

双跨门式刚架钢结构火灾下倒塌模式

李国强^{1,2}, 吉 蔚², 楼国彪^{1,2}, 蒋首超^{1,2}, 朱邵骏^{1,2}

(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 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 采用有限元模型对双跨门式刚架钢结构的火灾试验进行了模拟, 表明有限元模型可以准确预测火灾下双跨门式刚架钢结构的倒塌行为与倒塌模式。采用经试验验证的有限元模型, 对火灾下双跨门式刚架钢结构的倒塌过程进行了数值模拟, 归纳出双跨门式刚架钢结构的 6 种典型倒塌模式, 并与单跨门式刚架钢结构的倒塌模式进行了对比, 说明了中柱的存在对双跨门式刚架钢结构倒塌机制的重要影响。最后, 通过大量的参数分析, 研究了升温工况、柱脚刚性、中柱柱顶连接形式、荷载比、防火保护、温度梯度、跨高比和柱距等因素对火灾下双跨门式刚架钢结构倒塌模式的影响。参数分析结果表明, 升温工况对双跨门式刚架钢结构的倒塌模式有显著影响, 柱脚刚性、中柱柱顶连接形式、荷载比、跨高比和柱距对边柱倒塌模式和整体倒塌模式有一定影响, 防火保护对中柱倒塌模式有一定影响, 截面温度梯度对倒塌模式影响较小。结果可为双跨门式刚架钢结构在火灾下的倒塌预警提供参考。

关键词: 结构工程; 双跨门式刚架钢结构; 火灾; 倒塌模式; 数值模拟

中图分类号: TU352.5; TU392.5

文献标志码: A

Collapse Modes of Double Span Steel portal frames under fire

LI Guoqiang^{1,2}, JI Wei², LOU Guobiao^{1,2},
JIANG Shouchao^{1,2}, ZHU Shaojun^{1,2}

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

Abstract: This paper adopts a finite element model to simulate a fire test of a double span steel portal frame and the result proves its accuracy in simulating the collapse behavior and collapse mode of double span steel portal frames. Then the finite element model verified by the fire test is used in the numerical simulation of the collapse

process of double span steel portal frames. Six typical collapse modes are summarized and compared with the collapse modes of single span steel portal frames. The influence of the mid-column on the collapse mechanism of double span steel portal frames under fire is analyzed. The effects of heating conditions, stiffness of column base, connection form of mid column, load ratio, fire protection, cross-sectional temperature gradient, span-height ratio, and column spacing on the collapse mode of the frame are investigated. The results prove the accuracy of the finite element program in predicting the collapse process and collapse mode of double span steel portal frames. The parametric analysis indicates that heating conditions have a great impact on the collapse mode. Stiffness of column base, connection form of mid column, load ratio, span-height ratio, and column spacing only affect the side column collapse modes and overall collapse modes while fire protection only affects the mid-column collapse mode. The existence of cross-sectional temperature gradient rarely affects the collapse mode. This paper can provide an important basis for the early-warning of the fire-induced collapse of double span steel portal frames.

Key words: structural engineering; double span steel portal frame; fire; collapse mode; numerical simulation

门式刚架钢结构^[1]制作成本低廉、体系布置灵活、工业化程度高, 在工业建筑与商业建筑中应用十分广泛。但另一方面, 由于火灾荷载密度大、高温下钢材力学性能退化严重且结构冗余度低, 火灾下门式刚架钢结构建筑的安全性问题尤为突出。

当建筑物发生火灾时, 消防官兵需要入内灭火并抢救被困人员与重要物资, 然而在消防救援过程中有不少建筑物突然倒塌, 严重威胁到消防官兵的

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0703808); 国家自然科学基金面上项目(51578420)

第一作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗火抗震。

E-mail: gqli@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

人身安全^[2-3],也对现场消防战士的救援行动造成心理压力,从而影响救援效率。根据现有的事故统计数据^[4],门式刚架钢结构建筑是火灾倒塌中占比最大的一类建筑,如果能对火灾下门式刚架钢结构的倒塌进行预警,则对保障门式刚架钢结构建筑的火灾救援安全、提高救援效率有重要意义。

为实现火灾下门式刚架钢结构的倒塌预警,首先需要对结构的倒塌模式有清晰的认识。倒塌模式是对结构倒塌行为的规律性总结,反映了结构的倒塌机制,是倒塌预警理论的基础。目前对火灾下门式刚架钢结构倒塌模式的研究主要采用试验与数值模拟方法。Lou等^[5-7]分别设计了足尺单跨门式刚架钢结构与足尺双跨门式刚架钢结构的火灾试验,得到了试验刚架在局部火灾下的倒塌规律。Pyl等^[8]完成了一个足尺冷弯薄壁型门式刚架钢结构的火灾试验,试验刚架表现出整体向内倒塌的破坏模式。Wong^[9]对一个缩尺比为1:5的门式刚架钢结构进行了一系列火灾试验研究,试验刚架在第3次火灾中表现出“跳跃型”的破坏模式。

由于试验成本较高,且通过试验无法系统地总结结构倒塌的一般规律,数值模拟已成为火灾下门式刚架钢结构倒塌研究的重要手段。Souza等^[10]通过对比分析,指出三维有限元模型由于考虑了平面外的约束作用,因此模拟结果比二维模型更加精确。Ali等^[11]通过数值模拟得到了火灾下单跨门式刚架钢结构的2种倒塌模式,并分析了屋面荷载、柱脚刚性、钢材材性对结构抗倒塌性能的影响。Lausova等^[12]研究了火灾下钢梁横截面温度的不均匀分布对门式刚架钢结构倒塌行为的影响。

虽然研究人员已经取得了一系列成果,但关于火灾下门式刚架钢结构的倒塌模式研究仍然不足。上述研究更多地关注典型结构构件在火灾下的倒塌行为或结构在火灾下的抗倒塌性能,并未系统性地归纳门式刚架钢结构在各种可能火灾场景和不同几何与物理参数组合下的倒塌机制,包括火灾中门式刚架钢结构究竟有多少种倒塌模式尚不清晰。

李国强等^[13]通过大量参数分析总结了火灾下单跨门式刚架钢结构可能发生的4种倒塌模式,并在此基础上提出了单跨门式刚架钢结构的火灾倒塌预警方法^[14],为门式刚架钢结构的倒塌预警理论研究提供了重要方向。但上述成果主要针对单跨门式刚架钢结构,对于在实际应用中占有较大比例的多跨门式刚架钢结构,其倒塌模式更加复杂,火灾下单跨门式刚架钢结构的倒塌机制是否适用于多跨门式刚

架钢结构还有待探索。

本文在单跨门式刚架钢结构倒塌模式研究的基础上,研究火灾下双跨门式刚架钢结构的倒塌模式,分析其倒塌机制,并探索火灾下各种参数对倒塌模式的影响。

1 有限元模型

1.1 有限元模型的建立

在大型商业有限元软件ABAQUS的显式动力分析模块中进行火灾下门式刚架钢结构倒塌的数值模拟,分析中综合考虑了刚架倒塌过程中的非线性效应、动力效应、阻尼和刚度退化的影响。

采用考虑弯曲、剪切和轴向变形的B31单元模拟结构构件。模型共设置2个荷载步,第一荷载步对模型施加力学荷载,第二荷载步在恒荷载不变的情况下对刚架的受火区域进行升温,直至结构倒塌破坏。根据钢结构设计标准^[15]的规定,考虑刚架整体缺陷的影响,在柱顶施加假想水平力。

显式动力分析计算结果的准确性与网格划分的大小有关,网格越密,稳定增量步长也就相对越小,计算结果越精确,但计算时间显著增加。通过对网格尺寸敏感性分析,决定根据构件的重要程度采取不同的网格尺寸,设置梁、柱的网格尺寸为0.15m,檩条等次要构件的网格尺寸为0.30m。由于实际火灾的升温时间较长,为节约有限元的分析时间,需要将升温时间进行缩尺处理^[16]。通过对升温时间的敏感性分析,确定时间缩尺比(有限元升温时间与实际升温时间之比)为1:60。

1.2 钢材高温材性模型

钢材高温下的应力-应变模型按EC3^[17]确定,如图1所示,热膨胀系数按建筑钢结构防火技术规范^[18]中的规定取值,密度取 $7\ 850\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,泊松比为0.3。采用Rayleigh阻尼模型考虑动力失效过程中阻尼的影响,采用应变率效应增大系数考虑倒塌时应变率对钢材强度的影响^[16]。

1.3 有限元模型的试验验证

文献[6-7]进行了一个火灾下足尺双跨门式刚架钢结构的倒塌试验,获得了局部火灾下刚架内部的温度场分布规律和关键位置处的位移曲线。本节基于试验数据验证火灾下双跨门式刚架钢结构倒塌有限元数值模拟的准确性。

试验刚架平面尺寸为 $36\text{m}\times 12\text{m}$,边柱柱距6.0m,檐口高度5.4m,屋面坡度1:15,屋面围护为

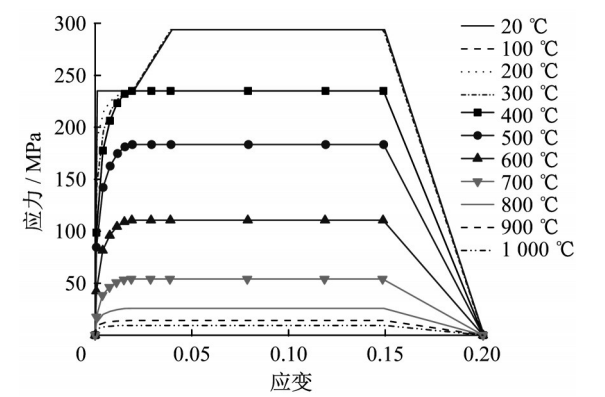


图1 EC3 钢材高温应力-应变模型(Q235)

Fig.1 EC3 high-temperature constitutive model (Q235)

单层彩钢板,在跨中位置设置平面尺寸为4m×6m的受火隔间,隔墙为双层彩钢岩棉夹芯隔墙,隔间内堆放8m³的木垛作为燃料。在右侧柱距离柱底0.8m、2.5m、3.5m和4.2m处通过定滑轮悬挂沙袋的方式模拟0.5 kN·m⁻²的设计风荷载,在两侧18m跨度的梁上等距、对称布置30个沙袋,模拟0.6 kN·m⁻²的竖向均布荷载。

在试验中,刚架边柱与横梁为变截面构件,中柱为等截面构件^[7]。为简化计算,在有限元模型中构件截面一律采用等截面,截面尺寸为实际变截面的平均值。有限元模型中构件截面与材料信息如表1所示。

表1 构件材料与截面信息^[7]

Tab.1 Material and section information of steel member^[7]

构件类型	截面信息/mm	屈服强度/MPa
边柱	H500×200×6×10	345
中柱	H400×200×6×10	
梁	H580×200×6×8	
柱间支撑	2L90×6	
连系梁	Φ121×3	235
檩条	C160×60×20×2.5	
屋面支撑	Φ25×5	

热电偶测量结果显示,火场内部温度沿高度方向可以分成上下2个区域,因此在数值模拟中可以将受火柱上下区域的平均温度作为热边界输入,由于热烟气与热辐射的影响,在受火隔间附近4m范围内的非受火梁也具有较高的温度。将刚架划分为不同的受火区域,如图2所示。各区域的温度时程数据^[7]如表2所示。

有限元结果显示试验刚架发生了明显的向内倒塌模式,与试验现象一致(图3)。试验刚架测点位移

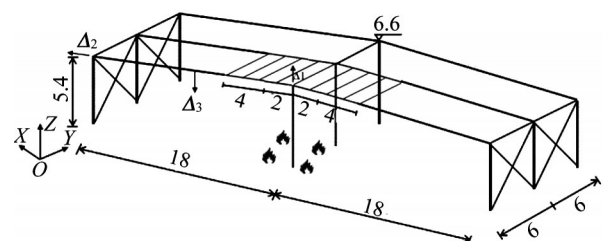


图2 有限元模型中的温度分区^[7]

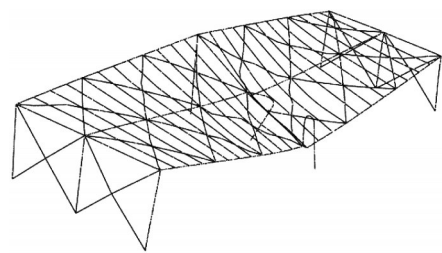
Fig.2 Temperature distribution in finite element model^[7]

表2 实测温度时程曲线^[7]

Tab.2 Measured temperature distribution of the frame^[7]

时间/min	温度/℃			
	受火柱		受火梁	非受火梁
	上半区	下半区		
0	20	20	20	20
3	64	48	191	67
6	440	280	620	433
9	765	532	932	515
12	980	673	950	530
15	990	770	973	545
18	998	780	991	558

模拟结果与试验结果的对比^[6]如图4所示。可见,有限元模型可以较准确地模拟试验刚架的倒塌行为。更多关于该有限元模型模拟火灾下门式刚架倒塌行为的验证可参见文献[13]、文献[19]。



a 有限元模拟的试验刚架倒塌变形

b 试验刚架倒塌实际变形图^[6]

图3 试验刚架倒塌模式对比

Fig.3 Comparison of collapse mode of the test frame

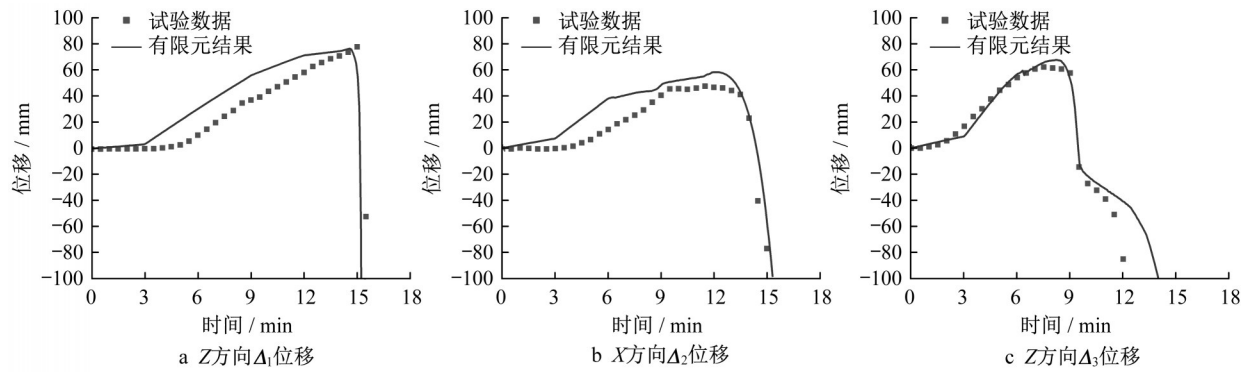


图 4 试验刚架位移曲线对比^[6]

Fig. 4 Comparison of measured and simulated displacements of the test frame^[6]

2 结构模型及影响因素

2.1 结构模型

采用三维门式刚架钢结构进行参数分析,结构模型如图 5 所示。刚架跨度 24.0m,檐口高度 6.9m,屋面坡度 1:15,柱距 6.0m,檩条与墙梁间距均为 1.5m,并在跨中设置一道拉条。边柱与中柱柱脚刚接,中柱柱顶与横梁铰接,模型考虑竖向均布荷载。构件截面尺寸见表 3,钢材屈服强度为 235MPa。实际结构中门式刚架钢结构沿纵向的榀数较多,受力特点接近平面结构,因此在有限元模型中,约束了两侧边刚架平面外的转动,以使结构的倒塌变形更接近真实情况。

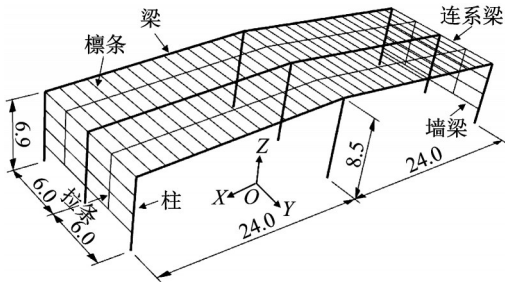


图 5 双跨门式刚架钢结构模型(单位:m)

Fig. 5 Structural models of double span steel portal frame(unit:m)

表 3 构件截面信息

Tab. 3 Section information of steel member

构件类型	截面信息/mm
边柱	H550×200×6×10
中柱	Ø273×8
梁	H600×200×6×8
檩条、墙梁	C200×70×20×3
连系梁	Ø140×4.5
拉条	Ø12

2.2 参数分析的影响因素

2.2.1 构件升温工况

采用参数化升温曲线^[20]近似模拟火灾下无防火保护钢构件的升温,曲线表达如式(1)所示:

$$T(t)=T_0+(T_{\max}-T_0)(1-e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

式中: T_0 为室温,取 20℃; T_{\max} 为构件达到的最高温度,与升温工况有关; α 为升温速率有关的参数,取 0.001。该升温曲线与热平衡理论计算出的无防火保护钢构件在 ISO834 标准火灾升温下的温度曲线基本一致^[13]。

门式刚架钢结构体系多用于大空间、大跨度建筑,由于设置了必要的防火隔墙,结构在火灾中往往是局部受火。为了研究火源位置、火源功率对门式刚架钢结构倒塌模式的影响,采用分区段升温的方式^[13,21],沿跨度方向将梁柱划分为 14 个升温区段(图 6),一共设置了 23 种升温工况,如表 4 所示。其中高温段的钢构件在火灾中能达到的最高温度 $T_{\max}=1\,000^{\circ}\text{C}$,次高温段的钢构件在火灾中能达到的最高温度为 $T_{\max}=667^{\circ}\text{C}$ 。其他钢构件保持常温。考虑到火势的蔓延快慢,沿柱距方向设置了 2 种火势蔓延速率,对应不同的受火榀数。当蔓延速率较小时,仅三维模型的中间一榀刚架及与之连接的檩条、墙梁和拉条受火,拉条以外区域保持常温,当蔓延速率较大时,三榀刚架和所有次要构件同时升温。以 F 表示升温工况,S 表示火势蔓延慢、结构单榀受火,D 表示火势蔓延快、结构多榀受火。

2.2.2 柱脚刚性与中柱连接形式

文献^[13]表明柱脚刚性对单跨门式刚架钢结构的倒塌性能有显著影响,本文采用刚接与铰接 2 种极限情况来研究柱脚刚性对火灾下双跨门式刚架钢结构倒塌模式的影响。此外,双跨门式刚架钢结构中柱柱顶与横梁存在刚接与铰接 2 种连接形式^[22],

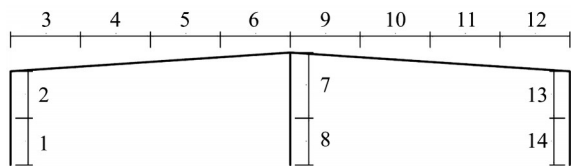


图6 跨度方向的温度分区

Fig. 6 Temperature partition of the frame along the span

本文研究这2种连接形式对倒塌模式的影响。

2.2.3 荷载比

为了研究荷载对门式刚架钢结构倒塌模式的影响,将竖向均布荷载按不同的荷载比0.3、0.4、0.5、0.6施加,荷载比定义为结构施加荷载与结构承载力之比。

2.2.4 防火保护

由于钢材在高温下材性退化严重,门式刚架钢结构一般设置必要的防火保护,以保证火灾下结构在规定时间内承载能力。为了研究不同防火保护条件对倒塌模式的影响,按照建筑设计防火规范^[23]的要求,采用5种不同的防火保护等级。对于檩条等次要构件的防火保护,考虑2种极限情况:第1种情况下,次要构件的防火等级较高,防火保护时间与梁相同,确保结构不会因檩条的失效而提前破坏。第2种情况下,次要构件的防火等级较低,火灾下提前破坏,对整体结构的倒塌可能有较大影响。防火保护的设置如表5所示。当构件存在防火保护时,构件温度在耐火极限时间内从常温20℃至临界温度(柱550℃,梁600℃)线性增加,次要构件的临界温度假定与梁相同。当构件无防火保护时,升温曲线按式(1)确定。

2.2.5 截面温度梯度

实际火灾发生时,由于通风等因素的影响,构件沿横截面存在温度梯度,为研究截面温度梯度对倒塌模式的影响,建设截面温度梯度为线性分布,研究

不同的温度梯度对倒塌模式的影响。选取3种不同的温度梯度,分别为200、400、600℃·m⁻¹。

2.2.6 刚架几何尺寸

实际使用中存在不同跨度与不同高度的门式刚架钢结构体系,为了研究跨高比对倒塌预警的影响,选择檐口高度6.9m、跨度18、21、24、27、30m的5种刚架,采用统一荷载比0.4进行模拟,以消除截面尺寸的影响。考虑到实际使用中存在多种柱距的门式刚架钢结构体系,为了研究柱距对倒塌模式的影响,选择3种不同的柱距,即6.0m、7.5m、9.0m。其中6.0m柱距的门式刚架在檩条跨中设置一道拉条,7.5m和9.0m柱距的门式刚架在檩条1/3和2/3跨度处各设置一道拉条。不同跨度与柱距下的钢构件截面尺寸参考门式刚架图集07SG518^[24]。

3 倒塌模式与机理

3.1 双跨门式刚架钢结构的倒塌模式

采用经试验验证的有限元模型,对上述各种参数条件的双跨门式刚架钢结构在火灾下的倒塌模式进行分析,基于参数分析结果归纳出了火灾下双跨门式刚架钢结构的6种典型倒塌模式,即:边柱侧倾倒塌模式(A类)、边柱屈曲倒塌模式(B类)、整体向内倒塌模式(C类)、整体向外倒塌模式(D类)、边跨局部倒塌模式(E类)和中柱倒塌模式(F类),如图7-12所示。

柱侧倾倒塌模式(A类)和柱屈曲倒塌模式(B类)属于边柱倒塌模式,主要发生在仅边柱小范围受火的火灾场景,破坏形态如图7、图8所示,倒塌机理与单跨门式刚架钢结构类似。当荷载比较大或未受火区域与柱脚无法对受火边柱提供足够的侧向约束时,边柱受火后的向外侧移会不断增大,受火柱将在弯矩与轴力作用下发生破坏,刚架将会向柱侧倾的方向发生整体倒塌。当荷载比较小或未受火区域与

表4 刚架升温工况

Tab. 4 Heating condition of the frame

边柱受火			边跨受火						中柱受火		
升温 工况	高温段	次高温段	升温 工况	高温段	次高温段	升温 工况	高温段	次高温段	升温 工况	高温段	次高温段
F1	1-2		F7	4-5	2-3,6-7,9	F12	4-6	2-3,7-10	F18	7-8	6,9
F2	1-2	3	F8	3-6	1-2,7-10	F13	5-8	3-4,9-10	F19	6-9	5,10
F3	1-3	4	F9	2-7,9	1,8,10-11	F14	4-9	2-3,10-11	F20	5-10	3-4,11-12
F4	1-4	5	F10	1-7,9	8,10-11	F15	3-10	1-2,11-12	F21	4-11	2-3,12-13
F5	1-5	6-7,9	F11	1-10	11-12	F16	2-11	1,12-13	F22	3-12	1-2,13-14
F6	1-6	7-10				F17	1-12	13-14	F23	1-14	

注:表中数字与图6中的编号对应,表示结构中受火的区域。

表5 结构防火保护
Tab. 5 Fire protection settings

防火保护等级		耐火极限/h		
		柱	梁	次要构件
一级	1—高	3.0	2.0	2.0
	1—低	3.0	2.0	1.5
二级	2—高	2.5	1.5	1.5
	2—低	2.5	1.5	1.0
三级	3—高	2.0	1.0	1.0
	3—低	2.0	1.0	0.5
四级	4—高	0.5	0.5	0.5
	4—低	0.5	0.5	

柱脚对受火边柱的侧向约束较强时,边柱的水平侧移受到抑制,弯矩几乎可以忽略,受火柱在轴力作用下屈曲破坏,非受火跨未发生倒塌。

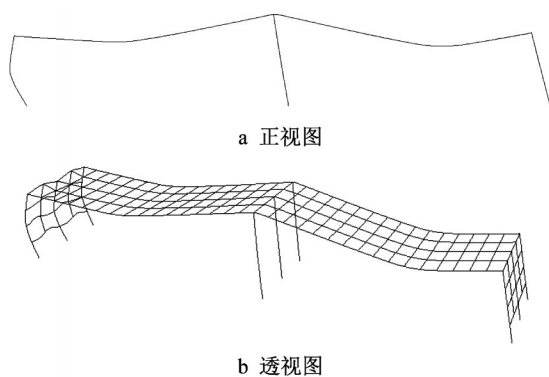


图7 边柱侧倾倒塌模式(A类)

Fig. 7 Side column lateral collapse mode (A)

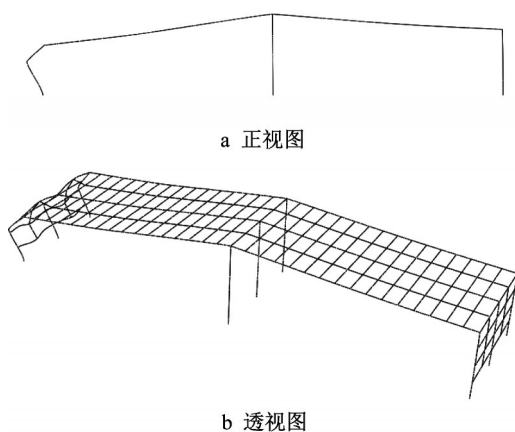


图8 边柱屈曲倒塌模式(B类)

Fig. 8 Side column buckling collapse mode (B)

整体倒塌模式包括整体向内倒塌模式(C类)和整体向外倒塌模式(D类),主要发生在梁柱大面积受火的火灾场景,破坏形态如图9、图10所示,倒塌机理与单跨门式刚架钢结构类似。在刚架受火初期,由于钢材的热膨胀效应,檐口向外膨胀而屋脊向上位移。随着温度增加,钢材的材性退化使得钢梁

开始向下挠曲。若檐口的向外膨胀受到约束,边柱将在梁的悬链线效应下拉向内侧,中柱也随之屈曲,结构整体向内倒塌;若檐口持续向外膨胀,则结构整体向外倒塌。

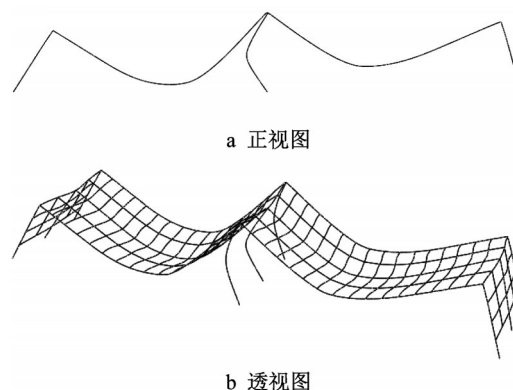


图9 整体向内倒塌模式(C类)

Fig. 9 Overall inward collapse mode (C)

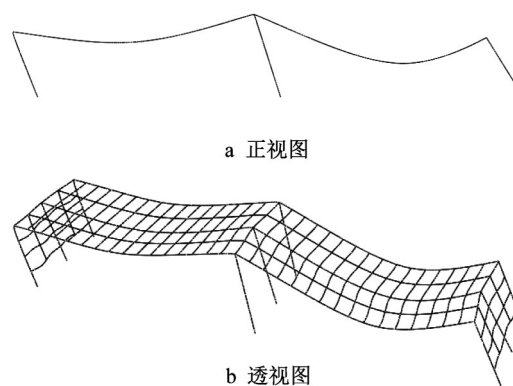


图10 整体向外倒塌模式(D类)

Fig. 10 Overall outward collapse mode (D)

边跨倒塌模式(E类)发生在边柱大范围受火和边跨小范围受火的火灾场景,破坏形态如图11所示。在该倒塌模式下边跨梁受火产生大变形,边跨柱在梁的悬链线效应下向内倾斜甚至倾倒,受火跨整体向内倒塌而非受火跨未发生倒塌。当仅有中间一榀刚架受火时,非受火榀刚架通过檩条承担受火梁的大部分悬链线力,受火边柱虽有一定倾斜,但基本保持直立。当多榀刚架同时受火时,梁挠曲的悬链线力主要沿跨度方向传递,受火柱在梁的悬链线效应下向内侧倒塌。

中柱倒塌模式(F类)主要发生在中柱小范围受火的火灾场景,破坏形态如图12所示。随着温度的升高,受火中柱材性退化严重,同时梁的挠曲变形恶化了中柱的受力情况,中柱受压破坏。由于受火范围较小,非受火的边柱仍然可以保持直立,结构在受火中柱附近发生局部坍塌。

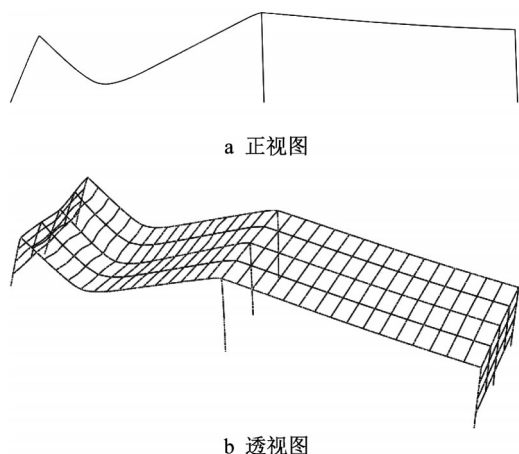


图11 边跨倒塌模式(E类)

Fig. 11 Side span collapse mode (E)

3.2 单跨与双跨门式刚架钢结构倒塌模式的对比

文献[13]表明火灾下单跨门式刚架钢结构存在4种倒塌模式,如图13所示。由于单跨门式刚架钢结构的冗余度很低,部分梁柱构件的破坏会导致整体结构的倒塌。当单柱受火破坏时,结构发生A、B类倒塌,当梁破坏或梁柱同时破坏时,结构发生C、D类倒塌。

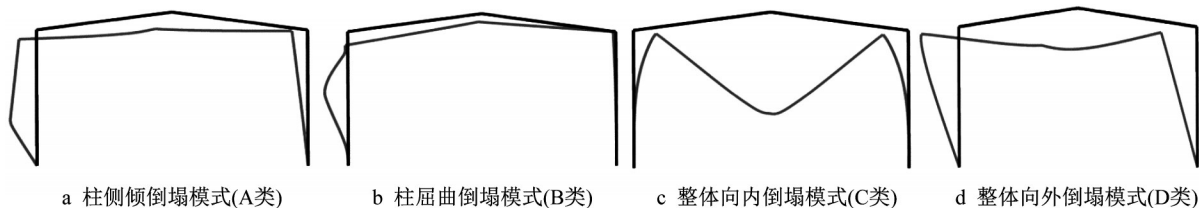
图13 单跨门式刚架钢结构的倒塌模式^[13]Fig. 13 Collapse modes of single span steel portal frames^[13]

表6 双跨与单跨门式刚架钢结构倒塌模式的关系

Tab. 6 Relationship between collapse modes of double span and single span steel portal frames

倒塌机制	门式刚架钢结构的倒塌模式	
	双跨	单跨
边柱倒塌	A、B	A、B
梁大挠曲变形	边柱向内倾斜	C、E
	边柱向外倾斜	C
中柱倒塌	D	D
	F	

4 倒塌模式影响因素分析

4.1 构件升温工况的影响

由表7可知,构件升温工况显著影响双跨门式刚架钢结构的倒塌模式。从火灾场景来看,对于边柱受火的火灾场景,当火势较小时,结构发生B类倒

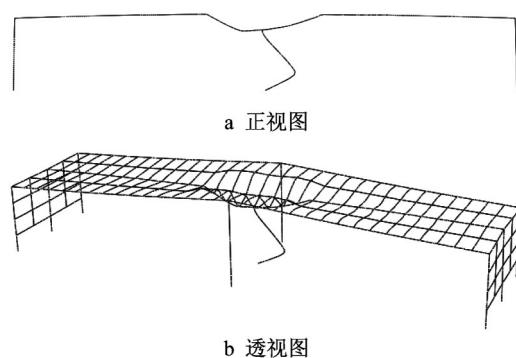


图12 中柱倒塌模式(F类)

Fig. 12 Mid column collapse mode (F)

双跨门式刚架由于中柱的存在,结构的冗余度增加,倒塌机理更加复杂。首先,中柱的存在增加了结构的传力路径,使得刚架允许出现某个柱子受火破坏而其余两柱保持直立的情况,表现为当边柱倒塌时,另一跨仍然保持直立(B倒塌模式),或当中柱倒塌时,边柱保持直立(F类倒塌模式)。其次,中柱的存在增加了刚架的抗侧刚度,当单跨受火破坏时,另一跨有足够的抗侧刚度抵抗受火梁的悬链线效应而不致倒塌(E类倒塌模式)。表6列出了双跨与单跨门式刚架钢结构倒塌模式的关系。

塌;当火势较大时,结构发生E类倒塌。对于边跨受火的火灾场景,当火势较小时,结构发生E类倒塌;当火势较大时,结构发生C、F类倒塌。对于中柱受火的火灾场景,结构发生C、F类倒塌。从火势沿纵向蔓延速率来看,蔓延较快时多榀受火,次要构件由于材性退化严重,在倒塌过程中对主体结构的约束较弱,因此蔓延较慢时结构发生E、F类倒塌,蔓延较快时结构发生B、C、E类倒塌。

4.2 柱脚刚性与中柱连接形式的影响

柱脚刚性与中柱连接形式主要影响边柱倒塌模式(A、B)与整体倒塌模式(C、D),如表8所示。当边柱铰接且中柱柱顶与横梁铰接时,结构的抗侧力刚度不足,结构更容易发生A类倒塌与D类倒塌。

表 7 不同升温工况下的倒塌模式

Tab. 7 Collapse modes under different heating conditions

边柱受火		边跨受火				中柱受火	
工况	倒塌模式	工况	倒塌模式	工况	倒塌模式	工况	倒塌模式
F1—S	直立	F7—S	E	F12—S	E	F18—S	直立
F2—S	直立	F8—S	E	F13—S	E	F19—S	F
F3—S	直立	F9—S	E	F14—S	F	F20—S	F
F4—S	E	F10—S	E	F15—S	F	F21—S	F
F5—S	E	F11—S	C	F16—S	C	F22—S	C
F6—S	E			F17—S	C	F23—S	C
F1—D	B	F7—D	E	F12—D	E	F18—D	C
F2—D	E	F8—D	E	F13—D	E	F19—D	C
F3—D	E	F9—D	E	F14—D	C	F20—D	C
F4—D	E	F10—D	C	F15—D	C	F21—D	C
F5—D	E	F11—D	C	F16—D	C	F22—D	C
F6—D	E			F17—D	C	F23—D	C

表 8 考虑柱边界条件影响的倒塌模式

Tab. 8 Collapse modes considering the effects of boundary conditions of columns

边柱铰接—中柱柱顶刚接		边柱刚接—中柱柱顶刚接		边柱铰接—中柱柱顶铰接	
工况	倒塌模式	工况	倒塌模式	工况	倒塌模式
F4—S	E	F4—S	E	F4—S	E
F8—S	E	F8—S	E	F8—S	E
F11—S	C	F11—S	C	F11—S	C
F15—S	F	F15—S	F	F15—S	F
F17—S	C	F17—S	C	F17—S	C
F20—S	F	F20—S	F	F20—S	F
F23—S	C	F23—S	C	F23—S	C
F1—D	B	F1—D	B	F1—D	A
F4—D	E	F4—D	E	F4—D	E
F8—D	E	F8—D	E	F8—D	E
F11—D	C	F11—D	C	F11—D	C
F15—D	C	F15—D	C	F15—D	C
F17—D	C	F17—D	C	F17—D	D
F20—D	C	F20—D	C	F20—D	D
F23—D	C	F23—D	C	F23—D	D

4.3 荷载比的影响

表 9 给出了荷载比为 0.3、0.4、0.5、0.6 时结构的倒塌模式。荷载比主要影响边柱倒塌模式(A、B),随着荷载比的增大,边柱侧倾后的二阶效应增大,结构侧倾趋势加剧,结构更容易发生 A 类倒塌。

4.4 防火保护的影响

防火保护对单榀受火门式刚架钢结构的倒塌模式有一定影响,如表 10 所示。由于防火保护的存在,柱、梁和次要构件的耐火极限时间有显著区别。由于柱的耐火时间较长,火灾下柱更不容易破坏,F 类倒塌模式有转变为 E 类倒塌模式的倾向。

表 9 考虑荷载比影响的倒塌模式

Tab. 9 Collapse modes considering the effects of load ratios

工况	荷载比				工况	荷载比			
	0.3	0.4	0.5	0.6		0.3	0.4	0.5	0.6
F4—S	E	E	E	E	F4—D	E	E	E	E
F8—S	E	E	E	E	F8—D	E	E	E	E
F11—S	C	C	C	C	F11—D	C	C	C	C
F15—S	F	F	F	F	F15—D	C	C	C	C
F17—S	C	C	C	C	F17—D	C	C	C	D
F20—S	F	F	F	F	F20—D	C	C	C	C
F23—S	C	C	C	C	F23—D	C	C	C	C
F1—D	B	B	B	A					

表 10 考虑防火保护影响的倒塌模式

Tab. 10 Collapse modes considering the effects of fire protection

工况	防火保护等级								无防火保护
	1—高	1—低	2—高	2—低	3—高	3—低	4—高	4—低	
F4—S	E	E	E	E	E	E	E	E	E
F8—S	E	E	E	E	E	E	E	E	E
F11—S	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F15—S	E	E	E	E	E	E	F	F	F
F17—S	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F20—S	E	E	E	E	E	F	F	F	F
F23—S	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F1—D	B	B	B	B	B	B	B	B	B
F4—D	E	E	E	E	E	E	E	E	E
F8—D	E	E	E	E	E	E	E	E	E
F11—D	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F15—D	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F17—D	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F20—D	C	C	C	C	C	C	C	C	C
F23—D	C	C	C	C	C	C	C	C	C

4.5 截面温度梯度的影响

由表 11 可知,截面温度梯度对结构的倒塌模式影响不大。

表 11 考虑截面温度梯度影响的倒塌模式

Tab. 11 Collapse modes considering the effects of cross-sectional temperature gradient

工况	温度梯度/(°C·m ⁻¹)				工况	温度梯度/(°C·m ⁻¹)			
	0	200	400	600		0	200	400	600
F4—S	E	E	E	E	F4—D	E	E	E	E
F8—S	E	E	E	E	F8—D	E	E	E	E
F11—S	C	C	C	C	F11—D	C	C	C	C
F15—S	F	F	F	F	F15—D	C	C	C	C
F17—S	C	C	C	C	F17—D	C	C	C	C
F20—S	F	F	F	F	F20—D	C	C	C	C
F23—S	C	C	C	C	F23—D	C	C	C	C
F1—D	B	B	B	B					

4.6 刚架几何尺寸的影响

表 12、表 13 分别给出了跨度和柱距对结构倒塌

模式的影响。跨度和柱距主要影响整体倒塌模式 C、D。当跨度增加时,梁挠曲后的悬链线效应增强,结构更容易发生 C 类倒塌;当柱距增加时,次要构件的侧向约束作用减弱,结构更容易发生 D 类倒塌。

表 12 考虑跨度影响的倒塌模式

Tab. 12 Collapse modes considering the effects of span

工况	跨度/m					工况	跨度/m				
	18	21	24	27	30		18	21	24	27	30
F4-S	E	E	E	E	E	F4-D	E	E	E	E	E
F8-S	E	E	E	E	E	F8-D	E	E	E	E	E
F11-S	C	C	C	C	C	F11-D	C	C	C	C	C
F15-S	F	F	F	F	F	F15-D	C	C	C	C	C
F17-S	C	C	C	C	C	F17-D	D	D	C	C	C
F20-S	F	F	F	F	F	F20-D	C	C	C	C	C
F23-S	C	C	C	C	C	F23-D	C	C	C	C	C
F1-D	B	B	B	B	B						

表 13 考虑柱距影响的倒塌模式

Tab. 13 Collapse modes considering the effects of column spacing

工况	柱距/m			工况	柱距/m		
	6.0	7.5	9.0		6.0	7.5	9.0
F4-S	E	E	E	F4-D	E	E	E
F8-S	E	E	E	F8-D	E	E	E
F11-S	C	C	C	F11-D	C	C	C
F15-S	F	F	F	F15-D	C	C	C
F17-S	C	C	C	F17-D	C	D	D
F20-S	F	F	F	F20-D	C	C	C
F23-S	C	C	C	F23-D	C	C	C
F1-D	B	B	B				

5 结语

建立了火灾下双跨门式刚架钢结构的有限元数值模型,进行了双跨门式刚架钢结构倒塌试验的数值模拟。采用经试验验证的有限元模型进行参数分析,总结了双跨门式刚架钢结构在火灾下可能发生的 6 种倒塌模式和相应的倒塌机制,得出以下结论:

(1) 双跨门式刚架钢结构在火灾下存在 6 种倒塌模式,即柱侧倾倒塌模式(A 类)、柱屈曲倒塌模式(B 类)、整体向内倒塌模式(C 类)、整体向外倒塌模式(D 类)、边跨倒塌模式(E 类)和中柱倒塌模式(F 类)。

(2) 相较于单跨门式刚架钢结构,中柱的存在显著影响了双跨门式刚架钢结构的倒塌机理,提高了结构的冗余度,增强了结构的水平抗侧刚度,使结构的倒塌模式更复杂。除了与单跨刚架相似的 A、B、C、D 类倒塌模式外,双跨门式刚架钢结构在局部火

灾下还可能出现 E、F 类倒塌模式。

(3) 升温工况显著影响双跨门式刚架钢结构的倒塌模式。A 类和 B 类倒塌模式发生在边柱小范围受火的工况,E 类倒塌模式发生在边柱大范围受火或边跨小范围受火的工况,F 类倒塌模式发生在中柱小范围受火的工况,C 类和 D 类倒塌模式发生在边跨或中柱大范围受火的工况。

(4) 防火保护显著影响双跨门式刚架钢结构的倒塌模式,当结构有防火保护时,梁和次要构件的耐火时间相对缩短,柱的耐火时间相对提高,局部倒塌模式 F 不容易发生。横截面温度梯度的存在对结构的倒塌模式没有明显影响。

(5) 柱脚刚性与中柱柱顶连接形式主要影响边柱倒塌模式(A、B)和整体倒塌模式(C、D),柱脚铰接且中柱为摇摆柱时,抗侧刚度较低,结构更容易发生 A 类和 D 类倒塌。

(6) 荷载比主要影响边柱倒塌模式(A、B),当荷载比增大时,结构侧倾产生的二阶效应增强,结构更容易发生 A 类倒塌。

(7) 刚架跨度和柱距主要影响整体倒塌模式(C、D),跨度增大时悬链线效应增强,结构更容易发生 C 类倒塌,柱距增大时侧向约束减弱,结构更容易发生 D 类倒塌。

作者贡献声明:

李国强:论文的选题、指导、修改。

吉 蔚:具体研究工作的开展和论文撰写。

楼国彪:论文的指导、修改。

蒋首超:论文的指导、修改。

朱邵骏:论文的指导、修改。

参考文献:

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J].建筑结构学报,2002,23(1):3.
WANG Yuanqing, SHI yongjiu, CHEN hong, *et al.* Contemporary lightweight steel structure and its application in China[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 3.
- [2] 新华社新媒体.泰国一楼房着火坍塌,多人遇难[EB/OL]. [2021-06-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1696026607120552569&wfr=spider&for=pc>.
Xinhua News Agency. A building in Thailand caught fire and collapsed, killing several people. [EB/OL]. [2021-06-01]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1696026607120552569&wfr=spider&for=pc>.
- [3] JIANG L R, ZHANG Q L, Li Y. Statistic study on sacrifices of firefighters in China [J]. Procedia Engineering, 2012,

- 45: 700.
- [4] 李耀庄,李昀晖. 中国建筑火灾引起坍塌事故的统计与分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 133.
- LI Yaozhuang, LI Yunhui. Survey and analysis on building collapses due to fire damage in China[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(5): 133.
- [5] LOU G B, WANG C H, JIANG J, *et al.* Experimental and numerical study on thermal-structural behavior of steel portal frames in real fires [J]. Fire Safety Journal, 2018, 98: 48.
- [6] LOU G B, WANG C H, JIANG J, *et al.* Fire tests on full scale steel portal frames against progressive collapse [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 145: 137.
- [7] JIANG J, WANG C H, LOU G Bo, *et al.* Quantitative evaluation of progressive collapse process of steel portal frames in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 120: 277.
- [8] PYL L, SCHUEREMANS L, DIERCKX W, *et al.* Fire safety analysis of a 3D frame structure based on a full-scale fire test [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61: 204.
- [9] WONG S Y. The structural response of industrial portal frame structures in fire [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2001.
- [10] de SOUZA Junior Valdenir, CREUS G J, FRANSSEN J M. Numerical modelling of a single storey industrial building at elevated temperature-comparison between 2D and 3D analysis [J]. Mecanica Computacional, 2002(21): 1986.
- [11] ALI H M, SENSENY P E, ALPERT R L. Lateral displacement and collapse of single-story steel frames in uncontrolled fires [J]. Engineering Structures, 2004, 26: 593.
- [12] LAUSOVA L, KOLOS I, Michalcova V, *et al.* Numerical analysis of steel portal frame exposed to fire [J]. Procedia Engineering, 2017, 190: 237.
- [13] 李国强,冯程远,楼国彪. 火灾下门式钢刚架倒塌模式及影响因素[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(9): 1271.
- LI Guoqiang, FENG Chengyuan, LOU Guobiao. Collapse mode and its influencing factors of steel portal frame under fire [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(9): 1271.
- [14] 李国强,冯程远,楼国彪,等. 火灾下门式钢刚架倒塌预测关键易测参量与预警方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 62.
- LI Guoqiang, FENG Chengyuan, LOU Guobiao, *et al.* Easy-measured key parameters and early-warning methods for the collapse prediction of steel portal frames under fire [J]. Journal of Civil Engineering, 2021, 54(1): 62.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [16] 冯程远,李国强,蒋彬辉. 钢材高温材性模型对火灾下钢框架结构倒塌模拟的影响研究[J]. 工程力学, 2019, 36(12): 24.
- FENG Chengyuan, LI Guoqiang, JIANG Binhui. The influence of high-temperature material model of steel on the simulation of collapse of steel frame structure under fire [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(12): 24.
- [17] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 3: design of steel structures, Part 1.2, general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.
- [19] LI G Q, JI W, FENG C Y, *et al.* Experimental and numerical study on collapse modes of single span steel portal frames under fire[J]. Engineering Structures, 2021, 245(15): 112968.
- [20] USMANI A S, CHUNG Y C, TORERO J L. How did the WTC towers collapse: A new theory [J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(6): 501.
- [21] O' MEAGHER A J, BENNETTS I D, DAYAWANSA P H, *et al.* Design of single storey industrial buildings for fire resistance [J]. Steel Construction, 1992, 26(2): 1.
- [22] 李自杰. 双跨门式刚架中柱柱顶刚接和铰接优劣比较[J]. 建筑结构, 2016, 6(46): 571.
- LI Zijie. Comparison of the top of the mid pillar in double span portal frame using rigid connection and hinged connection [J]. Building Structure, 2016, 6(46): 571.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB 50016—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [24] 中国建筑标准设计研究院. 多跨门式刚架轻型房屋钢结构设计: 07SG518-4 [S]. 北京: 中国建筑标准设计研究院, 2007.
- China Institute of Building Standard Design & Research. Design of Multi Span Light Steel Portal Frames: 07SG518-4 [S]. Beijing: China Building Standard Design and Research Institute, 2007.