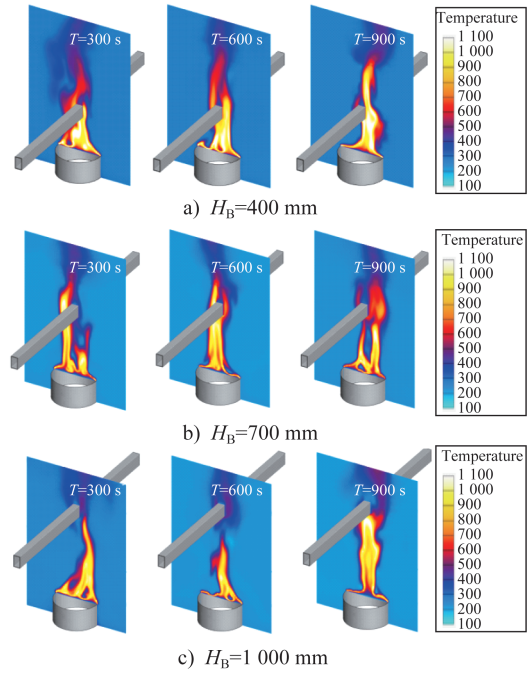


图5 温度分布云图(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 5 Contour of temperature distribution (unit: $^\circ\text{C}$)

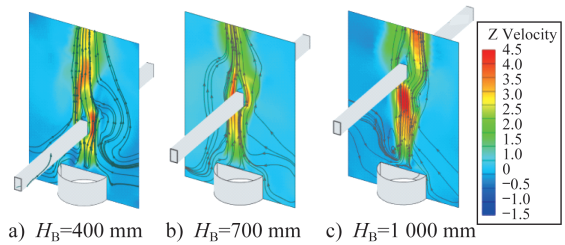


图6 速度分布云图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Contour of velocity distribution (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

达到稳定阶段时,当 $H_B=400\text{ mm}$ 时, A 点对应的 T_s 约为 $640\text{ }^\circ\text{C}$; 当 $H_B=700\text{ mm}$ 时, A 点对应的 T_s 接近 $520\text{ }^\circ\text{C}$; 当 $H_B=1\ 000\text{ mm}$ 时, A 点对应的 T_s 约为 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 。

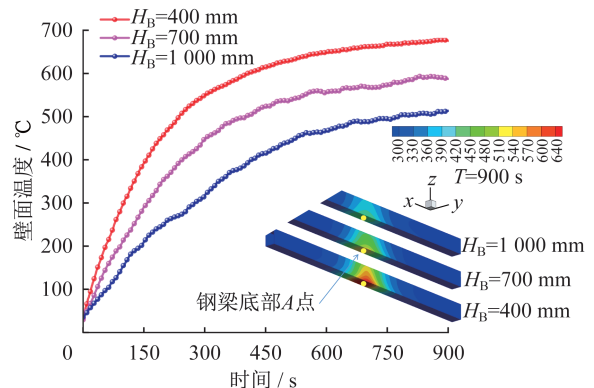


图7 壁面温度曲线

Fig. 7 Temperature curves of wall

接下来分析梁体壁面接收热量的情况。钢梁从火灾环境中接收的总热通量 \dot{q}''_{tot} 主要包含辐射热通量 \dot{q}''_{rad} 和对

流热通量 \dot{q}''_{conv} 。燃烧过程中的时均总热通量 $\overline{\dot{q}''_{tot}}$ 云图如图8所示,梁体底部壁面接收 $\overline{\dot{q}''_{tot}}$ 显著高于侧壁面的对应值。此外, H_B 越小,梁体接收到 \dot{q}''_{tot} 越大,当 $H_B=400$ mm时, A 点处 $\overline{\dot{q}''_{tot}}$ 约为 $18 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 当 $H_B=700$ mm时 $\overline{\dot{q}''_{tot}}$ 降至约 $8 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 当 $H_B=1\ 000$ mm时 $\overline{\dot{q}''_{tot}}$ 仅约为 $3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

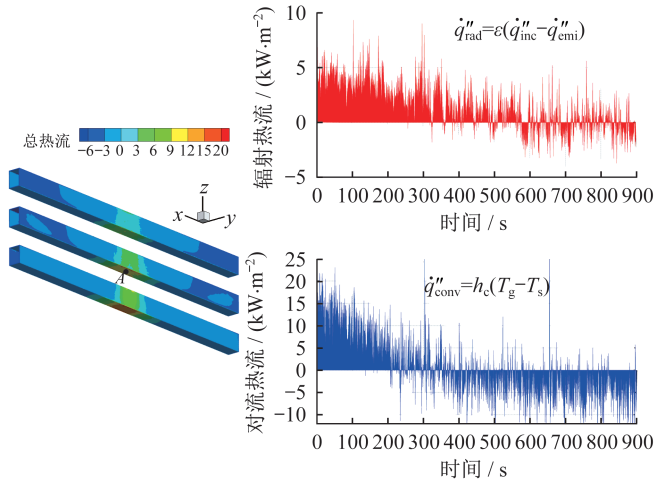


图8 壁面热流 (单位: $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig. 8 Wall heat flux (unit: $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$)

$H_B=700$ mm时钢梁下部 A 点的 \dot{q}''_{rad} 与 \dot{q}''_{conv} 随时间变化情况如图8所示。A 点的 \dot{q}''_{rad} 在前 600 s 内基本为正值,初始阶段达到约 $5 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, \dot{q}''_{conv} 在前 200 s 内基本为正值,初始阶段达到约 $15 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。钢柱持续受热, T_s 不断增大, \dot{q}''_{rad} 与 \dot{q}''_{conv} 均会减小。超过 600 s 后钢梁底部即达到热平衡状态,可见此时热量的吸收与散发呈动态平衡。

4.3 结构模块分析

经过热模块的传热分析后,只需将构件内部的温度分布结果导入到结构模块中开展有限元分析即可得到结构力学响应特性。当考虑钢梁两侧端部为固接约束,上壁面承受典型外加均布荷载为 0.5 MPa 时,常温情况下以及在该局部火灾场景下 900 s 时刻三种高度处钢梁的 Mises 应力 σ_M 云图如图9所示。在常温情况下钢梁除端部区域进入塑性阶段外,整体基本保持弹性,下壁面中部区域 σ_M 约为 120 MPa 。在受火羽流冲击情况下,由图9可见随着 H_B 越大,钢梁的应力 σ_M 趋于增大,当 $H_B=1\ 000$ mm时,下壁面中部区域 σ_M 约为 220 MPa ,而当 $H_B=400$ mm时,该区域 σ_M 降至 100 MPa 左右。这是因为当 $H_B=400$ mm时钢梁最高温度超过 $600\text{ }^\circ\text{C}$,根据高温下钢材的本构特性^[19],屈服强度的高温退化现象已经很明显,应力值也会随着屈服强度的降低而显著降低。而当 $H_B=1\ 000$ mm时,钢梁最高温度约为 $400\text{ }^\circ\text{C}$,此时屈服强度的降幅尚小,高温荷载引起的应力增幅就更为明显。

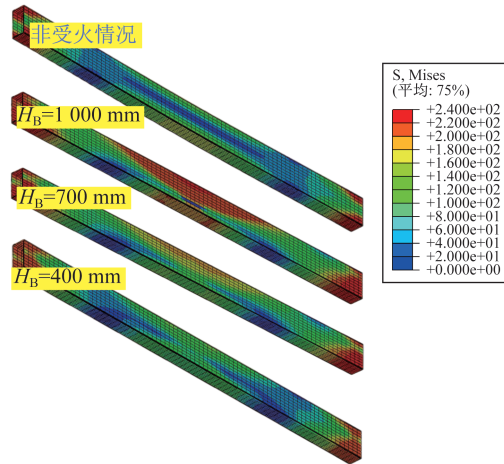
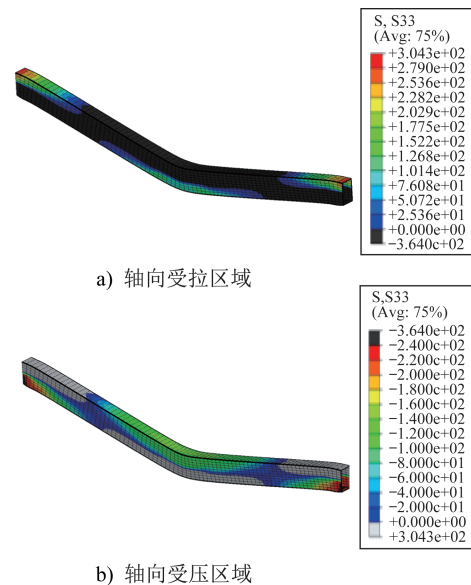


图9 钢梁应力云图 (单位: MPa)

Fig. 9 Stress contour of steel beam (unit: MPa)

当 $H_B=400$ mm 时在该局部火灾场景下 900 s 时刻钢梁的轴向主应力云图如图9所示,其中图9a)展示了轴向受拉区域的情况, σ_{33} 最大值约为 300 MPa ,分布于两端顶部,其中钢梁中段下侧大部分区域与两端上侧的小部分区域轴向受拉;图9b)展示了轴向受压区域的情况,其中 σ_{33} 最小值约为 -300 MPa ,其中钢梁中段上侧大部分区域与两端下侧的小部分区域轴向受压,如图10所示。



b) 轴向受压区域

图10 钢梁主应力云图 (单位: MPa)

Fig. 10 Principal stress contour of steel beam (unit: MPa)

在常温情况下以及在该局部火灾场景下 900 s 时刻三种高度处钢梁的位移云图如图11所示。在常温下钢梁承受此均布荷载作用时中段区域的最大位移仅约为 5.17 mm 。当 $H_B=1\ 000$ mm时,最大位移约为 22.40 mm ,可见其尚能保持部分承载能力。而当 $H_B=700$ mm时,最大位移约为 30.40 mm ,变形已十分明显,

当 $H_B=400$ mm时,最大位移超过65.00 mm,中段区域基本完全进入塑性阶段,强度与刚度急剧退化从而基本丧失承载能力。

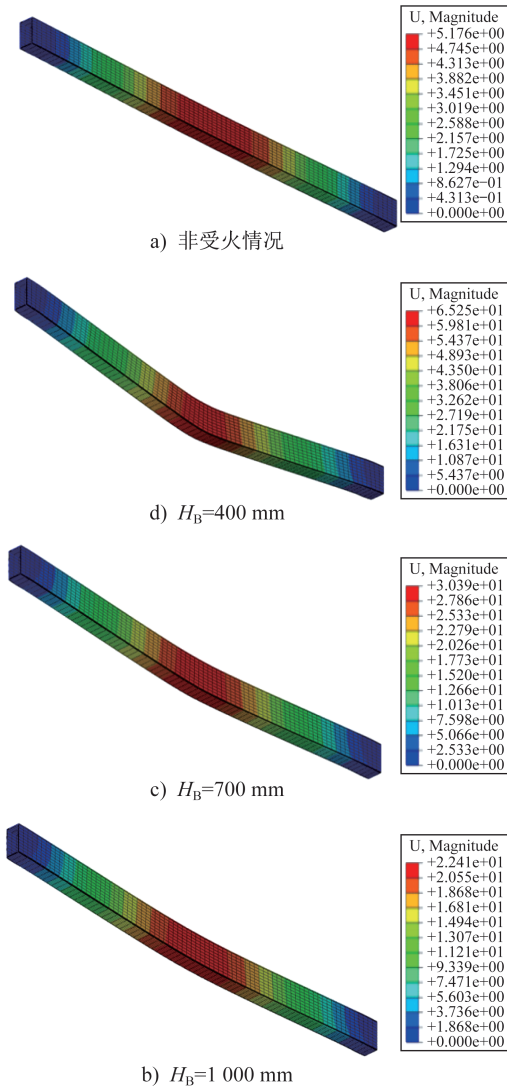


图 11 钢梁位移云图 (单位: mm)

Fig. 11 Deformation contour of steel beam (unit: mm)

5 结论

本文提出了一种应用于局部火灾场景下结构分析的CFD-FEM耦合数值模拟方法。

(1) 有别于目前国际主流应用AST概念的边界条件耦合处理方法,本文采用CFD方法来统一分析火灾模块与热模块,从而实现了流固传热界面的双向耦合。

(2) 在火灾模块分析中基于CFD方法模拟了流体域的燃烧现象,高温烟气冲击钢梁的温度随 H_B 增大而降低,最高流速可达近 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) 在热模块分析中,详细探讨了壁面热流的分布规律,其中钢梁底面接收的热流显著高于侧壁面接收的热流,且辐射热流与对流热流均随壁温升高而降低,最终

达到热平衡状态。

(4) 在结构模块分析中,详细探讨了钢梁受热后出现的屈服强度退化现象。在受热15 min后,当 H_B 较小时,梁体已基本丧失承载能力。

参考文献:

- [1] SILVA J C G, LANDESMANN A, RIBEIRO F L B. Performance-based analysis of cylindrical steel containment vessels exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2014, 69: 126-135. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.08.013.
- [2] 中国工程建设标准化协会. 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. China Association for Engineering Construction Standardization. Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings: CECS 200:2006[S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese)
- [3] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [4] 蔡新江, 夏玮超, 毛小勇, 等. 高温下不同比例钢筋混凝土柱力学性能相似性有限元分析[J]. 工程力学, 2022, 39(1): 129-138, 163. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.12.0890. CAI Xinjiang, XIA Weichao, MAO Xiaoyong, et al. Finite element analysis of mechanical properties similarity of reinforced concrete columns with different proportions due to high temperature[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(1): 129-138, 163. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.12.0890. (in Chinese)
- [5] ZHANG C, SILVA J G, WEINSCHENK C, et al. Simulation methodology for coupled fire-structure analysis: modeling localized fire tests on a steel column[J]. Fire Technology, 2016, 52(1): 239-262. DOI: 10.1007/s10694-015-0495-9.
- [6] WELCH S, MILES S D, KUMAR S, et al. FIRESTRUC-integrating advanced three-dimensional modelling methodologies for predicting thermo-mechanical behaviour of steel and composite structures subjected to natural fires[J]. Fire Safety Science, 2008, 9(9): 1315-1326. DOI: 10.3801/iafss.fss.9-315.
- [7] HURLEY J H. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. 5th ed// WICKSTRÖM U. Methods for predicting temperatures in fire-exposed structures. New York: Springer, 2016: 1102-1130.
- [8] MCGRATTAN K, HOSTIKKA S, MCDERMOTT R, et al. Fire dynamics simulator, user's guide[M]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013: 2019.
- [9] ANSYS Inc. ANSYS user manual[M]. Version 14.0. Cecil:

