

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.223



桥梁抗爆与抗火 2020 年度研究进展

崔闯, 杨正祥, 王昊, 张清华, 卜一之, 夏嵩

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:近年来能源交换的需求量随各区域经济的飞速发展而不断增大, 装载运输“燃、汽、爆、化”的危化品车辆日益增加, 由车辆导致的爆炸或火灾层出不穷, 桥梁结构的运营安全受到严重威胁。作为桥梁防灾的热点问题, 学者们在桥梁抗爆与抗火领域进行了卓有成效的研究, 现以 2020 年发表的中英文论文为主, 对国内外学者在爆炸冲击荷载试验与数值模拟方法、桥梁火灾试验与模拟技术、桥梁抗爆性能及劣化机理、火灾下桥梁损伤机理与安全评估、桥梁抗爆安全评估方法、过火后桥梁性能演化与灾变机制等方面所取得的研究成果进行扼要综述, 通过系统分析表明: 爆炸试验技术与结构高应变率下的力学特性研究、复杂火灾环境下桥梁结构断面温度传递与分布规律、多灾耦合作用下桥梁结构的损伤演化、灾变机制和桥梁结构安全评估体系等方面的研究欠缺。为保证桥梁结构在全寿命周期内的服役安全, 爆炸、火灾等极端荷载条件下的结构特性和运维安全是当前构建桥梁运维安全保障体系中的重中之重。

关键词:桥梁工程; 抗爆; 抗火; 综述; 研究进展

中图分类号: U446 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0207-15

State-of-the-art review of explosion and fire resistance of bridges in 2020

CUI Chuang, YANG Zhengxiang, WANG Hao, ZHANG Qinghua, BU Yizhi, XIA Song

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The demand for energy exchange increases as the rapid development of regional economy, and the number of vehicles loading and transporting "burning, vapour, explosion and chemical" dangerous chemicals is increasing. The structural safety of bridge in-service is seriously threatened due to the explosion and fire caused by the vehicles emerge in an endless stream. As a hot topic in the field of bridge disaster prevention, scholars have made fruitful research in the field of bridge explosion and fire resistance. Based on the publications in 2020, this paper briefly summarizes the research results at the present stage. This paper focuses on the explosion impact load test and numerical simulation method, bridge fire test and simulation technology, bridge anti-explosion performance and deterioration mechanism, bridge damage mechanism and safety assessment under fire, bridge anti-explosion safety assessment method, bridge performance evolution and disaster mechanism after overfire. The explosion test technology at present through the analysis of the system and research the mechanics characteristics of structure under high strain rate, complicated fire environment temperature transmission and distribution, coupled damage evolution of the bridge subjected on multi-disasters, disaster mechanism and bridge structure safety assessment system are of lack and urgent need. In order to ensure the service safety of bridge structure in the whole life cycle, the structural characteristics and operation and maintenance safety under extreme load conditions such as explosion and fire have been is of primary importance in the operation and maintenance of bridge.

Keywords: bridge engineering; explosion resistance; fire resistance; review; research progress

收稿日期: 2021-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(51878561, 51978579, 51758533, 51578455); 广东省重点领域研发计划(2019B111106002); 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题重点项目(BHSKL18-01-KF); 四川省科技计划(2021YJ0037)

作者简介: 崔闯(1989-), 男, 副教授, 主要从事钢结构桥梁研究, E-mail: ccui@swjtu.edu.cn.

区域城市协同发展与一体化是当前城市发展的特点,作为区域城市经济圈的重要节点和枢纽工程,桥梁结构的安全运营至关重要。随着经济的发展,装载运输“燃、汽、爆、化”的危化品车辆日益增加,由此导致的桥梁爆炸和火灾等极端事件日趋频繁。结合试验测试、数值模拟等手段,探究爆炸和火灾等极端荷载作用下的桥梁灾变机理和控制方法,保证桥梁的运营安全,是当前研究的热点问题。为应对这些挑战,本文对 2020 年关于桥梁抗爆和抗火等方面的创新成果进行系统总结与梳理,以期能为桥梁抗爆与抗火的研究提供参考和借鉴。

1 桥梁抗爆研究进展

随着由车辆爆炸引起的桥梁局部损伤的极端事件发生次数的不断增多,桥梁抗爆逐步引起国内专家学者的广泛关注,国内外专家学者主要围绕爆炸冲击荷载试验与数值模拟方法、桥梁抗爆性能及劣化机理、桥梁抗爆安全评估方法等方面进行了深入系统的研究,取得了卓有成效的研究成果。

1.1 爆炸冲击荷载试验与数值模拟方法

在试验研究方面,Chen 等^[1]对于全焊接钢柱节点在静、动冲击荷载作用下的受力性能试验和数值研究中采用有限元模型,从冲击荷载作用下的截面内力和能量吸收两方面,研究了局部焊接细节对连接行为的影响,并建立了连接件塑性旋转与输入冲击能量之间的简化关系,如图 1 所示。Do 等^[2]对爆炸荷载作用下预应力混凝土柱的动力特性进行了数值研究,探究了爆炸荷载引起的应力波在柱截面内、柱高方向的传播以及钢管在爆炸荷载作用下的防护效果,如图 2

所示。模拟结果表明,柱截面在爆炸荷载作用下的变形主要分为两个阶段,即压缩阶段和膨胀阶段,其中混凝土节段的破坏主要发生在后一阶段。Hajek 等^[3]通过全尺寸爆破试验研究,测试了混凝土基复合桥面在近距离爆破荷载作用下的抗爆能力,对近距离爆炸对试样造成的损伤进行分析,所有受试复合材料试样均出现明显分层,层状复合材料的非均匀性将内部回弹引起的爆炸损伤转化为分层损伤。Han 等^[4]针对桥面恐怖爆炸事故进行了 3 组预应力 T 梁模型试验。随着爆炸当量的增加,预应力钢筋的破坏程度加剧,锚固脱落次数增加,普通钢筋由破坏演变为断裂,预应力 T 梁腹板的破坏形态为“X”,腹板两侧的破坏形态大致为“I”型。混凝土裂缝数量增多,裂缝深度增大,裂缝尺寸增大,预应力 T 梁的局部破坏模式由地震倒塌演变为穿透破坏,剩余承载力逐渐降低,如图 3 所示。

Liu 等^[5]采用碳纤维增强聚合物(CFRP)对接触爆炸作用下的钢筋混凝土桥墩进行了防护,并在现场进行了爆炸试验,分析了钢筋混凝土桥墩的损伤发展及 CFRP 防护效果,所有试件在接触爆炸下均发生局部破坏。Wang 等^[6]对接触爆炸下超高性能胶凝复合钢管试件的残余轴向承载力进行了试验研究,并进行了相应的数值模拟研究,探究了钢管厚度和强度、芯混凝土抗压强度、柱直径等相关参数,对接触爆炸下的超高性能胶凝复合钢管试件局部坑炸深度、爆炸后残余轴向承载力以及相应的损伤指标的影响。相关研究成果可为接触爆炸条件下超高性能胶凝复合钢管试件的爆炸后性能评价和设计提供有益的参考。

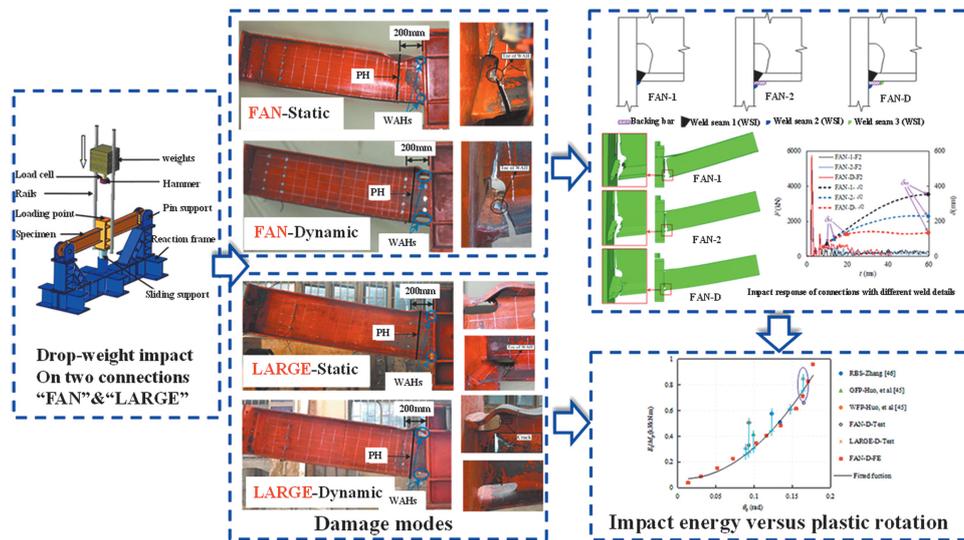


图 1 冲击荷载作用下焊接钢梁柱节点的试验与数值分析

Liu 等^[7]通过现场缩尺试验,研究了 1 个整体式桥墩和 12 个预制节段钢筋混凝土桥墩在近距离爆炸荷载作用下的受力性能和破坏模式。整体式桥墩在爆炸区附近出现局部弯曲破坏,由于应力波的垂直传播,出现大量横向裂缝,而预制节段钢筋混凝土桥墩出现局部弯曲破坏底部节段的冲切破坏和其他节段相对扭转导致的混凝土挤压变形和垂直裂

缝。参数分析表明,七个节段可以减小预制节段钢筋混凝土桥墩的局部残余变形,小长细比可以减小预制节段钢筋混凝土桥墩的整体残余变形;轴压比为 0.1 剪力键和钢筋可以减少混凝土的剥落和竖向裂缝;圆形截面可以有效地削弱由于小损伤引起的预应力损失。

在抗爆数值模拟技术与方法方面,师燕超等^[8]基于等效

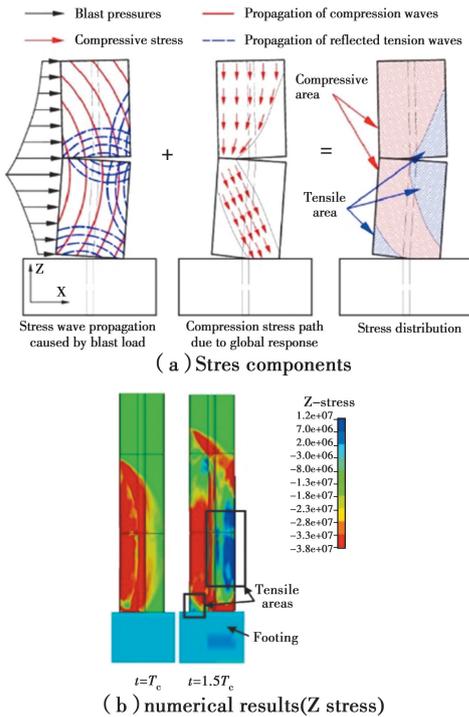


图 2 爆炸荷载作用下预制混凝土节段柱的应力波传播及结构响应

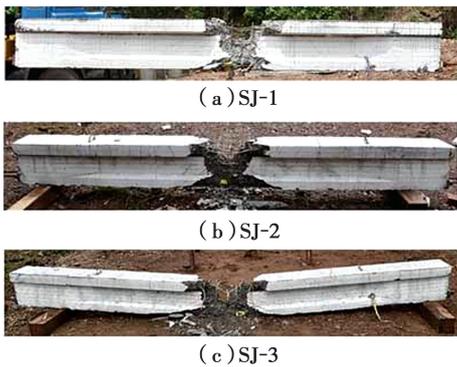


图 3 3 种试件损伤状态的比较

单自由度模型理论,改进了钢筋混凝土梁抗爆分析的直剪单自由度方法,提出了直剪、弯剪联合破坏的判定准则,给出了两种破坏模式下钢筋混凝土梁动态响应的计算方法,并考虑爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的弯曲破坏、直剪破坏和弯剪联合破坏,提出了钢筋混凝土梁式构件抗爆分析的改进等效单自由度方法。秦彦帅等^[9]研究发现,与常规荷载作用相比,爆炸冲击荷载作用下的钢板-混凝土组合结构(SPPCS)力学特性与劣化过程存在显著差异。其分别从理论、试验和数值模拟三个方面综述了爆炸冲击荷载作用下 SPPCS 的动力响应和损伤破坏的最新研究成果,并对其未来发展趋势进行了展望。甘露等^[10]基于数值模拟方法对爆炸作用下钢板和加劲钢板的动力响应和破坏模式进行了研究,并分析了不同工况下顶板、板肋及 U 肋在爆炸荷载下的动力响应和破坏模式。结果表明,U 肋抗爆性能更好,加劲板的破坏程度与加劲肋数量密切相关,增加 U 肋端头隔板有利于提高钢板的

抗扭性能。田力等^[11]通过非线性有限元软件 ANSYS/LSDYNA 模拟预应力混凝土板的爆炸试验和炸药驱动预制破片的试验,研究了爆炸波、破片荷载及二者复合作用下预应力空心板梁的动态响应的差异,同时运用参数化分析方法,研究了张拉控制应力、预应力损失水平、混凝土强度、普通钢筋纵筋配筋率及箍筋间距对空心板梁动力响应的影响。结果表明:构件的抗爆性能随着张拉控制应力增大而增强;在相同张拉控制应力作用下,即使构件有不同水平的应力损失,其抗爆性能也基本相同;提高混凝土强度对构件的抗爆性能的提升作用并不明显;普通钢筋纵筋配筋率的提升在一定范围内可以小幅度提高构件的抗爆性能;随着箍筋间距增加,构件的抗爆性能明显减弱。

杨赞等^[12]采用三阶段连续耦合有限元方法,对预应力钢筋混凝土箱梁桥在内爆荷载作用下的动态响应过程进行了数值模拟,综合考虑结构自重和预应力的影响,重现了箱梁桥局部破坏导致整体垮塌的物理过程。张纪刚等^[13]通过对纤维增强混凝土及其构件抗冲击和抗爆相关的试验研究,介绍了纤维增强混凝土及其构件在冲击和爆炸荷载下的动力学行为,总结了一些学者和专家进行各类纤维增强混凝土材料动力学行为试验所开展的研究方法,为之后各界开展纤维增强混凝土及构件的动力学试验提供部分帮助,促进纤维增强混凝土等复合材料领域动力学试验开展和性能研究,加快新型复合材料在土木工程中的进一步发展和应用。Draganić 等^[14]对关于爆炸荷载缓解的研究进行了总结和系统化,通过提高结构强度和延展性,减少甚至防止碎片飞扬,所有应用方法都具有很高的潜力。Zhang 等^[15]分别对冲击荷载和爆炸荷载作用下的钢筋混凝土(RC)结构进行了研究,通过提出的基于钢筋混凝土梁剩余抗弯承载力的损伤指标,评估了在冲击荷载和爆炸荷载共同作用下,不同钢筋混凝土梁的易损性随梁深、跨长和钢筋配置等重要结构参数的变化,如图 4 所示。

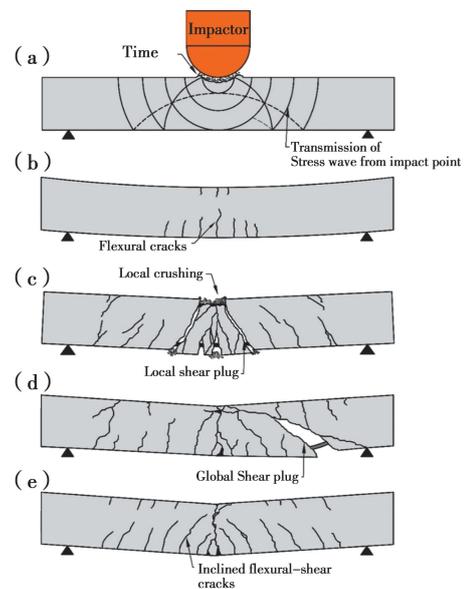


图 4 受冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的理论响应

1.2 爆炸作用下的桥梁抗爆性能及劣化机理

李源等^[16]为研究近爆荷载作用下的混凝土土桥的受力及破坏特征,采用 ALE 流固耦合分析理论,基于 AUTODYN 分析模型,开展了不同炸药当量、桥面跨中位置爆炸、支点位置爆炸等近爆荷载作用下的结构应力场及破坏特征的研究。沈达佳等^[17]为研究爆炸荷载作用下斜拉桥斜拉索的动力响应,开展了近爆作用下斜拉索的抗爆性能分析,对斜拉索应力和损伤进行分析,进一步就不同比例距离展开参数化分析。分析表明,在近场爆炸荷载下,斜拉索不会出现断裂,其破坏形式表现为应力超过屈服应力带来的失效,斜拉索最薄弱的位置是索梁锚固区,保持斜拉索不失效的安全比例距离为 $0.287 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。周游等^[18]采用实验与数值模拟相结合的方法,对比分析了薄壁方管在单次和重复爆炸荷载作用下的动力响应。其将薄壁方管置于爆炸场中进行冲击实验,并利用非线性动力有限元程序 LS-DYNA 完全重启动功能及流体与固体耦合算法,对薄壁方管在单次爆炸和重复爆炸荷载下的非线性动力响应过程进行三维数值模拟;描述了方管在不同爆炸次数下的动力响应及损伤变形,给出了一种通过损伤因子反映爆炸荷载作用后材料损伤劣化的数值计算方法。张强等^[19]为研究弹药接触爆炸条件下钢筋混凝土板的动力响应及毁伤模式,基于量纲分析得到了接触爆炸条件下钢筋混凝土板破坏特征量(正面破坏区直径、贯穿区直径和背面震塌区直径)与柱形装药直径、长径比之间的无量纲关系;在大量的数值计算的基础上总结出了装药直径、长径比与钢筋混凝土板破坏特征量关系的经验公式,以其为重要建筑物、桥梁和防护结构的毁伤评估提供一定的参考。Wang 等^[20]通过现场接触爆轰试验和随后的轴向压缩试验研究,表明轴压下完整柱和爆炸损伤柱均表现为斜剪破坏。Jin 等^[21]在研究三元局部共振超材料(LRM)这种新型隔震隔声材料在土木工程中的应用时,采用解析推导和数值模拟的方法研究了爆炸荷载作用下三元 LRC 结构的机理和性能,研究了不同材料(天然骨料和铅)、不同弹性模量和软涂层厚度对三元 LRC 结构响应的影响,并且发现三元 LRC 能有效地降低爆炸荷载作用下三元 LRC 结构的损伤。

Zhang 等^[22]在研究钢管混凝土节段柱的爆破性能时通过钢管混凝土节段柱现场爆破试验数据和节段柱室内冲击试验的研究分析,将钢管混凝土节段柱与传统的整体柱、预应力整体柱的抗爆性能进行比较,并进行参数化研究,探究了填充混凝土强度、钢皮厚度、预应力比、节段数等因素对节段柱抗爆性能的影响。增加钢板厚度能有效提高钢管混凝土节段柱的抗爆性能,同时提高混凝土强度、预应力和节段数,可提高钢管混凝土节段柱的抗冲击承载力,如图 5 所示。

Zhu 等^[23]采用基于完全耦合拉格朗日模型和欧拉模型的多欧拉域方法,利用商用软件 Autodyn,探究了汽车爆炸作用下的钢-混凝土组合桥损伤机理。结果表明:爆炸荷载作用下,桥梁破坏经历了弹性、塑性和塑性较三个全截面阶段;但支座发生爆炸时,钢梁在弯曲破坏前发生剪切破坏,两者作为控制因素决定了结构的抗爆能力。Wang 等^[24]对不

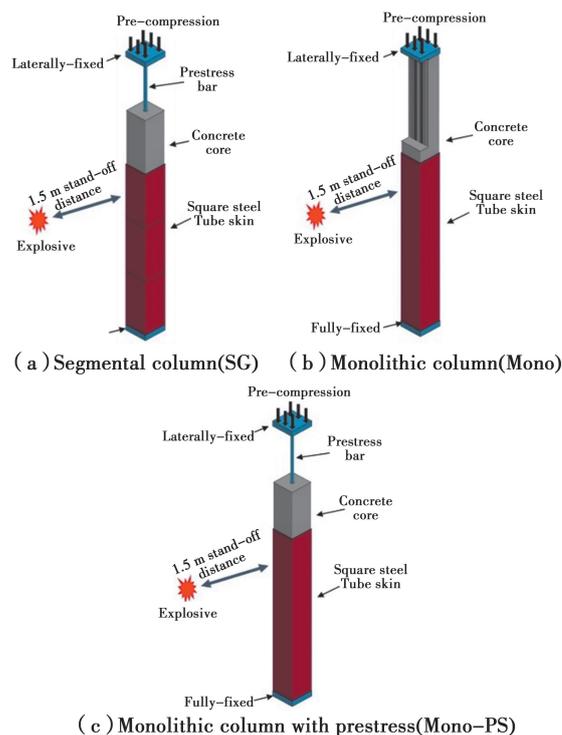


图 5 节段和整体 CFSC 柱模型的图解

同碳纤维布强化比的四种钢管拱在冲击荷载作用下的动力响应进行了深入研究,发现提高碳纤维布强化比和混凝土强度可以提高管拱的抗爆性能,如图 6 所示。在此基础上建立了拱的残余承载力与损伤度之间的联系,提出并讨论了简化的理论模型,可用于预测拱的极限承载能力。

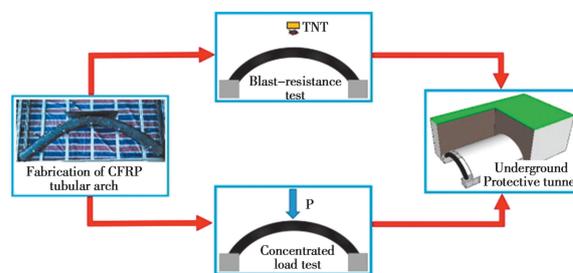


图 6 CFRP 管拱的爆炸响应及损伤评估

Yang 等^[25]对于不同截面形状的钢筋混凝土柱在接触和近距离空气爆炸作用下的损伤特性和动力响应,以及不同截面形状的钢筋混凝土柱在水下爆炸荷载作用下的抗爆性能进行了深入研究,并对比了接触爆炸和近距离爆炸作用下钢筋混凝土柱的非线性动力响应特性和损伤机理。无论是空气爆炸还是水下爆炸,截面形状对柱的抗爆性能都有显著影响,采用圆形截面可以有效地提高柱的抗爆性能,如图 7 所示。Zhu 等^[26]通过试验揭示了筒支边界小箱梁桥的爆破性能和破坏机理。研究表明,梁上发生爆轰时钢筋发生严重的混凝土剥落和断裂。由于损伤板释放的能量,桥面以上爆炸时,局部损伤和耗散振动有限,因此,增加梁间距,引导爆炸车辆的路径,可以有效降低桥梁倒塌的风险。Wang 等^[27]对超高性能水泥基复合钢管试件接触爆炸后的剩余抗震性能

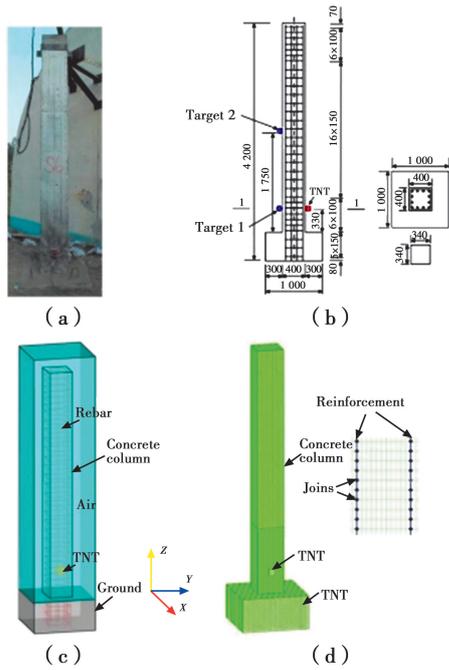


图 7 方柱实验装置

进行了试验研究。Gholipour 等^[28]从理论上研究了冲击荷载和爆炸荷载共同作用下中高层建筑钢筋混凝土柱的破坏行为和动力响应,如图 8 所示。

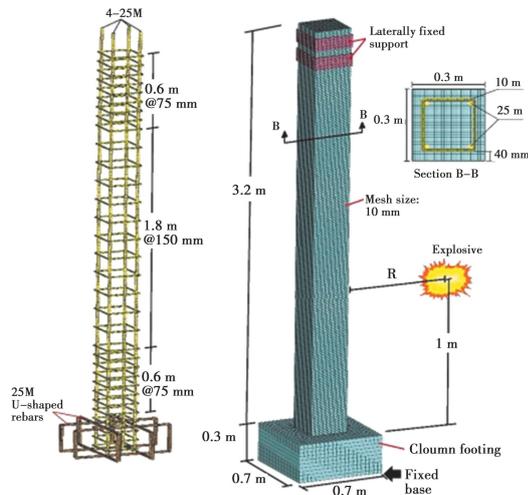


图 8 柱的爆炸试验

通过计算时滞参数的影响,发现在冲击力达到峰值时,连续爆轰作用下,柱体受到较大的剪切力和较严重的整体损伤。此外,在组合荷载情况下,荷载作用于柱中部高度,损伤指数对轴压比和冲击速度参数的敏感性阈值与单独冲击和爆炸荷载下计算的阈值存在差异。Liu 等^[29]针对普通方形钢筋混凝土桥墩和方形预应力混凝土桥墩进行了底部爆炸试验,探究了近距离爆炸荷载作用下预制节段钢筋混凝土桥墩的动力响应和破坏机理。预制节段钢筋混凝土桥墩在底部爆炸区出现局部节段破坏,并因混凝土挤压应力在爆炸区上方其他节段部位产生竖向裂缝和混凝土挤压,节段界面阻碍了爆炸导致的应力流的传播。Lee 等^[30]通过对钢筋混

凝土柱进行了试验,探讨了横向钢筋用量较大细部设计对结构的影响。采用细部设计可以提高柱的抗爆性能,从而减少柱中高度的最大位移和残余位移,更好地控制裂缝,并能承受较大的爆炸荷载,如图 9 所示。

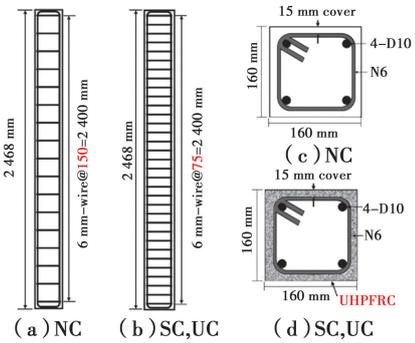


图 9 柱试样详图

Alsendi 等^[31]采用考虑材料损伤、断裂和分离的非线性有限元方法,对典型钢筋混凝土桥墩柱的抗爆性能进行了模拟。爆破承载力与混凝土强度和配筋率基本呈线性关系,其中配筋率对爆破承载力的影响最大;单层钢纤维混凝土适度地提高了抗爆性,但额外的钢纤维混凝土层提供的抗爆效应甚微。Tetougueni 等^[32]在探讨了爆炸等极端荷载对三种不同结构形式的斜拉桥的结构响应影响,并考虑不同荷载参数和位置对斜拉桥损伤进行了预测。

1.3 爆炸冲击作用下的桥梁安全评估方法

师燕超等^[33]提出了基于现场实测频率变化的钢筋混凝土柱爆炸损伤快速评估方法,通过研究矩形钢筋混凝土柱箍筋配筋率、纵筋配筋率和长细比对爆炸荷载作用前后钢筋混凝土柱频率变化的影响规律,拟合出柱损伤程度与频率变化之间的关系公式,建立了在爆炸现场通过频率测试对矩形钢筋混凝土柱爆炸损伤程度的快速评估方法。周晓宇^[34]建立了基于性能的钢筋混凝土构件抗冲击设计方法框架,以钢筋混凝土立柱抗爆设计为例,通过非线性有限元分析得到了设计构件的抗冲击性能状态,并对不满足设防标准的设计参数进行优化,得到满足三标准抗爆设防目标的立柱设计参数。如图 10 所示。

张于哗等^[35]为研究爆炸冲击作用下节段拼装桥墩的破坏模式和损伤评估方法,采用 ANSYS/LS-DYNA 建立了方形截面整体式桥墩和节段拼装桥墩受爆的三维实体分离式模型。通过改变爆炸 TNT 当量和爆炸距离,对比分析了不同超压作用下整体式桥墩与节段拼装桥墩的应力变化、破坏模式与损伤机理,并提出了基于截面损伤与墩身侧移的桥墩受爆损伤评估方法。Ding 等^[36]提出了一种基于 Jaya 和树种子算法(TSA)的混合群智能结构损伤识别方法。该方法考虑了测量和有限元建模中的高度不确定性,将结构损伤模拟为单元刚度的折减,将结构损伤识别描述为优化问题。识别结果表明,所开发的 C-Jaya-TSA 与非概率区间分析方法相结合可准确地识别结构损伤,如图 11 所示。Lee 等^[37]提出了一种基于数值分析的结构抗爆性能评估方法,并通过实例验证了该方法的可行性。建议的程序包括:1)选择严重影响

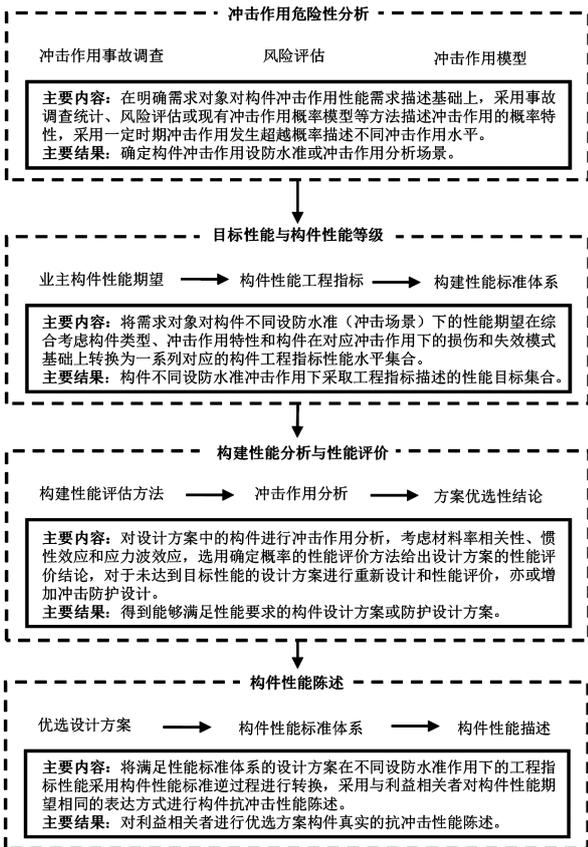


图 10 基于性能的构件抗冲击设计方法框架

整体结构行为的主要结构部件;2)设置由不同爆炸级别和位置组成的爆炸危险场景;3)使用数值爆炸模拟评估部件,如图 12 所示。通过实施实例评估,可以确定每个部件的临界爆破水平,并找到对考虑部件影响最严重的爆破位置。本研究采用的基于情景的评估方法,将有助于评估现有桥梁和将来设计中的桥梁结构在爆炸荷载作用下的性能。

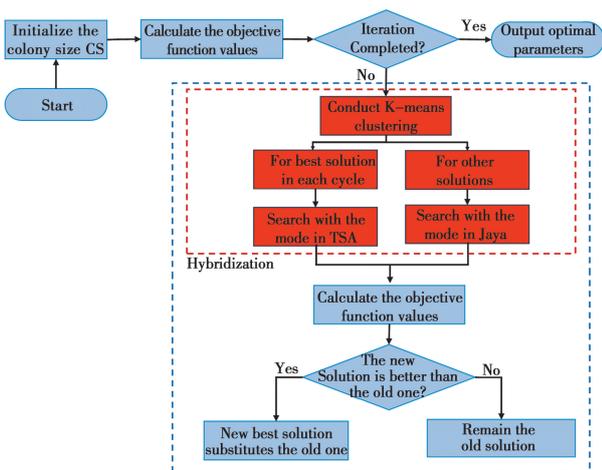


图 11 拟议混合 C-Jaya-TSA 的流程图

当前抗爆研究主要是以数值模拟方法为主,理论分析和试验研究相对较少,且研究对象大部分针对的是桥墩。理论分析尚不能充分考虑抗剪连接件对结构的作用,包括结构的破坏形态、损伤机理、动力特性、裂缝的扩展速度、抗剪连接

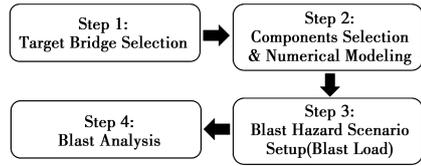


图 12 基于数值分析的斜拉桥构件抗爆性能评估

件的极限承载力和荷载滑移曲线、组合界面滑移;爆炸试验的难度较大,对设备的要求较高,且对数据的采集不够完善,缺乏基础性试验数据。相关的试验研究及相应的测试技术依然是下一阶段研究的重点和难点。关于数值模拟研究,目前仍以 LS-DYNA、ABAQUS 等商用有限元软件模拟为主,且模拟方法相对较成熟。如何通过大型的试验技术获得结构的动态本构关系,并综合考虑钢板和混凝土材料在高应变率下的力学特性,考虑桥梁结构整体损伤,对结构整体的抗爆性能尚待进一步研究。

2 桥梁防火研究进展

在桥梁防火方面,学者们主要围绕桥梁火灾试验测试与模拟技术、火灾下桥梁损伤机理与安全评估、过火后桥梁性能演化与灾变机制等方面进行了深入研究。

2.1 桥梁火灾试验与模拟技术

孟令野等^[38]对不同型号高强度螺栓的接头试件进行了不同温度条件下的抗剪试验研究,确定了常温下螺栓接头的摩擦面抗滑移系数、不同温度下的荷载-位移关系、荷载折减系数及试件的破坏形式。试验表明:随着温度的升高,螺栓接头的破坏形式发生改变;在不同温度条件下,采用耐火高强度螺栓可显著提高螺栓连接接头的高温极限承载力,并给出了建立该类螺栓接头高温设计方法的相关建议。朱美春等^[39]以工程中广泛应用的热铸锚、冷铸锚和 Wirelock 锚三大类锚固系统为研究对象,采用平行钢丝束拉索足尺试件对其防火性能进行了系统研究。通过 6 个拉索锚头试件在有应力状态下的火灾试验(试验参数包括拉索锚固类型和应力水平),研究其温度场分布及锚固性能退化规律。试验结果表明:锚具内部温度分布不均匀,底端温度最高,前端最低;拉索锚固系统在高温下的滑移过程大致分为无滑移、滑移稳定增长和破坏 3 个阶段,其中热铸锚的无滑移段持续时间最长,约为 60 min,冷铸锚和 Wirelock 锚的无滑移段持续时间都在 20 min 以内;3 类试件的破坏时间即耐火极限相近;当构件破坏时,热铸锚、冷铸锚、Wirelock 锚的临界温度分别为 420~443 °C、440~450 °C、279~284 °C;当拉索预应力水平从 0.3 增加到 0.4 时,拉索锚头耐火性能下降,如图 13 所示。

杨阳等^[40]为研究温变对大直径圆钢管混凝土构件截面温度场分布的影响,分别在室外环境和人工气候模拟试验箱内进行了温变试验,测得不同温变条件下钢管混凝土试件和素混凝土对照试件的温度场。试验结果表明:钢管混凝土试件和素混凝土对照试件温度场变化规律基本一致,无日照作用时截面温度场呈均匀分布;日照作用下截面温度场呈非均匀分布。两种环境下的试件截面温度场均呈现出从外往内



图 13 锚头破坏形态

越靠近圆心,温度变化越滞后的现象,而且试件截面最大温差主要取决于太阳辐射和气温变化幅度。张玉琢等^[41]为研究三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土柱的耐火极限,采用 ABAQUS 有限元软件建立了在 ISO834 标准火灾作用下三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土温度场及耐火极限有限元分析模型,分析了三面受火过程中取代率、荷载比、混凝土强度、长细比、含钢率、荷载偏心率对构件截面温度及其耐火极限的影响。模拟结果表明:荷载比对试件耐火极限影响显著,随荷载比增大耐火极限降低;含钢率在一定的范围内可以调高构件耐火极限,荷载比为 0.6 时,当含钢率由 5.55% 增加至 7.02% 时,耐火极限提升了 14.77%;当含钢率由 7.02% 提升到 8.51% 时,耐火极限仅提升了 3.09%。荷载偏心率对于构件耐火极限影响较为复杂,当荷载比低于 0.5 时,荷载偏心率对于构件耐火极限的影响主要取决于构件由于受火所引起的挠曲方向。适当减小构件荷载比、增大含钢率,可有效提高三面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土柱耐火极限。黄全成等^[42]在已有文献试验数据的基础上,验证了有限元拟合箱梁温度效应的正确性,建立了磁浮箱梁有限元模型,研究了日大气环境下箱梁在上海与青岛两地的温度效应,在此基础上研究了风速对于箱梁温度梯度的影响。结果表明:不同地区由于日照辐射、风速、大气温度等因素的不同,导致箱梁的竖向与横向最不利温差大小不一致,但温差分布趋势一致;竖向与横向温差梯度与规范相比存在一些区别,主要表现为温差非单方向减小;3 种方法计算的竖向温度变形中,拟合公式由于未考虑箱梁横向温度梯度,其计算的竖向温度变形最小,规范公式与三维模型计算结果相近。康俊涛等^[43]为研究汽车火灾对大跨度钢桁架拱桥结构受力性能的影响,以主跨为 240 m 的某下承式钢桁架拱桥为研究对象进行受火分析计算。结果表明:钢桁架拱肋在油罐车火灾作用下受火构件的最高温度达 540 ℃;主要传力构件在温

度为 430 ℃ 时屈服,达到承载能力极限状态,热膨胀效应与内力重分布导致附近构件的应力增幅达 60~180 MPa;桥面竖向位移变化最大为 115 mm,最大横向高差为 108 mm。油罐车火灾主要对火源附近 3 根吊索的温度场产生影响,受火吊索索力减小使得桥面下挠 33 mm,主梁应力增大 35 MPa。

刘才玮等^[44]为获得混凝土梁的受火损伤程度,提出了基于小波神经网络技术以等效爆火时间为指标的损伤识别新方法。数值模拟结果表明,该方法准确度较高,最后设计 4 根足尺寸钢筋混凝土简支梁分别进行 60、90、120、150 min 的火灾试验及灾后承载力试验,实测了火灾前、后及过程中的结构模态信息及灾后荷载-位移曲线。基于修正后的精细化模型,利用前 2 阶不完备模态信息构造小波神经网络输入参数、等效爆火时间作为输出参数进行损伤识别,实测值与识别预测值吻合较好,验证了该方法的可靠性,如图 14 所示。

杜咏等^[45]根据试验数据,建议了热铸锚填料锌铜合金和冷铸锚填料环氧树脂/钢丸混合物的比热容及导热系数计算公式。并基于热传导理论和 ABAQUS 数值传热模拟平台,进行了 ISO834 标准火灾下锚固节点截面瞬态温度分布的参数分析。结果表明:随着受火时间的延长,热铸锚杯壁截面温度分布非均匀性逐渐显现,锌铜合金填料的升温速率显著低于锚杯壁;冷铸锚杯壁截面温度分布较均匀,包裹钢丝的填料区域较填料其他区域温度分布非均匀性降低。总体上,锚头沿中心轴的温度分布非均匀性显著,且升温明显滞后于环境温度,无防火保护的情况下锚杯内壁界面处的填料将在较短时间内失效。其所提出的热铸锚截面瞬态升温理论计算式,为预应力钢结构锚头抗火承载力验算提供了理论依据。

Zhang 等^[46]提出了一种评估火灾下的复合箱形桥梁的耐火性能的方法。该模型考虑了关键参数,即火灾情况,火灾暴露长度,载荷水平,腹板和底部翼缘和腹板型式中纵向

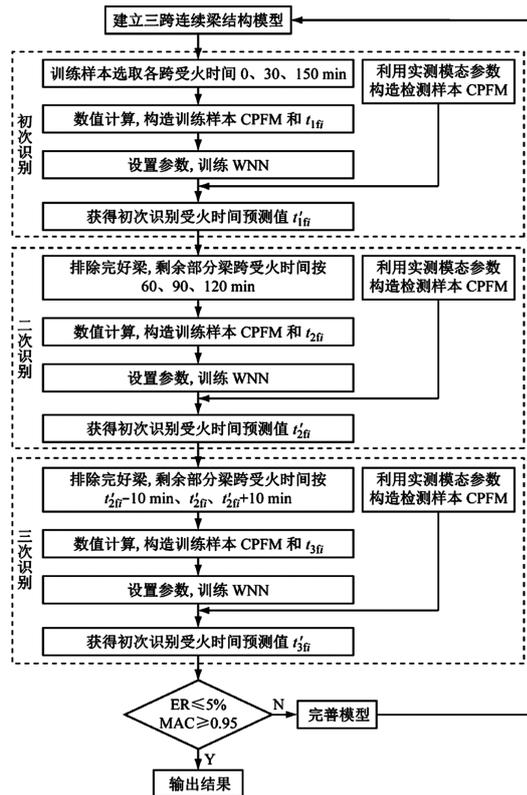


图 14 连续梁分步损伤识别方法

加肋的数量。结果表明,火灾严重程度、火灾暴露长度、荷载水平、纵向加肋数量和腹板长细比对组合梁的耐火性能有显著影响。纵向加强筋可以降低挠度,并增强抗火性能,同时基于腹板屈曲的破坏准则提出了适用于实际连续梁在局部火灾和结构荷载作用下的抗火计算方法^[47-48]。Song等^[49-50]提出了一种研究碳氢化合物暴露于火灾下的连续弯钢板-混凝土组合桥梁和预应力混凝土箱梁的性能的方法。利用 ANSYS 开发的三维非线性有限元模型,分析了火灾持续时间和同时结构荷载共同作用下的连续弯钢板-混凝土组合桥梁和预应力混凝土箱梁的响应,并使用暴露在炉中 ISO834 火中的比例缩放钢板梁和预应力混凝土箱形梁进行了模型验证。通过实例分析表明:连续弯钢板-混凝土组合桥梁的耐火性能受沿横向和纵纵向受火位置以及曲率的影响显著;混凝土保护层对预应力钢绞线的厚度和荷载水平对预应力混凝土箱梁的耐火性能有显著影响;增大预应力钢绞线的预应力将加快预应力箱梁在最终火灾暴露阶段的突然倒塌进程;减小火灾暴露长度或防止跨中区域发生火灾,可极大地提高简支预应力混凝土箱梁的抗火性能。在特殊情况下,预应力混凝土箱梁在碳氢化合物火灾暴露条件下受变形率失效准则控制。

Janssens等^[51]提出了一种对混凝土桥梁及其暴露于火中并易于剥落的结构部件的机械性能进行建模的方法。该方法可以捕获主要的物理和化学现象,非常简单,可以在 3D 结构仿真中实现。Li等^[52]分析了高温下钢桥的热力学性能,然后分析了考虑海洋环境破坏的钢桥腐蚀机理,最后,将氯化物腐蚀产生的初始裂纹的最大宽度作为快速氯化物腐

蚀试验的损伤指标,对不同损伤程度的构件进行了耐火试验。试验结果表明,腐蚀损伤指标对钢桥的耐火性能有显著影响,腐蚀裂缝宽度越大,试件抗弯承载力损失越大。Nicoletta等^[53]研究了用于快速建造钢筋混凝土(RC)桥面的玻璃纤维增强聚合物(GFRP)固定结构模板的防火性能,并测试了使用 GFRP 保持原位形式加固的混凝土板的七个横梁截面。试验结果表明:数值模拟得到的损伤相比于试验而言过于保守;与未损伤控制相比,火灾损伤不足以降低试件的极限荷载或改变试件的破坏模式;GFRP-混凝土在高温下的直接粘结剪切试验发现,粘结剪切应力和粘结刚度随粘结温度的升高而降低。Wu等^[54]介绍了在碳氢化合物燃烧下两种类型的粘结后张法混凝土桥梁的试验和数值研究。结果表明:箱形梁在使用荷载作用下能够承受火灾 184 min,而 T 梁在倒塌前只能承受 105 min;超载后的箱形梁能够承受 165 min 左右的火灾,经过 90 min 的火灾冷却后,箱形梁和三通梁分别损失了 11%和 38%的承载能力。火灾后的观察表明,箱形梁在试件的跨中和支撑区域严重剥落。Cai等^[55]为了研究在火灾后使用 UHPC 改善的梁柱节点的力学性能,对钢筋混凝土梁柱节点进行了一系列测试,其中常规混凝土和 UHPC 都在节点中。根据指定的加热曲线对样品进行了火暴露测试,然后进行了准静态载荷测试。结果表明:温度对混凝土梁柱节点试件的极限强度和初始刚度有显著影响;UHPC 的应用显著提高了梁柱节点的受力性能耗能能力;火灾暴露后,UHPC 试件的承载能力相应降低。

2.2 火灾下桥梁损伤机理与安全评估

张岗等^[56]针对钢结构桥梁抗火问题总结了国外遭遇典型火灾事故的钢结构桥梁特征、火灾发生的时间、过程及其所导致的后果,研究了油罐车火灾发生时的燃烧特征和钢结构桥梁遭遇油罐车火灾时的响应特征,并指出了当前亟需建立火灾后钢结构桥梁的安全评价方法与火灾时的智能防护技术。Chi等^[57]对钢桥火灾后进行了 X 射线荧光光谱法、超声波法和金相复制试验三种无损检测方法。火灾期间桥梁钢结构可能温度在 420 °C 以下,且没有裂纹等缺陷,钢的金相组织的组成和比例没有明显变化,本研究结果有助设计结构安全评估技术,如图 15 所示。

宋超杰等^[58]为研究提高钢-混组合连续弯箱梁抗火性能的策略,选取某三跨钢-混组合连续弯箱梁为研究对象,利用通用有限元软件 ANSYS 建立了其在火灾下的三维非线性两阶段分析模型,并研究了其极限承载能力和刚度衰变规律;以火灾下跨中挠度为评估指标,提出了针对钢-混组合连续弯箱梁的抗火设计方法。魏亚等^[59]提出了一种基于光学分析的比色法,通过色度图中颜色坐标的移动来评价混凝土的热损伤。对 C30 混凝土立方体进行了火灾破坏实验,然后在日光与荧光、手动与自动白平衡条件下拍摄混凝土表面照片,研究结果将有助于提高混凝土火灾损伤评估的技术水平。张晓栋等^[60]基于易损性分析及危险性分析,提出了桥梁在车辆火灾作用下风险概率的数值计算方法。依据车辆火灾事故的统计数据,利用最大熵原理估计了最大热释放速率

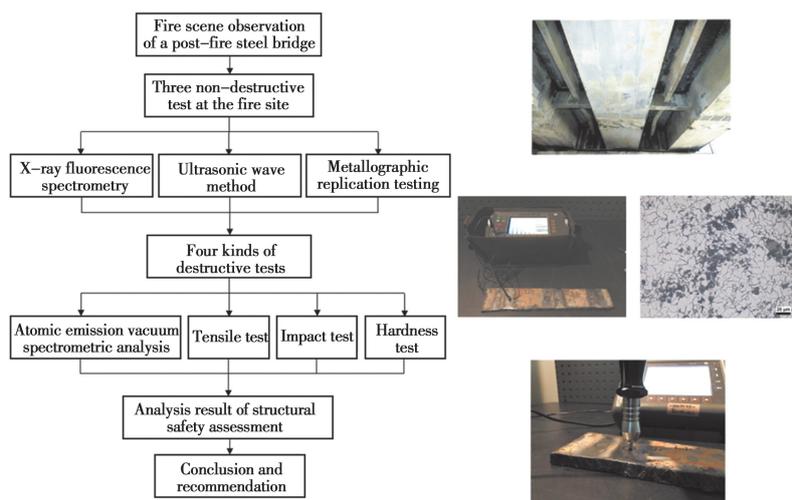


图 15 钢桥火灾后结构安全评价研究

的概率密度函数,在此基础上提出了基于 RSM-MCS 的桥梁构件易损性分析方法,并通过对结构体系、构件相关性及体系损伤准则的进一步研究,建立了结构体系易损性的分析方法。郑志远等^[61]系统阐述了初始缺陷对普通组合梁和预应力组合梁特性影响研究的现状,并指出今后在高温下初始缺陷对钢-混凝土组合梁性能影响方面值得进一步研究的方向。郑志远等^[62]为研究带几何缺陷的预应力连续组合梁抗火性能,建立了预应力连续组合梁在高温下的非线性有限元模型。通过屈曲分析引入最不利模态缺陷,揭示了梁的跨中挠度、预应力筋内力、截面弯矩随温度的变化规律,确定了荷载比及预应力比对带缺陷的预应力连续组合梁抗火性能的影响。

宋超杰等^[63]针对油罐车火灾对钢结构桥梁造成的严重威胁,以四跨双肋钢板组合连续梁(4×35 m)为研究对象,根据油罐车火灾燃烧特点选取最为贴近的碳氢(HC)火灾升温曲线,以实际受火特征还原了4种受火模式,采用热-力耦合计算方法建立了有限元模型,并对模型有效性进行了验证,为火灾下钢桥损伤分析奠定了基础。王庆杰等^[64]采用有限元方法探究了火灾下螺栓连接蜂窝梁的屈曲性能,并与传统焊接蜂窝梁进行了比较,分析了不同连接方式对蜂窝梁孔间腹板的屈曲模式和屈曲温度的影响,并对上、下两T形部分采用螺栓搭接连接、以单侧拼接板对接连接和以双侧拼接板对接连接的蜂窝梁的屈曲性能进行了系统研究。郭梓红等^[65]为研究预应力混凝土T梁在火灾后承载能力随延火时间的变化规律,采用ANSYS建立实体模型,通过施加不同的火灾工况,设计材料在高温下的强度折减,计算了不同火灾工况下的抗弯承载力并对其进行安全性进行评估。

鞠晓臣等^[66]为探究铁路桥梁发生火灾时的温度场和桥下失火安全高度,基于大涡模拟法对火灾场景开展研究。根据铁路桥梁火灾案例调研结果,将铁路桥梁火灾场景设定为桥面列车火灾、开敞式桥下火灾、半开敞式桥下火灾3种,确定3种火灾场景的参数取值和火焰尺寸,采用FDS火灾场模拟软件建立火灾场景的模型,分析温度场和升温曲线,并确

定桥下失火安全高度。邢德进等^[67]对火灾下预埋温度传感器的混凝土试件进行高温试验,研究了单面受火和三面受火两种工况下温度在混凝土内部的传播以及分布规律。并在试验的基础上采用大型通用软件ANSYS对混凝土试件内部的温度场进行了数值模拟,数值模拟结果与试验结果吻合较好。刘晓光等^[68]选择典型铁路桥梁64 m单线钢桁梁为研究对象,对其火灾作用下的温度场分布情况和力学行为进行了分析。基于桥梁结构特点及可能发生的火灾场景,确定桥面列车火灾为危险场景,并提出了温度场升温曲线。王莹等^[69]为了探明钢桥火灾下的腹板和底板的临界屈曲应力变化规律,利用火灾动力学软件FDS建立钢桥热分析模型,将多项式拟合所确定的钢材热工参数函数赋予钢材板件,通过确定油罐车热释放率增长模型计算得到桥梁随时间变化的温度场,同时根据钢材板件屈曲理论计算得到了火灾下桥梁腹板和底板随时间变化的临界屈曲应力,并采用有限元算法进行了验证。王莹等^[70]为了确定大跨径双层钢桁梁公路悬索桥油罐车燃烧下的损伤破坏情况,以武汉杨泗港长江大桥为背景,利用火灾动力学软件FDS模拟桥梁上7种不同火灾燃烧场景,以此确定出桥梁最不利油罐车火灾热释放率函数增长模型及规模。许肇峰等^[71]为分析火灾后预应力混凝土梁桥结构损伤,评定灾后桥梁安全性,通过火场调查、混凝土外观检查和烧失量检测,推定构件表面最高温度。采用有限元法分析桥梁构件温度场,探讨了不同温度下混凝土材料性能损伤劣化规律,提出了火灾后混凝土构件截面损伤等效代换方法,给出了截面损伤量化公式结合桥梁静载试验结果,对火灾后预应力混凝土梁桥安全性能进行评定。周焕廷等^[72]采用有限元软件对耐火钢预应力连续组合梁在高温下的抗弯性能进行参数研究,引入了材料非线性、几何非线性以及钢梁初始几何缺陷,考察了预应力组合梁在高温下的破坏形态,耐火极限,跨中挠度随温度及时间变化的曲线,分别得到了不同受火工况与耐火钢使用截面位置对组合梁高温下抗弯性能的影响规律。

曹茜等^[73]为探索抗火优越的纤维织物结构用于桥梁构

件防火隔热措施的可行性,通过抗火实验研究分析了织物结构的隔热效果,并测得其导热系数,为纤维织物防火隔热桥梁措施的研究提供了基础数据。Kodur 等^[74]介绍了温度对不同类型的超高性能混凝土(UHPC)的热性能的影响。在 20~800 °C 温度范围内对 UHPC 样品进行了一系列热性能测试,以测量导热系数、比热、质量损失和热膨胀。Jia 等^[75]通过在预应力钢和 SMA 筋的混合使用中引入形状记忆合金(SMA),获得了预应力混凝土梁可接受的抗火性能。为了研究所提出的梁的耐火性,首先给出了高温下混凝土、钢和 SMA 的材料性能的拟合公式;然后给出了混合梁的分析模型和工作机理;最后,还给出了耐火性的预测方法,以及梁的抗弯承载力和挠度的计算公式。Ma 等^[76]为车辆火灾下桥梁结构的性能设计提供了一个实用的框架流程,详细定义了火灾场景,结构热分析方法,防火等级以及基于风险分析的维护成本评估过程,并通过一个典型的案例研究来说明此设计过程的适用性和合理性。Zhu 等^[77]开发出了一种快速运行的分析框架模型,可以评估钢制桥梁的着火情况。分析的结果可用于制定性能指标,以表明火灾引起的损伤风险以及潜在的防火策略的有效性。Nicoletta 等^[78]对桥梁火灾研究的最新进展进行了回顾,旨在总结关键发现并为研究人员和从业人员提供最相关的信息。Martínez-Muñoz 等^[79]总结了对复合桥梁的设计、优化、施工过程与维护,性能评估和决策技术所进行的研究,以期制定完整的设计方法,设计标准方案如图 16 所示。

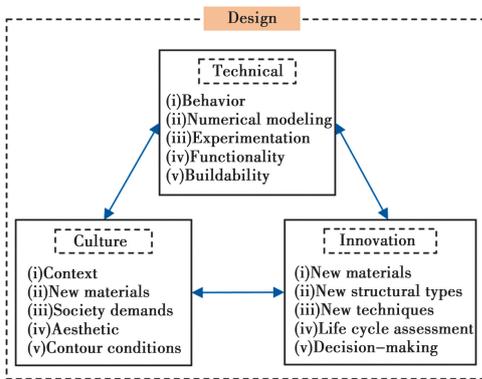
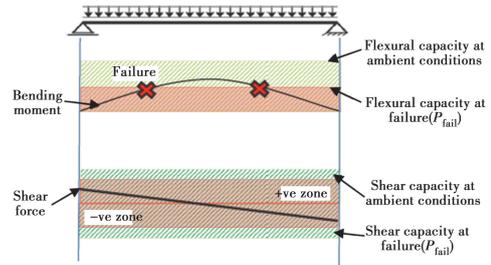


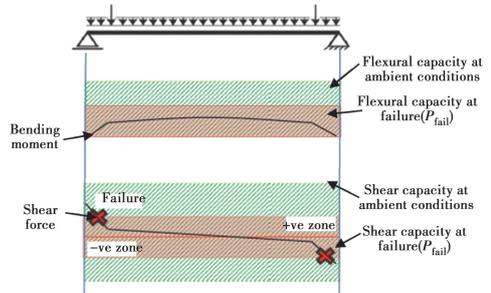
图 16 设计标准方案

Naser 等^[80]提出了旨在探究冷弯型钢梁火灾响应的数值研究成果,探讨了温度导致的剪切不稳定性对开槽冷弯型钢梁响应的影响。火灾条件下梁的弯矩和剪力变化如图 17 所示。Cui 等^[81]提出了一种研究三塔悬索桥稳定性的方法,其中考虑了油轮在中钢塔附近起火。结果表明,目前未考虑高度影响的火灾温度曲线会严重高估油轮火灾的影响,稳定系数在 30 min 后显著下降,且与火灾规模和燃烧位置有很强的相关性,该方法和结论对钢塔斜拉桥的安全评估、管理和维护具有重要的参考价值。陈伟强等^[82]为研究高温后混凝土的损伤特征,对 25~900 °C 范围内 10 种温度水平的混凝土立方体试块进行了单轴压缩和变幅循环加卸载试验,同步进行声发射采集。试验结果表明:高温后试块表观特征、受压破坏形态、力学性能、加载过程中的 Kaiser 效应和声发射速率过程参数均能有效表征高温对混凝土的损伤作用;以声

发射速率过程理论和损伤力学建立的高温后混凝土损伤模型,建立了利用初始损伤因子 D0 对高温后混凝土损伤程度进行定量评估方法。Fan 等^[83]针对城市桥梁火灾风险评估的模糊性和不确定性的特点,提出了一种基于模糊贝叶斯网络的城市桥梁火灾风险评估模型,并验证了模糊贝叶斯网络风险评估的可行性和有效性。Naser 等^[84]介绍了紧凑型钢梁中温度引起的弯矩剪切相互作用现象。相关结果可用于量化温度导致的关键参数对弯矩-剪切力相互作用,剪切和挠曲截面承载力以及火灾条件下钢梁的不稳定性的影响。暴露在火中的钢梁的抗弯和抗剪承载力评估如图 18 所示。



(a) Beam subjected to dominant bending moment



(b) Beam subjected to dominant shear loading

图 17 火灾条件下梁的弯矩和剪力变化

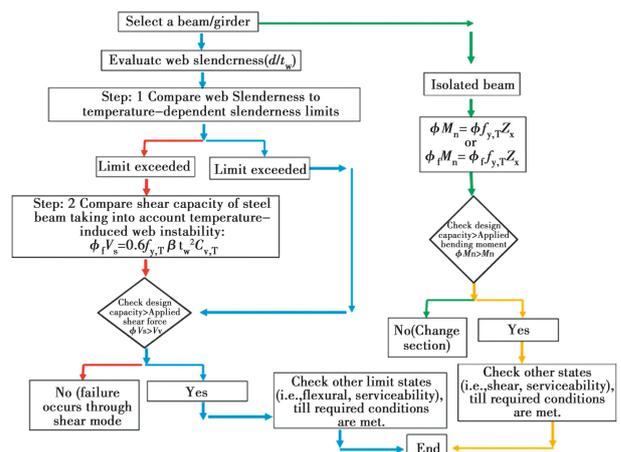


图 18 暴露在火中的钢梁的抗弯和抗剪承载力评估

2.3 过火后桥梁性能演化与灾变机制

张岗等^[85]对过火后遭遇不同温度的钢板-混凝土组合梁的剩余承载性能进行了研究,提出了过火后钢板-混凝土组合梁的安全评价方法。李国强等^[86]研究了表面涂层对钢构件膨胀涂料抗老化和防火性能的影响。基于经历了不同周期热液老化的膨胀涂料,测定其有效恒定导热系数,定量表征其防火性能。化学分析结果表明,面漆可以限制膨胀涂料

中亲水性组分的迁移,从而提高膨胀涂料的抗老化性能。采用 3 层或 4 层 P 型(热塑性)面漆的新鲜膨胀涂料在不同的老化周期内都能保持防火性能,涂两层面漆几乎可以确保不会因膨胀型涂层老化而增加结构安全的火灾风险。

邹慧辉等^[87]采用 LS-DYNA 软件对 ISO 834 标准火灾后的钢管活性粉末混凝土柱抗爆动态响应全过程进行了模拟。其首先采用 ANSYS 软件模拟钢管活性粉末混凝土柱在高温作用下的温度场分布,进一步得出钢管和核心混凝土的残余强度,在此基础上分别用弹塑性模型和 K&C 模型,描述钢管和钢管活性粉末混凝土柱的本构关系。结合试验结果,研究了荷载参数、几何特征参数和材料性能参数对火灾后钢管活性粉末混凝土柱抗爆性能的影响规律。刘晓等^[88]为了研究火灾后中空夹层高强钢管高强混凝土在纯弯作用下的力学性能,利用 ABAQUS 软件建立模型,对纯弯构件以受火时间、空心率、内外钢管屈服强度和混凝土抗压强度为主要变化参数,剖析了中空夹层高强钢管高强混凝土的纯弯工作机理,并对其典型的弯矩和跨中挠度关系曲线进行了分析。王保群等^[89]以某高速公路桥梁火灾后配筋混凝土实体板梁为研究对象,对其进行了不同火灾工况下梁体承载力试验,得出了不同火灾工况下梁板承载力变化规律,建立了火灾后梁体承载力修正公式和梁体刚度修正系数,为开展配筋混凝土桥梁火灾损伤后性能评价和科学处治提供借鉴。

郝朝伟等^[90]针对火灾后评估预应力混凝土梁桥时需快速、准确、真实地获得其材料性能的需求,对在役高速公路预应力混凝土桥梁过火后拆除的 32 块空心板进行表观分类和材料试验,通过实测过火后材料性能,获得常用检测指标与材料性能的关系,并利用极限承载能力试验及有限元模拟验证了其适用性。王利军等^[91]以实际火损钢筋混凝土预应力连续铁路桥梁工程为依托背景,对该梁体发生火灾后 45 天内的应变进行了紧密监测,对所测得的实际应变监测数据进行了详细分析,研究了该梁体火损后应变随时间的变化特性,确定了桥梁结构火损后应变随时间的变化规律以及力学性能的变化规律,为后期进行桥梁检测评定与维修加固奠定了坚实的理论基础。Zhou 等^[92]总结了对具有轴向载荷的失火钢筋混凝土构件进行修复的最新技术进展,探究了加载方法、物理尺寸和粘结行为对构件残余强度的影响。同时,其总结了可用的混凝土护套、钢护套和纤维增强聚合物护套修复轴向受火的钢筋混凝土构件的性能试验研究成果。其中,钢筋布置如图 19 所示,RC 柱的纤维增强聚合物护套制作过程如图 20 所示。

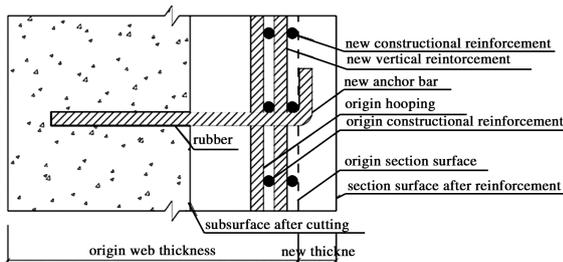


图 19 钢筋布置示意图

桥梁现行规范中未涉及桥梁抗火设计的要求,主要原因

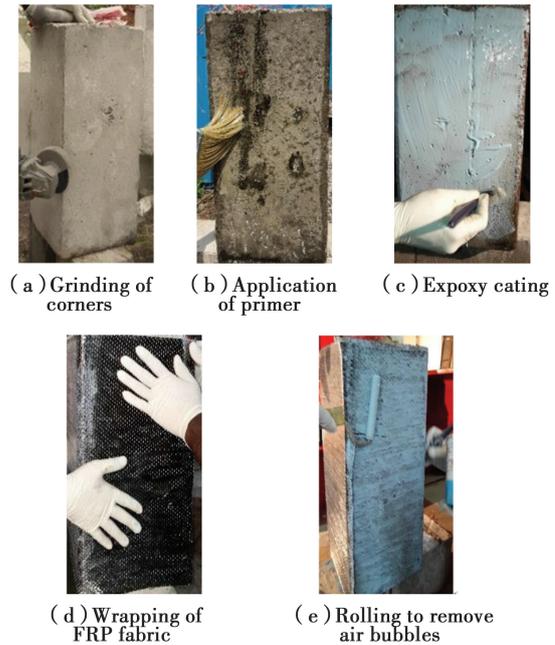


图 20 RC 柱的 EBR 程序

在于桥梁结构种类多,火灾环境复杂,各种桥梁结构遭遇不同火灾时的性能衰变机理还未能全面揭示。钢结构桥梁形式多样,抗火设计涉及的细节较多,各类抗火设计的计算方法与现有常温下的计算方法不能完全吻合,相应的设计程序也未实现,设计人员工作难度巨大,因此钢结构桥梁抗火需要研究的内容还很多,需要进一步建立以火灾为主导的多灾耦合作用下桥梁抗灾设计理论方法与多灾耦合作用后桥梁安全评价体系。

3 结论与展望

在系统研究的基础上构建桥梁运维安全保障体系,确保极端荷载条件下桥梁工程的运维安全,是桥梁工程发展的重要研究方向。对爆炸、火灾等极端荷载条件下的结构特性和安全保障技术进行系统研究,在此基础上逐步构建桥梁结构的运维安全保障体系是重中之重。交通运输部关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见中也再次强调了“应完善钢结构桥梁的防火构造措施,提高钢结构桥梁抵抗火灾的能力”。为防止爆炸或火灾情况下出现桥梁垮塌等恶性事故,亟待解决的关键问题包括以下几个方面:

- 1) 研究爆炸试验技术与结构高应变率下的力学特性。由于爆炸试验的难度较大,对设备的要求较高,且对数据的采集不够完善,缺乏基础性试验数据,相关的试验研究及相应的测试技术依然是下一阶段研究的重点和难点。在此基础上,通过大型的试验技术准确地获得结构的动态本构关系,确定钢材和混凝土材料在高应变率下的力学特性,仍是当前亟需解决的关键问题。
- 2) 揭示复杂火灾环境下桥梁结构断面温度传递与分布规律。当前针对火灾环境下的桥梁结构断面温度分布特性,主要基于缩尺的火灾试验与材料高温特性的数值模拟确定。

由于桥梁结构的足尺火灾试验难度极大,如何通过缩尺的火灾试验与数值模拟准确地反映桥梁结构断面温度传递与分布规律需要进一步深入研究。

3)探究多灾耦合作用下桥梁结构的损伤演化与灾变机制。目前针对火灾或者爆炸等极端荷载作用主要以试验和数值模拟为主,但大都只考虑火灾或爆炸单独作用,在桥梁结构火灾后的抗冲击(碰撞)、抗震、抗腐蚀或多极端荷载耦合作用的损伤演化与灾变机制亟需进一步研究。

4)建立多灾耦合作用桥梁结构安全评估体系。在多灾耦合作用下,特别是火灾或者爆炸冲击后,针对桥梁受其他极端荷载的再次损伤与安全问题,需要进一步建立以火灾为主导的多灾耦合作用下桥梁抗灾设计、多灾耦合作用后桥梁安全评价以及相应的防护技术等成套关键技术。

参考文献:

- [1] CHEN Y, HUO J S, CHEN W S, et al. Experimental and numerical assessment of welded steel beam-column connections under impact loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106368.
- [2] DO T V, PHAM T M, HAO H. Stress wave propagation and structural response of precast concrete segmental columns under simulated blast loads [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103595.
- [3] HAJEK R, FLADR J, PACHMAN J, et al. An experimental evaluation of the blast resistance of heterogeneous concrete-based composite bridge decks [J]. *Engineering Structures*, 2019, 179: 204-210.
- [4] HAN G Z, YAN B, YANG Z. Damage model test of prestressed T-beam under explosion load [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 135340-135351.
- [5] LIU L, ZONG Z H, GAO C, et al. Experimental and numerical study of CFRP protective RC piers under contact explosion [J]. *Composite Structures*, 2020, 234: 111658.
- [6] WANG Z G, WU H, FANG Q, et al. Numerical study on the residual axial capacity of ultra high performance cementitious composite filled steel tube (UHPC-FST) column under contact explosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 153: 106832.
- [7] LIU L, ZONG Z H, MA Z J, et al. Experimental study on behavior and failure mode of PSRC bridge pier under close-in blast loading [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(2): 04020124.
- [8] 师燕超, 张浩, 李忠献. 钢筋混凝土梁式构件抗爆分析的改进等效单自由度方法[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(10): 8-16.
- [9] 秦彦帅, 曲艳东, 李继野, 等. 爆炸冲击荷载下钢板-混凝土组合结构的动态性能和破坏机理研究进展[J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(3): 82-87.
- [10] 甘露, 宗周红, 李明鸿, 等. 爆炸作用下 U 形加劲肋加劲钢板结构的动态响应与破坏模式[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(2): 207-214.
- [11] 田力, 李永欣. 近爆冲击波和破片复合作用下预应力钢筋混凝土空心板梁的损伤效应分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(5): 1154-1164.
- [12] 杨赞, 韩国振, 严波, 等. 内爆荷载作用下 PC 箱梁桥的动态响应过程[J]. *高压物理学报*, 2021, 35(1): 87-97.
- [13] 张纪刚, 杨冉. 纤维增强混凝土及构件抗冲击和抗爆试验研究综述 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(11): 3393-3398.
- [14] DRAGANIĆ H, GAZIĆ G, VAREVAC D. Experimental investigation of design and retrofit methods for blast load mitigation-A state-of-the-art review [J]. *Engineering Structures*, 2019, 190: 189-209.
- [15] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 181: 124-142.
- [16] 李源, 侯炜, 贺拴海. 近爆荷载作用下的桥梁受力及破坏特征分析[J]. *公路*, 2020, 65(9): 73-77.
- [17] 沈达佳, 胡志坚, 李杨. 近场爆炸时斜拉索抗爆性能分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(21): 250-257.
- [18] 周游, 纪冲, 王雷元, 等. 重复爆炸荷载作用下薄壁方管动力响应研究 [J]. *兵工学报*, 2019, 40(9): 1871-1880.
- [19] 张强, 余曜, 迟德建, 等. 柱形装药接触爆炸条件下对钢筋混凝土板的毁伤规律研究[J]. *空天防御*, 2020, 3(2): 16-23.
- [20] WANG Z G, WU H, FANG Q, et al. Experimental study on the residual axial capacity of ultra high performance cementitious composite filled steel tube (UHPC-FST) column under contact explosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106515.
- [21] JIN H X, HAO H, HAO Y F, et al. Predicting the response of locally resonant concrete structure under blast load [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 118920.
- [22] ZHANG X H, HAO H, LI M H, et al. The blast resistant performance of concrete-filled steel-tube segmental columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 168: 105997.

- [23] ZHU Z, LI Y, HE S H, et al. Analysis of the failure mechanism of multi-beam steel-concrete composite bridge under car explosion [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(3): 538-548.
- [24] WANG H H, CHEN H L, ZHOU Y Z, et al. Blast responses and damage evaluation of CFRP tubular Arches [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196: 233-244.
- [25] YANG G D, WANG G H, LU W B, et al. Cross-section shape effects on anti-knock performance of RC columns subjected to air and underwater explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 181: 252-266.
- [26] ZHU Z, LI Y, MA C. Damage analysis of small box girder bridges under car explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 120: 105104.
- [27] WANG Z G, WU H, WU J, et al. Experimental study on the residual seismic resistance of ultra high performance cementitious composite filled steel tube (UHPCC-FST) after contact explosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106852.
- [28] GHOLIPOUR G, ZHANG C W, MOUSAVI A A. Numerical analysis of axially loaded RC columns subjected to the combination of impact and blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110924.
- [29] LIU L, MA Z J, ZONG Z H, et al. Blast response and damage mechanism of prefabricated segmental RC bridge piers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(4): 04021012.
- [30] LEE J Y, AOUBE H, YOON Y S, et al. Impact and blast behavior of seismically-detailed RC and UHPFRC-Strengthened columns [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 143: 103628.
- [31] ALSENDI A, EAMON C D. Quantitative resistance assessment of SFRP-strengthened RC bridge columns subjected to blast loads [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(4): 04020055.
- [32] TETOUGUENI C D, ZAMPIERI P, PELLEGRINO C. Structural performance of a steel cable-stayed bridge under blast loading considering different stay patterns [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110739.
- [33] 师燕超, 李绍琦, 李忠献, 等. 基于实测频率的钢筋混凝土柱爆炸损伤快速评估方法[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(11): 155-164.
- [34] 周晓宇. 基于性能的桥梁钢筋混凝土构件抗爆设计[J]. *上海公路*, 2020(2): 35-39, 128.
- [35] 张于晔, 杨旭, 冯君. 节段拼装桥墩在爆炸冲击作用下的破坏模式与损伤评估研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(23): 225-233.
- [36] DING Z H, LI J, HAO H. Non-probabilistic method to consider uncertainties in structural damage identification based on Hybrid Jaya and Tree Seeds Algorithm [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110925.
- [37] LEE J, CHOI K, CHUNG C. Numerical analysis-based blast resistance performance assessment of cable-stayed bridge components subjected to blast loads [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(23): 8511.
- [38] 孟令野, 涂程亮, 石永久, 等. 高性能耐火钢高强度螺栓接头高温受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 85-93.
- [39] 朱美春, 孟凡钦, 张海良, 等. 预应力拉索锚头抗火性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(1): 111-119.
- [40] 杨阳, 张戎令, 祁强, 等. 大直径圆钢管混凝土截面温度场分布的试验研究[J]. *建筑结构*, 2020, 50(17): 99-103.
- [41] 张玉琢, 陈新华, 张冠华, 等. 钢管约束钢筋再生混凝土柱三面受火下的耐火极限[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(1): 86-94.
- [42] 黄全成, 滕念管. 高速磁浮大型箱梁日照温度效应分析[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(9): 75-81.
- [43] 康俊涛, 王伟. 火灾下大跨度钢桁架拱桥结构性能分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(9): 77-84.
- [44] 刘才玮, 苗吉军, 高天予, 等. 基于动力测试的钢筋混凝土梁火灾损伤识别方法[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(11): 121-131.
- [45] 杜咏, 王爽, 朱钰, 等. 预应力钢结构锚固节点瞬态温度场分析[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 671-677.
- [46] ZHANG G, KODUR V, SONG C J, et al. A numerical model for evaluating fire performance of composite box bridge girders [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 165: 105823.
- [47] ZHANG G, SONG C J, LI X Y, et al. Fire performance of continuous steel-concrete composite bridge girders [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25(3): 973-984.
- [48] LI X Y, ZHANG G, KODUR V, et al. Designing method for fire safety of steel box bridge girders[J]. *Steel and Composite Structures*, 2021, 38(6): 657-670.
- [49] SONG C J, ZHANG G, HOU W, et al. Performance of prestressed concrete box bridge girders under hydrocarbon fire exposure [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(8): 1521-1533.
- [50] SONG C J, ZHANG G, KODUR V, et al. Fire response of horizontally curved continuous composite bridge girders [J]. *Journal of Constructional Steel*

- Research, 2021, 182: 106671.
- [51] JANSSENS M, DASGUPTA B. Development and application of a simulation approach for fire and structure interaction of concrete members subject to spalling [J]. *Fire and Materials*, 2020, 44 (3): 365-380.
- [52] LI Y Z, DONG F H. Fire resistance of steel bridge considering damage of marine environment [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 83(Sup1): 442.
- [53] NICOLETTA B, WOODS J, GALES J, et al. Postfire performance of GFRP stay-in-place formwork for concrete bridge decks [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(3): 04019015.
- [54] WU X Q, HUANG T, AU F T K, et al. Posttensioned concrete bridge beams exposed to hydrocarbon fire [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(10): 04020210.
- [55] CAI X S, TAERWE L R, YUAN Y. Hysteretic behavior of UHPC beam-column joints after fire exposure [J]. *Fire Safety Journal*, 2020, 117: 102987.
- [56] 张岗, 贺拴海, 宋超杰, 等. 钢结构桥梁抗火研究综述 [J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 1-11.
- [57] CHI J H, PENG P C. Study of the structural safety assessment of steel bridge subjected in post-fire [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118587.
- [58] 宋超杰, 张岗, 贺拴海, 等. 钢-混凝土组合连续弯箱梁抗火性能与设计方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(4): 139-149.
- [59] 魏亚, 孔维康, 万成, 等. 比色法检测受火后混凝土损伤程度 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(1): 233-244.
- [60] 张晓栋, 马如进, 陈艾荣. 车辆火灾作用下桥梁风险概率评估方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(6): 108-118.
- [61] 郑志远, 张裕锦, 胡俊峰. 初始缺陷对钢-混组合梁抗火性能影响研究综述 [J]. *山西建筑*, 2020, 46(10): 54-55.
- [62] 郑志远, 周焕廷. 带几何缺陷的预应力连续组合梁抗火性能研究 [J]. *建筑科学*, 2020, 36(11): 90-100.
- [63] 宋超杰, 张岗, 秦智源, 等. 钢板组合连续桥梁的耐火极限 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(6): 89-98.
- [64] 王庆杰, 娄超, 梁梦蝶, 等. 火灾下螺栓连接蜂窝梁孔间腹板屈曲性能分析 [J]. *建筑钢结构进展*, 2020, 22(4): 36-41, 49.
- [65] 郭梓栋, 李红. 基于 HC 温升曲线的 T 梁抗弯承载能力分析 [J]. *交通科技*, 2020(2): 10-14.
- [66] 鞠晓臣, 刘晓光, 赵欣欣, 等. 基于大涡模拟法的铁路桥梁火灾场景研究 [J]. *桥梁建设*, 2019, 49(6): 78-83.
- [67] 邢德进, 胡玉庆, 杨国栋, 等. 受火混凝土温度场的试验与数值模拟研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2019, 39(3): 465-469, 507.
- [68] 刘晓光, 鞠晓臣. 危险火灾场景下铁路钢桥温度场和极限承载力研究 [J]. *铁道建筑*, 2020, 60(2): 5-8.
- [69] 王莹, 王盼. 油罐车火灾下的钢桥高温屈曲失稳特性研究 [J]. *西部交通科技*, 2019(2): 115-120.
- [70] 王莹, 王盼. 油罐车火灾下大跨径双层钢桁梁悬索桥高温力学性能 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2019, 36(3): 91-100.
- [71] 许肇峰, 陈映贞, 张建. 预应力混凝土梁桥火灾损伤分析与评定 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 291-301.
- [72] 周焕廷, 郑志远, 伍先兴, 等. 预应力耐火钢-混凝土连续组合梁抗火性能研究 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 902-909.
- [73] 曹茜. 织物结构复合材料桥梁构件防火隔热性能试验研究 [J]. *广东建材*, 2021, 37(1): 11-13.
- [74] KODUR V, BANERJI S, SOLHMIRZAEI R. Effect of temperature on thermal properties of ultrahigh-performance concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(8): 04020210.
- [75] JIA Y Q, LU Z D, LI L Z, et al. A hybrid steel-shape memory alloy prestressed concrete beam for improved fire resistance [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(10): e2601.
- [76] MA R J, CUI C J, MA M L, et al. Performance-based design of bridge structures under vehicle-induced fire accidents: Basic framework and a case study [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109390.
- [77] ZHU Z D, QUIEL S E, CARLTON A, et al. Performance-based prioritisation of fire protection for steel girder overpasses in a complex highway interchange [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(3): 394-411.
- [78] NICOLETTA B, KOTSOVINOS P, GALES J. Review of the fire risk, hazard, and thermomechanical response of bridges in fire [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2020, 47(4): 363-381.
- [79] MARTÍNEZ-MUÑOZ D, MARTÍ J V, YEPES V. Steel-concrete composite bridges: Design, life cycle assessment, maintenance, and decision-making [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 8823370.

- [80] NASER M Z, DEGTYAREVA N V. Temperature-induced instability in cold-formed steel beams with slotted webs subject to shear [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 136: 333-352.
- [81] CUI C J, CHEN A R, MA R J. Stability assessment of a suspension bridge considering the tanker fire nearby steel-pylon [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 172: 106186.
- [82] 陈伟强, 靖洪文, 高远, 等. 高温后混凝土损伤评估的声发射试验研究[J]. *混凝土*, 2020(3): 54-58.
- [83] FAN Y Y, YANG Z Z, LI Z Q. Research on fire risk assessment and control methods for urban bridges based on fuzzy-bn [C]//2020 12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Phuket; IEEE, 2020: 446-449.
- [84] NASER M Z, KODUR V. Effect of temperature-induced moment-shear interaction on fire resistance of steel beams [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(5): 1540-1551.
- [85] 张岗, 宋超杰, 李建章, 等. 火灾后钢-混凝土组合梁承载能力评价方法[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(2): 1-11.
- [86] WANG L L, WANG Y C, LI G Q, et al. An experimental study of the effects of topcoat on aging and fire protection properties of intumescent coatings for steel elements [J]. *Fire Safety Journal*, 2020, 111: 102931.
- [87] 邹慧辉, 陈万祥, 郭志昆, 等. 火灾后钢管 RPC 柱抗爆动力响应数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(21): 155-163, 171.
- [88] 刘晓, 王伊, 王兵. 火灾后中空夹层高强钢管混凝土柱轴压机理分析[J]. *工业建筑*, 2019, 49(5): 146-153.
- [89] 王保群, 邢德进, 陶莉莉, 等. 火灾配筋混凝土空心板梁承载力试验研究[J]. *公路*, 2020, 65(7): 104-108.
- [90] 郝朝伟, 刘康, 李洪印, 等. 预应力混凝土梁桥过火后的材料性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 106-114.
- [91] 王利军, 唐先习, 徐俊兵. 预应力连续梁桥火损后的应变监测及分析研究[J]. *火灾科学*, 2020, 29(1): 42-48.
- [92] ZHOU J, WANG L. Repair of fire-damaged reinforced concrete members with axial load: A review [J]. *Sustainability*, 2019, 11(4): 963.

(编辑 袁虹)