

基于FDS-ABAQUS模拟移动火灾下的钢构件升温

邵海斌

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年1月24日; 录用日期: 2025年2月17日; 发布日期: 2025年2月27日

摘要

传统火灾分析中温度场通常被假定为均匀分布, 采用标准升温曲线进行模拟, 这与实际火灾场景中的非均匀温度分布存在显著差异。通过FDS-ABAQUS耦合分析方法, 结合绝热表面温度(AST)法实现火灾场景向结构传热分析的过渡, 研究了移动火灾下钢构件的温度场分布特性。数值模型经NIST局部火灾试验数据验证, 结果表明该方法能够准确预测构件的温度场分布和变形特征。对 $250 \times 250 \times 8 \times 8$ mm矩形截面钢管在快速移动火灾工况(传播速度 2.5 mm/s, 热释放速率 5 MW)下进行 3600 s模拟分析, 发现移动火灾作用下钢构件温度场呈现显著非均匀性, 最高温度出现在 $1950 \sim 2000$ s期间, 构件中心位置温度超过 950°C 温度场分布具有明显的动态特征, 验证了传统均匀温度场假设的局限性。研究成果为大空间钢结构建筑的抗火设计提供了重要的理论依据和数值计算基础。

关键词

移动火灾, 钢构件, AST温度, 数值模拟

Simulation of Steel Component Temperature Rise under Traveling Fire Based on FDS-ABAQUS

Haibin Shao

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 24th, 2025; accepted: Feb. 17th, 2025; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

Traditional fire analysis usually assumes uniform temperature field distribution and employs

standard temperature-time curves for simulation, which significantly differs from non-uniform temperature distribution in actual fire scenarios. The temperature field distribution characteristics of steel components under traveling fire were investigated using FDS-ABAQUS coupled analysis with Adiabatic Surface Temperature (AST) method to bridge the transition from fire scenario to structural heat transfer analysis. The numerical model was validated against NIST localized fire test data, demonstrating its accuracy in predicting temperature field distribution and deformation characteristics. A rectangular steel tube ($250 \times 250 \times 8 \times 8$ mm) was simulated under rapid traveling fire conditions with a propagation speed of 2.5 mm/s and heat release rate of 5 MW for 3600 s. Results revealed significant non-uniformity in the temperature field under traveling fire, with peak temperatures exceeding 950°C at the component center during 1950~2000 s. The temperature field distribution exhibited distinct dynamic characteristics, verifying the limitations of traditional uniform temperature field assumptions. The research findings provide important theoretical basis and computational foundation for fire-resistant design of large-space steel structures.

Keywords

Traveling Fire, Steel Component, AST Temperature, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢结构以其强度高、抗震性能优异和施工便捷的特点，近年来在我国建筑领域得到广泛应用。在建筑抗火设计中，传统分析方法通常假定火灾升温为均匀分布，并采用 ISO 834 标准升温曲线[1]或其他理想升温曲线作为参考。然而，实际火灾场景中，特别是在大空间建筑中，温度场通常呈现显著的不均匀分布，多数构件处于移动非均匀受火状态。这种动态的非均匀火灾模式对建筑结构的热响应和稳定性具有显著影响。因此，对于一些建筑钢结构，如较大空间钢结构，有必要在进行结构抗火分析时考虑真实的移动火灾场景。

移动火灾，一种动态的非均匀火灾模式，与传统的均匀温升模型不同，对建筑结构的热响应和稳定性具有显著影响。该模式下，温度分布非均匀，高温区(800°C 至 1200°C)与低温区(200°C 至 400°C)间存在显著温差，导致局部热膨胀不均和应力集中[2]。Jiang 等[3]通过 OpenSees 模拟发现，水平火灾传播会在结构表面产生显著温度梯度，导致高温区的构件易于过热和失效。Jiang 等[4]的研究表明，火灾传播速度和模式显著影响结构的稳定性，尤其是在多层建筑中可能引起不成比例倒塌。Dai 等[5]使用 CFD 模拟木质燃料火灾，揭示了火灾路径和通风条件对燃烧速度和热分布的显著影响。Nadjai 等[6]进行的大规模火灾试验证实，火灾传播的非均匀温升显著削弱钢结构的抗火性能，为大空间设计提供关键数据。

移动火灾因其非均匀温度分布和动态传播显著不同于传统火灾模型，为大空间建筑和多層结构的防火设计带来新挑战。Stern-Gottfried [7]提出了“移动火灾方法学”(Travelling Fires Methodology, TFM)，强调传统设计中均匀温度假设的局限性，强调了考虑火灾动态特性的重要性。继后，Rackauskaite 等[8]发展了 iTFM (Improved Travelling Fires Methodology)，利用复杂动力学模型分析火灾对钢结构和混凝土结构的影响，为工程设计提供指导。Zhang 等[9]对 iTFM 火灾模型进行了详细讨论，以验证能量等效方法在移动火灾条件下的有效性。

为更加准确地反映火灾在不同场景下的传播规律。进一步研究表明[10]，火焰传播速度与火灾的热释

放速率(Heat Release Rate, HRR)有着本质联系。HRR 的增加会导致火焰传播速度加快,并扩大高温区域的范围。具体而言,HRR 越高,近场高温区越集中,温度梯度越大,火灾对结构的热作用更显著。此外,HRR 的变化还影响火焰传播的持续时间和路径。对于燃料不均匀分布的场景,高 HRR 区域可能成为传播的主导点,显著改变火焰传播速度的均匀性。Nan 等[10]基于 iTFM,假设火灾以恒定速率在建筑内部传播。这一假设基于燃料负荷均匀分布和火焰前沿的恒定移动速度,提出了火灾传播速度与 HRR 的关系,见表 1。本文采用恒定的快速火灾移动速度值 2.5 mm/s 以及对应的 HRR、火灾持续时间进行数值模型分析。

Table 1. The relationship between fire spread velocity and HRR

表 1. 火灾传播速度与 HRR 的关系

No.	Category	V (mm/s)	HRR (W/m ² K)	Fire duration (min)	Fire model
1	Slow-Const	0.5	1 MW	300	Alpert model
2	Slow-Var	0.0 - 1.0	0.0 MW - 2.0 MW	300	Alpert model
3	Medium-Const	1.25	2.5 MW	120	ECI model
4	Medium-Var	0.0 - 2.5	0.0 MW - 5.0 MW	120	Alpert-ECI model
5	Fast-Const	2.5	5.0 MW	60	ECI model
6	Fast-Var	0.0 - 5.0	0.0 MW - 8.0 MW - 1000°C	60	Alpert-ECI-Ideslised ZIB model

2. 基于 FDS-ABAQUS 模拟移动火灾下的钢构件升温

进行钢构件的升温分析通常分为两个步骤:火灾场景模拟、传热模拟。在本研究中,使用绝缘表面温度(Adiabatic Surface Temperature),下称 AST 温度,来作为构件的热边界条件用于后续的传热分析中。AST 方法由 Wickström 等[11]提出,是在假定结构构件为理想绝缘体的前提下得出的虚拟温度,可以通过布置测点直接输出。

2.1. 钢的材料模型

在有限元分析中,准确定义材料随温度变化的特性至关重要。中国规范(GB 51249-2017) [12]、欧洲规范(EC3) [13] [14]、美国规范(AISC) [15]和英国规范(BS5950) [16]等各国规范对此规定了不同的表达式和参数取值。欧洲规范的材料模型被广泛应用,因此,本文选择采用欧洲规范中的相关规定。

2.2. 有限元模型的验证

为验证有限元方法的准确性,本文采用 NIST.TN.1983 中的局部火灾钢梁性能试验数据进行有限元模拟[17] [18]。试验采用 6.2 m 长 W16 × 26 型钢梁,试件材质为 ASTM A992 钢。试验工况如下:

(1) 加载条件:采用四点弯曲加载方式,集中力作用点间距 2.44 m。加载梁通过高强度钢棒与液压驱动器相连,驱动器安装在反力地板下方以避免火灾影响。

(2) 边界条件:钢梁两端均采用铰支座,可实现沿纵向自由伸长和绕强轴、弱轴自由转动。支座处设置横向约束防止扭转。

(3) 火灾工况:采用 1 m × 1 m 天然气燃烧器,位于梁中跨下方 1.1 m 处。燃烧器热释放速率可控,用于产生局部火灾工况。

根据上述试验参数,采用所述建模方法建立 FDS 和 ABAQUS 有限元分析模型。图 1 和图 2 分别展

示了升温过程中, 数值模拟与试验得到的钢梁的时间-温度曲线、时间-跨中挠度曲线。由图可见, 有限元模型能够较准确地反映构件在高温环境下的温度分布和变形规律。试验与数值模拟的结果非常接近, 显示了采用 AST 温度作为热边界条件的 FDS-ABAQUS 耦合分析方法对于构件高温下力-热耦合模拟的可靠性。

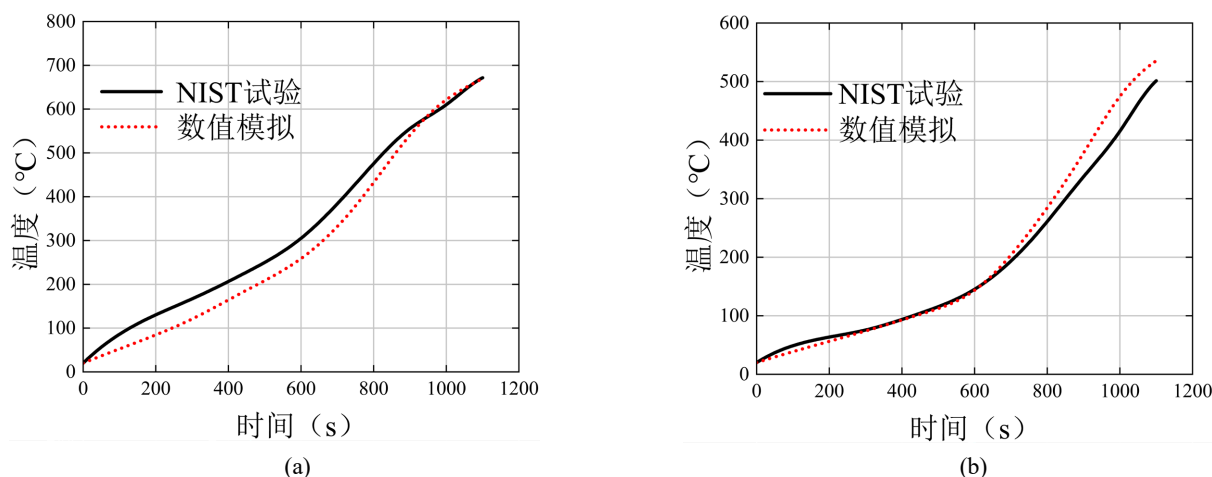


Figure 1. Time-temperature curve of the specimen. (a) Comparison of LF positions; (b) Comparison of MW positions

图 1. 试件的时间-温度曲线。(a) LF 位置对比; (b) MW 位置对比

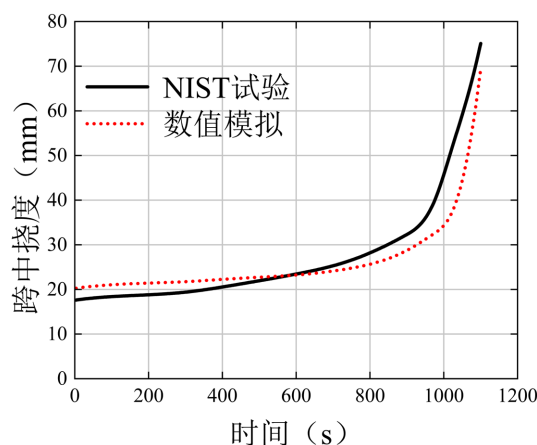


Figure 2. Time-central deflection curve of the specimen

图 2. 试件的时间-跨中挠度曲线

2.3. FDS 数值模拟

本文选用矩形截面钢管形式, $250 \times 250 \times 8 \times 8$ mm, 构件的长度取 5.0 m。模型计算域的平面尺寸为 3.0×9.0 m, 计算域的高度取 5 m。火盘高 0.1 m 且上表面是火源表面, 火源表面离构件距离为 3 m, 油盘尺寸取为 1×1 m, 共计 9 个, 如图 3 所示。

对于本章中的 FDS 模型, 在 XYZ 方向使用尺寸为 0.06 m 的均匀网格。FDS 模型中, 构件表面的辐射率 ε 取为 0.7, 表面与周围空气的换热系数取为 $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。在矩形构件的四个表面沿长度方向均匀布置 20 个 AST 温度测点来测量构件的热边界条件, 如图 4 所示。AST 测点在矩形管构件截面上的分布如图 5 所示。FDS 模拟中油盘热释放速率取为 5 MW, 通过控制 HRR, 模拟出移动火灾场景, 燃烧时长为 3600 s。

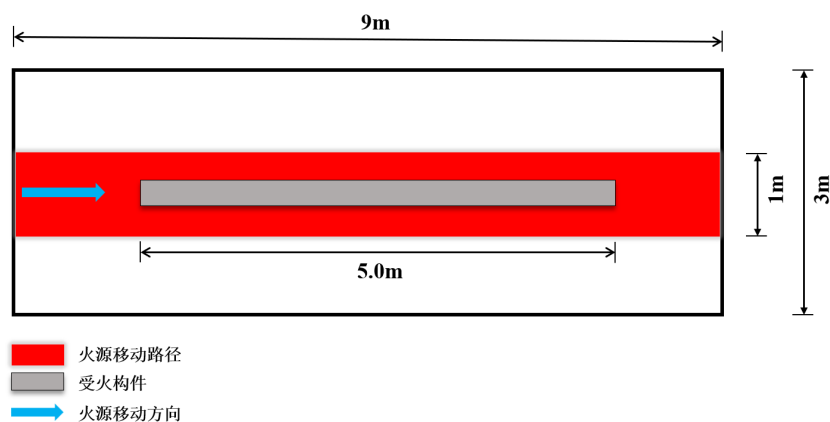


Figure 3. Schematic of the oil pan and component positions under moving fire
图 3. 移动火灾下油盘与构件的位置图

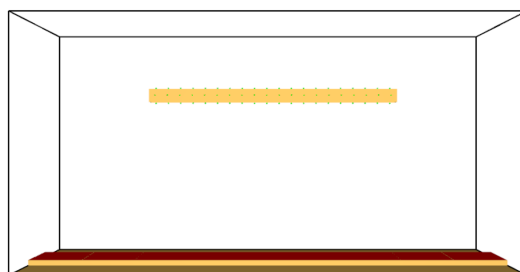


Figure 4. FDS simulation of the moving fire scenario
图 4. FDS 模拟的移动火灾场景

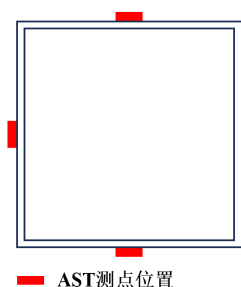


Figure 5. Distribution map of AST measurement points
图 5. AST 测点的位置分布图

2.4. 基于 ABAQUS 的热传递数值模拟

结构的热传递分析使用有限元软件 ABAQUS 进行。图 6 显示了数值模型中的有限元网格划分。网格采用 DC3D8 单元，单元的长度和宽度分别约为 0.025 m。数值模拟中使用的钢材牌号为 Q235，该牌号钢材常温下的屈服应力为 235 MPa、弹性模量为 210000 MPa、泊松比为 0.3。通过子程序将 FDS 结果导入到数值模型中，进而开展构件的传热计算[19]。其中，采用三维升温的温度分布时构件的网格划分需与 ABAQUS 传热分析时的构件网格划分完全一致，以确保三维升温计算的结果可以传递到结构分析模型中。

图 7 反映了梁中心受火位置随时间变化的温度曲线，揭示了火灾过程中的温度动态特性。曲线初期呈现出快速升温的趋势，约在 1950 秒到 2000 秒之间达到峰值温度(超过 950℃)，随后随着时间推移，温

度逐渐降低。这种显著的升温 - 降温特征表明火灾影响并非均匀分布, 而是表现出明显的移动性特征。温度的快速上升和高峰后逐渐下降, 揭示火灾热源在梁中心位置的作用具有时间上的局部性和动态性。这种特点强调了移动火灾过程中火源移动或燃烧强度随时间变化对结构构件温度分布的影响。

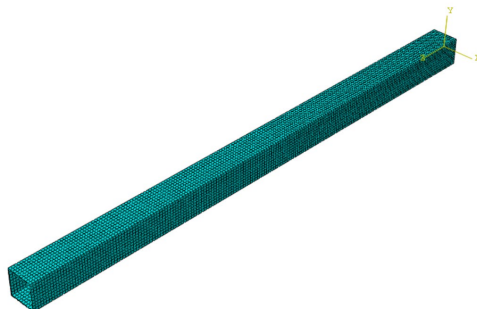


Figure 6. Mesh division of the structural model
图 6. 结构模型的网格划分

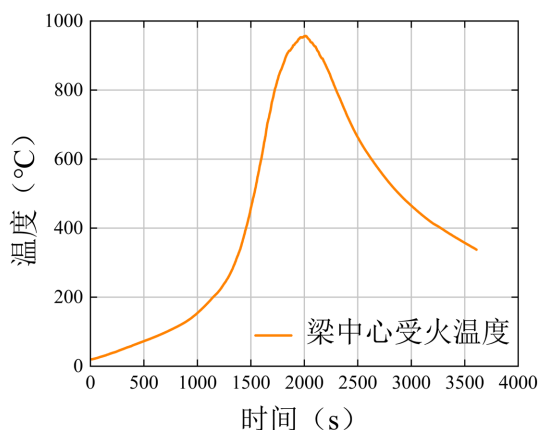


Figure 7. Time-Temperature data at the beam's fire exposure location
图 7. 梁中心受火位置的时间 - 温度数据

3. 结论

本文通过建立 FDS-ABAQUS 耦合分析模型, 结合 AST 温度法, 对移动火灾下钢构件的温度场分布特征进行了系统的数值模拟与分析, 得到如下主要结论:

(1) 提出了基于 FDS-ABAQUS 耦合的局部火灾分析方法, 通过 AST 温度实现火灾场景到结构传热分析的有效过渡。该方法经 NIST 局部火灾试验数据验证, 能够准确预测构件的温度场分布和变形特征。

(2) 研究揭示了移动火灾下钢构件的温度场分布规律。温度场呈现显著的非均匀分布特性, 最大温度差可达 630°C, 构件中心位置温度在 1950~2000 s 期间达到峰值(超过 950°C), 随后逐渐降低。温度场具有明显的动态特征, 验证了传统均匀温度场假设的局限性。

(3) 通过参数化分析确定了影响钢构件温度场的关键因素。火灾传播速度对温度分布均匀性有显著影响; 热释放速率直接决定构件的最高温度和温度梯度; 构件形式影响局部温度分布特征。

(4) 研究成果为大空间钢结构建筑的抗火设计提供了理论依据和计算方法。建立了适用于移动火灾工况的温度场分析方法, 揭示了非均匀温度场作用下的结构响应特征, 为工程实践中的防火设计提供了

定量化参考。

本研究获得的温度场分布规律和分析方法,可为大空间钢结构建筑在移动火灾工况下的抗火设计提供重要参考。

参考文献

- [1] Khan, A.A., Nan, Z., Jiang, L., Gupta, V., Chen, S., Khan, M.A., *et al.* (2022) Model Characterisation of Localised Burning Impact from Localised Fire Tests to Travelling Fire Scenarios. *Journal of Building Engineering*, **54**, Article 104601. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104601>
- [2] Alam, N., Nadjai, A., Charlier, M., Vassart, O., Welch, S., Sjöström, J., *et al.* (2022) Large Scale Travelling Fire Tests with Open Ventilation Conditions and Their Effect on the Surrounding Steel Structure—The Second Fire Test. *Journal of Constructional Steel Research*, **188**, Article 107032. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107032>
- [3] Jiang, Y., Kotsovinos, P., Usmani, A., Rein, G. and Stern-Gottfried, J. (2013) Numerical Investigation of Thermal Responses of a Composite Structure in Horizontally Travelling Fires Using OpenSees. *Procedia Engineering*, **62**, 736-744. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.120>
- [4] Jiang, J., Lu, Y., Dai, X., Li, G., Chen, W. and Ye, J. (2021) Disproportionate Collapse of Steel-Framed Gravity Buildings under Travelling Fires. *Engineering Structures*, **245**, Article 112799. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112799>
- [5] Dai, X., Gamba, A., Liu, C., Anderson, J., Charlier, M., Rush, D., *et al.* (2022) An Engineering CFD Model for Fire Spread on Wood Cribs for Travelling Fires. *Advances in Engineering Software*, **173**, Article 103213. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103213>
- [6] Nadjai, A., Naveed, A., Charlier, M., Vassart, O., Welch, S., Glorieux, A., *et al.* (2022) Large Scale Fire Test: The Development of a Travelling Fire in Open Ventilation Conditions and Its Influence on the Surrounding Steel Structure. *Fire Safety Journal*, **130**, Article 103575. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103575>
- [7] Stern-Gottfried, J. and Rein, G. (2012) Travelling Fires for Structural Design—Part I: Literature Review. *Fire Safety Journal*, **54**, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.003>
- [8] Rackauskaite, E., Hamel, C., Law, A. and Rein, G. (2015) Improved Formulation of Travelling Fires and Application to Concrete and Steel Structures. *Structures*, **3**, 250-260. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2015.06.001>
- [9] Zhang, Y., Zhi, W., Zhang, X., Ni, W., Xu, C., Xu, Y., *et al.* (2023) Experimental and Numerical Study on the Validity of the Energy-Based Time Equivalent Method for Evaluating the Fire Resistance of Timber Components Exposed to Travelling Fires. *Journal of Building Engineering*, **76**, Article 107169. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107169>
- [10] Nan, Z., Khan, A.A., Jiang, L., Chen, S. and Usmani, A. (2022) Application of Travelling Behaviour Models for Thermal Responses in Large Compartment Fires. *Fire Safety Journal*, **134**, Article 103702. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103702>
- [11] Wickström, U. (2008) Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for Calculating Heat Transfer and Controlling Fire Resistance Furnaces. *Fire Safety Science*, **9**, 1227-1238. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.9-1227>
- [12] 中国钢结构协会钢结构防火与防腐分会. GB51249-2017 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [13] CEN (2004) Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-2: General Rules—Structural Fire Design.
- [14] CEN (2005) Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-2: General Rules Structural Fire Design.
- [15] American Institution of Steel Construction (2010) Specification for Structural Steel Buildings.
- [16] British Standards Institution (2003) Structural Use of Steelwork in Building, Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design.
- [17] Peng, X. and Zhou, M. (2023) Thermo-Mechanical Behavior of Composite Beams with Corrugated Steel Webs Exposed to Localized Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, **211**, Article 108180. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108180>
- [18] Choe, L., Ramesh, S., Hoehler, M., *et al.* (2018) National Fire Research Laboratory Commissioning Project: Testing Steel Beams under Localized Fire Exposure. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1983>
- [19] Chen, L., Luo, C. and Lua, J. (2011) FDS and Abaqus Coupling Toolkit for Fire Simulation and Thermal and Mass Flow Prediction. *Fire Safety Science*, **10**, 1465-1477. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.10-1465>