

大跨度空间结构抗火研究进展与趋势分析

康玉婷^{1,2}, 吕辉^{1,2,3*}, 董石麟^{3,4}, 朱忠义^{1,5}

(1. 南昌航空大学 土木与交通学院, 南昌 330063; 2. 南昌航空大学 江西省装配式建筑与智能建造重点实验室, 南昌 330063; 3. 浙江大学 空间结构研究中心, 杭州 310058; 4. 浙江大学 浙江省空间结构重点实验室, 杭州 310058; 5. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

摘要: 火灾作用下大跨度空间结构可能会发生局部破坏和整体倒塌。随着城市化进程加快, 大跨度空间结构在大型建筑中的应用日益广泛, 其火灾安全问题备受关注。近年来, 国内外学者围绕大跨度空间结构抗火开展大量研究, 在不同结构的火灾响应规律、设计方法等方面取得了诸多代表性成果。本文首先详细阐述了国内外大跨度空间结构抗火研究在试验研究、数值分析、理论分析和性能化设计等方面取得的主要进展; 随后指出在复杂构型设计、新型材料属性、简要分析方法和精细化试验方案等方面尚存在不足之处, 并对精细化结构仿真模型、改进设计方法和智能化监测与预警系统等进行了展望, 最后提出了亟待突破的关键科学问题, 为我国大跨度空间结构抗火设计提供参考。

关键词: 大跨度空间结构; 抗火; 试验研究; 数值分析; 理论研究; 发展趋势

中图分类号: TU352.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)08-0001-16

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20250104001

Research Progress and Trends in Fire Resistance of Large-Span Spatial Structures

KANG Yuting^{1,2}, LYU Hui^{1,2,3*}, DONG Shilin^{3,4}, ZHU Zhongyi^{1,5}

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Prefabricated Building and Intelligent Construction, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 3. Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Space Structures, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 5. Beijing Institute of Architectural Design Co., Ltd., Beijing 100045, China)

*Corresponding author: lvhui@nchu.edu.cn

Abstract: Under fire, large-span spatial structures may experience local damage and overall collapse. With the acceleration of urbanization, large-span spatial structures are increasingly used in various large-scale buildings, fire safety issues have attracted much attention. In recent years, scholars worldwide have focused on fire resistance of large-span spatial structures and conducted in-depth research on the fire response and design methods for different structures, achieving many representative results. In this paper, the main progress in fire resistance research on large-span spatial structures in terms of experimental research, numerical analysis, theoretical analysis and performance-based design is elaborated. Then, existing deficiencies in complex configuration designs, new material properties, simplified analysis

收稿日期: 2025-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(52278224)

作者简介:

康玉婷(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事空间结构方面的研究。E-mail: 2769454211@qq.com。

通信作者:

吕辉(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间结构理论与应用方面的研究。E-mail: lvhui@nchu.edu.cn。

methods and refined experimental plans are pointed out. Prospects are discussed for refined structural simulation models, improved design methods, intelligent monitoring and early-warning systems. Finally, key scientific and academic problems requiring further study are proposed, providing a reference for fire resistance design of large-span spatial structures in China.

Keywords: large-span spatial structure; fire resistance; experimental research; numerical analysis; theoretical research; development trend

近年来,随着材料科学、计算机技术的发展以及施工技术的日渐成熟,大跨度空间结构技术发展迅猛,结构跨度与规模持续扩大,新体系、新材料不断涌现^[1-2],应用领域不断扩大,许多宏伟而富有特色的大跨度空间结构已成为地域标志和著名的人文景观^[3-5]。然而,这类建筑功能复杂、人员密集,一旦发生火灾,高温与结构损伤耦合作用风险极高。

与普通建筑结构相比,大跨度空间结构火灾下力学响应差异显著^[6]:(1)大跨度空间结构建筑内部空间较大,几何形状复杂多样,火灾下的空气温度场呈时变非均匀分布,无法沿用常规室内火灾的均匀温度假设;(2)从受力来看,空间结构是三维受力体系,传力路径复杂,火灾下局部构件受损会导致内力在复杂的三维体系中重新分布,对周边构件产生多方面的影响,而普通建筑以二维受力为主,内力重分布仅局限于相邻的梁、柱之间;(3)空间结构的稳定性依赖于整体的几何形状和构件的协同工作,整体关联性强,在火灾下关键构件或节点力学性能下降会迅速导致整体垮塌,与普通建筑结构局部构件出现屈服、变形,逐渐影响到整体结构的渐进性破坏过程不同。因此,传统抗火设计理念难以适用于大跨空间结构,促使学术界、工程界人士开展结构抗火性能方面的研究。

本文基于国内外学者对大跨空间结构火灾响应、设计方法、试验与模拟等相关问题进行的大量研究,从试验研究、数值模拟、理论分析和设计方法等四个方面总结了近年来空间结构抗火的研究进展,并分析了其未来发展趋势和亟待解决的关键问题。

1 大跨度空间结构抗火性能研究的主要进展

1.1 概述

火灾下城市建筑的损坏是早期国外建筑抗火研究发展的主要驱动力,如1835年纽约市大火、1871年芝加哥大火、1872年波士顿大火和1904年巴尔的摩大火等^[7],这些火灾的发生让相关学者开始研究如何测试建筑和构件的耐火性能。20世纪初,美国旧金山地震火灾和日本关东地区地震火灾中一些大跨度建筑结构受到严重破坏,导致了极其严重的人员伤亡和财产损失,大跨度空间结构抗火研究逐渐受到关注,同时也推动了大跨度空间结构在地震工况下的防火设计理念发展。在二战后,随

着建筑技术的快速发展,大跨度空间结构在工业建筑、体育场馆、展览馆等公共建筑中的应用日益广泛,对其抗火性能的研究越发受到重视,不同学者开展了不同材料、不同结构形式、不同火灾场景下的大跨度空间结构抗火性能研究。1973年日本熊本市大洋百货店火灾、1974年巴西圣保罗焦马大楼火灾等一系列大跨度空间结构火灾事件的发生,促使各国进一步加强了对大跨度空间结构抗火性能的研究。进入21世纪,国外学者对于大跨度空间结构抗火研究的深度明显提高,通过开展足尺或缩尺模型火灾试验以实现针对不同火灾场景的高精度模拟。随着大型商业有限元软件和开源软件的开发和应用,数值研究重点为精细化模拟和非线性动力分析。而理论研究也更系统、更全面,完善了材料本构关系、构件升温实用计算理论和火灾温度场理论,提高了设计方法的可靠性。

我国对大跨度空间结构的研究起步较晚,20世纪50年代至60年代,国内部分高校和科研机构开始对预应力钢结构等大跨度空间结构开展理论与试验研究,并将成果应用于预应力拱形屋盖梁、预应力输煤钢栈桥等结构中,但后来该项研究与应用因多种原因基本处于停滞状态^[8]。20世纪80年代,随着国家经济建设的恢复和发展,建筑行业对大跨度空间结构的需求逐渐增加,相关结构设计和施工技术得到了一定发展,但关于抗火性能方面的研究仍相对较少,已有研究主要集中在对普通钢结构抗火性能的初步探索以及借鉴国外相关研究成果上^[9]。20世纪90年代,随着我国经济的快速发展和城市化进程的加速,大量的大跨度空间结构建筑如体育馆、展览馆、机场航站楼等不断涌现,其抗火问题日益受到关注,国内学者开始对大跨度空间结构的火灾特点、结构在火灾中的力学性能变化等进行较为系统的研究,通过试验和理论分析相结合的方法,初步掌握了一些大跨度空间结构在火灾下的响应规律^[10]。进入21世纪,大跨度空间结构抗火研究进入快速发展阶段,国内学者在试验研究、数值分析和理论研究等方面对结构抗火性能进行了深入研究,取得了较大的进步。研究方向主要涉及火灾下结构的整体性能分析^[11]、抗连续倒塌分析^[12]、抗火设计方法^[13]及材料、节点和构件的抗火性能研究^[14-15]等,研究对象涉及大跨度网架结构^[16]、网壳结构^[17-18]、索穹顶结构^[19]和膜结构^[20]等。近年来,铝合金^[21]、重组竹^[22]和木材^[23]等高温敏感材料在大跨度空间结构领域得到

了广泛应用,相应的抗火研究也随之展开。

以下分别从试验研究、数值分析和理论研究等三个方面介绍近20年大跨度空间结构抗火研究的主要进展。

1.2 试验研究

1.2.1 节点试验研究

大跨度空间结构中常用的节点形式有焊接空心球节点、铸钢节点、板式节点和相贯节点等。其中,对节点高温下力学性能的试验研究对象主要集中于焊接空心球节点和铝合金板式节点。对于焊接空心球节点,薛素铎和邱林波等^[24-26]对不同空心球外径和壁厚、钢管外径和壁厚、钢材屈服强度和荷载比的6种受压焊接空心球节点试件进行了高温作用下的试验研究,结果表明:增大焊接钢管壁厚和降低焊接空心球节点实际承受的荷载可以有效地延长受压焊接空心球节点的极限耐火时间;对焊接空心球节点的极限承载力进行了高温加载试验,得到了在恒定温度下节点的温度场分布和荷载-位移曲线,并确定了高温下节点的破坏模式为失稳破坏。QIU等^[27]对暴露在高温下的非加劲焊接空心球节点进行了拉伸试验,获得了高温下节点的破坏模式、轴向荷载-位移曲线和力学行为。LIU等^[28-29]开展了300℃、500℃、700℃三种温度下的轴向压缩试验,分析了H型钢焊接空心球节点在高温轴向压缩下的失效模式,并得到了试件的荷载-位移曲线、屈服和极限承载力、延性和初始轴向刚度。此外,为了建立系统的火灾后大跨度空间结构节点损伤评估方法和指标体系,相关学者^[30-34]对火灾后焊接空心球节点的力学性能进行了试验研究,综合考虑焊接空心球节点的残余变形、残余承载力、延性和刚度等因素,准确评估了焊接空心球节点的损伤程度和剩余使用寿命,为结构火灾后修复加固提供科学依据。

铝合金板式节点在铝合金单层网壳中的应用较为成熟,郭小农等^[35-36]通过试验和数值分析发现铝合金板式节点在300℃以下的破坏模式与常温下的破坏模式相同,且当节点板足够厚时,接合区在300℃以下不会坍塌,并基于铝合金板式节点常温承载力公式提出了节点高温承载力公式。随后又完成了12个6061-T6铝合金板式节点受火后的承载性能试验,试验结果表明铝合金板式节点力学性能随受火温度的变化呈现三折线变化趋势。铝合金板式节点在常温下的试验涉及多种荷载下的滞回性能、稳定性能及抗剪性能等多方面研究,高温下的研究却仅仅关注了节点在平面外弯矩作用下的力学性能^[37]。由此可见,铝合金板式节点的高温性能研究还不全面,无法为防火设计提供全面、可靠的理论指导。图1为焊接空心球节点和铝合金板式节点试验图。

值得注意的是,南京工业大学正在开展火灾后胶合木网壳节点剩余承载特性研究,旨在为木网壳建筑的推



a) 焊接空心球节点^[33]

b) 铝合金板式节点^[35]

图1 节点模型试验

Fig 1 Joint model tests

广应用以及相关抗火设计规范的完善提供依据和参考。

1.2.2 结构足尺试验研究

对真实建筑结构进行火灾试验研究是获得火灾下结构响应规律最直观有效的方法。中国科技大学和香港理工大学于1997年合作建造了一座大空间火灾实验厅,开展了一系列全尺度的大空间火灾试验^[38-39]。张国维等^[40]在一座60 m×30 m×9.2 m的钢厂房里开展高大空间640 kW及1 080 kW的小功率油池火灾试验,测量火源上方4.0~7.5 m处羽流中心线的轴向温度。LOU等^[41]对暴露在自然火灾中的全尺寸36 m×12 m门式刚架的倒塌行为进行了试验研究,发现框架结构构件内的温度分布非常不均匀,结构发生不对称倒塌。陈杲杲^[42]以山东钢铁集团日照钢铁厂的实际工程为研究对象进行实体火灾试验,获得了一定强度下钢桁架的温度随时间的变化规律。NI等^[43]在一座大空间建筑中设计并进行了三次不同火源功率的全尺寸大空间火灾试验,对提出的大空间球面网壳结构不同火灾区域稳态和瞬态温度场的预测模型进行了验证。LI等^[44-45]开发了一种以“实时测量、在线数据分析和实时预警”为核心的火灾下建筑倒塌实时预警系统,通过开展实际桁架结构建筑屋顶火灾倒塌试验验证了在实际火灾场景中部署该预警系统的可行性,并将该试验的数据集进行了共享。图2为大跨度空间结构足尺试验图。

针对索穹顶、弦支穹顶以及网壳结构等复杂大跨度结构开展的足尺试验则寥寥无几。现有的研究中,尹亮等^[46]建立了一足尺铝合金柱面网壳结构,并进行了以木垛为火源的局部火灾试验,结果表明:结构在受火倒塌时,铝合金构件附近的最高温度达到了333℃,远高于基于性能化防火设计中的临界温度150℃。此外,天津消防所正在编制《建筑空间结构火灾模拟试验方法》,有望为建筑空间结构足尺火灾模拟试验提供统一、科学、规范的方法与标准。

1.2.3 结构缩尺试验研究

诸多学者通过缩尺模型试验来对大跨度空间结构进

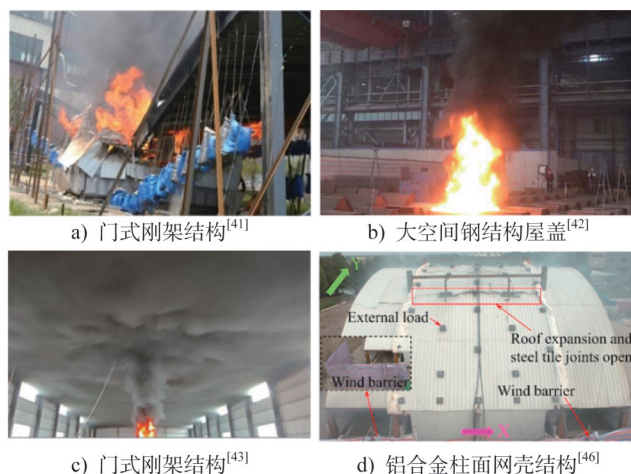


图2 大跨度空间结构足尺试验

Fig. 2 Full-scale tests of large-span spatial structures

行火灾下的力学性能研究、结构耐火性能评估、温度场分布研究以及防火设计方法验证,为结构防火的设计理论和相关规范的制定与完善提供了重要依据。王新堂等^[47-49]对四榀空间预应力钢桁架结构模型进行火灾下的结构响应及火灾后力学性能试验研究,试验结果表明:结构在受火过程中,虽然张拉钢索会出现一定的松弛,但不会发生整体坍塌;结构的抗火能力与自身刚度和预应力的施加次数有很大关系;受火后的结构模型仍具有较高的承载能力,在较大的受力范围内表现为线弹性。PYL等^[50]对门式刚架缩尺模型进行了火灾试验,结果表明其耐火极限为62 min。WONG^[51]对一个1:5缩尺门式刚架厂房进行了三次抗火试验,发现局部火灾下檩条等次要构件对结构的抗火性能有较大影响,在结构抗火设计时应予以考虑。李国强等^[52]通过试验揭示了单跨门式刚架的四种倒塌模式,即柱侧向倒塌、柱屈曲倒塌、整体向内倒塌和整体向外倒塌。楼国彪等^[53-55]针对火灾作用下门式刚架的热力耦合力学行为展开研究,揭示了结构由常温受力状态逐步发展至整体坍塌全过程中轴力、弯矩与变形的演化规律;试验中还发现室内烟气上部温度高,下部温度低,呈现典型的双区域模型特征,升温曲线与ISO标准升温曲线有较大差别,顶部热烟气的聚集会导致构件升温加快而提前失效。杜二峰等^[56]通过门式刚架火灾缩尺试验得到了相似的结果。李国强等^[57]和张浩等^[58]还对倒塌机制和倒塌预测预警技术进行了研究,结果表明:雷达具有不受高温和热烟气影响的优点,可用于真实火灾下结构的位移和变形测量。JI等^[59]开展了双跨门式刚架火灾坍塌试验与数值分析,研究表明刚架柱的温度、位移演化规律可反映受火框架坍塌进程,能够为火灾救援现场实时监测提供重要参考依据。QI等^[60]通过试验研究建议将基于转角的预警方法和基于位移的预警方法相结合用于门式刚架火灾倒塌的现场预警,可有

效提高精度和可靠性。

郭小农等^[61-63]针对铝合金网壳缩尺模型进行了结构受火试验,试验结果表明:空间温度场在大空间火灾下分布不均匀,且考虑温度水平梯度分布对结构的承载能力是有利的;火源位置、火源功率和通风条件对结构温度场分布具有较大影响;在所有结构模型受火试验过程中均发现网壳出现起拱变形。朱劭骏等^[64]通过试验研究了铝合金网壳的火灾倒塌行为,发现现场模拟可以准确地评估不均匀的空气温度分布,不均匀的结构温度分布将显著影响网壳的内力。图3为大跨度空间结构缩尺试验图。

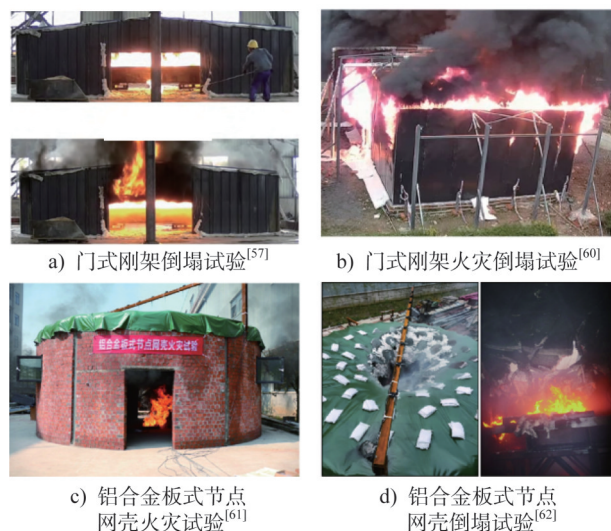


图3 大跨度空间结构缩尺试验

Fig. 3 Scale-down tests of large-span spatial structure

综上所述,大量试验结果表明:火灾下节点等关键构件的失效足以引起大跨度空间结构的整体坍塌,应引起重视;大跨度空间结构空气温度场分布不均匀,会对整体结构的力学响应和失效模式产生影响;结构的耐火极限和倒塌机制受结构参数和火源参数的共同影响。此外,现有大跨度空间结构火灾足尺和缩尺试验对象75%左右为门式刚架结构,对其他众多大跨度空间结构体系和结构材料研究不足,尤其是木竹结构,其独特的材料属性和结构形式使其在火灾中的行为特性亟待深入挖掘。

1.3 数值分析

大跨度空间结构火灾过程的数值模拟是利用数学模型和计算机技术对火灾场景下大跨度空间结构的热响应、力学响应以及火灾发展过程进行定量描述和分析。其难点是火灾过程涉及到多种物化现象的耦合,结构在火灾高温作用下的力学性能变化复杂,包括材料的热膨胀、强度退化、结构的变形、失稳等。要准确模拟结构的响应,还需要考虑结构的几何非线性、材料非线性以及

热-结构耦合效应等因素。当前,大跨度空间结构的抗火数值分析工作,主要依靠计算流体力学方法与有限元法来完成。

1.3.1 计算流体力学方法

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法是利用数值方法和计算机技术来求解流体流动问题的科学方法,可用于模拟火灾中的流体(空气、烟气等)流动和燃烧过程,通过与结构力学模型耦合,研究火焰和高温烟气对结构的热作用以及结构变形对流体流动的反作用。常用软件工具有 ANSYS Fluent、FDS 和 CFX 等,其中,美国国家标准与技术研究院(NIST)开发的 FDS 软件基于计算流体力学原理,采用有限体积法、有限差分法等数值方法,能够对火灾中的诸多关键要素进行模拟,其模拟结果得到了火灾试验的验证^[43,46],是目前专家学者进行大跨度空间结构温度场模拟的重要工具。李国强等^[65]和薛素铎等^[66]通过 FDS 程序模拟火灾场景,对大空间建筑火灾空气升温过程进行了研究,并提出了大空间建筑火灾的空气升温数学模型。更有许多专家学者基于 FDS 建立了不同的大跨度空间结构模型,探究火源功率大小、燃烧材料性质、建筑尺寸、建筑结构形式和通风排烟口设施等条件对结构内部温度分布的影响规律^[67-70],并根据温度分布情况对结构性能进行分析,为结构抗火研究提供了建议。

1.3.2 有限元法

有限元法的原理是利用有限元软件(如 ANSYS、ABAQUS 等)建立结构模型,再将结构离散为有限个单元,通过对每个单元进行力学和热学分析,建立结构的刚度矩阵、质量矩阵和热传导矩阵等,组合求解整体结构在火灾下的响应。按单元种类不同,有限元模型可分为微观模型(实体单元)、宏观模型(梁单元、壳单元、基于组件的节点模型)、多尺度及混合模型等^[71]。其中,微观模型和宏观模型广泛用于模拟预应力桁架结构^[72-73]、网壳结构^[74-76]、网架结构^[16,77]、索穹顶结构^[19,78]等大跨度空间结构火灾高温下的力学响应分析,包括分析火源面积、火源位置等火源参数和跨度、矢跨比、周边约束、杆件尺寸等参数对大跨度空间结构位移和耐火极限的影响规律。此外,李国强等^[79-80]采用经试验验证的三维有限元模型对火灾下门式刚架结构倒塌进行了仿真模拟,基于分析结果提出了适用于门式刚架多种倒塌模式的预警方法。

研究发现,随着温度的改变大跨度空间结构的节点刚度有较大的变化^[81],因此需要一种能同时计算节点局部受力和结构整体受力的有限元方法。多尺度有限元法可以综合考虑多个不同空间和时间尺度物理现象及其相互作用,根据构件和结构整体的受力情况耦合微观模型

和宏观模型来开展更全面、更准确的结构响应分析(图4)。王景玄等^[83]以局部火灾作用下三层三跨钢管混凝土平面框架为例,采用多尺度有限元计算方法进行了耐火性能数值模拟。罗尧治等^[84]采用多尺度有限元法的思想,考虑了焊接空心球节点的变形,对网壳结构进行了理论研究和实际应用分析,验证了该方法的合理性。苟宝龙^[85]使用多尺度数值模拟方法开展了冲击荷载下网壳结构的参数分析,基于模拟结果,给出了焊接球节点单层钢网壳的破坏模式及失效机理。由此可见,多尺度有限元模型在结构工程领域火灾及冲击等复杂工况下结构性能的研究中已展现出独特的价值与潜力。但是,要将多尺度有限元法应用于大跨度空间结构防火研究,在模型耦合、计算效率、参数确定等方面还需要进一步改进。

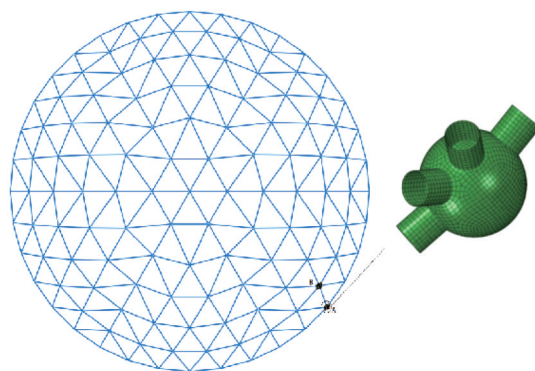


图4 单层球面网壳结构多尺度模型^[82]

Fig. 4 Multi-scale model of single-layer spherical reticulated shell structure^[82]

综上所述,计算流体力学方法主要用于模拟空气温度,而有限元法则主要用于构件温度模拟和热-力耦合分析。两种方法的相互结合初步实现了对大跨度空间结构火灾场景下温度分布、结构力学响应等的综合模拟,其难点在于如何准确定义流体-结构界面、控制数据传递方式和精度、协调时间步长和空间网格。此外,为提高大跨度空间结构火灾数值分析的准确性和可靠性,需进一步探究高效、高精度的结构火灾数值分析模型和方法。

1.4 理论研究

1.4.1 材料本构模型

大跨度空间结构中常用的材料为钢材,近年来铝合金、胶合木等材料在空间结构中的应用也逐渐增多。针对普通钢材的材料属性随温度的变化情况,国内外学者基于钢材高温材性试验和理论分析提出了相应的本构模型,如 SAAB 和 NETHERCOT 提出的 Saab 模型^[86]、英国规范 BS 5950-8 中的本构模型^[87]、欧洲规范 Eurocode 3 中的本构模型^[88]、赵金城、沈祖炎等结合欧洲钢结构协会提出的材性模型曲线而提出的一种三折线模型^[89]等。

杜咏等^[90-92]考虑钢索的热膨胀及高温蠕变效应,提出了相应的高温蠕变模型。针对不锈钢和高强钢,李国强等^[93-94]和杨成博等^[95]提出的材料高温本构模型具有较强的准确性和适用性,可为钢结构设计以及数值模拟提供参考。铝合金温度敏感性比较强,KAUFMAN^[96]、彭航等^[97]和王丽等^[98]对不同牌号的铝合金进行了高温试验,得到了高温下铝合金的弹性模量、名义屈服强度和极限强度等,并根据试验结果拟合得到高温下铝合金的材料模型。

1.4.2 构件升温的实用计算方法

构件的升温主要源于火灾环境向其传递的热量,欧洲规范 Eurocode 3^[88]考虑阴影效应首先给出了无保护层钢构件的升温计算公式。基于欧洲规范提供的计算方法,结合国内相关学者的研究成果^[99-101],《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200:2006)^[102]给出了标准火灾作用下增量形式的构件升温计算方法。但是,大跨度空间结构发生火灾时,构件一般处于火焰范围之外,其升温除了来自烟气的对流和辐射之外,还要考虑火焰辐射的影响^[103],以上升温计算方法的适用性不高。基于此,杜咏等^[104-105]研究了大空间建筑火灾中火焰辐射对钢构件升温的影响,提出了考虑火焰辐射时无保护层钢构件升温的简化计算方法,其表达式如下:

$$T_{sf} = T_m [k_1 e^{-k_2 \lg^2(t/t_m)} + k_3 e^{-k_4 \lg^2(t/t_m)}] + T_s \quad (1)$$

式中: T_{sf} 为受火焰辐射的钢构件在火灾历程 t 时刻的温度; T_m 为仅考虑火焰辐射下钢构件最高升温; t_m 为仅考虑火焰辐射下钢构件达到最高升温的时刻; k_i ($i=1\sim4$) 为待定系数; T_s 为结构初始环境温度。

张国维等^[106]改变杜咏模型中火焰辐射的计算方法,将火焰简化为点辐射源,从而向周围球面均匀释放热量,得到了新的构件升温计算方法。WICKSTRÖM等^[107]基于一系列的火灾试验,提出了采用绝热表面温度作为火场和结构之间的交互条件。焦冰等^[108]对以上三种钢构件升温计算方法进行对比研究,结果表明在大空间建筑火灾中应考虑火焰辐射的影响,且火焰辐射对钢构件升温的影响程度和构件与火源的距离有关;杜咏模型更适用于简单钢构件的计算,张国维模型更适用于大空间局部火灾,而基于绝热表面温度原理的计算方法相较于另外两种计算方法而言,具有较高的灵活性,适用范围也更广。

目前,铝合金构件在火灾下的升温可按照欧洲规范 Eurocode 9^[109]中给出的增量计算式进行计算,也可参考《大空间建筑铝合金结构防火技术标准》(DG/TJ 08-2420—2023)^[110]中的计算方法,无防火保护的铝合金构件升温表达式如下:

$$\Delta T_{al} = \Delta T (h_c + h_{fr} + h_r) / (c_{al} \rho_{al}) \quad (2)$$

式中: ΔT_{al} 为铝合金构件的升温; h_c 为烟气热对流传热系数; h_{fr} 为火焰热辐射传热系数; h_r 为烟气热辐射传热系数; c_{al} 为铝合金的比热容; ρ_{al} 为铝合金材料密度。

郭小农等^[111]通过火焰辐射试验得到了大空间火灾下火焰辐射会对构件升温产生较大影响的结论,并提出了大空间火灾下铝合金构件的升温计算方法。王卫永等^[112]通过增量法研究铝合金构件的升温曲线,得到有轻质保护层铝合金构件的升温简化计算公式,可为铝合金构件抗火设计提供参考。

1.4.3 火灾温度场经验公式

考虑大跨度空间结构实际火灾中空气温度分布的不均匀性,采用 ISO 834 等标准升温曲线进行温度场计算会存在较大误差。国外对大空间实际火灾空气升温简化计算方法的研究较少,STERN-GOTTFRIED^[113-114]考虑烟气蔓延的影响,提出了面向大空间结构设计的移动火灾温度预测模型。欧洲规范 Eurocode 1^[115]中规定,当屋顶不在火焰范围之内时,采用 Heskestad 羽流模型作为热空气温度计算公式,其表达式如下:

$$T = T_0 + kQ^{\frac{2}{3}} \left(\frac{z}{Q^{\frac{2}{3}}} \right)^{-\eta} \quad (3)$$

式中: T 为羽流区某高度处的温度; T_0 为环境温度; Q 为火源的热释放速率; z 为距离火源的高度; k 和 η 为与热释放速率 Q 有关的无量纲参数。

国内在这方面的研究中取得了一些成果,李国强等^[65]在大空间建筑火灾下的空气升温场模型分析基础上,通过 120 例数值模拟的回归分析,提出了实用大空间建筑火灾下空气升温经验公式,其表达式如下:

$$T_{(x,z,t)} - T_g(0) = T_z (1 - 0.08e^{-\beta t} - 0.2e^{-0.1\beta t}) [\eta + (1 - \eta)e^{-(x-b)/\mu}] \quad (4)$$

式中: $T_{(x,z,t)}$ 为对应 t 时刻距火源中心水平距离 x 、距地面垂直距离 z 处的空气温度; $T_g(0)$ 为火灾发生前的环境温度; T_z 为从火源中心距地面垂直距离 z 处的最高空气升温; β 为由火源功率和火源增长类型确定的升温曲线形状系数; t 为时间; η 为距火源中心水平距离 x 处的温度衰减系数; b 为火源形状中心至火源最外边缘的距离; μ 为系数; x 为距火源中心水平距离; z 为距地面的垂直距离。

薛素铎和梁劲等^[66,116]考虑烟气通风,对火灾下大空间结构空气温度的经验公式进行了修正,得出空气升温速率系数和平衡温度是描述空间温度场特性的主要参数,利用曲线拟合方法得出大空间建筑火灾空气升温经验公式,其表达式如下:

$$\theta(t) = \frac{\theta_m}{1 + \left(\frac{\theta_m}{\theta_0} - 1 \right) e^{-rt}} \quad (5)$$

式中: θ_m 为平衡温度,为常数; r 为升温速率系数; θ_0 为初始温度,取20℃。

张国维等^[117]基于不同理论和工程实况,也建立了大空间建筑实际火灾空气升温计算公式。但是,上述各文献给出的经验公式都是基于特定的建筑构形和火灾场景提出的,于志超等^[118]基于一个大空间火灾试验结果,对不同的经验公式进行了对比,发现这些公式的适用性有差别。在实际工程应用中,这些经验公式对于相似建筑抗火性能和火灾场景的初步评估和快速计算有一定的价值。然而,要想更精准地预测大空间建筑火灾温度场,需结合具体情况,利用更先进的模拟技术,对经验公式进行修正或者构建更符合实际情况的数值模型。

2 大跨度空间结构抗火设计的主要进展

结构抗火设计的核心目标是确保火灾高温下结构的抗火能力不低于抗火需求。伴随复杂多功能建筑的大量建设以及火灾科学、数值模拟技术的迭代升级,结构抗火设计已从传统试验法逐步过渡至计算分析法,并不断向性能化设计体系发展^[119]。

性能化的抗火设计突破了传统固定参数条文设计模式的束缚,以满足特定的建筑消防安全目标为核心,综合考虑火灾场景、结构响应和人员安全等多方面因素,通过计算为结构提供更科学合理的抗火设计方案,其设计思路见图5。

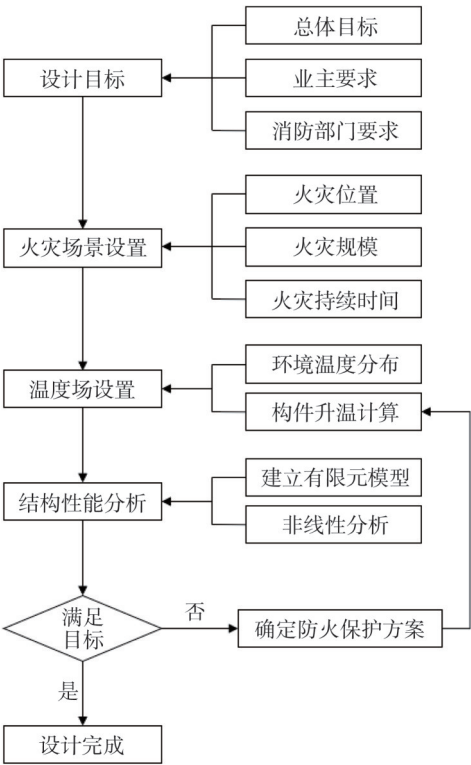


图5 性能化抗火设计思路

Fig. 5 Performance-based fire resistance design idea

就大跨度空间结构而言,往往由于其复杂的结构体系和使用功能上的需要(如机场、车站、体育馆、展览馆等),传统抗火设计难以满足需求,而性能化抗火设计能依据其结构、功能特点精准分析火灾响应,合理制定防火与疏散方案,使设计更加科学合理。我国《建筑钢结构防火技术规程》(CECS 200:2006)^[102]中首次采用计算方法进行抗火设计,且明确指出:对于多功能、大跨度、大空间的建筑可采用有科学依据的性能化设计方法模拟火灾升温,分析结构的抗火性能,并采取合理、有效的防火保护措施,保证结构的抗火设计安全。2017年,住建部发布的国家标准《建筑钢结构防火技术规范》(GB 51249—2017)^[120]也指出:(1)跨度不小于60 m的大跨度钢结构,宜采用基于整体结构耐火验算的防火设计方法;(2)预应力钢结构和跨度不小于120 m的大跨度建筑钢结构,宜采用基于整体结构耐火验算的防火设计方法。基于性能化抗火设计的大跨度空间结构研究逐渐得到重视,基于性能化的抗火设计方法在国内外的大型工程火灾安全评估中均得到了成功的应用,如2000年悉尼奥林匹克体育场馆^[121]、上海南站钢结构屋盖^[122]、杭州国际会议中心钢结构^[123]以及西安咸阳国际机场T3A航站楼^[124]等都进行了基于性能化的抗火设计。

相关学者在总结众多工程实践经验的基础上,提出了系统的大空间结构性能化抗火设计方法。史健勇等^[13]基于临界温度的设计思想,提出了面向结构整体的大空间钢结构性能化抗火设计流程,能够适配各类真实火灾场景,完成结构整体防火性能分析与抗火设计。华莹等^[125]整理了有关火灾安全性能化设计方法的规范条例及内容,提出了建筑结构性性能化抗火设计中的几个关键问题,建立了一种基于火灾随机性的性能化抗火设计方法,为这些关键问题提出解决思路。考虑火灾、传热和结构之间的相互作用,集火灾模拟、传热分析、结构抗火验算功能于一体的计算软件开发工作已取得一定进展^[119],史健勇等^[126]采用SFSAS系统对北京航空航天大学体育练习馆在火灾作用下的结构反应和力学性能进行了分析,充分表现出计算机仿真技术在建筑防火分析中的优越性。陈适才等^[127]基于性能化抗火设计的方法,结合连续性倒塌分析思路,提出了结构在火灾下基于性能的抗倒塌分析方法,并开发了结构反应分析程序FireStru。

综上所述,基于性能化的抗火设计具有较好的理论与实用价值。但当前许多工程结构的抗火设计往往是对已建成结构的抗火性能进行评估,缺乏设计的理念;同时,目前国家规范中尚未对大跨度空间结构的性能化抗火设计细节做出规定,相关规范的编制有待进一步推进。

3 大跨度空间结构抗火研究的发展趋势与关键问题

3.1 研究的不足

已有结构抗火研究主要针对单一火灾,对多灾害耦合作用下(火灾、地震、冲击荷载等)的结构响应规律研究不足。目前的研究中存在以下问题:(1)在结构类型方面,主要研究对象为门式刚架结构和网壳结构,对膜结构、索穹顶结构和混合结构的研究相对匮乏;(2)在试验研究方面,现有的试验设备和技术手段在应对火灾场景试验时存在局限性,难以获取全面准确的结构响应数据,导致火灾场景下大部分结构的性能分析缺乏足够的试验数据支撑;(3)在材料研究方面,主要针对钢材的高温本构模型,对常见建筑采用的铝合金材料高温蠕变特性的研究匮乏,对材料高温性能与结构一体化的研究相对薄弱;(4)目前的研究方法,火灾全过程数值分析仍是主流,但现有分析多基于理想化模型和假设条件,数值模拟精度与可靠性有待提高;(5)现有计算大空间火灾下空气温度分布的经验公式尚不完善。针对大跨度空间结构的性能化抗火设计,现有规范尚无法提供系统的理论支撑。

3.2 发展趋势

(1)发展多种结构体系和多荷载耦合作用的火灾试验技术是进行大跨度空间结构抗火理论验证的发展趋势。

(2)采用更精细的动态-高温材料模型和微观-细观-宏观多尺度结构模型是大跨度空间结构抗火计算的发展趋势。

(3)真实火灾现场结构倒塌的准确预警是大跨度空间结构火灾安全保障领域的重要发展趋势。

(4)建立基于性能的结构抗火设计方法是大跨度空间结构火灾安全评估和抗火设计的发展趋势。

3.3 待解决的关键问题

(1)发展结构火灾试验技术。木竹结构、膜结构、弦支穹顶结构等新型大跨度空间结构火灾全过程试验,地震-火灾、火灾-冲击荷载耦合试验,多火源火灾试验技术等。

(2)构建高效、高精度的结构火灾数值仿真模型。铝合金、胶合木、竹材等新型建筑材料的动态、高温模型,考虑节点效应的多尺度有限元模型和适用于大型结构分析的精细化高效建模技术。

(3)研发火灾下结构倒塌快速预警技术。高灵敏度、高可靠性、适用于大空间的火灾探测技术和设备,如雷达监测、气体分析等。基于人工智能方法的结构安全快速推演与研判技术以及具有预测结构是否倒塌、如何

倒塌、何时倒塌功能的结构倒塌预测预警系统^[71]。

(4)建立改进的结构抗火性能评估与设计方法。火灾场景随机性和不确定性的定量描述方法,准确的抗火性能评估方法和指标体系,基于性能化的标准化抗火设计方法以及多灾害作用下的协同设计方法。

4 结论

随着大跨度空间结构在实际工程应用中的兴起,其在火灾高温下的安全问题也受到了工程界的广泛关注。近年来,在大跨度空间结构抗火试验、数值分析、理论研究等方面均取得了诸多代表性的成果,极大地推动了该领域的技术进步和理论发展。

值得注意的是,目前的研究中依然有许多亟待解决的问题,如发展新型结构的火灾试验技术、构建高效高精度的结构火灾数值仿真模型、研发火灾下结构倒塌快速预警技术、建立改进的结构抗火性能评估与设计方法等。相信在未来的研究与实践中,国内外学者能够克服现有的困难,形成完整的大跨度空间结构抗火设计体系,进一步提升大跨度空间结构的安全性能。

参考文献:

- [1] 董石麟,王艺达,刘宏创.鼓蜂窝序列多撑杆型索穹顶结构体系创新研究及预应力态分析[J].空间结构,2022,28(3):3-15. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.03.003. DONG Shilin, WANG Yida, LIU Hongchuang. Structural form innovation and initial prestress analysis on drum-shaped honeycomb-type cable domes with multi-strut layout [J]. Spatial Structures, 2022, 28(3): 3-15. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.03.003. (in Chinese)
- [2] 邓宇晨,王星.空间结构复合材料的应用与受力分析研究进展[J].建筑技术开发,2019,46(19):15-17. DENG Yuchen, WANG Xing. Research progress of application and mechanical analysis of composite materials in spatial structure [J]. Building Technology Development, 2019, 46(19): 15-17. (in Chinese)
- [3] PULLEY J. Mercedes-Benz Stadium: creating a mechanical marvel[J]. Engineered Systems, 2019, 36(2): 24-27.
- [4] 陈宇军,刘彦生,李青翔,等.石家庄国际展览中心结构设计分析[J].建筑结构,2020,50(12):9-16,21. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.12.002. CHEN Yujun, LIU Yansheng, LI Qingxiang, et al. Structural design analysis of Shijiazhuang international exhibition center [J]. Building Structure, 2020, 50(12): 9-16, 21. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.12.002. (in Chinese)
- [5] OSAMU H. New national stadium in Japan [J]. Steel Construction Today & Tomorrow, 2019(56): 9-10.
- [6] 石永久,白音,王元清.大空间结构防火性能化设计方法研究[J].空间结构,2005,11(4):16-20. DOI:10.3969/j.issn.1006-6578.2005.04.003.

- SHI Yongjiu, BAI Yin, WANG Yuanqing. Studies on performance-based fire-resisting design method for large-space structures[J]. Spatial Structures, 2005, 11(4): 16-20. DOI:10.3969/j.issn.1006-6578.2005.04.003.(in Chinese)
- [7] LAWSON J R. A history of fire testing[M]. Washington, D. C.: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.
- [8] 陆赐麟. 预应力钢结构发展五十年[C]//第二届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京:《工业建筑》杂志社, 2002. LU Cilin. Fifty years of development of prestressed steel structure[C]//Proceedings of the 2nd National Symposium on Modern Structural Engineering. Beijing: Industrial Construction Magazine Agency, 2002. (in Chinese)
- [9] 席根喜. 钢结构暨空间结构的抗火设计综述[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(4): 40-44. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2001.04.011. XI Genxi. Review on fire-resistant design of steel and space structure[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(4): 40-44. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2001.04.011. (in Chinese)
- [10] 赵金城, 沈祖炎. 钢结构抗火设计进展与评述[J]. 建筑结构, 1995(5): 3-8. ZHAO Jincheng, SHEN Zuyan. Progress and review of fire-resistant design for steel structures[J]. Building Structure, 1995(5): 3-8. (in Chinese)
- [11] 叶建. 大空间钢结构整体抗火性能的数值研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2013. YE Jian. The numerical study about the fire-resistant of the whole steel structure in large space[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2013. (in Chinese)
- [12] 袁军平. 火灾下大跨空间结构抗连续倒塌评估方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. YUAN Junping. Research on evaluation method of the resisting progressive collapse of large-span spatial structure under fire [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [13] 史健勇, 孙旋, 刘文利, 等. 基于整体的大空间钢结构性能化防火设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 69-78. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2011.05.017. SHI Jianyong, SUN Xuan, LIU Wenli, et al. Study of performance-based fire resistance design methodology for large space structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 69-78. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.05.017. (in Chinese)
- [14] 邱林波, 薛素铎, 李雄彦, 等. 受拉焊接空心球节点火灾高温下的性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(3): 9-14. QIU Linbo, XUE Suduo, LI Xiongyan, et al. Tension performance of welded hollow spherical joints under fire[J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(3): 9-14. (in Chinese)
- [15] 刘松林. 大空间火灾下建筑构件耐火试验方法研究[C]//2022 中国消防协会科学技术年会论文集. 北京: 中国消防协会, 2022. LIU Songlin. Research on fire resistance test method of building components under large-space fire[C]//Proceedings of the 2022 Annual Scientific and Technological Conference of the China Fire Protection Association. Beijing: China Fire Protection Association, 2022. (in Chinese)
- [16] 陈程, 郭耀杰, 陈颢元, 等. 火灾下大空间铝合金网架受力性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10843-10850. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2021.25.038. CHEN Cheng, GUO Yaojie, CHEN Haoyuan, et al. The mechanical performance of large-space aluminum alloy truss under fire[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10843-10850. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.25.038.(in Chinese)
- [17] 翟彬, 于子力, 支旭东. 单层柱面网壳火灾温度场分布研究[J]. 空间结构, 2020, 26(1): 24-31. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2020.01.024. ZHAI Bin, YU Zili, ZHI Xudong. Research on fire temperature field distribution of single-layer cylindrical latticed shells[J]. Spatial Structures, 2020, 26(1): 24-31. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2020.01.024.(in Chinese)
- [18] 刘东宇, 刘红波, 廖祥伟. 在平体育馆弦支穹顶叠合拱复合结构抗火性能分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 7-12, 28. DOI:10.13204/j.gyjz201611002. LIU Dongyu, LIU Hongbo, LIAO Xiangwei. Fire resistance analysis of suspen-dome with stacked arch of Chiping gymnasium[J]. Industrial Construction, 2016, 46(11): 7-12, 28. DOI:10.13204/j.gyjz201611002.(in Chinese)
- [19] 孙国军, 陶冶, 薛素铎. 基于不同时间-温度场模型的索穹顶火灾响应分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(增刊1): 88-96. SUN Guojun, TAO Ye, XUE Suduo. Fire response analysis of cable dome based on different time-temperature field models [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(Suppl.1): 88-96. (in Chinese)
- [20] 燕飞. 气承式膜结构火灾响应及坍塌机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2022. YAN Fei. Study on fire response and collapse mechanism of air-supported structure [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [21] 谈凤婕, 崔家春. 铝合金空间网格结构在火灾下的数值模拟[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊2): 150-154. TAN Fengjie, CUI Jiachun. Numerical simulation of aluminum alloy spatial grid structure under fire[J]. Building Structure, 2020, 50(Suppl.2): 150-154. (in Chinese)
- [22] 蒲一可. 火灾作用下重组竹构件单层球形网壳结构力学行为分析方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2023. PU Yike. Analysis method of the mechanical behavior of single-layer spherical mesh-shell structure made of bamboo scrimber members under fire [D]. Chengdu: Southwest

- Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [23] 张永旺. 高大空间木结构建筑火灾动力特性及防火设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- ZHANG Yongwang. Research on fire dynamic characteristics and fire protection design method of tall-large space timber structure buildings [D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [24] 薛素铎, 邱林波. 受压焊接空心球节点高温试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 113-119. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.02.017.
- XUE Suduo, QIU Linbo. Experimental investigation on compression performance of welded hollow spherical joints in fire [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 113-119. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2011.02.017. (in Chinese)
- [25] 邱林波. 空间网格结构火灾下的力学性能研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- QIU Linbo. Mechanical behaviors study on space frame structures in fire [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [26] 薛素铎, 冯森, 邱林波. 焊接空心球节点恒温加载试验[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(9): 1222-1227.
- XUE Suduo, FENG Miao, QIU Linbo. Experimental study on welded hollow spherical joints under loading and constant temperature [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(9): 1222-1227. (in Chinese)
- [27] QIU X B, HUANG B S, ZHANG Z, et al. Research on the behavior on axial tensile welded hollow spherical joints exposed to elevated temperature [J]. Fire Technology, 2025, 61(2): 381-410. DOI: 10.1007/s10694-024-01618-5.
- [28] LIU H B, ZHAO Y, WANG L, et al. Axial compression properties of welded hollow spherical joints with H-beams under high temperature [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 169: 106051. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106051.
- [29] LIU H B, ZHANG Y J, WANG L, et al. Mechanical performance of welded hollow spherical joints with H-beams after elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111092. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111092.
- [30] 卢杰. 焊接空心球节点空间网格结构火灾后力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- LU Jie. Study on the post-fire performance of space lattice structures with welded hollow spherical joints [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [31] 周元. 负载高温后焊接空心球节点剩余力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- ZHOU Yuan. Study on behavior of welded hollow spherical joints after exposure to fire with load [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. (in Chinese)
- [32] HUANG B S, QIU X B, ZHU J R, et al. Residual performance of compression stiffened welded hollow spherical joints after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 208: 108001. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108001.
- [33] LIU H B, LU J, CHEN Z H. Residual behavior of welded hollow spherical joints after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 102-118. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.06.003.
- [34] LU J, CHEN Z H, LIU H B, et al. Behavior of eccentrically loaded welded hollow spherical joints after elevated-temperature exposure [J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(6): 1352-1367. DOI: 10.1177/1369433218815432.
- [35] GUO X N, ZHU S J, LIU X, et al. Study on out-of-plane flexural behavior of aluminum alloy gusset joints at elevated temperatures [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123: 452-466. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.045.
- [36] 郭小农, 徐泽宇, 陈晨, 等. 铝合金板节点火灾后承载性能 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1264-1275. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21352.
- GUO Xiaonong, XU Zeyu, CHEN Chen, et al. Bearing performance of aluminum alloy gusset joints after fire [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(9): 1264-1275. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.21352. (in Chinese)
- [37] 陈安阳, 何嘉年, 徐小清, 等. 空间结构节点高温性能研究现状综述 [C]// 第二十届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 石家庄: [出版者不详], 2020.
- CHEN Anyang, HE Jianian, XU Xiaoqing, et al. A brief description of the research status of high-temperature performance of spatial structure joints [C]// Proceedings of the 20th National Symposium on Modern Structural Engineering. Shijiazhuang: [s.n.], 2020. (in Chinese)
- [38] 霍然, 范维澄, 袁理明, 等. 大空间火灾实验厅的建造与初步试验 [J]. 火灾科学, 1998, 7(1): 8-13.
- HUO Ran, FAN Weicheng, YUAN Liming, et al. Construction and preliminary test of large space fire experiment hall [J]. Fire Safety Science, 1998, 7(1): 8-13. (in Chinese)
- [39] 霍然, 李元洲, 金旭辉, 等. 大空间建筑内火灾烟气充填的研究 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 88-92. DOI: 10.13577/j.jnd.2000.0115.
- HUO Ran, LI Yuanzhou, JIN Xuhui, et al. Studies of smoke filling process in large space buildings [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(1): 88-92. DOI: 10.13577/j.jnd.2000.0115. (in Chinese)
- [40] 张国维, 朱国庆, 吴维华, 等. 高大空间池火羽流中心线轴向温度试验研究 [J]. 消防科学与技术, 2012, 31(9): 907-910. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2012.09.001.
- ZHANG Guowei, ZHU Guoqing, WU Weihua, et al. Plume centerline temperature distribution of pool fire in the large space [J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(9): 907-910. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2012.09.001. (in Chinese)

- [41] 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: 137-152. DOI:10.1016/j.jcsr.2018.02.024.
- [42] 陈杲杲. 大空间钢结构屋盖火灾实测与抗火性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.
CHEN Gaogao. The fire experiment and research of fire resistance ability about the large space steel roof[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018. (in Chinese)
- [43] NI W B, FU T, JI K Q, et al. Estimation and research of the temperature field models of large space spherical mesh shell structures under localized fire [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 258: 124554. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124554.
- [44] LI G Q, LI J Y, ZHU S J, et al. An experiment on a real building with truss roof to validate real-time early-warning system for fire-induced collapse[J]. *Fire Technology*, 2025, 61(4): 2013-2046. DOI:10.1007/s10694-024-01671-0.
- [45] LI J Y, ZHU S J, LI G Q, et al. Data set for fire-induced collapse test on an existing building with a truss roof [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2024, 150 (10) : 04724003. DOI:10.1061/jsendh.steng-13689.
- [46] YIN L, NI Z P, FAN F, et al. Temperature field characteristics of cylindrical aluminum alloy reticulated roof system under localized fire [J]. *Fire Safety Journal*, 2021, 121: 103267. DOI:10.1016/j.firesaf.2020.103267.
- [47] 王新堂, 杜引刚, 孙宏亮. 不锈钢预应力钢桁架火灾响应及火灾后受力性能试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(5): 60-70. DOI:10.13577/j.jnd.2013.0509.
WANG Xintang, DU Yingang, SUN Hongliang. Experimental study on fire response and mechanical performance of stainless steel prestressed steel truss after fire [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(5): 60-70. DOI:10.13577/j.jnd.2013.0509. (in Chinese)
- [48] 王新堂, 孙宏亮, 杜引刚, 等. 空间预应力钢桁架火灾响应及火灾后受力性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(8): 28-37. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2013.08.014.
WANG Xintang, SUN Hongliang, DU Yingang, et al. Experimental study on fire response and post-fire performance of spatial prestressed steel trusses [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(8): 28-37. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2013.08.014. (in Chinese)
- [49] 王新堂, 孙宏亮, 杜引刚, 等. 预应力钢桁架火灾响应及火灾后受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(8): 46-55. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.08.007.
WANG Xintang, SUN Hongliang, DU Yingang, et al. Experimental research on fire response and post-fire performance of prestressed steel truss structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(8): 46-55. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.08.007. (in Chinese)
- [50] 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: 204-212. DOI:10.1016/j.tws.2012.03.023.
- [51] WONG S Y. The structural response of industrial portal frame structures in fire [D]. Sheffield: University of Sheffield, 2001.
- [52] 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: 112968. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112968.
- [53] 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: 48-62. DOI:10.1016/j.firesaf.2018.04.006.
- [54] LOU G B, HOU J, QI H H, et al. Experimental, numerical and analytical analysis of a single-span steel portal frame exposed to fire [J]. *Engineering Structures*, 2024, 302: 117417. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.117417.
- [55] 侯婧, 楼国彪, 蒋亚强, 等. 典型火灾场景下的门式刚架结构受火试验研究[J]. *工程力学*, 2025, 42(7): 137-149.
HOU Jing, LOU Guobiao, JIANG Yaqiang, et al. Fire test study of a portal frame structure undertypical fire scenarios [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(7): 137-149. (in Chinese)
- [56] 杜二峰, 舒赣平, 吕晓. 1:4 缩尺厂房中功率火灾试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(3): 82-88. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.03.010.
DU Erfeng, SHU Ganping, LYU Xiao. Medium power fire test study on a 1:4 scaled portal frame building [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(3): 82-88. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2020.03.010. (in Chinese)
- [57] 李国强, 吉蔚, 冯程远, 等. 火灾下门式钢刚架倒塌试验与雷达位移测试系统有效性研究[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(9): 56-65.
LI Guoqiang, JI Wei, FENG Chengyuan, et al. Collapse test of steel portal frame under fire and effective analysis of radar-based displacement measuring system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(9): 56-65. (in Chinese)
- [58] 张浩, 温经林, 杨晓琳, 等. 基于地基干涉雷达的火灾下门式钢刚架三维变形监测研究[J]. *消防科学与技术*, 2024, 43(7): 932-936, 945. DOI:10.20168/j.1009-0029.2024.07.0932.05.
ZHANG Hao, WEN Jinglin, YANG Xiaolin, et al. Research on three-dimensional deformation monitoring of steel portal frames under fire based on ground-based interferometric radar [J]. *Fire Science and Technology*, 2024, 43(7): 932-936, 945. DOI:10.20168/j.1009-0029.2024.07.0932.05. (in Chinese)
- [59] JI W, LI G Q, WANG Y, et al. Experimental and numerical study on fire-induced collapse of double-span steel portal frames [J]. *Fire Safety Journal*, 2024, 143: 104059. DOI:

- 10.1016/j.firesaf.2023.104059.
- [60] QI H H, JIANG Y Q, HOU J, et al. Experimental and numerical study on early-warning approach for fire-induced collapse of steel portal frame based on rotational angles[J]. Fire Technology, 2025, 61(2): 947-974. DOI: 10.1007/s10694-024-01645-2.
- [61] 郭小农, 陈晨, 朱劭骏, 等. 铝合金板式节点网壳非破坏性火灾响应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 72-84. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0814.
- GUO Xiaonong, CHEN Chen, ZHU Shaojun, et al. Nondestructive experimental study on fire response of aluminum alloy reticulated shells with gusset joints [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 72-84. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0814.(in Chinese)
- [62] 郭小农, 陈晨, 朱劭骏, 等. 铝合金板式节点网壳破坏性火灾试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9): 73-81. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0815.
- GUO Xiaonong, CHEN Chen, ZHU Shaojun, et al. Destructive fire tests on aluminum alloy reticulated shells with gusset joints[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9): 73-81. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0815. (in Chinese)
- [63] GUO X N, ZHU S J, JIANG S C, et al. Fire tests on single-layer aluminum alloy reticulated shells with gusset joints[J]. Structures, 2020, 28: 1137-1152. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.09.054.
- [64] ZHU S J, GUO X N, JIANG S C, et al. Experimental study on the fire-induced collapse of single-layer aluminum alloy reticulated shells with gusset joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(12): 04020268. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002819.
- [65] 李国强, 杜咏. 实用大空间建筑火灾空气升温经验公式[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(3): 283-287. DOI:10.3969/j.issn.1009-0029.2005.03.006.
- LI Guoqiang, DU Yong. Utility temperature elevation empirical formula in large space fire [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(3): 283-287. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2005.03.006. (in Chinese)
- [66] 薛素铎, 梁劲, 李雄彦. 大空间建筑火灾空气升温经验公式[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(2): 203-207.
- XUE Suduo, LIANG Jin, LI Xiongyan. Empirical formula for air temperature in large space structure under fire [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(2): 203-207. (in Chinese)
- [67] YU Z W, LU C, ZHONG Y Q. Performance-based analysis of single-layer cylindrical steel reticulated shells in fire [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3099. DOI: 10.3390/app10093099.
- [68] 柳念. 单层柱面索承网壳结构抗火性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- LIU Nian. Study on fire resistance of single-layer cylindrical reticulated shell structure with cable-supported [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [69] 焦冰. 大空间钢桁架火灾温度场与力学性能研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院有限公司, 2022.
- JIAO Bing. Study on temperature field and mechanical properties of large space steel truss under fire [D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2022. (in Chinese)
- [70] 周仲. 大空间弦支穹顶结构火灾全过程分析及力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- ZHOU Zhong. Analysis of suspended dome under fire during heating and cooling phase [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [71] 姜健, 吕大刚, 陆新征, 等. 建筑结构抗连续性倒塌研究进展与发展趋势[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 1-28. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0494.
- JIANG Jian, LYU Dagang, LU Xinzhen, et al. Research progress and development trends on progressive collapse resistance of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 1-28. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0494.(in Chinese)
- [72] 王广勇, 方淳锟, 苏恒, 等. 索桁架结构耐火性能试验研究及分析[J]. 工程力学, 2025, 42(6): 80-92.
- WANG Guangyong, FANG Chunkun, SU Heng, et al. Experimental study and theoretical analysis on the fire resistance of cable truss structures [J]. Engineering Mechanics, 2025, 42(6): 80-92. (in Chinese)
- [73] 袁国安, 邱国志. 大跨张弦桁架结构整体抗火性能分析[J]. 空间结构, 2022, 28(3): 49-55. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.03.049.
- YUAN Guoan, QIU Guozhi. Analysis on overall fire resistance of long-span truss string structure [J]. Spatial Structures, 2022, 28(3): 49-55. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.03.049.(in Chinese)
- [74] WANG X T, YIN J, ZHOU M, et al. Analysis of performance of suspended pre-stressed steel shells with large span in fire[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71/72/73/74/75/76/77/78: 3717-3720. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.71-78.3717.
- [75] 于敬海, 韩平, 李路川, 等. 天津中医药大学体育馆不连续支承弦支穹顶结构抗火分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(9): 81-87, 94. DOI:10.19701/j.jzjg.20212185.
- YU Jinghai, HAN Ping, LI Luchuan, et al. Fire resistance analysis of suspen-dome structure with discontinuous support in gymnasium of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine [J]. Building Structure, 2024, 54(9): 81-87, 94. DOI:10.19701/j.jzjg.20212185.(in Chinese)
- [76] 尹越, 方喆立, 刘红波, 等. 火灾下双层柱面网壳结构连续倒塌分析[J]. 空间结构, 2022, 28(1): 13-20, 63. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.01.013.
- YIN Yue, FANG Zheli, LIU Hongbo, et al. Progressive collapse analysis of a double-layer lattice shell under fire [J].

- Spatial Structures, 2022, 28(1): 13-20, 63. DOI:10.13849/j.issn.1006-6578.2022.01.013.(in Chinese)
- [77] 李忠献, 李鹿宁, 师燕超, 等. 天津港“8·12”特别重大火灾爆炸事故轻轨东海路站网架结构破坏分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 1-7. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0097.
- LI Zhongxian, LI Luning, SHI Yanchao, et al. Failure analysis of light rail station structure at Donghai Road in the “Aug 12th” accident of great fire explosion at Tianjin Port[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 1-7. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0097.(in Chinese)
- [78] 于敬海, 唐渝轩, 张中宇, 等. 火灾高温下复合式索穹顶结构力学性能参数分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(23): 24-30. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.23.005.
- YU Jinghai, TANG Yuxuan, ZHANG Zhongyu, et al. Parametric analysis on mechanical properties of composite-type cable dome structure under high temperature of fire[J]. Building Structure, 2020, 50(23): 24-30. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.23.005.(in Chinese)
- [79] 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): 62-75, 133. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.01.006.
- 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]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(1): 62-75, 133. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2021.01.006.(in Chinese)
- [80] 吉蔚, 李国强, 楼国彪. 火灾下门式钢刚架倒塌预警可靠度研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 154-164. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0125.
- JI Wei, LI Guoqiang, LOU Guobiao. Research on reliability of early-warning methods for collapse prediction of steel portal frames under fire[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(2): 154-164. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0125.(in Chinese)
- [81] 谈凤婕, 崔家春. 高温下铝合金板式节点刚度退化及其对网壳结构抗火性能的影响研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(2): 152-156, 144. DOI:10.19701/j.jzjg.LS210371.
- TAN Fengjie, CUI Jiachun. Study on stiffness degradation of aluminium alloy plate joints at high temperatures and its effect on fire resistance of mesh structures[J]. Building Structure, 2024, 54(2): 152-156, 144. DOI:10.19701/j.jzjg.LS210371.(in Chinese)
- [82] 贺小玲. 基于多尺度模型的球面网壳结构地震损伤累积效应及其破坏过程分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- HE Xiaoling. Analysis of seismic damage accumulation effect and failure process of spherical reticulated shell structure based on multi-scale model[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [83] 王景玄, 王文达. 不同火灾工况下钢梁-钢管混凝土柱平面框架受火全过程分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 102-109. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.03.015.
- WANG Jingxuan, WANG Wenda. Analysis of planar frame with steel beam-concrete-filled steel tubular columns after exposure to complete fire process under different fire cases[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 102-109. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.03.015.(in Chinese)
- [84] 罗尧治, 刘海锋, 姜荣. 考虑焊接球节点变形的网壳结构多尺度有限元分析方法[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 190-196, 209.
- LUO Yaozhi, LIU Haifeng, LOU Rong. Multi-scale finite element simulation of reticulated shell considering deformation of welded hollow spherical joints[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 190-196, 209. (in Chinese)
- [85] 苟宝龙. 冲击荷载下焊接球节点与铝合金板式节点力学性能及其对单层网壳抗冲击性能影响[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- GOU Baolong. Mechanical behavior of welded spherical joints and aluminum alloy gusset joints under impact load and their influence on impact resistance of single-layer reticulated shells[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [86] SAAB H A, NETHERCOT D A. Modelling steel frame behaviour under fire conditions[J]. Engineering Structures, 1991, 13(4): 371-382. DOI: 10.1016/0141-0296(91)90024-7.
- [87] BS 5950-8 Structural use of steelwork in building-Part 8: Code of practice for fire resistant design[S].
- [88] EN 1993-1-2 Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-2: General rules-Structural fire design[S].
- [89] 赵金城, 沈祖炎. 钢结构抗火分析中的材性模型[J]. 工业建筑, 1996, 26(9): 3-6, 11. DOI:10.13204/j.gygz1996.09.001.
- ZHAO Jincheng, SHEN Zuyan. Material property model in the analysis of fire resistance of steel structures[J]. Industrial Construction, 1996, 26(9): 3-6, 11. DOI:10.13204/j.gygz1996.09.001.(in Chinese)
- [90] 杜咏, 严芙蓉. 火灾下平行钢丝束温度膨胀及高温蠕变试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 66-74. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0536.
- DU Yong, YAN Furong. Experimental investigation on the creep response and thermal expansion of parallel steel wires at elevated temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(8): 66-74. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2020.08.0536. (in Chinese)
- [91] 张昊宇, 郑文忠. 高温下1770级 ϕ^P5 钢丝蠕变及应力松弛性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 7-13. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2006.08.002.
- ZHANG Haoyu, ZHENG Wenzhong. An experimental study on the creep and stress relaxation properties of 1770- ϕ^P5 prestressing steel wires at high temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(8): 7-13. DOI:10.

- 15951/j.tmgcxb.2006.08.002.(in Chinese)
- [92] 周焕廷, 聂河斌, 李国强, 等. 高温作用下1860级预应力钢绞线蠕变性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 123-129. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.06.015.
- ZHOU Huanling, NIE Hebin, LI Guoqiang, et al. Experimental research on creep properties of prestressed steel strand in 1860 MPa at high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 123-129. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2014.06.015.(in Chinese)
- [93] 李国强, 黄雷, 张超. 国产超高强度钢Q890高温力学性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1673-2049.2018.03.001.
- LI Guoqiang, HUANG Lei, ZHANG Chao. Experiment on mechanical properties of domestic ultra-high strength steel Q890 at elevated temperatures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 1-6. DOI:10.3969/j.issn.1673-2049.2018.03.001.(in Chinese)
- [94] 李国强, 吕慧宝, 张超. Q690钢材高温后的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 109-116. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.05.014.
- LI Guoqiang, LYU Huibao, ZHANG Chao. Experimental research on post-fire mechanical properties of Q690 steel [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 109-116. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.05.014.(in Chinese)
- [95] 杨成博, 胡鹰, 杨波, 等. 不锈钢材料的高温性能与本构关系[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(增刊2): 103-109.
- YANG Chengbo, HU Ying, YANG Bo, et al. Material properties and stress-strain model for stainless steel at elevated temperatures [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2015, 37(Suppl.2): 103-109. (in Chinese)
- [96] KAUFMAN J G. Properties of aluminum alloys: Tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures [M]. Materials Park: ASM international, 1999.
- [97] 彭航, 蒋首超, 赵媛媛. 建筑用6061-T6系铝合金高温下力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 46-49. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2009.07.011.
- PENG Hang, JIANG Shouchao, ZHAO Yuanyuan. Experimental study on the mechanical property of structural Al-alloy at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 46-49. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2009.07.011.(in Chinese)
- [98] 王丽, 郭小农, 刘林林, 等. 国产铝合金材料滞回本构模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 29-36. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2018.11.004.
- WANG Li, GUO Xiaonong, LIU Linlin, et al. Study on hysteretic constitutive model of domestic aluminum alloy [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11): 29-36. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbk.2018.11.004. (in Chinese)
- [99] 史聪灵, 霍然, 李元洲, 等. 火灾环境下钢构件升温过程的模型研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(12): 66-72.
- SHI Congling, HUO Ran, LI Yuanzhou, et al. Model study on the heating process of steel components under fire conditions [J]. Strategic Study of CAE, 2003, 5(12): 66-72. (in Chinese)
- [100] 杨柳, 许峰. 局部火作用下大空间网架结构温升的数值计算[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(5): 490-493. DOI:10.3969/j.issn.1009-0029.2014.05.005.
- YANG Liu, XU Feng. Numerical calculation of temperature rise in the large space grid structure under local fire conditions [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(5): 490-493. DOI:10.3969/j.issn.1009-0029.2014.05.005.(in Chinese)
- [101] ZHANG C, USMANI A. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire [J]. Fire Safety Journal, 2015, 78: 85-95. DOI:10.1016/j.firesaf.2015.08.006.
- [102] CECS 200:2006 建筑钢结构防火技术规范[S].
- CECS 200:2006 Code for fire safety of steel structures in buildings[S]. (in Chinese)
- [103] 黄珏倩, 李国强, 杜咏, 等. 大空间火灾中火焰辐射对钢构件升温的影响[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 87-94. DOI:10.13577/j.jnd.2008.0515.
- HUANG Jueqian, LI Guoqiang, DU Yong, et al. Influence of flame radiation on temperature rising of steel members in large space fire [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5): 87-94. DOI:10.13577/j.jnd.2008.0515.(in Chinese)
- [104] 杜咏, 李国强. 基于场模型的大空间建筑火灾钢构件升温的简化计算方法[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(3): 299-303.
- DU Yong, LI Guoqiang. Simplified algorithm of steel member at elevated temperature in large space fire based on field model [J]. Fire Science and Technology, 2006, 25(3): 299-303. (in Chinese)
- [105] 杜咏, 李国强. 考虑火焰辐射的大空间建筑火灾中钢构件升温实用计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3): 54-60. DOI:10.3321/j.issn.1673-2049.2008.03.011.
- DU Yong, LI Guoqiang. Practical calculation method for temperature elevation of steel members on flame radiation in large space building fire [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 54-60. DOI:10.3321/j.issn.1673-2049.2008.03.011.(in Chinese)
- [106] 张国维, 朱国庆, 袁广林, 等. 火焰热辐射作用下大空间火场钢构件升温模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 96-101.
- ZHANG Guowei, ZHU Guoqing, YUAN Guanglin, et al. Temperature model of steel members exposed to thermal radiation and fire in large space building [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 96-101. (in Chinese)
- [107] WICKSTRÖM U, DUTHINH D, MCGRATTAN K. Adiabatic surface temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures [C]//Proceedings of the Eleventh

- International Interflam Conference. London: Interscience Communications, 2007.
- [108] 焦冰, 邱仓虎, 张耕源. 考虑火焰辐射的钢构件升温计算方法对比研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(3): 34-40. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.03.005.
- JIAO Bing, QIU Canghu, ZHANG Gengyuan. Comparative study of heating calculation methods for steel members considering flame radiation[J]. Building Science, 2022, 38(3): 34-40. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2022.03.005.(in Chinese)
- [109] EN 1999-1-2 Eurocode 9: Design of aluminum alloy structures—Part 1-2: Structural fire design[S].
- [110] DG/TJ 08-2420—2023 大空间建筑铝合金结构防火技术标准[S].
DG/TJ 08-2420—2023 Technical standard for fire safety of aluminum structures in large-space building[S]. (in Chinese)
- [111] 郭小农, 陈晨, 朱劭骏, 等. 大空间火灾下铝合金构件升温计算方法[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(9): 118-126. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0876.
GUO Xiaonong, CHEN Chen, ZHU Shaojun, et al. Calculation method for temperature rise of aluminum alloy structural members in large-space fires [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(9): 118-126. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0876.(in Chinese)
- [112] 王卫永, 丁勇, 张泽江, 等. 轻质防火保护层铝合金构件升温计算简化[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(1): 33-37. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.01.009.
WANG Weiyong, DING Yong, ZHANG Zejiang, et al. A simplified method for calculating temperature of aluminum alloy components with light fire protection[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(1): 33-37. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.01.009.(in Chinese)
- [113] STERN-GOTTFRIED J, REIN G. Travelling fires for structural design-Part I: Literature review [J]. Fire Safety Journal, 2012, 54: 74-85. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
- [114] STERN-GOTTFRIED J, REIN G. Travelling fires for structural design-Part II: Design methodology [J]. Fire Safety Journal, 2012, 54: 96-112. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.06.011.
- [115] EN 1991-1-2 Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-2: General actions-Actions on structures exposed to fire[S].
- [116] LIANG J, XUE S D, LI X Y. Empirical formula considering the smoke ventilation for air temperature in large space structure under fire [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 94/95/96: 587-593. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.94-96.587.
- [117] ZHANG G W, ZHU G Q, YUAN G L, et al. Methods for prediction of steel temperature curve in the whole process of a localized fire in large spaces[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014(1): 238515. DOI: 10.1155/2014/238515.
- [118] 于志超, 朱国庆, 张国维. 建筑高度对大空间温度场的影响[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(7): 903-905, 916. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2016.10.006.
YU Zhichao, ZHU Guoqing, ZHANG Guowei. Influence of building height on large space temperature field [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(7): 903-905, 916. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2016.10.006.(in Chinese)
- [119] 王烨华, 沈祖炎, 李元齐. 大跨度空间结构抗火研究进展[J]. 空间结构, 2010, 16(2): 3-12. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2010.02.001.
WANG Yehua, SHEN Zuyan, LI Yuanqi. Recent advances in research on fire-resistance of long-span spatial structures[J]. Spatial Structures, 2010, 16(2): 3-12. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2010.02.001.(in Chinese)
- [120] GB 51249—2017 建筑钢结构防火技术规范[S].
GB 51249—2017 Technical code for fire protection of building steel structures[S]. (in Chinese)
- [121] 刘激扬, 李引擎. 现行防火规范与奥运场馆的防火设计[J]. 消防科学与技术, 2003, 22(4): 285-288. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2003.04.008.
LIU Jiyang, LI Yinqing. The current fire code and the fire protection design of the Olympic gymnasium [J]. Fire Science and Technology, 2003, 22(4): 285-288. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2003.04.008.(in Chinese)
- [122] 李国强, 郭士雄, 蒋首超, 等. 上海南站钢屋盖结构性能化抗火安全评估[J]. 建筑钢结构进展, 2005, 7(2): 31-36. LI Guoqiang, GUO Shixiong, JIANG Shouchao, et al. Analysis of the fire safety of the steel roof construction of Shanghai south railway station [J]. Progress in Steel Building Structures, 2005, 7(2): 31-36. (in Chinese)
- [123] 李国强, 杜咏, 王银志, 等. 杭州国际会议中心钢结构抗火性能评估与设计[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(1): 14-22. LI Guoqiang, DU Yong, WANG Yinzh, et al. Evaluation and design on fire-resistance of steel structures for Hangzhou international conference center [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1): 14-22. (in Chinese)
- [124] 吴隼. 性能化消防设计在西安咸阳国际机场 T3A 航站楼工程上的应用[J]. 消防技术与产品信息, 2010, 23(11): 53-58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2010.11.018.
WU Jun. Application of fire protection performance-based design in T3A terminal of Xi'an Xianyang international airport project [J]. Fire Technique and Products Information, 2010, 23(11): 53-58. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2010.11.018.(in Chinese)
- [125] 华莹, 赵金城. 建筑结构性能化抗火设计中的几个关键问题[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(3): 1-13. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.001.
HUA Ying, ZHAO Jincheng. Key issues in the performance-based fire resistant design for building structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2022,

- 24(3): 1-13. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.001.
(in Chinese)
- [126] 史健勇,任爱珠,陈驰.基于计算机仿真模拟系统的奥运场馆火灾安全分析[J].工程抗震与加固改造,2005(增刊1): 221-227. DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2005.s1.045.
SHI Jianyong, REN Aizhu, CHEN Chi. Analysis on the fire safety of gymnasiums for 2008 Olympic Games based on the computer simulation technology [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2005(Suppl.1): 221-227. DOI: 10.16226/j.issn.1002-8412.2005.s1.045. (in Chinese)
- [127] 陈适才,任爱珠,唐方勤,等.火灾下大空间网架结构的抗倒塌分析方法[J].钢结构,2007,22(8): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2007.08.025.
CHEN Shicai, REN Aizhu, TANG Fangqin, et al. Performance-based anti-collapse analysis of the large-space steel lattice truss structure under fire [J]. Steel Construction, 2007, 22(8): 85-88. DOI: 10.3969/j.issn. 1007-9963.2007.08.025.(in Chinese)