

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.021

结构抗火混合试验方法的研究进展*

蔡新江, 毛小勇, 田石柱

(苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011)

摘要: 基于构件标准试验的抗火试验方法很难考虑非受火构件对受火构件的约束效应,也难以反映受火构件对整体结构抗火性能的影响,而正在兴起的抗火混合试验方法是解决上述问题的一条重要途径。本文首先简述传统结构抗火试验方法及其面临的问题,进一步阐述了抗震混合试验与抗火混合试验的关系,然后从试验流程原理、典型试验装置及对应力学边界条件、试验子结构选取与数据交换、不同试验方法的结果对比等方面较为系统地介绍了第一代抗火混合试验,并简要介绍了正在进行的第二代抗火混合试验系统及其特点,最后总结了抗火混合试验中有待进一步深入研究的几个关键科学问题。

关键词: 结构抗火; 试验方法; 混合试验; 研究进展

中图分类号: TU352.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0309-08

Research Progress of Structure Hybrid Fire Testing Method

CAI Xinjiang, MAO Xiaoyong, TIAN Shizhu

(School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Fire test method based on the standard is difficult to consider the restraining effect of the surrounding unfired components on the fired components, and it is also difficult to reflect the influence of the fired components on the fire resistance performance of the overall structure. The emerging hybrid fire testing may be an important way to solve the above problems. This paper first briefly describes the traditional structural fire resistance test methods and their defects, and further expounds the relationship between the hybrid seismic testing and the hybrid fire testing. Secondly, the first generation hybrid fire test method is systematically introduced from the aspects of the test process and principle, typical test equipment and corresponding mechanical boundary conditions, physical substructure selection and data exchange, and the comparison of results from different test methods. Then the second-generation hybrid fire testing system and its characteristics are introduced briefly. Finally, several key scientific issues to be further studied in the hybrid fire testing are summarized.

Keywords: fire resistance of structures; testing method; hybrid testing; hybrid fire testing; research progress

* 收稿日期:2019-02-12;修回日期:2019-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51778395);江苏省自然科学基金(BK20171221);江苏高校“青蓝工程”(2018);江苏省“333工程”(2018)资助

作者简介:蔡新江(1981-),男,副教授,博士,硕导。主要从事抗震抗火混合试验研究。Email:caixinjiang@usts.edu.cn

引言

近年来火灾频繁发生,导致学术界对结构抗火设计越来越重视。结构抗火设计,可归结为通过设计一定的防火保护措施,使结构在承受确定外荷载条件下,满足对应的结构耐火时间要求。抗火研究可分为材料、构件和结构三个层次,其中构件的耐火极限往往通过进行一系列的标准耐火试验来确定。构件标准耐火试验通常无法完全反映构件在实际火灾下的真实反应,试验所得的耐火极限与构件在真实火灾下的耐火时间也并没有必然联系,但基于构件的标准耐火试验仍可为工程应用提供一个衡量构件耐火性能的基本度量,同时也为试验数数据库的积累以及共享试验结果创造条件。

目前,国内外相关科研机构建立了一批基于构件的结构抗火试验装置,但大多数装置均为固定力学边界条件,一般难以反映构件在整体结构中的真实火灾反应,导致传统抗火试验方法存在一定局限性。本文简述目前国外正在兴起的抗火混合试验方法,该方法既可以研究区域火灾下整体结构的抗火性能,又可以评估与相邻构件交互作用下的单独构件抗火能力,有效利用现有抗火试验设备以较低成本实现更高可靠性的整体结构抗火分析。

1 基于构件标准试验的抗火试验方法

结构抗火试验方法最早出现于17世纪90年代,中国以ISO834为基础颁布了第一版《建筑构件耐火试验方法》(GB/T 9978)^[1],提出以标准升温曲线为试验条件,测试构件承载力失效时的耐火时间并以此确定构件的耐火能力,由此判断是否满足规定的耐火极限,方法简单明确,但成本较高。以钢筋混凝土柱构件为例,混凝土强度、钢筋种类及强度、截面尺寸、荷载比、保护层厚度、约束条件、防火材料等均为耐火极限的影响因素,想要完全掌握构件的抗火性能,需要进行较多数量的抗火试验,目前主要采用现代计算方法进行数值模拟来弥补传统试验方法的不足,并且正向性能化方向发展。

目前大部分抗火试验装置主要针对构件进行抗火试验,其做法是将构件置于火灾试验炉中进行高温加载,但力学边界条件保持恒定不变,并且常

规抗火试验装置试件上下端均为铰接或固接等固定边界条件,存在以下两个问题:

(1)固定边界条件对受火构件的影响。受火构件会发生热膨胀,这种热膨胀效应会受到周围非受火部分的约束,使得构件自身产生附加热内力,目前的常规抗火试验中一般采用恒定荷载的固定边界条件,未能考虑周围非受火部分对受火构件的影响,试验结果与真实结果相比存在一定的误差。

(2)固定边界条件对非受火部分的影响。受火构件高温作用下力学性能会产生退化,对周围非受火部分会产生一定影响,即导致整体结构各构件之间产生内力重分布,目前大部分抗火试验仅针对构件进行抗火试验,很少考虑受火部分对非受火部分的影响。

2 基于混合模拟的抗火试验方法

混合模拟(Hybrid Simulation)或混合试验(Hybrid Testing)被学术界公认为是一种模拟“尺度和复杂性超出现有实验室设备能力情况下”结构动态反应的有效手段,目前主要应用于结构抗震试验领域,其思想来源于子结构拟动力试验,将整体结构划分为两部分,具有强烈非线性反应或者缺乏精确及可靠计算模型的部分制作试件在实验室进行真实试验,称为试验子结构;其余部分利用有限元分析软件进行数值模拟,称为数值子结构;试验子结构和数值子结构之间通过边界条件和数据交换来满足动力方程的力学平衡和位移协调^[2-7]。

与地震作用不同,很多火灾仅仅发生在结构局部,结构破坏也往往集中在受火最严重的局部构件,取此局部构件放置在火灾炉里进行高温试验,其余部分进行数值模拟,两者通过数据交换可以满足边界条件的力学平衡和位移协调,因此区域火灾情况下可能更能体现出混合试验的优势所在。与抗震混合试验相比,抗火混合试验具有以下差异:与地震下结构动态反应相比,火灾下结构热力学反应是一种静态反应;试验子结构往往需要采用足尺模型才能反映出温度场的梯度变化;试件温度场分布随时间发生变化,因此需要进行实时试验才能真实反映结构的热力学特性;试验子结构需要放置在火灾炉中进行试验,仅能采用耐高温传感器对其少量特定部位进行量测。

3 第一代抗火混合试验

3.1 试验流程原理

M. Korzen 等^[8-11]最早基于子结构方法考虑了高温约束效应对构件力学性能的影响,试验子结构为单柱,计算子结构定义为一个恒定矩阵,界面边界条件简化为轴向单自由度,初步实现了第一个位移控制的抗火混合试验;F. Robert 等^[12]以单层多跨连续预应力混凝土板为整体结构进行了三自由度抗火混合试验,其中试验子结构为单跨板,数值子结构通过预先设定的矩阵来模拟,界面边界条件控制的是板的轴向拉伸和两端弯曲三个自由度;针对多层框架结构,H. Mostafaei^[13-14]分别以底层柱和其余层任意柱为试验子结构阐述了力学平衡和边界协调的实现条件,考虑到常规抗火试验中“试件底端需固定”以及“仅能在试件顶端施加水平力和竖向力”两个符合实际的边界条件,利用结构力学中荷载-位移矩阵关系,依据剪力等效的原则,采用增加等效水平位移的方法来弥补弯曲效应,以此来模拟周围构件对受火构件的约束;王震等^[15]针对试验子结构和数值子结构数据交换路径、混合试验步骤等进行了阐述,并基于四层三跨平面钢框架进行了混合试验数值仿真,验证了抗火混合试验方法的准确性。

3.2 典型试验装置及对应力学边界条件

德国科研机构 BAM 和葡萄牙科英布拉大学 FCTUC 合作进行了 H 型钢柱和 H 型钢部分包裹混凝土组合柱的对比抗火试验^[8-11],试验目的是探索整体结构中非受火部分对受火构件力学性能的影响,为了模拟这种影响,FCTUC 采用了三维约束框架方法,而 BAM 则采用了子结构方法。BAM 的抗火炉设备共计 10 个作动器,包含一个 6 300 kN 竖向作动器和一个 160 kN 水平作动器,其余 8 个 400 kN 作动器负责实现试件顶端和底端的双向弯矩。控制系统通过 6 个闭环控制通道分别控制试件的竖向位移、水平位移、顶端和底端的 X 向和 Y 向双向角位移,BAM 的抗火炉及力学边界条件如图 1 所示,但进行的混合试验中仅对竖向进行了单自由度抗火混合试验。

F. Robert^[12]在 CERIB 进行了单层多跨预应力混凝土板的抗火混合试验,原型结构及其力学边界

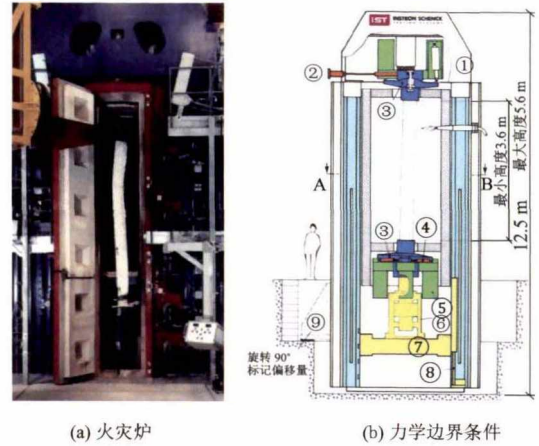


图 1 BAM 的抗火炉及力学边界条件

Fig. 1 Furnace and mechanical boundary conditions of BAM

条件如图 2 所示,利用 30 个液压千斤顶基于力控制方式来模拟界面边界条件,其中跨中竖向千斤顶模拟重力作用,支座处竖向千斤顶依据测量转角和数值子结构转动刚度来模拟界面处弯矩边界条件,支座处水平千斤顶依据测量轴向变形和数值子结构水平刚度来模拟界面处轴力边界条件。

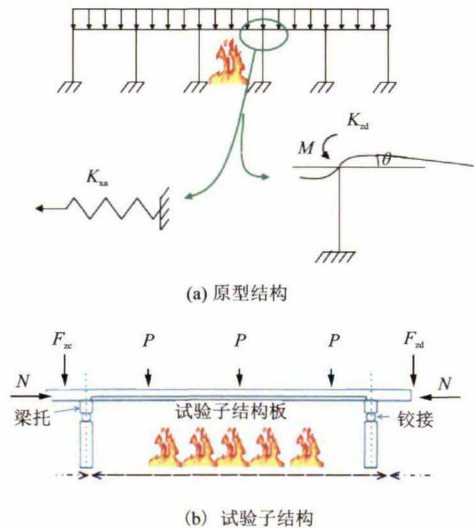


图 2 多跨混凝土板的力学边界条件

Fig. 2 Mechanical boundary conditions of a concrete slab
注: K_{xa} 为考虑填充墙和楼板后的边界轴向刚度, M 为边界弯矩, θ 为边界转角, K_{zd} 为边界扭转刚度, P 为边界等效竖向荷载, F_{zc} 、 F_{zd} 为施加弯矩作用的等效竖向荷载, N 为边界等效水平轴力

H. Mostafaei^[13-14]进行多层钢筋混凝土框架的抗火混合试验,抗火炉试验装置如图 3 所示,其空间受火尺寸约为 $2.6\text{ m} \times 2.6\text{ m} \times 3.2\text{ m}$,竖向采用力控制电液伺服作动器进行加载,加载能力为 9 790 kN,水平向采用液压千斤顶进行加载,南北水平向加载



图3 NRC的火灾炉及力学边界条件

Fig. 3 Furnace and mechanical boundary conditions of NRC

能力为 110 kN,东西水平向加载能力为 310 kN,可以保持高温的同时进行竖向和水平联合加载,但目前也仅实现了竖向单自由度抗火混合试验。

C. A. Whyte 等^[16-17]在混合试验平台 OpenFresco 和有限元分析软件 OpenSees 基础上扩展了温度自由度和温度荷载,并利用拉压材料试验机 and 小型电高温炉进行了双杆桁架的抗火混合试验,如图 4 所示。试验子结构取其中一根杆,试验中使用显式算法,数值计算中使用隐式算法,试验结果和理论结构吻合较好,验证了热力耦合混合试验方法的可行性。

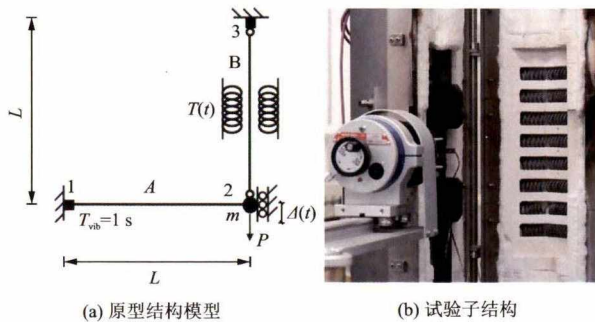


图4 长跨双杆桁架的抗火混合试验

Fig. 4 Hybrid fire testing of long-span dual girder

注: m 为集中质量, L 为杆件长度, P 为 B 杆的轴向反力, $\Delta(t)$ 为节点 2 的竖向位移, T_{vb} 为模型基本周期, $T(t)$ 为 B 杆承受 ISO834 升温曲线的时变温度

P. Schulthess 等^[18]针对跨中连接桁架杆的简支梁进行了热力耦合混合试验,此试验模型被定义为基准模型,如图 5 所示。取桁架杆作为受火试验子结构,并在拉压材料试验机上利用电炉进行试验,简支梁取为计算子结构并利用 ABAQUS 进行数值模拟。同时也进行了全结构整体试验进行对比。

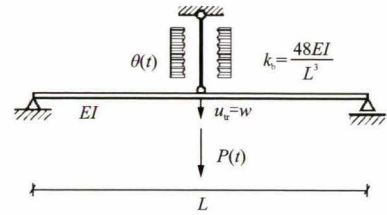


图5 抗火混合试验的基准模型

Fig. 5 Benchmark model of hybrid fire testing

注: $P(t)$ 为桁架杆受热膨胀产生的轴向荷载, $\theta(t)$ 为桁架杆升温曲线时变温度, k_b 为梁的抗弯刚度, U_{ir} 为桁架杆的轴向位移, W 为梁的跨中挠度

3.3 试验子结构选取与数据交换

限于各研究机构火灾炉配套力学加载装置的局限性,目前的抗火混合试验中数值子结构一般选取柱、桁架杆、梁等力学边界条件相对较易模拟的基本构件为主。M. Korzen 等^[8-11]取单柱为试验子结构,但仅对其竖向进行了加载和反馈,数据传输如图 6 所示,通过数值子结构计算可知,由于热效应导致试验子结构柱顶产生膨胀变形 u^{therm} ,同时试验子结构受到周围非受火构件刚度 c^{mod} 约束产生力学压缩变形 u^{mech} ,因此计算求得试件最终真实变形 $u = u^{therm} + u^{mech}$,将其施加到试验子结构上,同时测量试件竖向反力 f ,使得 $f = c^{mod} \times u$ 则进行下一步计算,直至试件破坏或达到预定温度则停止试验。

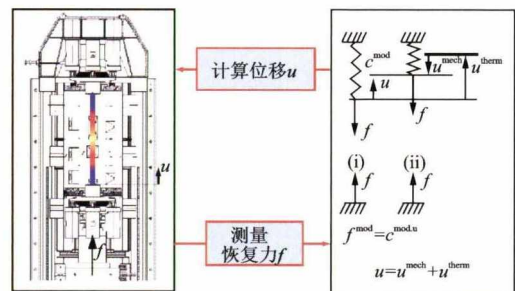


图6 BAM试验子结构和数值子结构数据传输

Fig. 6 Data transmission between physical substructure and numerical substructure of BAM

文献[13-14]中整体结构模型为六层四跨钢筋混凝土空间框架,试验子结构取为底层双向对称中柱,火灾也取为对称荷载,因此可以仅对试件竖向进行加载和反馈。其数据传输如图 7 所示,数值子结构部分采用了 SAFIR 软件。值得注意的是,此试验中每 5 min 手动进行一次加载和反馈,以满足试验精度。

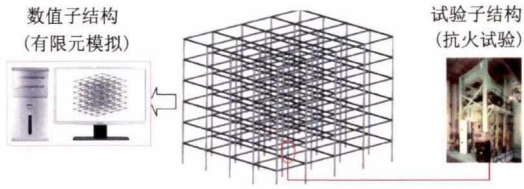


图7 NRC 试验子结构和数值子结构数据传输

Fig. 7 Data transmission between physical substructure and numerical substructure of NRC

与上述试验相比,文献[16-17,26]均进行了完全自动化运行的抗火混合试验。

3.4 抗火混合试验的稳定性

A. Sauca^[19]发现第一代抗火混合试验的稳定性与子结构的刚度比 $R = K_N/K_P$ 有关(K_N 、 K_P 分别为数值结构和试验子结构的刚度),当采用力控制加载时应满足 $R < 1$,当采用位移控制时应满足 $R > 1$ 。上述稳定性条件在实际应用时存在如下两个问题:一方面, K_P 在混合试验过程中会发生退化,使得预设的单一控制方法在试验后期可能失效;另一方面,当边界处自由度较多时,部分自由度为满足稳定条件需要采用力控制,余下的自由度则需要采用位移控制,使得控制难度增加。

3.5 不同试验方法的结果对比

M. Korzen等^[8-11]的研究结果表明,与构件标准抗火试验结果相比,采用抗火混合试验方法对受火构件的耐火极限产生了一定程度的影响。当增大数值子结构与试验子结构的刚度比时,试件耐火极限相应降低。

F. Robert等^[12]指出,由于高温膨胀受到数值子结构的约束,最初90 min内试验子结构的轴向力有所增大;由于试验子结构受火导致刚度降低,导致跨中挠度增加,使得轴向力在90 min后开始降低。

H. Mostafaei^[13-14]分别给出试验子结构和数值子结构界面处的轴向位移和轴向力对比曲线,两者几乎完全重合,证实边界处满足力学平衡和位移协调条件。与构件标准试验结果相比,基于混合试验的构件抗火能力相对更高。

4 第二代抗火混合试验

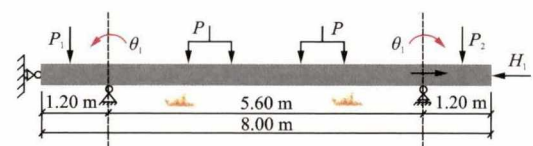
文献[19]表明,数值子结构进行计算时,高温依然会影响试验子结构,因此当对试验子结构施加

位移时,用于计算新位移的测量力值也将发生变化。由于温度的连续变化可能会使得求解算法不稳定,因此选择合适的时间步长非常重要。

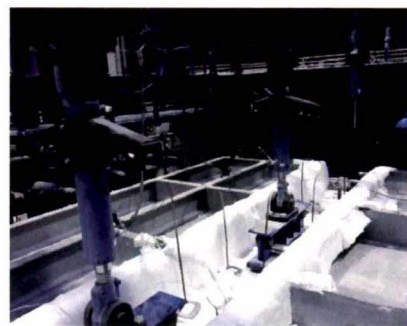
A. Sauca等^[20]认为计算界面处的位移和反力时,第一代混合试验中仅考虑了数值子结构的特性,而忽略了试验子结构的特性,其中刚度比对试验结果产生关键影响。针对上述问题,基于有限元撕裂对接法(FETI),A. Sauca等^[21-23]提出了一种不依赖刚度比而无条件稳定的连续位移加载控制方法,该方法具有两个特点:一是不需要预估试验子结构的刚度。数值模拟结果证实,求解结果是无条件收敛的,与试验子结构的刚度无关,因此试验子结构刚度可取为常温下刚度;二是可以连续加载。与地震作用不同,温度荷载是连续变化的,收敛过程是在每个时间步长内平衡之后进行的,因此可以采取连续加载过程而不需要每一步进行迭代,但需要作动器具有较高性能连续加载能力。

A. Sauca等^[19-23]基于法国CERIB的火灾炉设备进行了以连续梁为试验子结构的抗火混合试验,如图8所示。其中支承点之间中段梁受火,一端悬臂梁边界条件为弯曲及铰接,另一端悬臂梁边界条件为弯曲及轴压。文献中同时进行了全结构数值模拟及构件标准抗火试验以对比分析。

N. Tondini等^[24-25]基于有限元撕裂对接法提出了一种求解结构热力学响应的静态方法,针对四层



(a) 边界条件力学表征



(b) 边界条件加载设置

图8 基于梁子结构的抗火混合试验

Fig. 8 Hybrid fire testing based on beam physical substructure

注: H_1 为边界等效水平轴力, P_1 、 P_2 为控制转角 θ_1 、 θ_2 的等效竖向荷载, P 为边界等效竖向荷载

四跨抗弯框架基于位移控制方法进行了数值模拟验证,并对算法鲁棒性、系统延迟误差和测量误差等进行了分析,结果证实该算法可以较好地保证界面处力平衡和位移协调。

C. A. Whyte 等^[16-17]提出一种完全自动控制的抗火混合试验方法,该方法具备控制多自由度抗火混合试验的能力,并能处理复杂的动态混合模型、荷载组合和加载次序,同时能够进行实时试验。

X. G. Wang 等^[26]基于 UT-SIM 混合试验系统进行了四层四跨平面钢框架的抗火混合试验,取底层中柱为试验子结构,如图 9 所示。采用足尺构件基于位移控制方式进行了全自动试验,并进行了变形误差补偿,试验数据与数值结果吻合,研究结果表明所建立的抗火混合试验系统能够较好地反映结构的抗火性能。

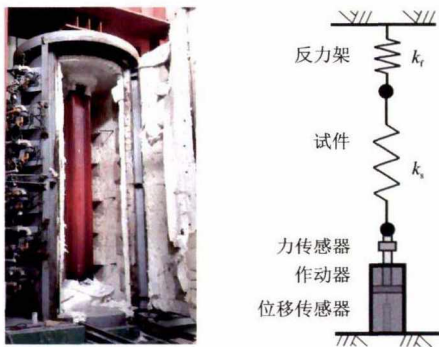


图 9 试验子结构及其边界设定

Fig. 9 Physical substructure and test setup

F. Faghihi 等^[27]提出一种适用于抗火混合试验的热力耦合系统框架,研究了顺序耦合和完全耦合两种不同热传递过程及其对整体结构力学行为的影响,针对文献[18]中的基准模型,考虑了受火构件对周围构件热传递过程中热流参数和温度分布效应,对混合试验中热力耦合给出了更为精确的结果。

5 抗火混合试验亟待解决的关键问题

5.1 刚度变化对稳定性的影响

火灾静态反应求解过程中需要用到试验子结构的刚度,但受火过程中出现的一些特殊现象(如混凝土的爆裂等)将使试验子结构的刚度发生剧烈变化,使得混合试验过程中可能无法满足稳定

性条件;与处于高温中的试验子结构相比,数值子结构处于常温,刚度降低幅度较小,但当其出现大变形或材料非线性时也可能影响混合试验的稳定性。

另外,当结构接近倒塌时,整体结构分析将从静力分析转化为动力分析,需要在程序中设定判定准则并及时切换,这给求解过程带来了一定难度。

5.2 实时试验

除了部分金属构件外,大多数结构构件(尤其是混凝土结构和木结构)的温度场分布具有高度不均匀性,并且还随时间发生变化(即使火灾停止之后,温度场依然会发生变化);另外,火灾高温热膨胀作用下界面处的边界条件也是实时变化的,因此,只有进行实时试验并通过快速交互才能真实反映出受火试件温度场变化的特点。

5.3 试验子结构的复杂边界条件及实时性

抗震混合试验领域中已经建立了多种各具特色的力学边界条件加载装置,但目前大多数火灾炉设备建造之初仅考虑进行构件标准抗火试验,加载设备以轴向荷载和偏心荷载为主,难以满足混合试验中试验子结构的真实边界条件,针对梁、墙、节点、约束子结构等局部构件的边界条件模拟还很难通过现有设备条件精确实现。参考借鉴抗震混合试验研究领域的边界条件模拟新方法,如 T. Wang 等^[28]和 M. J. Hashemi 等^[29]提出的“重叠领域分割法”,是解决抗火混合试验边界条件精确模拟的一个突破口。

5.4 多尺度数值子结构连接与协调

与试验子结构相连接的其他局部构件也可能受到高温作用,称之为高温数值子结构,这部分构件可能存在温度梯度,需要精确模拟梯度温度并与其他子结构实时交互;结构剩余部分称之为常温数值子结构,由于精细化分析的需要,常温数值子结构经常采用不同尺度的单元进行模拟,因此整体结构中存在试验子结构、高温数值子结构、常温微观数值子结构、常温宏观数值子结构等 4 种子结构类型,不同子结构或单元之间涉及到尺度间分离和尺度间耦合的问题,如何在保证一定的计算效率和稳定性的前提下,选择合适尺度的分析模型,实现局部宏观-局部微观-局部试验的多尺度协同分析。

5.5 试验子结构和数值子结构的时间域协调

常规抗火试验一般持续时间为十几分钟至几个小时不等,即为试验子结构所需的时间域,并且升温曲线呈现先快后慢的特点,一般可以先进行构件抗火数值分析预判运行时间;数值子结构计算时间取决于所分析问题的复杂程度和建模精细化程度,可能为几分钟、几小时或更长。抗火混合试验过程中需要协调试验部分和数值部分的时间域,即两者需要同步协调进行,可以采用变时间步长和并行分析技术来实现数值子结构部分每一步的分析时间小于等于试验子结构部分所持续的时间。

5.6 试验数据采集及其对整体结构的影响

测量受火试件表面温度及截面温度分布,一般仅能在试件局部布置少量热电偶并采集有限的单点温度,解决方法是可以在火灾炉体表面设置耐高温玻璃观察孔,采用红外热像仪按照一定时间间隔连续扫描试件表面温度以获得其温度分布及其随时间变化的情况。测量受火试件表面某点位移,可以在该处预先布置耐高温弯钩,将柔性耐高温丝绑在弯钩上,再将高温丝从炉体表面引伸出来通过滑轮装置与位移计进行连接,则可以对试件位移进行测量。

通过测量受火试件的表面温度及截面温度,可以了解温度分布及随时间变化的规律;通过测量试验子结构和数值子结构界面处不同方向力和位移与时间的关系曲线,可以证明混合试验是否满足边界处力平衡和变形协调;通过测量构件控制点位移与时间的关系曲线,可以得到构件的耐火极限,并与数值模拟和构件标准抗火试验结果进行对比分析;通过测量试件力和位移关系曲线,可以得到构件高温下的刚度退化规律;对于升降温抗火试验,可以获得试件在降温后性能退化规律及其残余承载力,为构件的火灾后性能鉴定与评估提供参考。

同时,通过界面处边界条件的传递及有限元分析,可以进一步得到数值子结构的全部反应,用来评价整体结构在火灾下的内力重分布。

6 结 语

抗火混合试验是混合试验研究领域的一个重要拓展方向,该方法既可以研究区域火灾下整体结构的抗火性能,又可以评估与相邻构件交互作用下

的单独构件抗火能力,能有效利用现有抗火试验设备以子结构试验的方式较低成本地实现更可靠的整体结构抗火分析。目前国外对抗火混合试验已经开始进行深层次的基础性理论研究,中国也陆续建立了一批各具特色的抗火试验装置,并具备基本构件的抗火试验能力,在此基础上如何对相关试验设备进行适当的升级改造,并拓宽和加深抗火试验方面的基础性理论,使之具备整体结构抗火混合试验的能力,是一个值得深入研究的课题,也是国际上抗火试验研究的一个重要发展趋势。

参考文献:

- [1] 建筑构件耐火试验方法: GB/T 9978—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
Fire-resistance Tests-elements of building construction: GB/T 9978—1988 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.(in Chinese)
- [2] Takahashi Y, Fenves G L. Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(3): 267-394.
- [3] Stojadinovic B, Mosqueda G, Mahin S A. Event-driven control system for geographically distributed hybrid simulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(1): 68-77.
- [4] Wang T, Yoshitake N, Pan P, et al. Numerical characteristics of peer-to-peer (P2P) internet online hybrid test system and its application to seismic simulation of SRC structure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2008, 37(2): 265-282.
- [5] Mahmoud H N, Elnashai A S, Spencer B F, et al. Hybrid simulation for earthquake response of semirigid partial-strength steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(7): 1 134-1 148.
- [6] Chen Z X, Xu G S, Wu B, et al. Equivalent force control method for substructure pseudo-dynamic test of a full-scale masonry structure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(7): 969-983.
- [7] 杨 格, 王 贞, 吴 斌, 等. 建筑结构混合试验平台 HyTest 开发研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 149-156.
Yang G, Wang Zh, Wu B, et al. Development of HyTest for structural hybrid simulation [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(11): 149-156. (in Chinese)
- [8] Korzen M, Magonette G, Buchet P. Mechanical load-

- ing of columns in fire tests by means of the substructuring method [J]. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1999, 79: 617-618.
- [9] Korzen M, Ziener K U, Riemen S. Some remarks on the substructuring method applied to fire resistance tests of columns [C]// *World Congress on Housing, Housing Construction-An Interdisciplinary Task*, Portugal: [s. n.], 2002: 9-13.
- [10] Korzen M, Rodrigues J P C, Correia A M. Thermal restraint effects on the fire resistance of steel and composite steel and concrete columns [C]// *Application of Structural Fire Engineering*, Prague: Czech Republic, 2009: 512-517.
- [11] Korzen M, Rodrigues J P C, Correia A M. Composite columns made of partially encased steel sections subjected to fire [C]// *Proceedings of the Sixth International Conference Structures in Fire*, Michigan, USA: [s. n.], 2010: 341-348.
- [12] Robert F, Rimlinger S, Collignon C. Fire resistance facility taking into account the surrounding structure [C]// *1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Leipzig: [s. n.], 2009: 3-5.
- [13] Mostafaei H. Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire—application [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 56: 30-38.
- [14] Mostafaei H. Hybrid fire testing for assessing performance of structures in fire—methodology [J]. *Fire Safety Journal*, 2013, 58: 170-179.
- [15] 王震, 李国强. 整体结构混合火灾试验原理及数值仿真分析 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(3): 409-414.
Wang Zh, Li G Q. Methodology and numerical analysis of hybrid fire test for whole structure [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(3): 409-414. (in Chinese)
- [16] Whyte C A, Mackie K R, Stojadinovic B. Hybrid simulation of thermomechanical structural response [J]. *Journal of Structure Engineering*, 2016, 142(2): 04015107.
- [17] Whyte C A, Mackie K R, Stojadinovic B. Experimental modeling of the structural response to fire loads using the hybrid simulation technique [C]// *Proceedings of 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska: [s. n.], 2014: 1-12.
- [18] Schulthess P, Neuenschwander M, Knobloch M, et al. Consolidated fire analysis coupled thermo-mechanical modeling for global structural fire analysis [C]// *9th International Conference on Structures in Fire*, Princeton USA: [s. n.], 2016: 819-826.
- [19] Sauca A. Development and implementation of a methodology for hybrid fire testing applied to concrete structures with elastic boundary conditions [D]. Belgium: University of Liege, 2016.
- [20] Sauca A, Gernay T, Robert F, et al. A novel method for hybrid fire testing [C]// *6th European Conference on Structural Control*, Sheffield, England: [s. n.], 2016: 11-13.
- [21] Sauca A, Gernay T, Robert F, et al. Stability in hybrid fire testing [C]// *Proceeding of the 9th International Conference on Structures in Fire*, New York, USA: [s. n.], 2016: 836-843.
- [22] Sauca A, Gernay T, Robert F, et al. Hybrid fire testing discussion on stability and implementation of a new method in a virtual environment [J]. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2018, 9(4): 319-341.
- [23] Sauca A, Zhang C, Chernovsky A, et al. Hybrid fire testing of a single degree-of-freedom linear system [C]// *The 10th International Conference on Structures in Fire*, Belfast, UK: [s. n.], 2018: 1-8.
- [24] Tondini N, Abbiati G, Possidente L, et al. A static partitioned solver for hybrid fire testing [C]// *9th International Conference on Structures in Fire*, Princeton, USA: [s. n.], 2016: 819-826.
- [25] Tondini N, Abbiati G, Possidente L, et al. Hybrid simulation applied to fire testing: a newly conceived numerical framework [C]// *Proceedings of the EACS 2016-6th European Conference on Structural Control*, Sheffield, England: [s. n.], 2016: 11-13.
- [26] Wang X G, Kim R E, Kwon O S, et al. Hybrid simulation method for a structure subjected to fire and its application to a steel frame [J]. *Journal of Structure Engineering*, 2018, 144(8): 04018118.
- [27] Faghihi F, Neuenschwander M, Knobloch M. A computational framework for thermal coupling in hybrid fire simulation [C]// *VIII International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, Sitges, Spain: [s. n.], 2019: 757-767.
- [28] Wang T, Mosqueda G, Jacobsen A, et al. Performance evaluation of a distributed hybrid test framework to reproduce the collapse behavior of a structure [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2012, 41(2): 295-313.
- [29] Hashemi M J, Mosqueda G. Innovative substructuring technique for hybrid simulation of multistory buildings through collapse [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(14): 2059-2074.

(本文责编:赵霞)