网站地图 (http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/) |

联系我们 (http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html) |

(http://www.imech.cas.cn/serv/szxx/) | 所内図 (https://ioa.imech.ac.cn) | p://englis.ch.cas.cn/ン 中国中学院 (p://www.cas.m/)
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

(http://www.imech.cas.cn/)

Search O



当前位置:首页(../../../)>>科学传播(../../)>>力学园地(../../)>>前沿动态(../)

【前沿动态】从发现火到预测燃烧(I)——不受控制的燃烧

2022-11-01 17:03

【放大 缩小】

编者按:中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室的姚卫研究员运用数值模拟方法对于航天超燃冲压发动机中的燃烧过程进行了系统深入的研究。针对超声速燃烧这样一个多尺度多物理场耦合的复杂系统,他提出了"分区解耦+整场耦合"的策略,并运用自主发展的煤油骨架机理、自主模型和算法,在国际上首次开展了基于多步骨架机理和亿级网格规模的煤油超声速燃烧大涡模拟研究,更加详细地展示了煤油超声速燃烧室内部的流动、混合与燃烧等瞬态过程,揭示了自点火、稳焰与流动失稳等对燃烧室性能至关重要的物理机理,相关研究被美国航空航天学会(AIAA)授予高超声速系统与技术最佳论文奖。接受了《力学园地》编辑部的约请后,姚卫研究员送来了一个"科普盛宴",不仅仅介绍了工作进展,而且从人类发现火一直讲到了预测燃烧。本刊将分两期连载,这是第一篇。

从发现火到预测燃烧(I)——不受控制的燃烧

姚卫

- 1 不受控制的燃烧
- 1.1 自然界中的火与早期人类
- 1) 自然界中的火

自然界中存在充足的氧气和各类可燃物质(如植被、化石燃料等),在一定能量的点火源(如闪电、火山喷发的热岩浆等)的作用下,可形成各种形式的自然火(也称野火)。自然界中的野火与当地的生态环境、生物种群相互作用,形成一定的生态平衡。



图1 自然界中的火(图片来源:网络)

2) 火与早期人类

人类作为地球生态系统的组成部分,与野火也有相互作用。目前,古人类学和考古学方面的研究者普遍认为:人类祖先在几十至百万年前即开始利用自然界的火。图2所示的北京猿人遗址出土的遗迹,表明距今50万年前北京猿人就会用火了。火被人类用于烹煮食物、取暖、照明以及捕猎等,使人类相对于其他灵长类动物具有更高效的获取能量和适应环境的能力,为人类文明的发展奠定了物质基础。



图2 北京猿人遗址出土的(a)烧骨、碳化种子以及(b)烧石(图片来源:网络)

早期人类从何时开始、以何种方式掌握点火的技术无从得知。因此,关于人类获取火的各类神话传说,在不同文化背景的人群中广为流传,如我国南方流传甚广的火神祝融氏授火、古希腊神话中普罗米修斯从太阳车中窃取火种给予人类,等等。有记录的人类使用火的起源是伏羲授火和燧人氏钻木取火。正如燃烧领域权威罗忠敬(C. K. Law)院士所说,获得使用火的能力是开启人类文明曙光的重要一环("It is fair to say that the ability to use fire is an important factor in ushering the dawn of civilization")。



图3 人类始得火种的传说: (左)祝融与(右)普罗米修斯(图片来源: 网络)



图4 有记录人类使用火的最早起源: (左) 伏羲授火; (右) 燧人氏钻木取火(图片来源: 网络)

1.2 失控的燃烧引发的灾害——火灾

可以不夸张地说,火的利用开启了人类文明,失控的燃烧也给人类社会造成了巨大灾害。从远古开始,火灾一直伴随着人类至今。根据我国应急管理部消防救援局发布的《2021年全国消防救援队伍接处警与火灾情况》,2021年各地共接报火灾约74.8万起,死亡1987人,受伤2225人,直接财产损失67.5亿元。国外情况类似,以美国为例,据其全国消防协会(NFPA)《2020年火灾损失报告》的数据,全美2020年各地约报告140万起火灾事故,共造成约死亡3500人、受伤15200人、财产损失219亿美元。根据火灾发生的场所的不同,可将火灾划分为不同的类型,如建筑火灾、交通运输火灾、森林火灾等。

1.2.1 典型火灾场景

1) 高层建筑火灾

高层建筑火灾扑灭难度大,人员疏散困难,容易造成重大人员和财产损失。例如,2010年上海静安区教师公寓改造过程中发生火灾,造成58人死亡;2017年英国伦敦格伦费尔发生高层大楼火灾,造成72人死亡。



图5(a)2010年静安区教师公寓火灾; (b)2017年伦敦格伦费尔高层大楼火灾(图片来源:网络)

2) 古建筑火灾

由于古建筑本身具有重大的文物、历史和艺术价值,对古建筑的保护得到世界各国的重视。火灾事故则是古建筑保护中的重点防范内容,近年来国内外发生过多起重大的古建筑火灾事故,如中国云南香格里拉独克宗古城火灾(2014)、日本琉球首里城火灾(2019)、法国巴黎圣母院火灾(2019)等。



图6 古建筑火灾实例: (a) 2014年云南香格里拉古城火灾; (b) 2015年巴西博物馆火灾; (c) 2019年法国巴黎圣母院火灾; (d) 2019年日本首里城火灾。(图片来源:网络)

特别是对于我国而言,由于古建筑多以木结构和砖混结构为主,材料耐火极限低,极易在火灾中损毁,这也是导致我国现存古建筑数量较少的重要原因。我国在古代曾有不少传统的消防措施,如故宫建筑群中常见的铜质水缸、徽派建筑中起到防火分隔作用的马头墙等。



图7 古建筑中传统消防措施: (左)故宫铜质水缸; (右)徽派民居马头墙(图片来源:网络)

3) 飞机火灾

飞机装载有大量的可燃易燃物质(如燃油、货物以及飞机内部装饰材料等),其单位体积的能量载荷密度是普通居民建筑的2-3倍。在遭受撞击、闪电、外部火源等能量输入的情况下极易发生爆燃(这是一种以亚声速传播的燃烧波),从而造成重大飞行事故。因此,国内外飞机适航标准中,飞机的火灾风险及相应的控制措施都是重点关注的部分。



图8 飞机火灾事故: (a) 机舱中锂电池自燃; (b) 飞机降落撞击跑道引发火灾; (c) 飞机发动机空中起火(图片来源: 网络)

1.2.2 火灾模拟研究

所谓的"火灾模拟",就是通过数值计算或模型试验等手段,反演出火灾的发生、发展过程。火灾模拟研究的意义在于:在火灾发生前对不同场景下的火灾风险评估、消防性能化设计及消防设施有效性验证、人员疏散方案的制定等提供输入数据,在火灾后对火灾源头调查及火灾时空演化过程的规律认识提供数据支撑。

1) 建筑火灾模拟

图9中展示了一个房间过火后的数值模拟结果和实物场景照片。通过对火灾过程的重构,再结合现场火灾痕迹的勘测,人们便可以调查火灾事故的起火位置和原因。

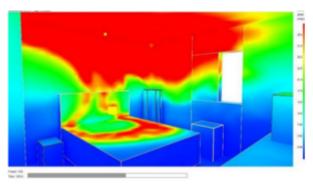




图9 房间火灾场景模拟: (左)模拟结果; (右)火灾现场照片 (Gorbett G E, CFEI C, IAAI-CFI M. Computer fire models for fire investigation and reconstruction[C]//International Symposium on Fire Investigation and Technology. 2008: 23-34.)

当然,在火灾的数值模拟研究中,首先要建立一个理论模型,再设计计算程序,才能对火灾过程实现重构。 下面的实例是结合高层建筑火灾现场调查数据,对高层建筑内火灾的蔓延和传播过程进行了模拟重构, 二者比较便可以验证火灾模拟模型的有效性。如图10对高层建筑第10-15层火灾的模拟结果所示,对于这场垂直蔓延的火灾,在初始阶段,建筑起火点位于第十层的南侧墙角,而随着北侧墙面在火灾发展过程中被破坏,导致高温的火焰和烟气在浮力作用下向上层建筑蔓延, 同时环境中新鲜空气快速通过开口卷吸进入建筑内补充燃烧所需氧气,使火灾规模进一步扩大,最后发展到第十五层。可以看到,模拟结果和现场调查基本符合。

(a) Initial stage



(b) Vertical fire spread



图10 高层建筑火灾蔓延过程模拟(Khan, A.A., Domada, R.V.V., Huang, X. et al. Modeling the collapse of the Plasco Building. Part I: Reconstruction of fire. Build. Simul. 15, 583-596, 2022)

2) 飞机火灾模拟

飞机在空中发生火灾难以像地面火灾那样进行施救, 所以事先对可能发生的火灾进行模拟十分重要。如图 11所示, 美国联邦航空管理局 (FAA) 对波音747飞机客舱顶棚结构中火灾场景进行了全尺寸模拟(包括了实验安排和数值计算),给出了明火导致的顶棚温度分布情况。这样便可以评估其火灾风险。而图12示出的是飞机货舱

中氮气灭火系统的模拟结果,它动态复现了氮气(白色圆点)与火焰的相互作用,这项研究的目的是评估货舱灭火系统的性能。

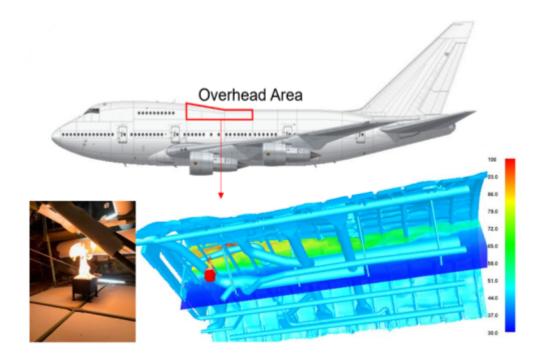


图11 波音747顶棚火灾的模拟研究: (左)实验安排; (右)数值计算结果(DOT/FAA/TC-21/8)

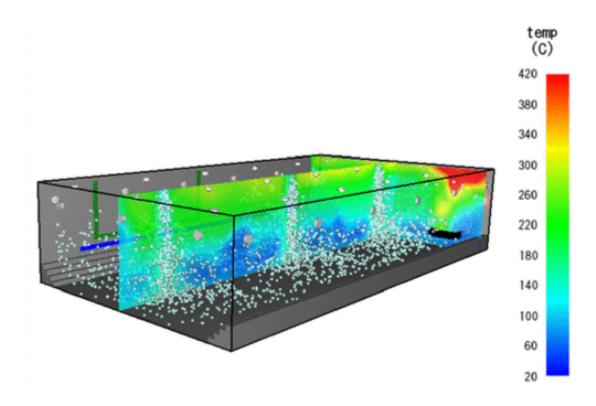


图12 飞机货舱灭火系统模拟结果 (Xiong, Y., Diakostefanis, M., Dinesh, A., Sampath, S., & Nikolaidis, T., Numerical assessment for aircraft cargo compartment fire suppression system safety. Journal of Fire Sciences, **39**(3), 240-261, 2021)

1.2.3 火灾模拟面临的主要挑战

火灾作为一类不受控制的燃烧,存在空间尺度大、燃料多样复杂、与周围环境相互作用的特点。与此相对应,火灾模拟具有很大的挑战。根据火灾场景不同,其空间尺度规模可从数平米的单一房间到几十公顷的森林,相应的数值模拟中空间离散便需要大量的网格数量,这导致计算花销十分巨大。火灾中可燃物既有常见的燃料,也包含有各种人造有机物和生物质等。这不仅给准确地预估可燃物组成带来困难,而且由于各类可燃物的燃烧存在相变、热解和气/固相混合燃烧等复杂的物理化学过程,其所需的基础热物性参数以及相应的物理模型存在着大量的不确定性。这些也会导致计算模拟的困难。此外,火灾的发展过程往往受环境的影响(如风、温度、湿度等),而大规模的火灾又同时影响周围环境发生变化。例如,燃烧过程对建筑结构破坏会导致的通风环境的变化,森林火灾会形成火旋风,等等。这种火灾与环境的相互作用给火灾的模拟研究带来更大的输入参数和边界条件的不确定性。



图13 火灾对环境的影响: (左)火旋风(<u>Fire whirl - Wikipedia</u> (https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_whirl)); (右)火灾中的破窗行为(<u>www.scienceabc.com/eyeopeners/why-do-glass-windows-break-during-fires.html</u>(https://www.scienceabc.com/eyeopeners/why-do-glass-windows-break-during-fires.html))

为了应对上述挑战,研究者在火灾模拟中采用了许多简化的物理模型,如火源功率模型、烟点模型等,而但这些理论模型的正确性极大地依赖于实验数据的支持。因此,不同尺度的火灾模型实验是火灾模拟的重要基础工作。图14为对某一传统木结构民居的全尺寸模型实验,图15则是对飞机火灾从飞机整机模型、货舱模型、货架模型进行的多尺度实验。通过上述不同类型的实验可获取火灾在不同材料、外部环境下的热释放过程、火焰传播速度等的模型参数。



图14 云南丽江传统民居全尺寸火灾动力学以及防火措施验证实验(图片来源:火灾科学国家重点实验室)



图15 飞机火灾模型实验: (a)全尺寸飞机火灾与灭火测试系统; (b)飞机货舱火灾模拟实验; (c)模拟飞机货舱高空低压环境下纸箱火灾(图片来源:清华大学公共安全研究中心)

(未完待续)



中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址:北京市北四环西路15号 邮编:100190

(http://bszs.conac.cn/sitename?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7)

