

钢结构地震后火灾耦合灾害研究

杨紫旭

西南林业大学土木工程学院，云南 昆明

收稿日期：2026年6月13日；录用日期：2026年7月5日；发布日期：2026年7月15日

摘 要

本文以钢结构在地震 - 火灾双重灾害下的有限元分析，系统分析了耦合灾害的触发机理、损伤劣化规律。通过梳理国内外典型灾害案例，结合Abaqus有限元模拟方法，揭示了地震损伤与火灾高温的协同作用机制；从材料、构件、结构三个层面，结合现行国家标准，提出了针对性的预防预警策略。研究结果可为钢结构多灾害协同设计、灾后风险评估及工程处置提供理论支撑与实践参考。

关键词

钢结构，地震后火灾，耦合灾害，性能劣化，有限元分析

Research on Fire and Earthquake Coupled Disasters in Steel Structures

Zixu Yang

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: June 13, 2026; accepted: July 5, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

This paper conducts a finite element analysis of steel structures under the dual disasters of earthquake and fire, systematically analyzing the triggering mechanisms of coupled disasters and the patterns of damage deterioration. By reviewing typical disaster cases at home and abroad, and combining them with Abaqus finite element simulation methods, the synergistic mechanism of earthquake damage and high-temperature fire is revealed; at the levels of materials, components, and structures, combined with current national standards, targeted prevention and early-warning strategies are proposed. The research results can provide theoretical support and practical reference for the collaborative design of steel structures against multiple disasters, post-disaster risk assessment, and engineering handling.

Keywords

Steel Structure, Post-Earthquake Fire, Coupled Disaster, Performance Deterioration, Finite Element Analysis

Copyright © 2026 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

全球地震灾害时常发生，由此而引发的次生灾害造成了严重的人员伤亡与经济损失[1]。在 1995 年日本阪神 7.2 级地震中，钢结构厂房因地震导致燃气管道破裂起火，高温下受损构件快速失稳，最终引发大面积坍塌，造成大量人员伤亡；2024 年日本能登半岛 7.6 级地震后，半岛中的钢结构商铺在地震的损伤后发生了火灾，建筑化为焦土，扭曲发黑的钢柱成为耦合灾害的产物。钢结构虽具有强度高、延性好的抗震优势，但钢材在 600℃ 时的屈服强度仅为常温的三分之一[2]，并且地震造成的构件变形、节点松动等损伤会进一步削弱其抗火性能，从而形成“地震损伤 - 高温劣化”的灾害循环。因此，深入研究钢结构地震后火灾的耦合灾害特性，结合有限元模拟方法耦合，已成为建筑结构安全领域的迫切需求。

目前，国内外学者已开展了相关领域的初步研究：在触发机制方面，研究表明地震次生火灾的火源主要源于燃气泄漏、电气短路及构件碰撞，而结构变形导致的通风条件改变会加速火灾蔓延[3]；在数值模拟方面，学者们采用 ABAQUS、MSC 等软件开展钢结构抗火或抗震模拟，但针对地震 - 火灾耦合作用的精细化模拟研究较少[4]。现有研究仍存在明显不足：一是耦合效应量化模型缺失，未能准确描述地震损伤与高温作用的协同劣化规律[5]；二是防控技术针对性不强，现有防火设计未充分考虑地震后的特殊工况；三是有限元模拟多聚焦单一灾害，缺乏对耦合过程的全流程模拟与验证[6]。Niu 等人[7]研究冷成型钢结构(CFS)的多灾韧性，与火区和有限元热传递模型的比较显示，其与平均温度保持保守一致，但凸显了空间变异和石膏衰落预测的局限性。Risco 等人[8]研究了不同高度的防火和无防护钢架的地震后耐火性能，结果显示，地震对未绝缘钢框架防火能力的影响可忽略不计，无论框架高度如何。另一方面，受保护钢框架的防火能力显著降低，这与绝缘损伤程度直接相关。此外，如果绝缘层损坏足够严重，框架的倒塌模式会发生不利变化。

本文旨在揭示钢结构地震后火灾的耦合灾害机理，通过 Abaqus 有限元分析量化地震损伤对结构抗火性能的影响，提出科学合理的防控与修复技术方案。主要研究内容包括：1) 构建钢结构地震 - 火灾耦合作用的 Abaqus 有限元模型，明确建模方法与参数设置；2) 从材料、构件、结构三个层面，结合模拟结果与试验数据，量化评估地震损伤对钢结构抗火性能的削弱效应；3) 为多灾害协同设计标准的优化提供参考。

2. 有限元模型构建

采用 Abaqus 有限元软件构建钢结构地震 - 火灾耦合作用的三维地震有限元模型，模型选取典型钢框架结构(4 层 3 跨，柱距 6 m，首层高 3.6 m，其余层高 2.9 m)，构件采用 H 型钢(梁：H300 × 200 × 15 × 20)、方钢管(柱：H400 × 400 × 20 × 20)，钢材牌号为 Q355B。建筑模型如图 1 所示。

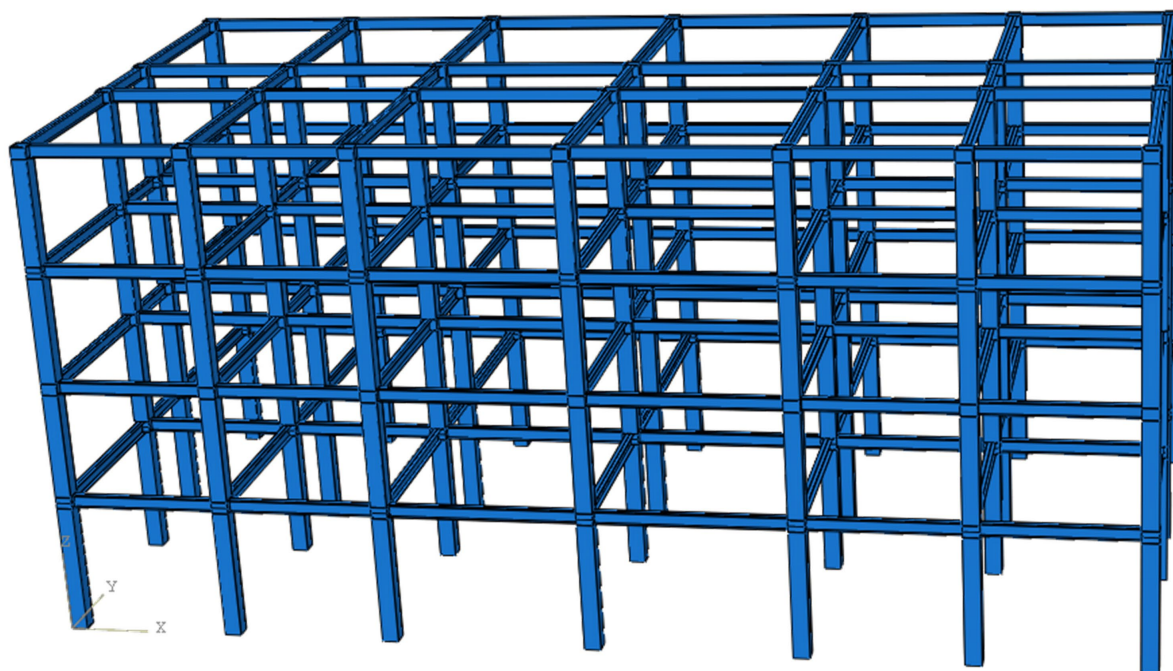


Figure 1. Architectural model
图 1. 建筑模型

材料本构：采用双线性随动强化模型，考虑温度对钢材力学性能的影响，依据 GB 51249-2017 规范确定不同温度下的屈服强度、弹性模量及热膨胀系数；引入损伤因子描述地震塑性变形对钢材性能的削弱。单元类型：火灾分析中构件采用八节点线性传热实体单元(DC3D8)，用于精准计算温度场分布；地震 - 火灾耦合分析中构件采用八节点线性减缩积分实体单元(C3D8R)，兼顾计算精度与效率；焊缝采用实体单元(C3D8R)并设置粘结面接触(法向硬接触，切向罚系数 0.3)，合并模型实例进行顺序热力耦合计算。三维地震荷载采用 EL Centro 波(峰值加速度 0.3 g，持续时间 45 s)，通过加速度时程法施加；火灾荷载采用 ISO 834 标准升温曲线，通过热传递分析实现温度场与应力场的耦合；边界条件设置为柱底固定，梁端与柱顶为刚性连接。

2.1. 模拟工况设计

设计 4 组对比工况，探究地震损伤程度对火灾下结构响应的影响：

工况 1：中度地震损伤(对照组)，仅施加地震荷载，地震作用后构件最大变形率 $L/800$ ，节点承载力损失率 15%；

工况 2：中度地震损伤 + 火灾荷载(耦合工况)，先施加与工况 1 相同的地震荷载，待结构形成稳定损伤后，施加 ISO 834 标准火灾荷载；

工况 3：重度地震损伤(对照组)，仅施加地震荷载，地震作用后构件最大变形率 $L/400$ ，节点承载力损失率 35%；

工况 4：重度地震损伤 + 火灾荷载(耦合工况)，先施加与工况 3 相同的地震荷载，待结构形成稳定损伤后，施加 ISO 834 标准火灾荷载；

补充对照组：工况 5 (无地震损伤 + 火灾荷载)，直接施加火灾荷载，作为耦合工况的基准参考。

2.2. 模拟结果分析

1) 地震损伤对照组(工况 1、工况 3)响应特征

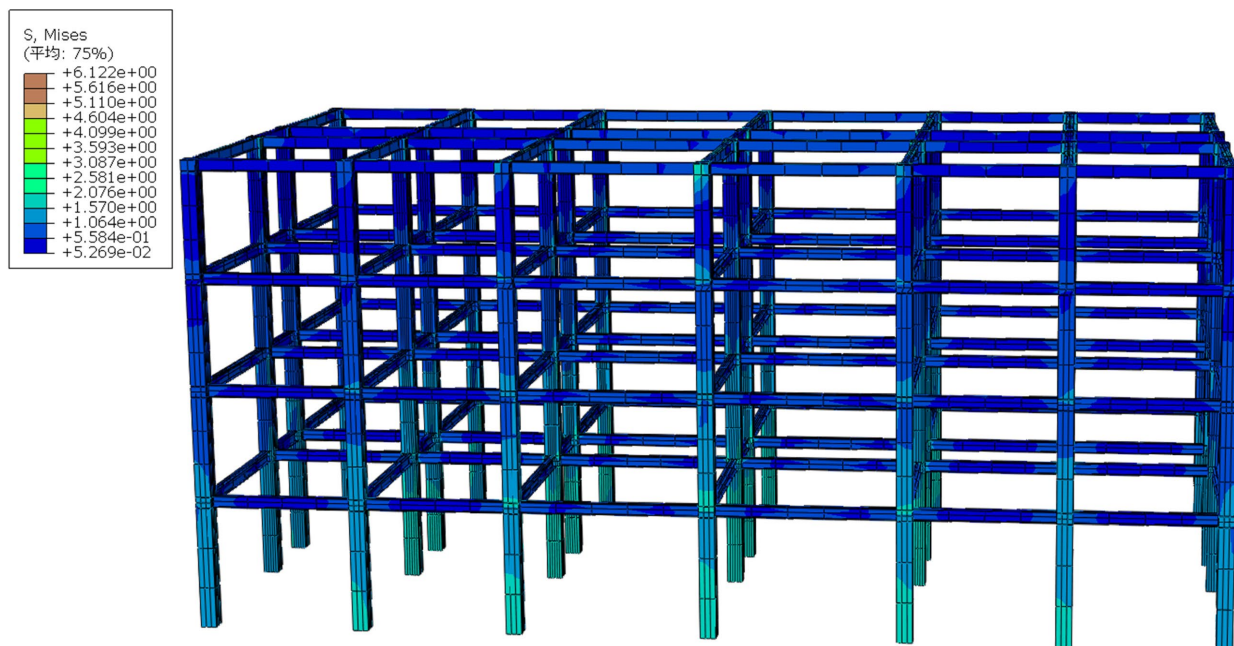


Figure 2. Stress diagram for working condition 1

图 2. 工况 1 应力图

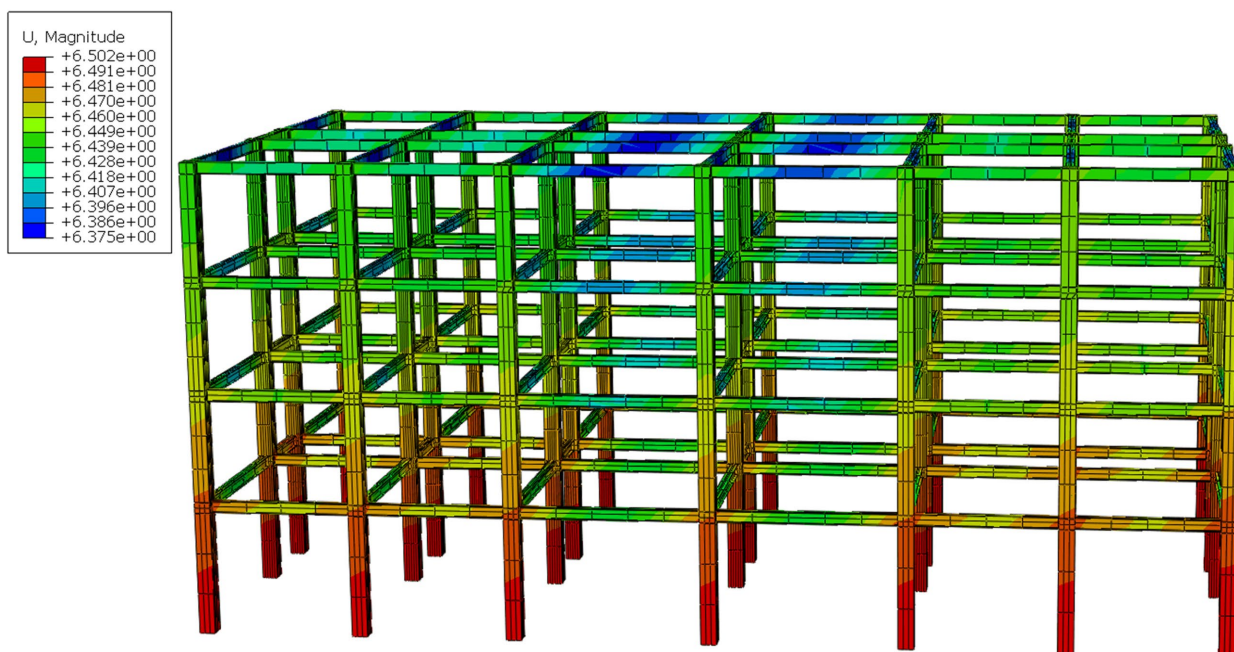


Figure 3. Displacement diagram for working condition 1

图 3. 工况 1 位移图

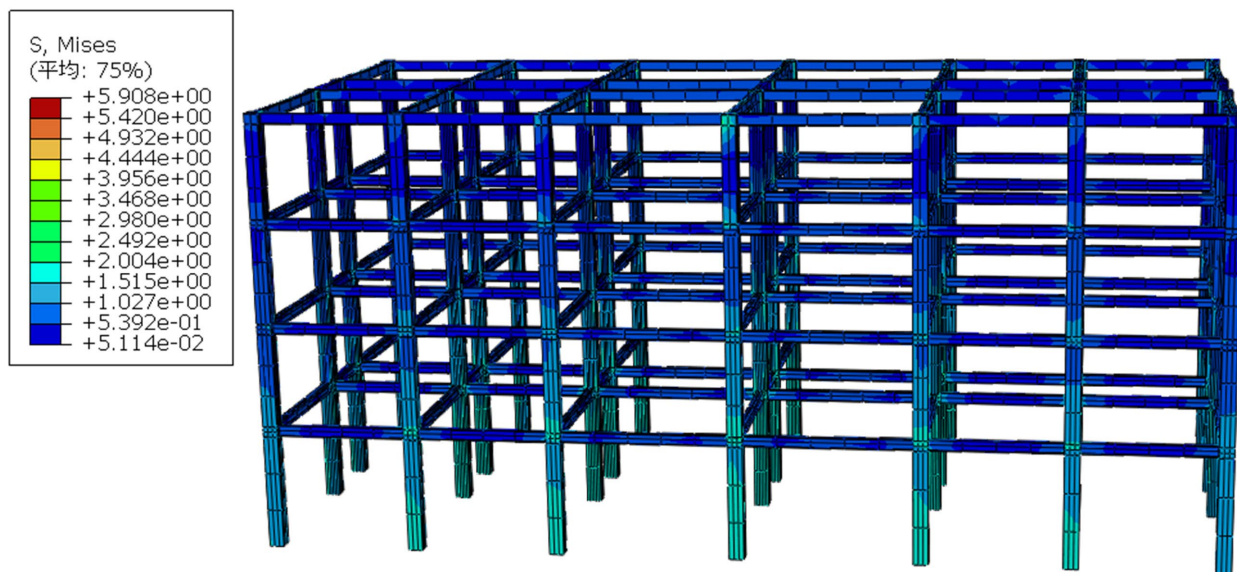


Figure 4. Stress diagram for working condition 3

图 4. 工况 3 应力图

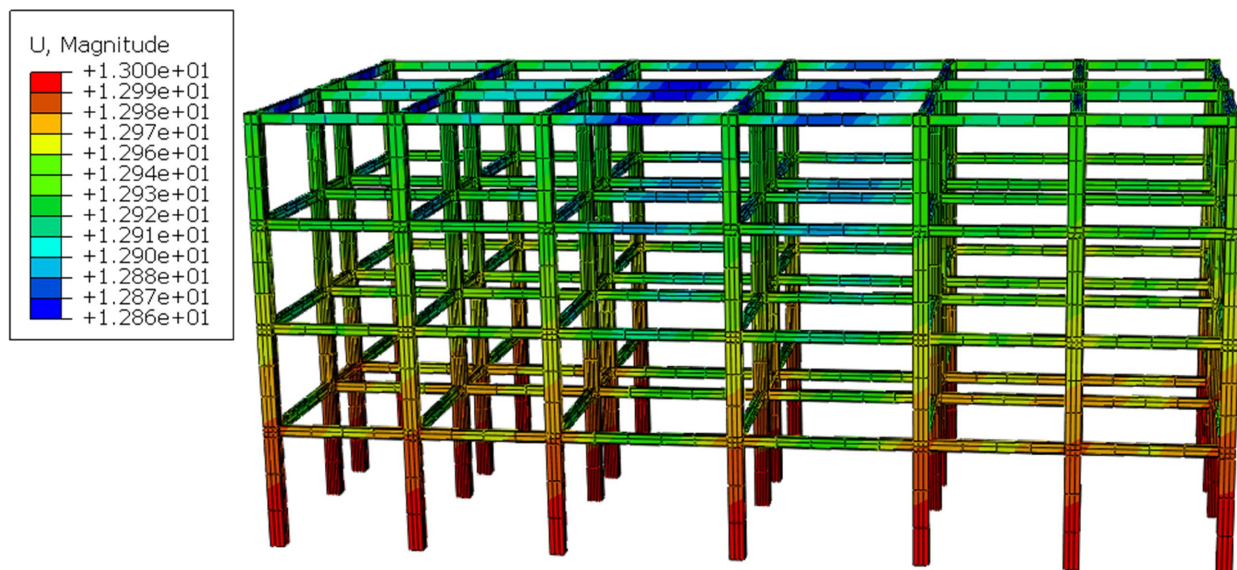


Figure 5. Displacement diagram for working condition 3

图 5. 工况 3 位移图

如图 2、图 3 所示为工况 1 (中度地震): 结构最大残余应力 Q355 钢屈服强度, 未出现全域塑性屈服; 构件底层梁端变形最大, 顶层变形最小; 节点连接处无明显焊缝开裂, 符合预设中度损伤等级要求。

如图 4、图 5 所示为工况 3 (重度地震): 结构底层边柱及梁端出现局部塑性屈服区(等效塑性应变 ≥ 0.002); 构件最大变形量满足设计要求, 节点承载力损失率 35%, 满足预设重度损伤等级要求, 且损伤主要集中于底层柱与梁柱节点区域, 与实际地震中钢结构的损伤分布规律一致。

2) 耦合工况与基准组(工况 5)对比分析

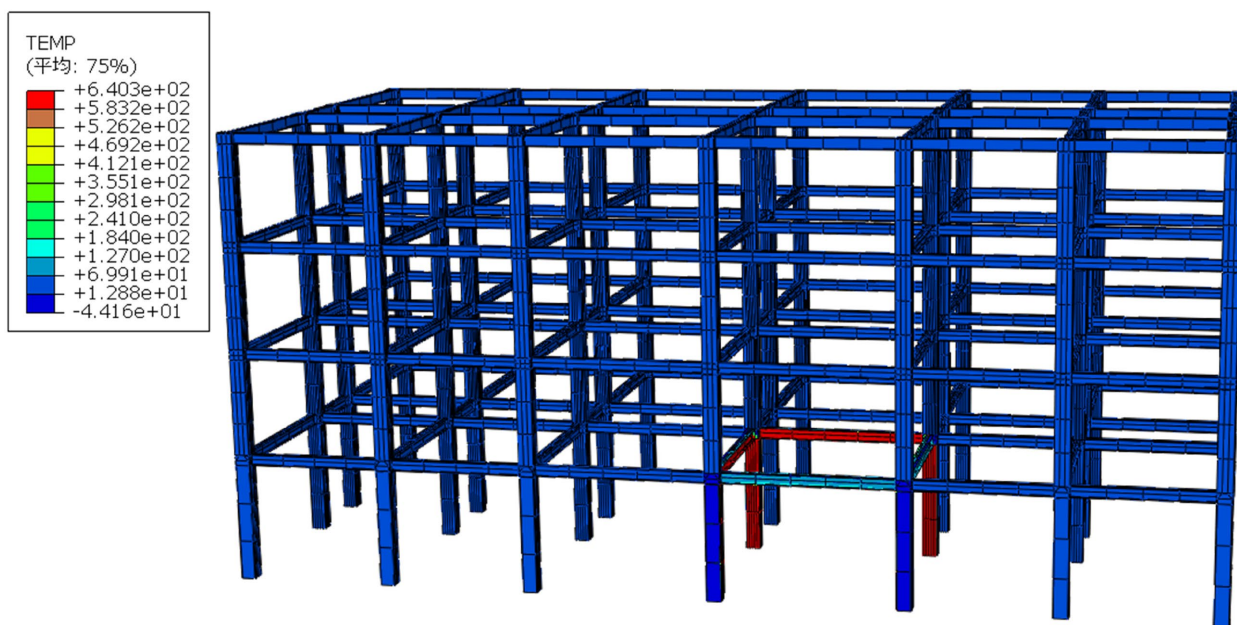


Figure 6. Temperature map under working condition 5

图 6. 工况 5 温度图

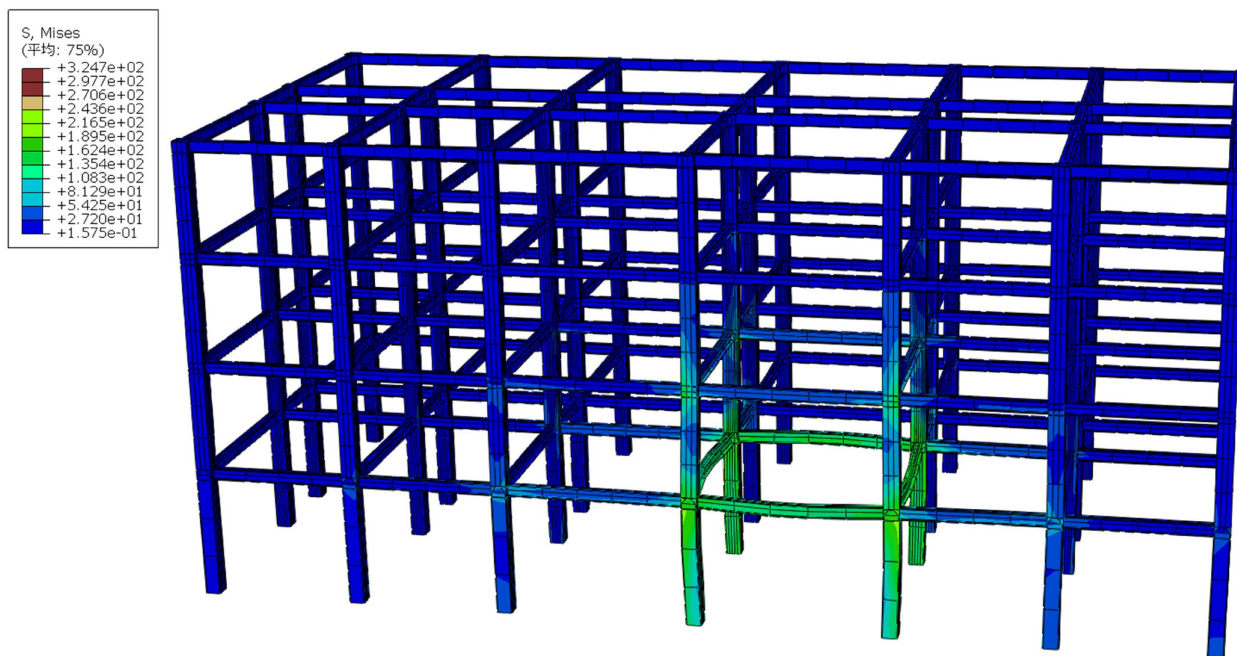


Figure 7. Deformation and stress diagram under working condition 2

图 7. 工况 2 变形及应力图

温度场分布：图 6 所示为工况 5 (无损伤基准组)中钢柱核心区域达到 600℃的时间为 40 分钟，温度

分布均匀, 最大温差不超过 50℃; 图 7 所示为工况 2 (中度损伤 + 火灾) 中钢柱核心区域达到 600℃ 的时间为 46 分钟, 比基准组延迟 6 分钟, 构件边缘裂缝处局部高温达 670℃, 温差扩大至 80℃; 图 8 所示为工况 4 (重度损伤 + 火灾) 中钢柱核心区域达到 600℃ 的时间为 53 分钟, 比基准组延迟 13 分钟, 但焊缝裂缝密集区域出现显著高温集中(最高温度 750℃), 温差达 120℃, 而高温集中现象则因重度损伤导致构件表面完整性破坏, 局部热辐射与对流换热增强, 验证了“损伤越严重, 温度场分布越不均匀”的规律。

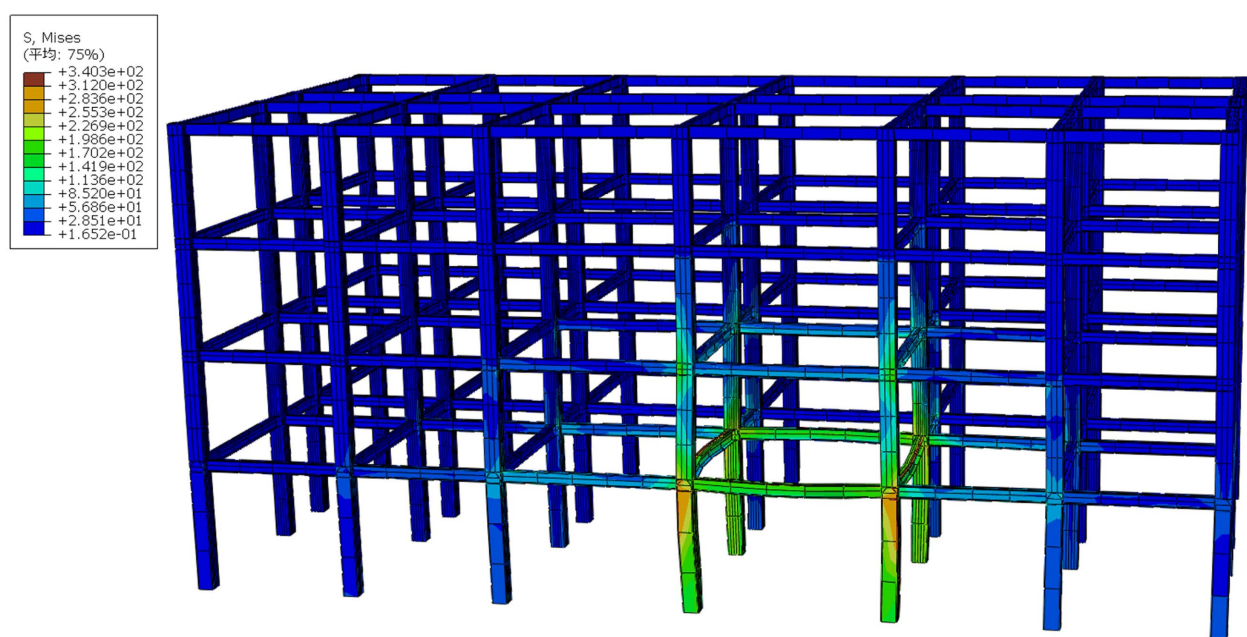


Figure 8. Deformation and stress diagram under working condition 4
图 8. 工况 4 变形及应力图

应力演化规律: 火灾初期(0 到 30 分钟), 工况 5 的构件最大应力为 180 MPa(温度应力主导); 工况 2 的构件最大应力为 245 MPa, 比基准组高 36.1%, 源于地震残余应力(195 MPa)与温度应力的叠加; 图 8 所示为工况 4 的构件最大应力为 310 MPa, 比基准组高 72.2%, 因重度损伤的残余应力(330 MPa)与温度应力叠加后接近屈服强度, 应力增长速率达 7.8 MPa/分钟, 显著高于工况 2 (5.2 MPa/分钟)和基准组(4.1 MPa/分钟)。火灾中期(30~60 分钟), 工况 4 的应力率先超过屈服强度(355 MPa), 在 48 分钟时进入塑性屈服阶段, 比工况 2 (56 分钟)提前 8 分钟, 比基准组(65 分钟)提前 17 分钟, 表明地震损伤显著降低了结构的高温承载阈值。

3. 地震损伤对钢结构抗火性能的影响分析

3.1. 材料层面：受损钢材的高温力学性能

地震塑性变形会显著改变钢材的高温力学性能。试验研究表明, 经历 2%塑性变形的 Q355 钢, 在 600℃ 时屈服强度降至常温的 32%, 而未受损钢材同期屈服强度为常温的 38%; 弹性模量随温度升高呈线性下降趋势, 受损钢材的弹性模量衰减速率比未受损钢材快 15%到 25%。此外, 地震损伤导致钢材内部晶格畸变, 高温下断裂韧性降低, 当损伤程度达到中度, 钢材高温断裂韧性下降 40%以上, 易发生突发性断裂。

3.2. 构件层面：受损钢构件的抗火承载力

弯曲变形构件的抗火承载力随损伤程度增加显著下降。对于 H 型钢梁(H300 × 200 × 15 × 20)，当弯曲变形率为 L/400 时，其在标准火灾下的抗火极限时间为 45 分钟，比未受损构件缩短 25%；当变形率达到 L/300 时，抗火极限时间仅为 30 分钟。节点损伤对构件抗火稳定性的影响更为突出，螺栓松动率超过 20%时，钢柱的抗火稳定性系数下降 30%，易发生整体失稳。

3.3. 结构层面：受损钢结构的整体抗火安全性

地震损伤分布直接影响钢结构高温下的内力重分布规律。框架结构中，边柱损伤会导致梁端弯矩增大，使梁的抗火失效风险提升；而节点损伤集中区域易形成塑性铰，加速结构整体失稳。耦合作用下钢结构倒塌风险可通过“损伤程度 - 温度 - 承载力”三维评估指标表征，当损伤构件比例超过 30%且核心区域温度达到 500℃时，结构倒塌风险等级升至极高。对门式刚架钢结构的研究表明，地震造成的柱间支撑损伤会使结构抗火极限时间缩短 35%，且倒塌模式从“整体渐进式”转变为“局部突发性”。

Abaqus 模拟的结构整体响应分析显示：工况 5 (无损伤)的倒塌始于底层中柱屈服，随后梁端形成塑性铰，整体失稳过程持续 12 分钟；工况 2 (中度损伤 + 火灾)的倒塌始于受损边柱，失稳过程持续 8 分钟；工况 4 (重度损伤 + 火灾)的倒塌始于节点损伤集中区域，因焊缝裂缝扩展导致荷载传递路径瞬间中断，局部构件突发性失效并引发连锁反应，整体失稳过程仅持续 3 分钟，倒塌模式的突发性随损伤程度增加而显著增强，与 1995 年阪神地震中钢结构厂房快速坍塌的灾害现象高度吻合。

4. 结论

本文通过使用 Abaqus 顺序热力耦合的方式，建立了钢结构三维模型，对钢结构地震后发生火灾的耦合灾害进行了模拟研究，结论如下：

- 1) 耦合灾害的基本流程为“地震损伤触发 - 高温加速劣化 - 协同导致坍塌”的演化路径，节点损伤与构件变形是影响结构安全的关键因素，有限元模拟揭示了地震残留应力与温度应力的叠加效应是性能劣化的核心机制，且损伤程度越高，叠加效应越显著。
- 2) 地震损伤从材料、构件、结构三个层面削弱钢结构抗火性能，重度损伤抗火极限时间比中度损伤缩短 30.9%，比未受损构件缩短 44.1%。
- 3) Abaqus 软件通过 DC3D8 与 C3D8R 单元的组合应用，有效模拟了地震 - 火灾耦合作用的全流程演化，5 组对比工况的设计精准区分了损伤程度与火灾荷载的独立作用及协同效应，为耦合效应量化分析提供了可靠工况。
- 4) 该研究采用顺序热力耦合，未考虑地震损伤与火灾高温间的实时交互作用，对实际耦合灾害的极端非线性协同效应存在一定简化。

参考文献

- [1] 董龙威. 火灾后高层钢结构住宅力学性能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2023.
- [2] 陈雪. 地震火灾作用下钢框架全过程抗火性能研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2017.
- [3] 李伟松. 钢结构连接体火灾后地震易损性分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [4] 杨龙龙. 震后火灾作用下导管钢框架反应过程[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [5] 苏万崇. 火灾后钢框架地震易损性评估及支撑加固效应研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2025.
- [6] 金靖, 张志谦, 陈适才. 某常规岛厂房在地震火灾作用下的反应分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(10): 90-93+89.

- [7] Niu, Y., Emberley, R., Hutchinson, T., Schafer, B., Meacham, B. and Gernay, T. (2026) Thermal Modeling of Post-Earthquake Fire Tests on a 10-Story Cold-Formed Steel Building. *Fire Safety Journal*, **162**, Article ID: 104773. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104773>
- [8] Risco, G.V., Zania, V. and Giuliani, L. (2023) Numerical Assessment of Post-Earthquake Fire Response of Steel Buildings. *Safety Science*, **157**, Article ID: 105921. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105921>