

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.020

铝合金空间结构抗火性能研究进展*

郭小农, 陈晨, 朱劭骏, 成张佳宁

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 铝合金材料在高温下的力学性能较差,考虑到铝合金结构常用于重要大型空间结构,其抗火性能与人员生命财产安全密切相关,对国内外近年来关于铝合金空间结构抗火性能的研究进行了系统综述与分析。首先,总结了有关铝合金结构高温性能的研究,包括材料的高温性能、构件和节点的高温性能和空间结构的整体抗火性能等。随后,指出了大空间火灾与一般室内火灾的不同,并对比了各种大空间火灾温度场确定方法的优缺点;总结了有关钢结构构件在火灾下温升的确定方法,并强调了火焰辐射在大空间火灾下的重要影响;阐述了有关大空间结构整体抗火性能的研究;介绍了性能化抗火设计思想及其优越性。最后,总结了有待解决的关键问题和需进一步开展的工作。

关键词: 铝合金; 空间结构; 抗火性能; 火灾; 性能化设计方法

中图分类号: TU395.02; TU317.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0293-16

State-of-the-arts of Research on Fire-resistance of Aluminum Alloy Spatial Structures

GUO Xiaonong, CHEN Chen, ZHU Shaojun, CHENG Zhangjianing
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The elevated-temperature mechanical behavior of aluminum alloy is relatively poor. Considering aluminum alloy structures are mainly used in important large spatial structures, their fire behavior is highly associated with the safety of the life and properties of human beings. In this paper, the researches on the fire-resistance of aluminum alloy spatial structures in recent years are summarized and analyzed. Firstly, studies on the elevated-temperature behavior of aluminum alloy structures, including the high-temperature mechanical behavior of the material, members, joints, as well as the overall fire-resistance of aluminum alloy spatial structures, are introduced. Then, the difference between large-space fires and normalized indoor fires is presented, and the pros and cons of the determination methods on air temperature distribution under large space fires are compared; the calculation methods on temperature rise of structural components are illustrated, and the role of fire radiation is emphasized; studies on the behavior of the whole structure in fire, as well as the performance-based fire resistance design concept is introduced. Finally, the key problems to be solved and further work are presented.

Keywords: aluminum alloys; spatial structures; fire resistance; fire; performance-based design method

* 收稿日期:2019-11-28;修回日期:2020-01-27

基金项目:国家自然科学基金(51478335)资助

作者简介:郭小农(1977-),男,副教授,博士,博导。主要从事铝合金结构方面的研究。Email: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者:朱劭骏(1994-),男,博士研究生。主要从事铝合金结构方面的研究。Email: zhushaojun@tongji.edu.cn

引言

铝合金空间结构由于其外型美观、比强度高、加工精度高、延展性好和耐腐蚀性好等优点,1996年起在我国得到广泛应用^[1]。然而,同为典型的结构用金属材料,铝合金与钢材在材料特性方面有较大区别^[2]。因此,大量针对空间钢结构抗火性能的研究成果和相关设计方法不能直接应用于铝合金结构。相关研究^[3-5]表明,铝合金材料在高温下的力学性能较常温下退化幅度较大,相同温度下铝合金材料强度和弹性模量的高温折减系数比钢材更小。另外,铝合金的导热系数为钢材的3倍左右;但考虑到铝合金材料的外形美观,一般不对结构构件进行被动防火保护。可以推测,在火灾下,无隔热保护的铝合金构件其升温速度比钢构件更快。由此,铝合金结构可能较钢结构更容易在火灾下发生破坏。

目前,国外对铝合金结构的高温性能研究相对较为成熟,并已经编制了相应设计规范^[4];国内尚未出台铝合金结构抗火设计规范,且对铝合金结构高温性能的研究尚处于初步阶段。本文对现有文献资料进行归纳分析,以总结出所取得的研究成果及提出需进一步深入研究的问题,为铝合金结构的抗火性能研究提供参考和依据。

1 铝合金空间结构抗火性能

1.1 铝合金高温下的材料特性

国外对高温下铝合金材料特性的研究起步较早。早在1964年,W. R. Martin等^[6]就对X8001和6061系列铝合金在70~600 ℉(约20~315 ℃)下的材料性能进行了试验,发现铝合金材料的弹性模量和强度在高温下都有较大幅度的折减。在315 ℃时,6061-O型铝合金的极限强度和弹性模量较常温下分别降低了约80%和30%。然而,由于现代铝合金的材料成分已经发生了很大变化,当年的研究成果可能无法直接应用于现代铝合金。

在欧洲铝合金抗火设计规范^[4]中,对高温下结构构件和节点承载力的折减一般通过引入名义屈服强度折减系数 $k_{0.2}$ 或弹性模量折减系数 k_E 来考虑。近年来,为了获得铝合金材料在高温下的力学性能折减系数,有不少国外学者进行了铝合金材料在高温下的拉伸试验。1999年,J. G. Kaufman^[5]对各种

牌号的铝合金材料进行了不同温度(25~540 ℃)和曝火时间(0.1~10 000 h)下的拉伸试验,给出了不同温度下铝合金的弹性模量、名义屈服强度和极限强度的试验结果。2009年,J. Maljaars等^[7]对5083-H111和6060-T6两种牌号的铝合金进行了在20~400 ℃下的稳态和瞬态拉伸试验,得到了其高温下的屈服强度和弹性模量。根据文献[5,7]中的试验结果计算材料力学性能高温折减系数,所得到的结果与欧洲规范^[4]中建议的取值相近。相对而言,针对国产结构用铝合金的高温下力学性能的研究起步较晚。彭航等^[8]和郭小农等^[9]对国产结构用铝合金进行了高温下的拉伸试验,并拟合了6061-T6、6061-T4、6082-T6、6N01-T6和7020-T6等5种牌号铝合金在高温下的屈服强度、极限强度和延伸率的计算式。结果表明,对国产结构用铝合金高温下的性能指标,欧洲规范^[4]和美国铝合金设计手册^[10]中的建议值均偏于保守。对此,上海市地方标准《铝合金格构结构技术标准》^[11]参考了有关试验结果和既有规范推荐值,给出了现代常用国产结构用铝合金材料在高温下的力学性能指标折减系数。此外,Zh. H. Chen等^[12]和Y. Liu等^[13]对6061-T6、6082-T6和7075-T73等3种牌号铝合金在不同热处理方式和冷却方式下的残余力学性能进行了试验研究,得到了火灾后各牌号铝合金的应力-应变曲线、弹性模量、屈服强度、极限强度和延性等力学指标。试验结果表明,铝合金火灾后强度受过火温度和冷却方式影响较明显。通过对试验数据的拟合,得到了预测不同冷却方式下3种牌号铝合金火灾后力学指标的经验式,为铝合金结构火灾后残余力学性能的评估打下了基础。

J. Maljaars等^[7]将稳态和瞬态拉伸试验的结果进行了对比,结果表明在相同温度下,稳态试验得到的名义屈服强度高出曝火时间为120 min的瞬态试验结果三倍以上。对原因进行初步分析,猜测是铝合金在高温下的蠕变特性影响了其高温下的本构关系。对于铝合金的蠕变特性,欧洲规范^[4]指出对温度超过170 ℃或曝火时间超过30 min的部件,需进行特殊处理以考虑蠕变带来的影响。由此,基于试验数据,J. Maljaars等^[14]对J. E. Dorn^[15]和T. Z. Harmathy^[16]提出的金属材料高温蠕变本构模型进行了修正,并得到了不同应力下的温度-应变曲线,进而绘制了该温度下考虑蠕变的铝合金应力-应变曲线。通过分析,J. Maljaars等^[3]提出该曲线在

形式上仍可用 Ramberg-Osgood 模型的表达式:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_T} + \left(\frac{\sigma}{f_{0.2,T}} \right)^{n_T} \quad (1)$$

其中, E_T 和 $f_{0.2,T}$ 分别为铝合金在温度 T 下的弹性模量和名义屈服强度; n_T 为铝合金在温度 T 下的硬化系数。

目前,国内也有一些学者对铝合金在高温下的蠕变特性进行了试验研究^[17-18],不过所涉及的铝合金牌号主要应用于航空航天领域;而对于铝合金高温本构关系的研究^[19-25]虽然包括了不少常用结构用铝合金牌号,但其侧重点主要为高温下微观的流变本构关系,未提出便于结构分析的高温下铝合金应力-应变关系模型。

综上,国外对结构用铝合金材料的高温力学性能包括屈服强度、极限强度、弹性模量和延伸率等的研究成果相当丰富。相比之下,应对国产结构用铝合金在高温下的蠕变特性及其对结构分析的影响进行进一步研究。

1.2 铝合金构件的高温性能

1.2.1 铝合金轴压构件的高温性能

国内外针对铝合金轴压构件高温性能的研究起步较晚。J. I. Suzuki 等^[26]考虑不同的截面类型、形状系数和隔热层厚度等参数,对火灾下铝合金轴心受压构件的耐火时间和临界温度进行了试验研究,并基于试验结果提出了铝合金构件临界温度的计算方法。J. Maljaar 等^[7,27-28]对火灾条件下工字型和方管铝合金轴压构件的整体和局部屈曲性能进行了试验和有限元分析,提出了确定几何缺陷和残余应力的方法。M. Liu 等^[29]对不规则截面铝合金构件高温下的轴压性能进行了数值研究,分析了常温和高温下铝合金轴压构件的稳定承载性能。Sh. Ch. Jiang 等^[30]分别在高温和常温下对 60 根矩形管和 48 根圆形管铝合金构件进行了轴压试验,并基于数值分析结果,提出了火灾条件下铝合金柱稳定系数的计算式。郭小农等^[31]对 34 种截面规格的国产 6061-T6 铝合金柱的高温轴压承载性能进行了大规模数值分析,提出了其高温轴压稳定承载力计算式。蒋首超等^[32]在不同温度下进行了 14 个矩形截面铝合金挤压型材试件的轴心受压试验,结合数值分析研究了初弯曲、初偏心、残余应力等因素对铝合金轴压构件高温承载性能的影响规律,并提出了铝合金轴压构件高温承载力的实用计算式。刘梅

等^[33]通过有限元分析研究了长细比和过火温度对薄壁异形截面铝合金轴心受压柱在火灾下的破坏模式和屈曲承载力的影响,结果表明火灾高温会降低柱的屈曲承载力,但不会改变柱的破坏模式;并通过对长细比和火灾温度展开数值分析,提出了欧洲规范^[4]的修正式,用于计算薄壁异形截面铝合金柱的抗火承载力。

综上所述,目前国内外针对铝合金轴压高温承载力的研究已经取得了阶段性成果,但由于尚未形成具有一定规模的试验(数值分析)结果数据库,工程设计人员应用较为困难。

1.2.2 铝合金受弯构件的高温性能

由于铝合金材料一般不用于纯弯构件,针对铝合金受弯构件高温性能的研究成果较为匮乏。时文丽^[34]对 20 根工字型铝合金悬臂受弯试件进行了恒温加载试验,得到了其稳定承载力和荷载-位移曲线,填补了国内铝合金受弯构件高温承载力试验数据的空白。在其基础上,黄力才等^[35]对高温下铝合金受弯构件的稳定承载力进行了大规模数值分析,并拟合了高温下受弯构件整体稳定承载力的计算式。随后,林维春^[36]采用 ABAQUS 对工字形铝合金受弯构件进行了进一步数值分析,提出了高温下铝合金受弯构件整体稳定系数的计算式。

与轴心受压构件类似,已有研究成果很难有效地指导工程实际中铝合金受弯构件的高温承载力设计。

1.2.3 铝合金偏压构件的高温性能

考虑到铝合金空间结构中构件主要为压弯构件,针对压弯构件高温承载性能的研究相对丰富。韩川^[37]对 113 根 6061-T6 铝合金方管和圆管截面试件进行了 20~350 °C 下的偏心加载试验,并建立了试验数据库。随后,黄玮嘉^[38]在其基础上对方形、圆形、H 形、T 形、C 形和 L 型等 6 种截面形式的压弯构件高温性能进行了大规模参数分析,拟合了 20~300 °C 下适用于所有类型截面偏压构件弯曲稳定承载力验算的下限相关公式;同时,完成了 14 根 6063-T5 铝合金偏压构件高温下平面外弯扭稳定试验,并对 H 形和 T 形截面,考虑不同的铝合金牌号、正则化长细比、温度和偏心距进行了参数分析。研究结果表明,300 °C 以下时,铝合金构件平面外弯扭失稳承载力可偏于安全地采用线性相关公式计算。

综上,目前主要由国内学者对铝合金偏压构件进行了试验研究和有限元分析,并提出了简洁但偏

于保守的相关公式;该下限公式的保守性随温度升高而升高,且随构件截面形式、构件长细比等参数的变化而变化。对适用于不同截面的精确相关公式仍有待进一步研究,以提高实际设计的经济性。

1.3 铝合金板式节点的高温性能

2016年,郭小农等^[39]建立了高温下铝合金板式节点的数值模型,提出高温下铝合金板式节点的破坏模式主要为块状拉剪破坏和中心区屈曲破坏。2018年,X. N. Guo等^[40]进行了9个铝合金板式节点高温下的受弯承载性能试验,并验证了所建立的数值模型;在可靠的有限元模型的基础上,对不同节点板厚度、中心区半径、铝合金牌号和温度进行了参数分析。分析结果表明,在300℃以下,若节点板厚度大于等于翼缘厚度,节点域将不会发生破坏;另外,铝合金板式节点的平面外弯曲刚度可在常温四折线模型^[41]的基础上引入温度影响系数进行考虑,同时还拟合了高温下的节点承载力计算式。

综上所述,目前对铝合金板式节点的高温平面外抗弯刚度和承载力的研究已经取得了较为丰富的成果,为进一步的结构抗火分析打下了坚实的基础。

2 火灾下大空间结构温度场计算

长宽比不大、体积大小数量级约为100 m³的受限建筑空间中发生的火灾称为一般室内火灾,其发展分为三个阶段——初期增长阶段、全盛阶段及衰退阶段^[42]。在初期增长阶段,火灾局限于局部区域,室内空气温度相对较低。若火灾空间通风条件较好,所有可燃物将会几乎在同一时间发生燃烧(即“轰燃”),使火灾进入全盛阶段。火灾在“轰燃”后对建筑结构危害最大,而此时室内空气分布较为均匀,模拟其影响时可假定室内温度均匀分布。因此,不少学者对既有统计资料和试验数据进行了分析,并提出了一般室内火灾在“轰燃”后的空气升温模型,如马忠诚模型^[43]、ASCE模型^[44]、Eurocode模型^[45]等。为了使试验所测得的构件抗火性能之间能够相互比较,国际标准组织还制定了ISO834标准升温曲线^[46],在我国抗火设计中得到了广泛应用,其表达式如下:

$$T_g - T_0 = 345 \lg(8t + 1) \quad (2)$$

式中, T_g 为时间 t 的室内空气平均温度(℃); T_0 为火

灾发生前的室内空气平均温度(℃); t 为时间(min)。

然而,由于大空间结构室内空间较大,空气升温速度较慢,不会发生“轰燃”现象。此外,火苗可能集中在局部区域,室内空气温度分布不宜假定为均匀分布。因此,上述一般室内火灾空气升温模型无法直接应用于大空间结构火灾。为了获得大空间火灾的室内温度分布,一般可采用以下方法:

(1) 大空间结构火灾试验

进行火灾试验是获得大空间结构火灾下温度场分布最直接可靠的方法。然而,进行火灾试验将消耗大量人力和物力资源,其可变参数较少,且实际火灾不确定因素较多而难以控制;此外,对于实际工程中的大空间结构,一般无法建造全尺寸试件进行试验研究,转而采用相似(缩尺)模型进行火灾试验,这可能无法模拟部分特殊火灾的实际情况。因此,在进行火灾试验并获得特定试件的温度场分布之后,一般会将试验结果与数值模拟结果进行对比以验证数值解的可靠性,从而基于数值模拟进行后续研究。

(2) 基于区域模型的预测

在火灾的发展过程中,热烟气在上升和填充室内空间时存在不同程度的分层现象,即上部为热烟气流层,下部为冷空气层^[42]。为了进一步简化计算过程,可将室内空间人为划分成若干区域,并假定每个区域气体的状态参数均匀分布,即采用区域模型分析火灾过程,如图1所示。其中,应用最为广泛的双区域模型将室内气体分为上层烟气和下层冷空气两个区域,而用一个水平横截面作为分层界面。

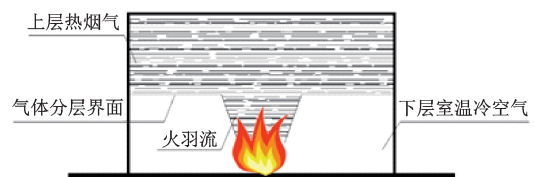


图1 采用双区域模型模拟大空间火灾

Fig.1 A two-zone model for simulating large space fires

采用区域模型的分析火灾过程时,区域之间的质量交换主要由火焰羽流和通风口的掺混作用造成;能量交换除了包括由质量交换带来的能量传递外,还包括辐射和导热损失。可见,区域模型的应用关键在于确定火焰羽流的质量流量。确定了火焰羽流的质量流量后,可建立质量守恒和能量守恒

方程以求解上层烟气的平均温度。不少学者基于火灾试验,提出了计算该物理量的半经验式,常见的有 Zukoski 模型^[47]、Thomas-Hinkley 模型^[48]和 McCaffrey 模型^[49]等。通过实际算例的对比,程远平等^[50]指出 Zukoski 模型适用于小面积火源条件下的羽流质量流量计算,Thomas-Hinkley 模型适用于大面积火源条件下的羽流质量流量计算,而 McCaffrey 模型同时适用于大小面积火源条件;然而,这些条件的界限并不明确,且模型的提出受早期试验条件、测试仪器水平和人们对火灾问题的科学认识程度限制,其适用性亟待重新评价。杜咏等^[51]通过计算提出区域模型的经验式在烟气填充过程中具有足够的精度,而当双区域模型下层冷空气的80%被热烟气填充后,其计算结果随时间的增长变化误差增大。

(3) 基于场模型的数值计算

火灾过程中各时刻下状态参数(如速度、烟气浓度和温度等)在空间上的分布称为场。场模型数值计算的基本思路是将所研究的连续空间离散为有限个点,并建立基于质量守恒定律的连续方程、基于动量守恒定律的 Navier-Stokes 方程、基于能量守恒定律的能量方程和元素守恒方程;随后,通过数值方法(如有限差分法、有限容积法和有限分析法等^[52])求解上述方程,即可得到火灾下空间温度场的分布。目前,已经有不少学者^[53-57]采用基于场模型的数值分析软件对火灾场景进行了数值计算,并分析了影响大空间建筑火灾空间温度场分布的参数。

场模型给出的数值解可以较为准确地预测火灾全过程的空间温度场分布,从而为进一步的结构火灾性能研究打下基础。然而场模型理论性较强,难以直接为工程技术人员在实际设计时所用。

(4) 基于经验式的预测

国内不少学者基于区域模拟或场模拟结果,对大空间建筑火灾烟气升温非定场进行了简化,并给出了预测火灾过程中任意位置和任意时刻温度的近似表达式。典型的计算大空间火灾温度场的经验公式有:

a. 李国强等^[53]的经验公式

2005年,李国强等^[53]假定在高度确定的水平面上温度场分布关于火源点呈极对称,将大空间建筑

火灾中的温度非定场简化为一数学模型,并基于大量数值模拟结果回归了其经验公式:

$$T(x, z, t) - T_0 = T_z^{\max}(1 - 0.8e^{-\beta t} - 0.2e^{-0.1\beta t})\kappa(3)$$

式中, $T(x, z, t)$ 为大建筑空间中距离火源点水平投影距离为 x 、竖直投影距离为 z 的点在 t 时刻的温度($^{\circ}\text{C}$); T_0 为火灾发生前的空气温度($^{\circ}\text{C}$),取 20°C ; T_z^{\max} 为从火源中心距地面垂直投影距离 z 处的最高空气温度($^{\circ}\text{C}$); β 为升温曲线形状系数,由火源功率和火源增长型确定; κ 为距离衰减系数; t 为时间(s)。

b. 薛素铎、梁劲等^[58-59]的经验公式

2012年,梁劲等^[59]指出火灾过程的空气升温曲线与火灾初始阶段的升温速率系数 r 和空气最终趋向的平衡温度 T_m 存在一一对应的关系,且不同的建筑结构壁面形式(如矩形、圆弧形等)对火灾下大空间的升温曲线会产生不同程度的影响。基于大量场模拟结果,文献^[59]提出了圆弧形边界大空间建筑火灾空间升温经验公式:

$$T(x, z, t) = \frac{T_m}{1 + e^{-rt} \left(\frac{T_m}{T_0} - 1 \right)} \quad (4)$$

2013年,薛素铎等^[60]还采用FDS对矩形边界大空间建筑结构火灾进行了数值模拟,指出其升温曲线形式与式(4)相同,其中参数 T_m 和 r 按文献^[61]查表取值。

c. G. W. Zhang等^[62]的经验公式

2014年,G. W. Zhang等^[62]在一大空间建筑火灾试验的基础上,采用FDS对不同高度、面积和火源功率的大空间火灾场景进行了数值模拟,并提出了预测火灾全过程烟气温度的分段表达式:

$$T(x, z, t) = \begin{cases} T_0 + T_z^{\max} e^{-\frac{(\ln t - \ln t_d)^2}{\omega_1}}, & t \leq t_d \\ T_0 + T_z^{\max} e^{-\frac{(\ln t - \ln t_d)^2}{\omega_2}}, & t > t_d \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω_1 为火灾发展阶段的烟气温度曲线形状系数; ω_2 为火灾衰退阶段的烟气温度曲线形状系数; t_d 为火灾开始进入衰减阶段的时间,按下式确定:

$$t_d = \frac{6t_s + 2t_g}{9} = \frac{6t_s + 2\sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha}}}{9} \quad (6)$$

式中, t_s 为火灾全过程所持续的时间(s); t_g 为火灾进入全盛阶段的时间(s); Q_{\max} 为最大火源功率(MW); α 为火源增长系数。

上述经验公式形式简洁,便于工程人员在设计

时使用。《建筑钢结构防火技术规范》^[63]推荐的高大空间火灾下空气温度的计算式即为文献 [58] 给出的经验公式。现行《建筑钢结构防火技术规范》^[64]中省去了该式,但指出了高大空间火灾的升温曲线与一般室内火灾有明显区别。

然而,各经验公式对同一火灾场景的计算结果并非完全相同。于志超等^[57]基于一大空间火灾试验结果,对文献 [58, 60, 62] 所提出的经验式进行了对比。结果表明,对于高大空间油池小功率火灾,三个经验公式均可以较好地描述火源正上方的温度变化;G. W. Zhang 等^[62]提出的经验公式能够模拟火灾的全过程,包括火灾发展阶段和衰退阶段,而李国强等提出的计算式^[53]则只能模拟火灾发展阶段的升温曲线;薛素铎等提出的经验式^[58-59]能够模拟火源从火灾增长阶段到稳定阶段的过渡段;使用经验公式时,某些参数的取值在实际火灾下较难确定。

3 火灾下大空间结构构件升温计算

国内外对一般室内火灾下构件的升温研究主要集中在钢结构^[66-72]。国内相关研究成果已被我国旧版标准《建筑钢结构防火技术规范》^[63]所采纳,该规范还给出了火灾下三种钢结构构件升温计算方法:增量法、简化式法和查表法。邢君等^[73]对这三种计算方法的计算结果进行了比较,结果表明增量法使用范围最广,但需经过较为繁琐的迭代计算;简化计算式应用较为灵活,但必须满足钢构件温度 $T_s \leq 600^\circ\text{C}$ 的条件;查表法最为简单直接,但只适用于有轻质保护层的钢构件;对于涂有非膨胀型防火保护层的钢构件在火灾下的升温计算,增量法所得结果最为保守,查表法结果居中,简化式计算结果最低。现行《建筑钢结构防火技术规范》^[64]保留了增量法和简化式法两种计算钢构件升温的方法,并将简化式法的适用条件从 $T_s \leq 600^\circ\text{C}$ 放宽到了 $T_s \leq 700^\circ\text{C}$ 。欧洲钢结构设计规范^[74]也给出了基于增量法的火灾下构件温度计算方法。

然而,黄珏倩^[75]指出一般室内火灾的“轰燃”现象使得空间内烟气温度与火焰温度接近,因此不予区分;在大空间火灾条件下,由于不存在“轰燃”现象,烟气温度可能远低于火焰温度,火焰与烟气通过热辐射传递给构件的热量应分别考虑,即:

$$T_s(t) = T_{\text{flame}}(t) + T_{\text{smoke}}(t) + T_0 \quad (7)$$

式中, $T_{\text{flame}}(t)$ 和 $T_{\text{smoke}}(t)$ 分别为火焰辐射和烟气辐射对钢构件温升的贡献($^\circ\text{C}$)。

张超等^[76]对大空间火灾采用 FDS 进行了数值模拟,也得出了类似结论。而对一般室内火灾的研究仅考虑了烟气辐射对钢构件温升的贡献,即 $T_{\text{smoke}}(t)$ 。因此,文献 [64, 74] 所推荐的计算方法未必适用与大空间火灾下的构件温升。目前,对大空间火灾下钢构件温升的研究也已经启动。2006年,杜咏等^[77]基于文献 [58] 提出的大空间火灾空气升温计算式,采用增量法求得了钢构件温升的数值解,并在参数分析的基础上,对钢构件的时间-温度曲线进行最小二乘拟合,得到了大空间建筑火灾下钢构件温升的实用计算式。

随着对大空间火灾钢结构温升研究的深入,研究重点逐渐转向火焰辐射对构件温升影响的量化。杜咏等^[79-80]首先通过理论推导和参数分析,提出构件辐射角系数 φ_{sl} 决定了在计算构件温升时是否应额外考虑火焰辐射的影响,同时给出了辐射角系数的实用计算式和临界辐射角限值表;随后,对火焰辐射对钢构件温升的影响进行了参数分析,提出了火焰辐射对构件温升的贡献 $T_{\text{flame}}(t)$ 的计算式。

黄珏倩等^[81]也对式(7)中 $T_{\text{flame}}(t)$ 的计算展开了研究,并提出在一定火源功率和火焰直径下,对于超过一定高度限值 H_{max} 的大空间结构,可不考虑火焰辐射对钢构件升温的影响,并给出了 H_{max} 的取值表;而当火焰辐射的影响不可忽略时,给出了 $T_{\text{flame}}(t)$ 的计算方法。

近年,张国维等^[82]也进行了类似的研究,并进行了一次大空间建筑火场钢构件升温试验^[83],进而提出并验证了大空间火灾下钢构件升温的理论模型^[84-85]:

$$\Delta Q_s = V_s \rho_s C_s \Delta T_s \quad (8)$$

式中, V_s 为单位长度钢构件的体积(m^3); ρ_s 为钢构件密度(kg/m^3); ΔT_s 为单位时间内钢构件的温升($^\circ\text{C}$); T_s 为钢构件温度($^\circ\text{C}$); C_s 为钢构件的比热($\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$); ΔQ_s 为单位时间内单位长度钢构件净吸收的热量(J)。

目前,铝合金构件在火灾下的温升可按照欧洲规范^[4]中给出的增量计算式进行计算:

$$\Delta T_{\text{al}} = K_{\text{sh}} \frac{1}{c_{\text{al}} \rho_{\text{al}}} \frac{A_m}{V} h \Delta t \quad (9)$$

式中, ΔT_{al} 为单位时间内铝合金构件的温升($^\circ\text{C}$); h 为单位面积的总热流量(W/m^2), $h = h_c + h_r$, 其中 h_c 和 h_r 分别为热对流和热辐射对总热流量的贡献;

A_m/V 为无保护层铝合金构件的截面形状系数; c_{al} 和 ρ_{al} 分别为铝合金的比热容($J/(kg\cdot^{\circ}C)$)和密度(kg/m^3); K_{sh} 为阴影效应的修正系数,可偏于安全地取为1.0。

郑永乾等^[86]对既有试验结果^[26]进行了有限元模拟,并将试验和有限元结果与式(9)的计算结果进行了对比。结果显示,式(9)计算结果偏高;而当式(9)中单位面积总热流量 h 的计算式修正为 $h=h_c+0.15h_r$ 时,其结果与有限元结果最为接近。然而,所对比的试验中构件由高温炉进行加热,与实际火灾有一定差异。近期,郭小农等^[87]通过火焰辐射试验,提出了大空间火灾下铝合金构件温升的计算方法,并强调了大空间火灾下火焰辐射作用对构件温升的影响不容忽视。

可见,尽管针对火灾下铝合金构件温升的研究起步较晚,目前已经基于试验分析形成了较为完善的计算方法,为火灾下铝合金结构性能的分析打下了基础。

4 火灾下整体结构的承载性能

目前,现有钢结构抗火设计规范(如GB51249^[64]和Eurocode 3^[74]等)给出的抗火设计方法主要还停留在构件抗火设计层面。然而国内外基于试验或数值方法对钢框架结构在火灾下的承载性能进行的研究^[88-98]表明,结构的整体作用会提升结构中单一构件在火灾下的承载性能,应在设计过程中予以考虑。

基于上述思想,近年来针对大空间钢结构火灾下整体承载性能的研究越来越多。在研究初期,部分学者^[99-102]偏于安全地采用了ISO834标准升温曲线对大空间结构在火灾下的空气温度场进行模拟,所得结果误差较大。

随着对大空间火灾下空气温度场分布规律研究的深入,近年来有关大空间结构整体抗火性能分析的研究均引入了更接近实际的温度场分布。韩庆华等^[103]和陈鑫^[104]对某实际双层网壳在不同实际火灾场景下的响应进行了数值分析,得到了火灾下结构的破坏形式和杆件的应力比。分析结果表明,该双层网壳在火灾下并未发生整体破坏,可通过加强火灾下关键杆件防火保护的方法防止结构的破坏。

周明等^[105]对单层柱面弦支网壳火灾下的性能

进行了数值分析,结果表明起火位置和网壳的矢跨比是影响该类结构火灾行为的重要因素;火灾导致的热膨胀会打破索杆之间的平衡,导致拉索过早出现应力松弛而退出工作。

相较于双层网壳和单层柱面弦支网壳,针对单层球面网壳抗火性能的研究成果相对较多。邱林波等^[106]、薛素铎等^[107]和梅冰辉^[108]通过数值分析发现钢网壳的极限耐火时间约为20~30 min,远远短于现行规范^[64]规定的2 h。然而,文献^[106-108]在分析过程中未考虑钢材的线膨胀系数,所得结论偏于保守。薛素铎等^[109]、王娜等^[110]、白音等^[111-112]和郭胜等^[113]进行了考虑材料热膨胀系数的有限元分析,结果表明网壳在火灾下的变形分为热膨胀阶段和屈曲阶段等两个阶段,热膨胀效应甚至会提升网壳的极限承载力。其中,文献^[109]对某网壳在设计荷载下的有限元分析结果表明,其耐火极限可以达到13 h;文献^[110-112]的分析结果均指出当网壳在跨度大于40 m,或矢跨比大于1/7时,极限耐火时间大于2 h。由此可以推测,一般钢网壳在实际火灾下的耐火极限大于2 h。

可见,目前对钢材高温性能、大空间空气和钢结构构件温升方面的相关研究相对成熟;对大空间钢结构整体抗火性能的研究也主要采用了数值模拟的方法。然而,考虑到铝合金材料的线膨胀系数远大于钢材,针对空间钢结构抗火性能的研究成果未必能直接沿用至铝合金结构中。对于大空间铝合金结构的整体抗火性能,目前仅郭小农等^[114]考虑了不同的实际火源功率、火源位置和通风条件等因素,对一直径8 m,矢跨比1/16的铝合金板式节点网壳缩尺模型进行了8种实际火灾场景下的火灾试验。试验结果表明,铝合金网壳在各实际火灾场景下均未发生破坏;空间温度场在大空间火灾下分布不均匀,且火源位置和火源功率对结构温度场分布具有较大影响。随后,郭小农等^[115]又对该网壳进行了2次破坏性火灾试验。结果表明,在局部特大功率火灾场景下,网壳发生了局部倒塌;结构部件的破坏模式包括熔化、断裂和弯扭失稳。同时,采用Pyrosim和FDS进行了试验模型的温度场分析,并与试验结果进行了对比,验证了所建立模型的可靠性。

可见,有关铝合金空间结构的整体抗火性能的研究刚刚起步,应类比钢空间结构抗火性能的研究思路,进一步在试验结果的基础上对跨度、矢跨比、

材料热膨胀系数、火源位置和功率等参数进行分析,力求得到铝合金空间结构抗火性能的定量描述。

5 大空间结构性能化防火设计方法

现有结构防火设计规范主要是基于试验和经验制定的“指令式”设计规范,这些规范中对结构各部件的抗火性能有详细的规定。在实际工程中,设计人员根据建筑物的情况按照相应的规定选取结构的设计参数。这种“指令式”规范虽然具有一定的合理性和适用性,然而随着经济的发展,其局限性日益凸显:

(1) 限制了结构个性化的发展。拟建建筑结构(尤其是大空间建筑结构^[116])的个性化特征越来越强,若仍然沿用这种强制性设计方法,难免会限制结构的设计,导致许多新兴的设计理念无法应用。

(2) 忽略了火灾下结构的整体作用。“指令式”规范往往停留在构件设计层面,而单根构件的耐火极限无法代表整体结构的耐火极限,因此这种设计方法也难以体现结构在火灾下的真实受力情况。

(3) 经济性较差。“指令式规范”由于基于试验或工程经验制定,具有一定的普遍性,因此难免对部分区域抗火性能要求过于严格;此外,这种设计方法对结构的防火分区和消防系统等进行了独立考虑,没有考虑其综合作用,也会造成设计的浪费。

“性能化防火设计”是“以性能为基础的防火设计”的简称,是一种新型的个性化消防系统设计方法^[117](见图2)。这种设计方法与传统的“指令式”防火设计不同,它没有明确规定某项解决方案,而是从防火设计总体目标出发,结合建筑物的实际情况,提出结构各部分应达到的功能目标和性能要求,最后进行受火性能分析以得到最佳的解决方案和办法^[42]。李国强^[118]提出性能化防火设计的总体目标为:① 不致因结构破坏影响建筑内人员的逃生及消防人员灭火;② 不致因结构破坏使建筑火灾损失更大。由此可见,性能化防火设计方法较传统指令化防火设计方法更为科学和经济。目前,世界各国均已意识到发展性能化防火设计方法的重要性,部分国家的防火设计规范中也初步融入了性能化设计的理念^[119]。

目前,我国尚未出台以性能化防火设计思想为主导的设计规范,但已经有不少工程技术人员将性

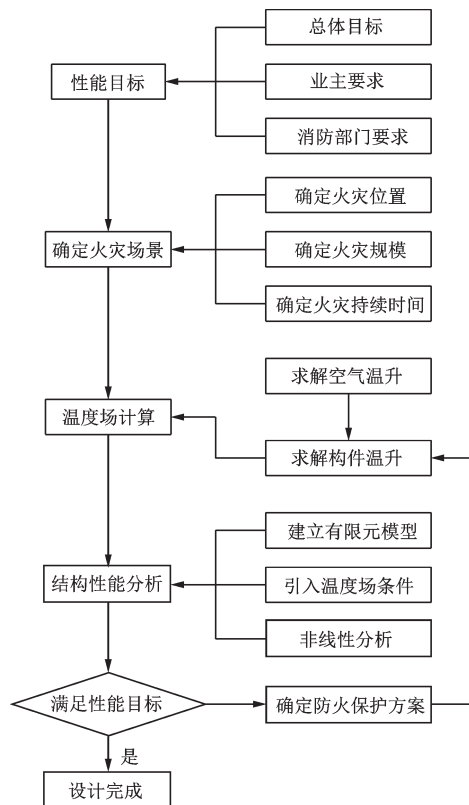


图2 建筑结构性能化防火设计思路

Fig.2 The process of performance-based fire design of building structures

能化设计方法应用于部分重要性较高、结构体系较复杂的大空间钢结构中^[120],如上海南站^[121]、青岛北站^[122]和上海吴淞口国际邮轮码头^[123]等。更有学者基于性能化防火设计思路开发了实用的大空间结构火灾设计程序,如陈适才等^[124]基于性能化防火设计方法和结构抗连续性倒塌设计方法,提出了火灾下大空间网架结构抗倒塌的分析方法,并开发了相应的有限元程序(FireStru)。通过该有限元程序,可进行结构在局部构件破坏后的抗连续性倒塌分析。由此看来,性能化防火设计是结构抗火设计未来的发展趋势。

然而,上述相关研究和实际工程主要是针对大空间钢结构的性能化防火设计。对于大空间铝合金结构,基于性能化防火方面的研究和实际工程基本处于空白状态。

6 结论

总的来说,国内外对铝合金结构常温下的受力性能研究已经较为完善,其成果也体现于各国的设计规范或指南中。现阶段对于铝合金结构的抗火

性能研究还存在以下不足:

(1) 对常见结构用铝合金材料高温蠕变特性的研究匮乏。材料在高温下的蠕变会对结构部件在火灾下的性能产生较大影响。既有研究所针对的铝合金牌号主要集中在航空航天领域,而对常见结构用铝合金材料的蠕变特性,以及高温下蠕变本构关系等方面的研究较为匮乏。

(2) 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。为了计算大空间火灾下空气温度场的分布,不少学者基于理论推导得出了实用的经验公式。然而其主要考虑的参数有火源功率、建筑高度和面积等,尚未考虑通风情况等因素的影响。

(3) 尚未形成对铝合金空间结构抗火性能的定量化描述。国内针对铝合金空间结构的火灾试验已经完成,且建立数值模型并进行了初步分析。然而,尚需进一步对试验结果进行分析,并给出如极限耐火时间和临界温度等结构抗火性能参数定量描述指标。

(4) 尚未进行铝合金结构抗火设计方法的研究。目前,国内对铝合金结构抗火设计方法的研究主要停留在构件层面,且尚未形成铝合金结构的抗火设计规范。随着性能化防火设计思想的应用,有必要在研究大空间铝合金结构抗火性能的基础上,提出其性能化防火设计方法,为相关规范的编制提供理论基础。

参考文献:

- [1] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状综述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):100-109.
Shen Z Y, Guo X N, Li Y Q. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):100-109. (in Chinese)
- [2] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):110-117.
Guo X N, Shen Z Y, Li Y Q, et al. Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):110-117. (in Chinese)
- [3] Maljaars J, Twilt L, Fellingner J, et al. Aluminium structures exposed to fire conditions - An overview[J]. Heron, 2010, 55(2):85-122.
- [4] Design of aluminum alloy structures - Part 1-2: Structural fire design: EN1999-1-2 Eurocode 9 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2007.
- [5] Kaufman J G. Properties of aluminum alloys: Tensile, creep, and fatigue data at high and low temperatures [M]. Ohio: ASM International, 1999.
- [6] Martin W R, Weir J R. Mechanical properties of x8001 and 6061 aluminum alloys and aluminum-base fuel dispersion at elevated temperatures [R]. [S.l.]: Office of Scientific & Technical Information, 1964.
- [7] Maljaars J, Soetens F, Snijder H H. Local buckling of aluminium structures exposed to fire. Part 1: Tests[J]. Steel Construction, 2009, 47(11):1404-1417.
- [8] 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.
Peng H, Jiang Sh Ch, Zhao Y Y. Experimental study on the mechanical property of structural Al-alloy at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7):46-49. (in Chinese)
- [9] 郭小农,高志朋,朱劲骏,等. 国产结构用铝合金高温力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(7):20-28.
Guo X N, Gao Zh P, Zhu Sh J, et al. Experimental research on mechanical property of domestic structural aluminum alloy at elevated temperatures[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(7):20-28. (in Chinese)
- [10] Aluminum design manual ADM 2015 [S]. Washington D C: Aluminum Association, 2005.
- [11] 铝合金格构结构技术标准(报批稿): DG-TJ-08-95-20XX [S]. 上海: [s.n.], 2020.
Technical specification for aluminum alloy reticulated structures: DG-TJ-08-95-20** (draft for approval) [S]. Shanghai: [s.n.], 2020. (in Chinese)
- [12] Chen Zh H, Lu J, Liu H B. Experimental investigation on the post-fire mechanical properties of structural aluminum alloys 6061-T6 and 7075-T73 [J]. Thin-Walled Structures, 2016, 106:187-200.
- [13] Liu Y, Liu H B, Chen Zh H. Post-fire mechanical properties of aluminum alloy 6082-T6 [J]. Construction and Building Materials, 2019, 196:256-266.
- [14] Maljaars J, Soetens F, Katgerman L. Constitutive model for aluminum alloys exposed to fire conditions [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2008, 39(4):778-789.
- [15] Dorn J E. Some fundamental experiments on high temperature creep [J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 1955, 3(2):85-116.

- [16] Harmathy T Z. A Comprehensive creep model[J]. Journal of Fluids Engineering, 1967, 89(3): 496-502.
- [17] 王 萌, 湛利华, 李文科, 等. 2219 铝合金蠕变时效研究及宏微观本构建模[J]. 热加工工艺, 2017, 46(6): 221-225.
Wang M, Zhan L H, Li W K, et al. Creep aging research and macro and micro constitutive modelling of 2219 aluminum alloy [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(6):221-225. (in Chinese)
- [18] 王新建. 2024T4 铝合金蠕变本构关系研究[J]. 航空精密制造技术, 2017, 53(3):26-29.
Wang X J. A creep constitutive equation for 2024T4 aluminium alloy [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2017, 53(3):26-29. (in Chinese)
- [19] 韦 韡, 蒋 鹏, 曹 飞. 6082 铝合金的高温本构关系[J]. 塑性工程学报, 2013, 20(2):100-106.
Wei W, Jiang P, Cao F. Constitutive equations for hot deformation of 6082 aluminum alloy[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20(2):100-106. (in Chinese)
- [20] 付秀丽, 艾 兴, 万 熠, 等. 铝合金 7050 高温流变应力特征及本构方程[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(12):113-116.
Fu X L, Ai X, Wan Y, et al. Flow stress characteristics and constitutive equation at high temperature for 7050 aluminum alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(12):113-116. (in Chinese)
- [21] 王孟君, 杨立斌, 甘春雷, 等. 6063 铝合金高温流变本构方程[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6):20-22.
Wang M J, Yang L B, Gan Ch L, et al. Constitutive equation of the flow for 6063 aluminium alloy at elevated temperature [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science), 2003, 31(6):20-22. (in Chinese)
- [22] 黄光杰, 朱清洋, 黄本多. 3104 铝合金高温塑性变形本构关系研究[J]. 材料导报, 2006, 20(增 2): 460-462.
Huang G J, Zhu Q Y, Huang B D. Research on constitutive relationship of 3104 aluminum alloy during plastic deformation in high temperature [J]. Materials Review, 2006, 20(Sup 2):460-462. (in Chinese)
- [23] 赵培峰, 任广升, 沈 智, 等. 6061 铝合金热压缩变形条件对流变应力的影响及其本构方程的研究[J]. 塑性工程学报, 2007, 14(6):130-133.
Zhao P F, Ren G Sh, Shen Zh, et al. Influence of hot compressive deformation conditions of 6061 aluminum alloy on flow stress and research on its constitutive equation [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(6):130-133. (in Chinese)
- [24] 林高用, 张 辉, 郭武超, 等. 7075 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(3): 412-415.
Lin G Y, Zhang H, Guo W Ch, et al. Flow stress of 7075 aluminum alloy during hot compression deformation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(3):412-415. (in Chinese)
- [25] 盈 亮, 戴明华, 胡 平, 等. 6061-T6 铝合金高温本构模型及温成形数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(7):1 815-1 821.
Ying L, Dai M H, Hu P, et al. Thermal constitutive model and numerical simulation of hot forming for 6061-T6 aluminum alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(7):1 815-1 821. (in Chinese)
- [26] Suzuki J I, Ohmiya Y, Wakamatsu T, et al. Evaluation of fire resistance of aluminum alloy members [J]. Fire Science & Technology, 2005, 24(4):237-255.
- [27] Maljaars J, Soetens F, Snijder H H. Local buckling of aluminium structures exposed to fire : Part 2: Finite element models [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(11):1 418-1 428.
- [28] Maljaars J, Twilt L, Soetens F. Flexural buckling of fire exposed aluminium columns [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(5):711-717.
- [29] Liu M, Chang Y C, Wang P J, et al. Buckling behaviors of thin-walled aluminum alloy column with irregular-shaped cross section under axial compression in a fire [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 98:230-243.
- [30] Jiang Sh Ch, Xiong Z, Guo X N, et al. Buckling behaviour of aluminium alloy columns under fire conditions [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 124:523-537.
- [31] 郭小农, 黄玮嘉, 楼政权, 等. 6061-T6 铝合金柱高温轴压承载性能数值研究[C]// 第十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2016:1 500-1 509.
Guo X N, Huang W J, Lou Zh Q, et al. Numerical research on bearing capacity of 6061-t6 aluminum alloy columns under axial compression at elevated temperatures [C]// Proceedings of the 16th National Conference on Modern Structural Engineering. Tianjin: Academic Committee of The National Symposium on Modern Structural Engineering, 2016:1 500-1 509. (in Chinese)
- [32] 蒋首超, 毛 龙, 何志力. 高温下铝合金轴心受压构件试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(16):93-96.
Jiang Sh Ch, Mao L, He Zh L. Experimental research on axially loaded aluminum members at elevated temperatures [J]. Building Structure, 2013, 43(16):93-96.

- (in Chinese)
- [33] 刘梅, 常煜存, 刘昌斌. 高温下异形截面薄壁铝合金轴压构件局部畸变屈曲耦合分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(3):380-385.
Liu M, Chang Y C, Liu Ch B. Local-distortional interactive buckling of thin-walled aluminum alloy axial compression member with irregular-shaped cross section at elevated temperatures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(3) : 380-385. (in Chinese)
- [34] 时文丽. 铝合金受弯构件抗火性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
Shi W L. Experimental study on fire resistance of aluminum alloy bending members[D]. Shanghai: Tongji University, 2015. (in Chinese)
- [35] 黄力才, 蒋首超. 高温下铝合金受弯构件弯扭稳定承载力研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(1):57-62.
Huang L C, Jiang Sh Ch. Research on lateral-torsional buckling resistance of aluminum beams in fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(1):57-62. (in Chinese)
- [36] 林维春. 高温下铝合金构件极限承载力实用计算方法[D]. 上海: 同济大学, 2016.
Lin W Ch. Practical calculation method of ultimate bearing capacity of aluminum alloy members at high temperature[D]. Shanghai: Tongji University, 2016. (in Chinese)
- [37] 韩川. 铝合金偏压构件抗火性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
Han Ch. Experimental research on structural behavior of aluminum alloy members at elevated temperature [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese)
- [38] 黄玮嘉. 铝合金偏压构件高温承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.
Huang W J. Research on bearing capacity of aluminum alloy members under eccentric compression at elevated temperatures[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)
- [39] 郭小农, 王昆, 楼政权, 等. 铝合金板式节点高温承载性能数值模拟[C]// 十六届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2016:296-302.
Guo X N, Wang K, Lou Zh Q, et al. Numerical research on bearing capacity of aluminum alloy gusset joints at elevated temperatures[C]// Proceedings of the 16th National Conference on Modern Structural Engineering, Tianjin: Academic Committee of The National Symposium on Modern Structural Engineering, 2016: 296-302.(in Chinese)
- [40] Guo X N, Zhu Sh 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.
- [41] Guo X N, Xiong Z, Luo Y F, et al. Application of the component method to aluminum alloy gusset joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(11) : 1 931-1 946.
- [42] 李国强. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Li G Q. Fire resistance design of steel structure and steel-concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [43] 马忠诚. 火灾后钢筋混凝土结构损伤评估与抗震修复[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1997.
Ma Zh Ch. Evaluation and seismic repair of reinforced concrete structure after fire [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997. (in Chinese)
- [44] ASCE. Manuals and reports on engineering practice No.78, structural fire protection[M]. New York:[s.n.], 1992.
- [45] Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire: EN1991-1-2 Eurocode 1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.
- [46] ISO 834-1: Fire-resistance tests-elements of building construction, Part 1: General requirements[S]. Geneva: International Standard Organization, 1999.
- [47] Zukoski E E, Kubota T, Cetegen B. Entrainment in fire plumes [J]. Fire Safety Journal, 1981, 3(3) : 107-121.
- [48] Thomas P H, Hinkley P L, Theobald C R, et al. Investigations into the flow of hot gases in roof venting[M]. London: The Stationary Office, 1963.
- [49] Jones W W, Forney G P, Peacock R D, et al. Technical Reference for CFAST: an engineering tool for estimating fire and smoke transport (NIST TN 1431)[R]. Gaithersburg: Building and Fire Research Laboratory, NIST TN 1431, 2000.
- [50] 程远平, 陈亮, 张孟君. 火灾过程中羽流模型及其评价[J]. 火灾科学, 2002, 11(3):132-136.
Cheng Y P, Chen L, Zhang M J. The analysis and estimation of the plume models in the development of fires [J]. Fire Safety Science, 2002, 11(3) : 132-136. (in Chinese)
- [51] 杜咏, 李国强, 黄珺倩. 大空间建筑火灾中烟气温度计算模型比较[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6):

- 99-103.
- Du Y, Li G Q, Huang Y Q. Comparison of calculation models for smoke temperature in fire of large space[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6):99-103. (in Chinese)
- [52] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Yang Sh M, Tao W Sh. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [53] 李国强, 杜咏. 大空间建筑顶部火灾空气升温的参数分析[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(1):19-22.
- Li G Q, Du Y. Analyses the parameters of fire temperature elevation at the top of large space buildings [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(1):19-22 (in Chinese)
- [54] 白音, 石永久, 王元清. 火灾下大空间结构温度场的数值模拟分析[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(1):34-38.
- Bai Y, Shi Y J, Wang Y Q. Numerical simulation analysis on temperture field for large-space structures under fire[J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(1):34-38. (in Chinese)
- [55] 袁铁柱, 王江飞. 大空间火灾温度场分布研究[C]//庆贺刘锡良教授执教六十周年暨第十一届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 天津: 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会, 2011:1 438-1 443.
- Yuan T Zh, Wang J F. Study on temperature field distribution of large space fire[C]// Proceedings of the 11th National Conference on Modern Structural Engineering, Tianjin: Academic Committee of The National Symposium on Modern Structural Engineering, 2011: 1 438-1 443.(in Chinese)
- [56] 白音, 杨海勇, 石永久, 等. 大空间结构各种火灾场景下的温度场分布[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(8):1 122-1 127.
- Bai Y, Yang H Y, Shi Y J, et al. Temperature field distribution of large-space structures under various fire scenarios [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2011, 51(8):1 122-1 127. (in Chinese)
- [57] 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.
- Yu Zh Ch, Zhu G Q, Zhang G W. Influence of building height on large space temperature field[J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(7):903-905,916. (in Chinese)
- [58] 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.
- Li G Q, Du Y. Utility temperature elevation empirical formula in large space fire [J]. Fire Science and Technology, 2005, 24(3):283-287. (in Chinese)
- [59] 梁劲, 薛素铎, 李雄彦. 考虑圆弧形壁面影响的大空间建筑火灾空气升温经验公式[J]. 工业建筑, 2012, 42(7):91-94.
- Liang J, Xue S D, Li X Y. Air temperature empirical formula for large space structure under fire considering the effect of circular wall [J]. Industrial Construction, 2012, 42(7):91-94. (in Chinese)
- [60] 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 S D, Liang J, Li X Y. 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)
- [61] 梁劲. 考虑烟气排放的大空间建筑火灾空气升温特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- Liang J. The research on the characteristics of air temperature of large space structures in fire considering the effect of smoke emission [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [62] 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(1):1-12.
- [63] 建筑钢结构防火技术规范: CECS 200—2006 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- Technical code for fire safety of steel structure in buildings: CECS200—2006 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese)
- [64] 建筑钢结构防火技术规范: GB51249—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- Technical code for fire safety of steel structure in buildings: GB51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [65] 于志超, 朱国庆, 田承飞. 大空间温度场预测模型与实验分析[J]. 消防科学与技术, 2016, 35(10):1 372-1 375.
- Yu Zh Ch, Zhu G Q, Tian Ch F. Large space temperature field prediction model and experimental analysis [J]. Fire Science and Technology, 2016, 35(10):1 372-1 375. (in Chinese)
- [66] 丁军, 李国强, 蒋首超. 火灾下钢结构构件的温度分析[J]. 钢结构, 2002, 17(2):53-56.
- Ding J, Li G Q, Jiang Sh Ch. Analysis of temperature

- response of steel structural members exposed to fire[J]. Steel Construction, 2002, 17(2):53-56. (in Chinese)
- [67] 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 C L, Huo R, Li Y Zh, et al. Modeling study of steel elements submitted to real compartment fires[J]. Engineering Science, 2003, 5(12):66-72. (in Chinese)
- [68] Zhang Ch, Usmani A. Heat transfer principles in thermal calculation of structures in fire[J]. Fire Safety Journal, 2015, 78:85-95.
- [69] Ghojel J I. A new approach to modeling heat transfer in compartment fires [J]. Fire Safety Journal, 1998, 31(3):227-237.
- [70] Dwaikat M M S, Kodur V K R. A simplified approach for predicting temperature profile in steel members with locally damaged fire protection [J]. Fire Technology, 2012, 48(2):493-512.
- [71] Ghojel J I, Wong M B. Heat transfer model for unprotected steel members in a standard compartment fire with participating medium[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(6):825-833.
- [72] Gardner L, Ng K T. Temperature development in structural stainless steel sections exposed to fire [J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(3):185-203.
- [73] 邢君, 杨斌. 钢构件升温计算方法对比分析[J]. 消防科学与技术, 2011, 30(8):664-667.
Xing J, Yang B. Comparative analysis of calculation method for temperature elevation of steel member [J]. Fire Science and Technology, 2011, 30(8):664-667. (in Chinese)
- [74] Design of steel structures - Part 1-2: Structural fire design: EN1993-1-2 Eurocode 3[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [75] 黄珏倩. 平面大空间钢结构抗火研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Huang Y Q. Study on fire resistance of large space steel structure [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [76] 张超, 李国强. 基于FDS模拟分析的建筑大空间火灾下钢构件的升温确定方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(增1):72-75.
Zhang Ch, Li G Q. Study on the method of determining the temperature rise of steel components in large space fire based on FDS [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(Sup 1):72-75. (in Chinese)
- [77] 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 Y, Li G Q. 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)
- [78] 杜咏. 大空间建筑网架结构实用抗火设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Du Y. A practical method of fire-resistant design for large space buildings [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [79] 杜咏, 李国强. 大空间建筑火灾中火焰辐射对无保护钢构件升温的影响[J]. 火灾科学, 2006, 15(4):189-199.
Du Y, Li G Q. Fire radiation effect on steel member at elevated temperature in large space fire [J]. Fire Safety Science, 2006, 15(4):189-199. (in Chinese)
- [80] 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.
Du Y, Li G Q. 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. (in Chinese)
- [81] 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.
Huang Y Q, Li G Q, Du Y, 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. (in Chinese)
- [82] 张国维, 朱国庆, 王晓岚, 等. 基于区域模型的单层高大空间建筑钢构件温升计算[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(12):1043-1046.
Zhang G W, Zhu G Q, Wang X L, et al. The calculation of steel temperature rise in the large-space building based on the regional model [J]. Fire Science and Technology, 2010, 29(12):1043-1046. (in Chinese)
- [83] 张国维, 朱国庆, 黄丽丽. 大空间建筑火场钢构件升温实验与理论模型[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(3):370-374.
Zhang G W, Zhu G Q, Huang L L. Experiment and theoretical model for the temperature development in steel members exposed to fire in the large space building [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(3):370-374. (in Chinese)
- [84] 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 G W, Zhu G Q, Yuan G L, 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)
- [85] Zhang G W, Zhu G Q, Huang L L. Temperature development in steel members exposed to localized fire in large enclosure [J]. Safety Science, 2014, 62(1):319-325.
- [86] 郑永乾, 陈志波, 张 铮. 火灾下铝合金方管柱的升温[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(9):991-994.
- Zheng Y Q, Chen Zh B, Zhang Zh. Temperature rises of square aluminium alloy tubular columns in fire [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(9):991-994. (in Chinese)
- [87] 郭小农, 陈 晨, 朱劲骏, 等. 大空间火灾下铝合金结构部件温升计算方法 [J]. 建筑结构学报, doi: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0876.
- Guo X N, Chen Ch, Zhu Sh J, et al. Calculation method of temperature rise of aluminum alloy structural components in large-space fires [J]. Journal of Building Structures, doi: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0876. (in Chinese)
- [88] 赵金城, 沈祖炎. 局部火灾下钢框架结构整体性能的非线性分析[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(4):30-36.
- Zhao J Ch, Shen Z Y. Nonlinear analysis of the whole performance of steel frame structure under local fire [J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(4):30-36. (in Chinese)
- [89] 蒋首超, 李国强, 叶绮玲. 火灾下钢框架结构非线性反应分析与试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(8):66-69.
- Jiang Sh Ch, Li G Q, Ye Q L. Theoretical and experimental research on nonlinear behavior of steel frames subjected to fire [J]. Industrial Construction, 2004, 34(8):66-69. (in Chinese)
- [90] 董毓利. 两层两跨组合钢框架抗火性能的试验研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(3):37-50.
- Dong Sh L, Experimental study on performance of 2-storey and 2-bay composite steel frames subjected to fire [J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(3):37-50. (in Chinese)
- [91] 吕俊利, 董毓利, 杨志年, 等. 钢框架边跨梁抗火性能试验研究和理论分析 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9):92-98.
- Lyu J L, Dong Sh L, Yang Zh N, et al. Experimental and analytical studies on performance of edge beams of steel framed building subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9):92-98. (in Chinese)
- [92] 吕俊利, 董毓利, 杨志年. 整体结构中两跨钢梁火灾变形性能的试验研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(3):110-114.
- Lyu J L, Dong Sh L, Yang Zh N. Experimental study on the deformation of a two-span steel beam in a structural system [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3):110-114. (in Chinese)
- [93] 王 勇, 董毓利, 彭普维, 等. 足尺钢框架结构中楼板受火试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8):1-11.
- Wang Y, Dong Sh L, Peng P W, et al. Fire test on floor of full-scale steel-framed structure [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8):1-11. (in Chinese)
- [94] Wang Y C, Lennon T, Moore D B. The behaviour of steel frames subject to fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 35(3):291-322.
- [95] Franssen J M, Cooke G M E, Latham D J. Numerical simulation of a full scale fire test on a loaded steel framework [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 35(3):377-408.
- [96] Bailey C G, Moore D B. The behaviour of full-scale steel framed buildings subject to compartment fires [J]. Structural Engineer, 1999, 77(8):15-21.
- [97] Wang Y C. An analysis of the global structural behaviour of the Cardington steel-framed building during the two BRE fire tests [J]. Engineering Structures, 2000, 22(5):401-412.
- [98] Gillie M, Usmani A S, Rotter J M. A structural analysis of the first Cardington test [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(6):581-601.
- [99] 陈 波, 郑 瑾, 岳 磊. 网壳结构火灾反应非线性有限元分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(6):69-72.
- Chen B, Zheng J, Yue L. Nonlinear finite element analysis of a reticulated shell subjected to a fire [J]. Journal of Wuhan University of technology, 2007, 29(6):69-72. (in Chinese)
- [100] 殷志祥, 张晶晶. 大跨度空间网壳结构抗火反应分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(增1):65-67.
- Yin Zh X, Zhang J J. Analysis of large-span space truss dome fire resistant response [J]. Journal of Liaoning Technology University (Natural Science Edition), 2008, 27(Sup 1):65-67. (in Chinese)
- [101] 张 艳, 陈 波. 施威德勒型单层球面网壳结构抗火的非线性有限元分析 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2008, 29(5):42-44.
- Zhang Y, Chen B. Nonlinear finite element analysis of

- fire resistance for schwedler single spherical steel truss dome [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2008, 29(5): 42-44. (in Chinese)
- [102]刘明友,王海忠.单层球面网壳结构的抗火性能研究[J].工程建设,2009,41(1):10-13.
Liu M Y, Wang H Zh. Study on fire resistance performance of single layer spherical reticulated shell structure [J]. Engineering Construction, 2009, 41(1): 10-13. (in Chinese)
- [103]韩庆华,陈鑫,张坤.非均匀温度场下双层网壳的抗火反应分析[C]//庆祝刘锡良教授八十华诞暨第八届全国现代结构工程学术研讨会,天津:全国现代结构工程学术研讨会学术委员会,2008:873-879.
Han Q H, Chen X, Zhang K. Analysis of fire resistance of double layer reticulated shell under non-uniform temperature field[C]// Proceedings of the 8th National Conference on Modern Structural Engineering, Tianjin: Academic Committee of The National Symposium on Modern Structural Engineering, 2008:873-879.(in Chinese)
- [104]陈鑫.双层网壳结构抗火性能数值分析[J].消防科学与技术,2012,31(7):691-695.
Chen X. Numerical analysis on fire resistance behavior of the double-layer grid shell structure[J]. Fire Science and Technology, 2012, 31(7):691-695. (in Chinese)
- [105]周明,王新堂,俞锋波.柱面弦支网壳预应力钢结构的火灾响应数值分析[J].空间结构,2012,18(1):51-57.
Zhou M, Wang X T, Yu F B. Numerical analysis of fire response of the pre-stressed suspend-reticulated cylindrical shells[J]. Spatial Structures, 2012, 18(1):51-57. (in Chinese)
- [106]邱林波,薛素铎.火灾作用下单层球面网壳的非线性有限元分析[J].防灾减灾工程学报,2010,30(5):533-537.
Qiu L B, Xue S D. Nonlinear finite element analysis of single layer reticulated dome under fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(5):533-537. (in Chinese)
- [107]薛素铎,邱林波,李雄彦,等.火灾作用下单层球面网壳结构的整体性能分析[J].北京工业大学学报,2012,38(4):488-491.
Xue S D, Qiu L B, Li X Y, et al. Overall performance analysis of single layer reticulated dome under fire [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4):488-491. (in Chinese)
- [108]梅冰辉.施威德勒网壳和凯威特网壳结构抗火屈曲分析[J].低温建筑技术,2011,33(7):25-27.
Mei B H. Analysis of fire buckling of schweidler reticulated shell and kevit reticulated shell [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(7):25-27. (in Chinese)
- [109]薛素铎,王广勇.凯维特单层球面网壳抗火性能研究[J].工业建筑,2008(增1):452-454.
Xue S D, Wang G Y. Behavior of a single layer spherical kevit lattice and shell at elevated temperatures [J]. Industrial Construction, 2008 (Sup 1): 452-454. (in Chinese)
- [110]王娜,薛素铎,李雄彦,等.火灾下单层球面网壳的耐火极限分析[C]//第十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集,天津,全国现代结构工程学术研讨会学术委员会,2013:328-335.
Wang N, Xue S D, Li X Y, et al. Analysis of fire resistance limit of single layer spherical reticulated shell in fire [C]// Proceedings of the 13th National Conference on Modern Structural Engineering, Tianjin: Academic Committee of The National Symposium on Modern Structural Engineering, 2013:328-335.(in Chinese)
- [111]白音,翟建磊,石永久,等.单层网壳在高温状态下的整体稳定承载力分析[J].中国科学:技术科学,2013,43(3):291-297.
Bai Y, Zhai J L, Shi Y J, et al. Analysis of overall stability bearing capacity of single-layer shell structures under high temperature condition [J]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(3):291-297. (in Chinese)
- [112]白音,石永久,王元清.火灾下K8型单层网壳弹塑性稳定承载力计算[J].北京工业大学学报,2011,37(3):381-387.
Bai Y, Shi Y J, Wang Y Q. Elasto-plastic stability bearing capacity calculation for k8 single-layer reticulated shells under fire conditions [J]. Beijing University of Technology, 2011, 37(3):381-387. (in Chinese)
- [113]郭胜,赵金城,史健勇.火灾下凯威特单层球面网壳非线性分析[J].钢结构,2012,27(5):70-75.
Guo Sh, Zhao J Ch, Shi J Y. Nonlinear analysis of Kiewitt single layer latticed dome in fire [J]. Steel Construction, 2012, 27(5):70-75. (in Chinese)
- [114]郭小农,陈晨,朱劭骏,等.铝合金板式节点网壳火灾响应试验研究[J].建筑结构学报,doi: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0814.
Guo X N, Chen Ch, Zhu Sh J, et al. Experimental study on the fire response of aluminum alloy shells with gusset joints [J]. Journal of Building Structures, doi: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0814.(in Chinese)
- [115]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, doi: 10.14006/j. jzjgxb.2019.0815.

Guo X N, Chen Ch, Zhu Sh J, et al. Experimental study on the fire-induced collapse of single-layer aluminum alloy reticulated shells with gusset joints[J]. Journal of Building Structures, doi: 10.14006/j. jzjgxb. 2019.0815. (in Chinese)

[116]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.

Shi J Y, Sun X, Liu W L, et al. Study of performance-based fire resistance design methodology for large space structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5):69-78. (in Chinese)

[117]Meacham B J, Custer R L P. Performance-based fire safety engineering: an introduction of basic concepts [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 1995, 7(2):35-53.

[118]李国强. 性能化钢结构抗火设计[C]// 工程力学学术研讨会论文集, 北京: 中国力学学会, 2004:109-119.

Li G Q. Performance-based fire-resistant design of steel structure[C]// Proceedings of the Symposium on Engineering Mechanics, Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2004:109-119. (in Chinese)

[119]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.

Shi Y J, Bai Y, Wang Y Q. Studies on performance-based fire-resisting design method for large-space structures[J]. Spatial Structures, 2005, 11(4):16-20. (in Chinese)

[120]史健勇. 我国大空间钢结构性能化防火设计的现状与发展[C]//中国科协年会论文集(四), 北京: 中国科学

技术协会, 2007:610-617.

Shi J Y. Current situation and development of performance-based fire protection design for large space steel structures in China [C] // Proceedings of the Annual Meeting of The China Association for Science and Technology(No.4), Beijing:China Association for Science and Technology, 2007:610-617.(in Chinese)

[121]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 G Q, Guo Sh X, Jiang Sh Ch, 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)

[122]张相勇, 尧金金, 牟在根. 青岛北站主站房性能化抗火设计研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(增1):816-820.

Zhang X Y, Yao J J, Mu Z G. Performance-based design for the fire-resistance of Qingdao North Station main station building[J]. 2011, 41(Sup 1):816-820. (in Chinese)

[123]殷颖智. 上海吴淞口国际邮轮码头钢结构抗火设计[J]. 建筑钢结构进展, 2011, 13(3):15-19.

Yin Y Zh. Structural fire engineering design for Shanghai Wusong Cruise Terminal [J]. Progress in Steel Building Structures, 2011, 13(3):15-19. (in Chinese)

[124]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(7):85-88.

Chen Sh C, Ren A Zh, Tang F Q, et al. Performance-based anti-collapse analysis of the large-space steel lattice truss structure under fire [J]. Steel Construction, 2007, 22(7):85-88. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)



(上接第 267 页)

Yang J H, Tang X F, Zhang J S, et al. Analysis on water and soil gushing accident occurred in deep mine air returning shaft during freezing construction[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3):26-32. (in Chinese)

[22]夏才初, 李强, 吕志涛, 等. 各向均匀与单向冻结条件下饱和岩石冻胀变形特性对比试验研究[J]. 岩石力学

与工程学报, 2018, 37(2):274-281.

Xia C Ch, Li Q, Lyu Zh T, et al. Comparative experimental study on frost deformation characteristics of saturated rock under uniform freezing and uni-directional freezing conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2):274-281. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)