许友行,吕辉,谢欣,等.空间结构抗连续倒塌研究进展[J].地震工程学报,2027,49(1):15-30.DOI:10.20000/j.1000-0844.20260113001

Xu Youxing, Lü Hui, Xie Xin, et al. Advances in progressive collapse resistance of spatial structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 15-30. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20260113001

空间结构抗连续倒塌研究进展

许友行,吕 辉,谢 欣,李贤泽

(南昌航空大学 土木与交通学院,江西 南昌 330063)

摘要:针对大跨度空间结构抗连续倒塌核心问题,文章梳理了连续倒塌的定义与典型事故案例,厘清了抗连续倒塌分析方法从静力到精细化非线性动力的演进脉络,对比了拉结力法、拆除构件法和关键构件法的适用性与局限。在此基础上,重点剖析了网架、网壳、索穹顶、弦支网壳、张弦梁五类典型空间结构的失效机理、关键构件识别规律与性能评价体系,总结了各体系在多灾害耦合工况下的抗倒塌性能与优化策略,对比了五类体系在冗余度、预应力损失敏感性、分析方法成熟度上的核心差异。最后指出当前研究不足,展望了未来发展方向:需修正适配空间结构的设计参数,深化混合结构体系协同机理研究,构建"主体-支撑-围护"协同模型,建立多维融合的抗倒塌性能综合评价体系。

关键词:空间结构;抗连续倒塌;理论研究;实验研究;综述

中图分类号:TU393 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0015-16

DOI:10.20000/j.1000-0844.20260113001

Advances in progressive collapse resistance of spatial structures

Xu Youxing, Lü Hui, Xie Xin, Li Xianze

(*College of Civil Engineering and Transportation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China*)

Abstract: To address the core issue of progressive collapse resistance in long-span spatial structures, this paper reviews the definition of progressive collapse and examines representative accident cases. It traces analytical methods from static analysis to refined nonlinear dynamic analysis and compares the applicability and limitations of the tie-force, component-removal, and critical-member methods. Building on this foundation, the failure mechanisms, critical-member identification patterns, and performance evaluation systems for five typical spatial structures: space trusses, reticulated shells, cable domes, suspen-domes, and beam-string structures, are analyzed in detail. The collapse resistance performance and optimization strategies of each system under multi-hazard coupled conditions are then summarized, and the core differences among the five systems are compared in terms of redundancy, sensitivity to prestress loss, and the maturity of analytical methods. Finally, the paper identifies cur-

收稿日期:2026-01-13

基金项目:国家自然科学基金(52278224, 52568028)

第一作者简介:许友行(2003-),男,江西上饶人,硕士研究生,主要研究方向:空间结构。E-mail: zhang39649pup@163.com。

通信作者:吕 辉(1982-),男,江西上饶人,博士,教授,主要研究方向:空间结构。E-mail: lvhui081012@163.com。

rent research gaps and outlines future directions, including the need to refine design parameters specifically for spatial structures, deepen research on the collaborative mechanisms of hybrid structural systems, develop a "structure-bracing-envelope" coordinated model, and establish a comprehensive, multi-dimensional fusion evaluation system for progressive collapse resistance.

Keywords: spatial structures; progressive collapse resistance; theoretical research; experimental studies; review

0 引言

随着城镇化深化与城市功能升级,大跨空间结构的定位已从体育场馆、展览中心、机场航站楼和剧场等单一基础功能的承载,拓展至"功能+文化"双重定位,这就要求结构通过其形态与建筑语言,传递城市独特气质与精神内核。因此,大跨空间结构通常具有功能复杂、人流量大、社会影响广泛等特点。当结构遭受爆炸、撞击等偶然事件时,局部构件的失效可能导致重大人员伤亡与严重的经济损失。2023年,齐齐哈尔某体育馆因违规堆载导致屋顶整体坍塌,造成11人死亡;2019年,荷兰AFAS体育场因屋架焊接接头失效导致部分坍塌(图1)。这两起事故均清晰地展示了由局部失效迅速演变为整体结构破坏的典型过程。因此,针对空间结构开展抗连续倒塌分析,始终是工程界与学术界共同关注并致力解决的重要课题。

各国规范对连续倒塌的定义各有侧重:美国土木工程师协会发布的《建筑物及其他结构最小设计荷载》定义为初始局部失效从构件向构件扩散,最终导致整体结构或其不成比例部分的坍塌[1];英国规范强调坍塌程度不应与事故原因不成比例[2];欧洲规范要求损害范围不超出初始原因的合理范围[3];美国联邦总务署(General Services Administration, GSA)将其描述为连锁反应导致的整体坍塌[4];《建筑结构抗倒塌设计标准》[5]定义为初始局部破坏从构件到构件扩展,最终导致部分或整体结构倒塌;《工程结构通用规范》[6]要求,以偶然作用为主导时,应考虑作用发生时和发生后两种工况,并允许局部构件破坏,但不得因此引发连续倒塌。对连续倒塌的定义的总结,其核心在于局部构件的初始失效向整体结构破坏的连锁扩展过程,而相关抗连续倒塌规范的设计大多旨在通过特定的设计方法与构造措施,将最终的破坏范围控制在可接受的有限区域内。



(a) 齐齐哈尔某体育场屋顶倒塌



(b) 荷兰AFAS体育场屋面倒塌

图1 空间结构连续倒塌事故

Fig. 1 Progressive collapse accidents of spatial structures

早期的连续倒塌研究主要聚焦于竖向承载的多高层建筑体系。1968年,英国伦敦罗南角公寓楼因燃气爆炸导致局部承重墙破坏,进而引发连锁反应导致大楼局部倒塌。该事故的调查报告直接推动了英国相关规范的制定,首次强调了设计需避免"与事故原因不成比例"的坍塌范围[7]。2001年,发生的纽约世贸中心双子塔倒塌事故,则显著提升了工程界对建筑结构抗连续倒塌能力的重视。美国国家标准与技术研究院在调查报告中指出火灾削弱了钢结构,导致桁架开始逐渐下垂,这种下垂将桁架的向下拉力转化为向内的拉力,不断增强的向内拉力最终导致大楼的连续倒塌[8]。

与多高层建筑的"千层饼"式倒塌不同,传统观点认为空间结构冗余度较高,但历史事故表明,该结构对初始缺陷、荷载变化及节点失效极为敏感。1963年,布加勒斯特穹顶因节点设计错误,在1/3设计雪荷载下整体失稳;1978年,哈特福德体育馆因设计错误,导致空间网架屋顶整体坍塌;2019年,荷兰AFAS体育场因焊接缺陷与钢结构劣化导致屋

盖部分坍塌。

导致连续倒塌的因素包括火灾、超设计荷载、地震、爆炸及撞击等，不同因素导致的失效特点各异。火灾下需综合考量高温材料劣化[9-10]、节点性能退化[11]及温度场分布不均引发的热应力与变形[12]。爆炸不仅限于单一构件破坏，冲击波效应需特殊考虑[13]。高纬度地区需关注低温影响[14]，沿海地区需差异化分析台风作用[15]及风致疲劳损伤[16]。由此可见，导致空间结构连续倒塌的外部因素复杂且具有差异性。因此，在深入研究各类外部作用的基础上，有必要进一步聚焦并揭示结构连续倒塌的内在规律，系统阐释在不同失效模式下结构的内力重分布机制、破坏发展路径以及整体鲁棒性的核心机理。

综上所述，大跨空间结构的倒塌往往具有突发性强、破坏机理复杂等特点。简单地套用多高层建筑的“拆除构件法”往往难以真实反映空间结构的倒塌行为，因此，针对空间结构特定形态与受力特征的抗连续倒塌分析研究显得尤为迫切。

1　抗连续倒塌分析方法

大跨空间结构抗连续倒塌的分析方法经历了由浅入深的演进：从基础线性静力法，到捕捉“薄膜效应”的非线性静力法，再到精确考虑惯性与阻尼的非线性动力法，逐步揭示了结构真实的倒塌机制。基于分析手段的精细化，目前已形成三大主流设计体系：增强连续性的拉结力法、检验冗余度的拆除构件法，以及强化薄弱环节的关键构件法。下文将从分析理论与设计应用两个维度，剖析上述方法在应对空间结构复杂传力机制时的优势与局限。

1.1　按分析过程本质分类

1.1.1　线性静力分析法

线性静力分析基于小变形和线弹性假设，忽略构件失效瞬间的动力效应，引入动力放大系数放大剩余结构的内力并比较内力需求与极限承载力。其应用于空间结构时存在显著缺陷：首先无法模拟大变形产生的次生抗力机制及构件屈服后的内力重分布；其次传力路径复杂导致动力系数统一取值易产生较大偏差。

1.1.2　非线性静力分析法

非线性静力分析引入材料与几何非线性，能模拟大变形、塑性铰形成及内力重分布，通过“荷载-位移”曲线确定极限承载力与延性。其优势在于能捕捉大变形阶段的“悬链作用”或“薄膜效应”等次生抗力机制，完整描述从局部屈服到整体垮塌的全过程。但作为静力方法，本质上仍忽略动力效应，需引入动力放大系数修正。

1.1.3　非线性动力分析法

非线性动力分析是最接近真实物理行为的精确方法，能基于大变形假设和非线性材料本构，完整考虑惯性力与阻尼效应，通过时程积分直接模拟构件失效后剩余结构在不平衡力作用下的内力重分布与变形发展全过程。其优势在于：能精确捕捉几何非线性与动力失稳；完整考虑高应变率下的冲击效应；彻底消除静力分析中动力系数取值的人为偏差。

随着三种分析方法精度的提升，计算成本也相应增加。因此，在实验研究与工程实践中，应根据实际需求与方法特点合理选择：线性静力法适用于初步筛查与规则结构的简化校核；非线性静力法是评估结构极限承载力与失效路径的主要手段；非线性动力分析则可作为验证关键结论、探究复杂机理的精确参照。未来研究应致力于发展适用于空间结构的简化动力分析规程或高精度等效静力方法，从而在计算精度与效率之间取得更好平衡。

1.2　按实际设计方法分类

1.2.1　拉结力法

拉结力法通过规定构件最小拉结强度确保结构连续性，利用大变形激发悬链线效应和薄膜作用构建备用传力路径。其缺陷在于：基于规则框架的经验公式无法反映空间结构复杂的三维内力重分布；忽略动力效应可能低估冲击风险；对张弦梁等结构适用性受限。其在空间结构中仅作为基础构造措施，重要结构需结合精细分析验算。

1.2.2　拆除构件法

拆除构件法通过虚拟移除关键构件，检验剩余结构能否建立备用传力路径，依靠非线性动力响应和内力重分布耗散失效构件释放的应变能。其缺点是计算效率与精度矛盾突出，且高度超静定性使最不利失效位置难以直观判断。建议采用分级评估策略：对一般杆件用简化静力法快速筛选，对关键传力节点采用非线性动力法精细验算。

1.2.3　关键构件法

关键构件法通过识别缺乏冗余度的关键部位并大幅提高该部位承载力，在源头切断倒塌链条。其挑战在于：空间结构拓扑复杂、高度超静定，精准

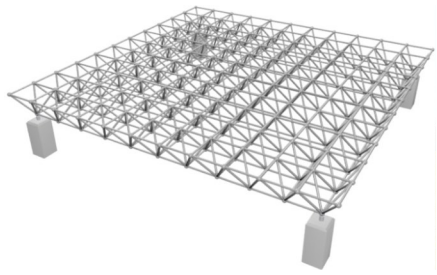
定位关键构件需依赖复杂敏感性分析;大范围强化导致造价激增,且对异常荷载预估依赖性较强。建议结合敏感性分析筛选极少数构件局部强化,配合拆除构件法验算备用路径。

在实际工程中,应综合运用三种设计方法,形成递进式的设计策略:首先通过拉结力法保证结构的基本整体性;进而采用拆除构件法,系统检验结构在预设意外作用下的抗倒塌性能;最后针对识别出的少数关键构件,利用关键构件法进行针对性加强。这种由整体到局部、安全性逐步提升的递进策略,有助于在保障结构安全的同时,实现经济性的合理平衡。

2 空间结构体系抗连续倒塌研究

2.1 网架结构

网架结构是由多根杆件通过节点连接而成的空间刚性体系,其核心构件分工明确:位于顶层的上弦杆和底层的下弦杆通常分别承受轴向压力与拉力,界定结构外形;连接上下弦的腹杆主要负责传递剪力并维持几何稳定性;所有杆件在节点处汇交固定,最终通过支座将荷载传递给下部结构,共同形成了受力合理的大跨度空间骨架,如图2(a)所示。英国早期最主要的公共建筑之一塞恩斯伯里视觉艺术中心就采用了网架结构,具体如图2(b)所示。



(a) 网架结构



(b) 塞恩斯伯里视觉艺术中心

图2 网架结构构造与应用实例

Fig. 2 Configuration and application examples of space truss structures

2.1.1 局部失效机理与整体结构响应特征

针对网架结构的抗连续倒塌机理,学者们从整体稳定、关键构件影响及特殊荷载响应等方面进行了广泛探讨。在整体结构稳定与缺陷敏感性方面,Fu等[17]利用遵循GSA中定义的替代路径方法的隐式方法研究了多种坍塌场景,并使用显式法模拟坍塌全过程,详细讨论了相关的潜在因素;基于拆除构件法的多项实际工程分析表明,网架结构对初始缺陷分布形态普遍不敏感。得益于材料的非线性发展与结构的高冗余度,局部构件失效通常不会直接引发整体的连续倒塌[18-19]。在关键构件与失效模式的研究上,丁北斗等[20]通过仿真与试验表明,支座及其相邻腹杆是关键杆件,其失效会导致连续倒塌,设计时需加强;Liu等[21]结合动态坍塌测试对大跨度双层网格结构的研究则强调上弦杆是抗连续倒塌关键,其断裂会引发周围构件屈曲和显著位移,而腹杆和下弦杆断裂虽导致内力重分布但对结构影响较小。针对支承与支撑体系的影响,韩庆华等[22]结合杆件应力响应,针对网架的支撑方式和设计参数进行分析,结果表明,周边支承网架和点支承网架的抗连续倒塌性能较好。网架结构连续倒塌极限位移随网架厚跨比增大而增大、随跨度的增大而减小;Mao[23]填补了支撑构件研究的空白,提出了一种能区分拉压响应的特殊支撑构件,并对结构进行非线性动力分析,分析显示由局部受压支撑构件屈曲引起的整体动力连续失稳会显著降低极限承载力。

网架结构的多重超静定特性使其在单根乃至多根构件失效时不易发生连续倒塌,但不同构件的失效影响差异显著:支座区域及相邻腹杆是力流汇聚的敏感控制点,上弦杆在维持整体抗弯刚度与防止连续失稳中发挥核心作用。未来研究应从单根构件失效拓展至区域性破坏下的非线性瞬态动力响应,并深入揭示关键节点区域失效的影响。

2.1.2 抗连续倒塌评估方法与评价指标体系

在网架结构抗连续倒塌的性能评价与评估方法上,研究人员从理论框架、监测识别到多维指标体系进行了深入拓展。以拆除构件法为研究基础:首先,石城林[24]提出一种基于关键构件失效并结合抗连续倒塌静、动力计算的稳定性计算方法,相较传统方法有效提升了结构整体稳定性并降低了局部非稳定因素影响。在损伤识别技术方面,邢哲等[25]基于模态参数变化理论,利用神经网络构建了

损伤指标，提出了从识别可疑杆件到确定受损位置与程度的二阶段方法。针对关键构件的评价与系数计算，王悦等[26]引入温度因素，推导了高温下构件重要性系数公式，强调构件的敏感性与重要性并不完全等同，设计时需综合考虑；Zhou 等[27]则结合非线性动力分析提出改进的分区概念判断和灵敏度分析方法，有效避免了关键构件遗漏。

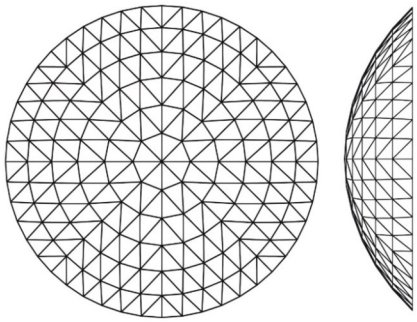
2.1.3　复杂工况下的结构响应与优化加固策略

采用拆除构件的方式，针对具有复杂边界条件如大悬挑[28]、高低跨交错[29]等大跨度网架结构评估表明，基于体系自身的高超静定特性，局部荷载超限或单杆失效通常不会导致整体坍塌。然而，在爆炸冲击波的作用下[30]，节点破坏显著。针对此类薄弱环节，研究证实采用“强结构、弱围护”的设计原则、针对关键传力节点进行局部加强，或引入黏滞阻尼器[31]与预应力构件[32]均是提升结构整体抗连续倒塌性能的有效途径。

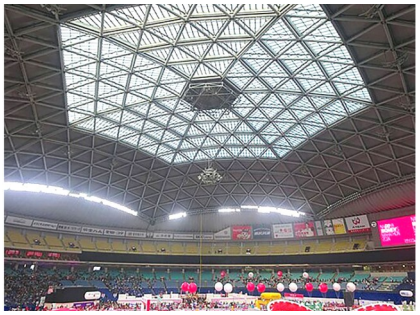
当前关于网架结构抗连续倒塌的研究仍主要集中于传统钢材，对于铝合金、钢-木组合、纤维增强复合材料等新型材料在该类结构中的抗连续倒塌性能，尚缺乏系统研究。此外，网架结构通常直接暴露于外界环境，其性能容易受到环境腐蚀、后期维护状况及施工误差累积效应等多种因素的综合影响。然而，现有研究往往未能充分考虑这些实际条件，也较少考察屋面围护系统、下部支撑体系与主体结构协同工作对连续倒塌行为的影响。同时，在连续倒塌性能指标方面，既有研究多聚焦于单一指标，忽视了不同指标之间的相互关联与整体作用。

2.2　网壳结构

网壳结构是按曲面规律布置的杆件通过节点连接而成的刚性结构，主要由壳面杆件（上弦、下弦及腹杆的变体，主受力轴）构成曲面网格，边缘设有边缘构件以提供边界约束，整体主要依靠曲面形状产生的薄膜内力来抵抗外荷载，图 3(a)展示了典型的空间网壳构成。作为日本五大巨蛋球场之一的名古屋巨蛋即采用了单层网壳结构，如图 3(b)所示。



(a) 网壳结构



(b) 名古屋巨蛋

图 3　网壳结构构造与应用实例

Fig. 3　Configuration and application examples of reticulated shell structures

2.2.1　局部失效机理与整体结构响应特征

针对网壳结构的倒塌行为与失效机理，现有研究从宏观表现到微观节点进行了深入探讨。在整体倒塌机制方面，Tian 等[33-34]结合实验对比分析凯威特-6 型和三向斜线单层网壳在连续倒塌时的表现，区分了二者的差异，对比了不同单层网壳的倒塌性能与表现形式，并较为全面地分析了 6 个全尺寸典型穹顶的动态渐进坍塌行为，表明重要区域内的构件失效将显著影响结构性能。针对具体的单层网壳形式，采用改变荷载路径法：针对特定网壳构型的研究表明，凯威特-8 型等球面网壳冗余度较低，其构件敏感性呈现显著的“圈层化”特征。内部环杆（如 1～3 圈）失效会导致结构极限承载力大幅下降，而外围杆件失效影响甚微[35]。此外，初始几何缺陷的增加会进一步削弱结构的抗倒塌性能[36]。沈金等[37]采用弹性静力法对长异形曲面单层网壳分析，发现温差效应大的结构抗连续倒塌能力表现出更强趋势。在双层及复杂网壳方面，石瑛莉[38]的仿真模拟结果表明双层网壳结构抗连续倒塌性能良好、变形较小，且与拆除主梁相比，拆除立柱对结构影响更小；张晓辉等[39]指出大跨预应力双层组合扭网壳的高敏感性杆件主要分布在边桁架和支座附近，拆除这些杆件只会造成局部轻微损坏，不会引发连续倒塌。此外，在节点与数值模型层面，Shan 等[40]专门研究了采用螺栓柱接头的单层网壳失效机制；Xu 等[41-42]设计出一种联合弹簧模型，经实验与仿真数据对比，验证了该模型在抗连续倒塌

研究中的准确性,为相关研究提供了新工具。

单层网壳构件重要性呈现显著区域化和圈层化特征,聚焦于顶点及内侧1~3圈;节点失效导致传力路径中断,其重要性不可忽略。双层网壳关键构件为结构主梁,支座和边桁架虽敏感但失效不会引起整体倒塌。未来应区分敏感性与重要性构件,跳出传统标准构型限制,建立更具普遍指导意义的识别方法。

2.2.2 抗连续倒塌评估方法与评价指标体系

建立科学的性能评价指标是准确评估网壳结构抗连续倒塌能力的前提,当前该领域的评估体系已形成由整体到局部、再延展至时间维度的完整脉络:在结构整体评估方面,综合了经工程验证的动态分析体系[43-44]、以能量平衡为准则的倒塌模式划分[45],以及基于刚度与隐式指数对元素重要性及节点脆弱性的高精度量化[46-47],并对传统地震损伤模型进行了修正[48];深入到构件层级,基于承载力的敏感性评价不仅印证了短程线型网壳的最优抗倒塌性能,更明确了相较于一般敏感构件,直接增大关键构件截面是提升整体防塌陷能力的高效手段[49];此外,该体系进一步将环境与时间效应纳入考量,利用基于位移响应的塌缩标准等系数精准量化了结构抗力的长期衰减规律,例如40米跨度网壳在服役50年后抗力会骤降70.2%,并在60年后逐渐面临塌陷的严峻风险[50]。

2.2.3 复杂工况下的结构响应与优化加固策略

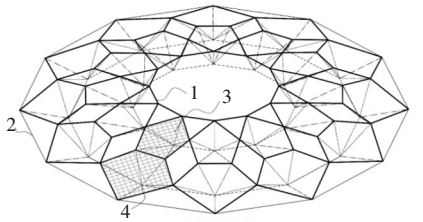
在实际工程中,网壳结构常面临地震、风雪、火灾及环境腐蚀等多重灾害的耦合作用。在强震作用方面,现有研究结合数值模拟与试验,揭示了单层[51]、双层[52]网壳基于能量耗散和损伤积累的连续倒塌机制[53],并证实了采用铝合金蜂窝板组合构造,以及合理的矢跨比、跨度等几何参数对提升结构抗倒塌性能的重要作用[54],此外翟永梅等[55]针对大量工况下网壳在地震作用下的失效模式进行了全面的研究。在风雪荷载方面,极端风载[56-57]及非均匀雪荷载[58]极易诱发结构的局部跃越失稳或连续倒塌。在此过程中,杆件初始刚度、节点失效模式,以及屋面板和支撑柱的协同参与,是决定结构几何非线性表现及整体稳定性的关键因素。针对火灾与温度效应,研究表明特定关键构件如双层网壳的横向下弦杆及受压腹杆的受火失效,往往是引发结构连续倒塌的直接诱因[59],且网壳构件对温度变化的敏感性存在显著差异[60]。此外,在服役劣化与初始缺陷方面,尽管单一的局部构件锈蚀通常仅引发局部效应而不会导致整体失稳[61],但焊接热收缩变形[62]、支座不均匀沉降[63]、节点螺栓强度不足[64],均会显著放大杆件敏感性并降低结构冗余度,进而对网壳的抗连续倒塌能力产生严重的不利影响。下部结构的改变同样会对结构抗连续倒塌能力产生影响[65]。

为有效提升网壳结构的抗连续倒塌性能,研究人员提出了从构造措施到构件强化的多种策略。在结构体系与构造改进方面,通过在主肋下部增设连系梁[66]、发挥结构板的协同受力作用[67],或采用具备更高延性的新型节点[41],可显著优化结构的传力路径并改善失效模式。在关键构件强化与截面优化方面,相关研究证实,综合运用增大截面面积与更换高强材料的方案,能最大程度提高结构抗连续倒塌能力[68]。关键受力环杆与斜杆[69]以及对边柱等高危区域[70]进行重点干预亦可达到同样的目的。此外结合参数不确定性预测技术与构件重要性量化指标,并辅以双层构件等直接或间接的加固措施,能够更为科学、全面地提升结构的整体鲁棒性[71-72]。

当前,网壳结构的抗连续倒塌研究大多集中于规则曲面或其组合形式。然而,随着北京大兴国际机场、深圳T3航站楼等自由曲面网壳的建成与投入使用,针对此类非规则网壳的抗连续倒塌性能研究已显得尤为迫切。此外,现有研究多针对个别具体结构展开,一定程度上限制了对网壳结构体系抗连续倒塌普遍规律的总结与认知;对于主体结构以外的附属系统如屋面、悬挂设备等对整体抗连续倒塌性能的影响,目前也尚缺乏深入研究。在相关性能指标方面,既有研究往往将构件层面的响应与结构整体行为割裂讨论,未能充分揭示二者之间的内在联系与协同机制。

2.3 索穹顶结构

索穹顶结构是基于“张拉整体”思想的全张力自平衡体系,内部无传统受弯构件。其核心由受拉的脊索、斜索和环索,以及受压的撑杆组成;结构完全通过对索施加预应力建立刚度,撑杆仅起维持几何形状的支撑作用,是目前效率极高的大跨度体系,如图4(a)所示。凤凰山体育公园足球场屋盖就采用了全球首个大开口葵花形索穹顶屋盖体系,具体如图4(b)所示。



(a) 索穹顶结构



(b) 凤凰山体育公园足球场屋盖

图 4　索穹顶结构构造与应用实例

Fig. 4　Configuration and application examples of cable dome structures

2.3.1　局部失效机理与整体结构响应特征

张微敬等[73-75]采用非线性动力分析方法，结合有限元模型与实验，对多种索穹顶的抗连续倒塌能力进行研究，研究结果均指出在索穹顶中，外圈环索是影响结构抗连续倒塌的关键构件，在结构设计时需进行重点考虑，同时结构的设计参数亦会对结构的抗连续倒塌能力产生影响；针对新材料在索穹顶中的应用，袁文俊等[76]对三撑杆形式索穹顶的抗倒塌能力展开分析，指出多撑杆的存在加强了相邻结构之间的联系，增大了结构的延性，并明确需要加强的构件。Zhang等[77]对鼓蜂窝Ⅲ型索穹顶的抗连续倒塌能力进行分析，研究结果表明，单个构件的失效不会导致结构整体不稳定，环索和部分上弦脊索的重要性等级高于斜索，A类撑杆的重要性等级高于B类撑杆。此外，外环组件的重要性等级高于内环组件；Zhang等[78]对索穹顶中部分采用碳纤维增强塑料（Carbon Fiber-Reinforced Plastic，CFRP）材料的情况进行研究，指出CFRP材料在不同位置使用时的影响差异。

综合以上研究内容不难看出，虽然单一构件的失效并不会引起结构连续倒塌，但外圈环索一般是结构最为重要的构件，其次是上弦索。作为一种并未得到广泛应用的空间结构构型，索穹顶的研究多建立在理想模型之上，下部结构的连接方式对连续倒塌的影响并未得到深入研究，且现实的连续倒塌往往并不是单一构件的失效，基于此，研究应引入更多的相关影响因素，探讨在区域失效的情况下结构的动力响应。

2.3.2　抗连续倒塌评估方法与评价指标体系

陈联盟等[79-81]基于全动态等效载荷的瞬时卸载法，建立了一套涵盖“整体-构件-节点”的系统性评估体系：在整体层面，界定了轻微损伤、局部损伤和整体失效三种模式，并将其与整体损伤指数建立了量化联系；在构件与节点层面，不仅制定了构件重要性分类的临界标准，还基于位移变化提出了节点重要性系数，深刻揭示了节点损伤与相关构件失效之间的内在关联。此外，针对特定材质与构型，惠卓等[82]围绕碳纤维Geiger型索穹顶引入了结构重要性矩阵与构件重要性系数的概念，通过构建倒塌控制方程，为抗倒塌设计提供了针对性的指导建议。

2.3.3　复杂工况下的结构响应与优化加固策略

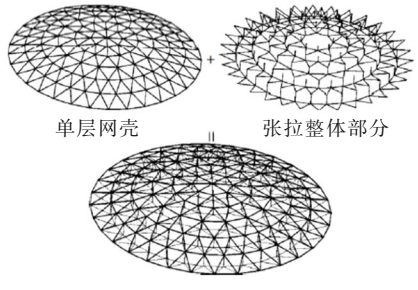
针对现实复杂环境与多灾害耦合作用，现有研究围绕外部荷载响应与加固优化技术展开了全面探索。在特殊工况与环境荷载方面，研究评估了台风作用下的结构抗倒塌能力及优化策略[83]，还提出利用悬挂斗屏作为减振装置以有效降低结构的水平变形[84]。在应对断索等突发状况及提升抗连续倒塌能力时，引入其他结构系统[85]与构建可靠的备用路径成为加固核心。多项研究证实，相比于单纯提高预应力、增大撑杆高度或采用限制力装置等效果不佳的手段，增设内环交叉拉索[86]、在环形支架间加装交叉支撑索或底线网[87]能更显著地提升整体稳定性。此外，基于结构性能的综合优化方法也被证实是增强抗连续倒塌能力的有效途径[88]。

索穹顶作为一种典型的预应力结构，其刚度主要建立在初始预张力之上。鉴于这一特性，其抗连续倒塌研究不仅应关注单个构件的失效，更需聚焦于预应力汇聚的关键节点。然而，现有研究对节点失效机制的探讨仍不够充分，且未能系统兼顾长期服役下预应力损失带来的不利影响。此外，针对不同结构构型的抗倒塌内在共性规律也有待深入总结，在理论方法上更存在简单套用刚性网架屋面、忽视柔性薄膜材料差异的不严谨问题。最后，现有的性能评估多孤立地依赖单一数据指标，难以有效反映结构的整体响应以及多指标间的协同作用。

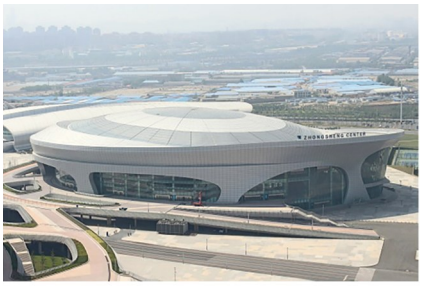
2.4　弦支网壳结构

弦支网壳是一种刚柔杂交结构，由上部刚性的单层网壳和下部柔性的索杆体系组合而成。上部的网壳杆件主要受压，下部的径向索与环向索受

拉,中间通过竖向撑杆连接;索内的预应力通过撑杆为上部网壳提供多点弹性支撑,有效减小了网壳的变形与截面,如图5(a)所示。大连体育中心体育馆就采用了平面为不规则椭圆形的弦支穹顶结构,如图5(b)所示。



(a) 弦支网壳结构



(b) 大连体育中心体育馆

图5 弦支网壳结构构造与应用实例

Fig. 5 Configuration and application examples of suspen-dome structures

2.4.1 局部失效机理与整体结构响应特征

针对弦支网壳结构的连续倒塌机理,学界主要聚焦于环索与节点等关键部位的失效影响。现有研究普遍表明,外环索是结构安全的重中之重,外圈环索和支座处环索失效会引发结构刚度与承载力的骤降,极易诱发整体的渐进或连续倒塌[89-90]。基于这种受力特性,实际工程设计通常遵循安全等级“由外向内依次递减”的原则[91],同时需高度防范关键节点失效所引发的连锁反应[92-93]。然而,局部失效并非必然导致整体破坏。针对连体弦支网壳、无环索交叉索系及特殊蜂窝型等特定构型,多项研究表明,在合理的参数设计下,单根索或杆件的破坏虽会引起局部变形与内力增大,但剩余结构仍可通过内力重分布维持整体稳定,展现出较好的抗连续倒塌性能[94-95]。此外,学者同样对新型全铰接弦支网壳的抗连续倒塌性能进行了研究[96]。

根据研究文献的相互验证可以知晓,在弦支网壳结构中,重要构件主要集中在结构的外部,其中最为关键的构件为外环索,除此之外支座连接处构件的失效同样会对结构产生重大影响,且设计参数对结构抗连续倒塌能力的影响同样不可忽略。弦支网壳结构通常设计为节点固接的单层网壳,新型结构例如全铰接节点弦支网壳等研究相对较少;同时在长期使用中预应力损失对结构抗连续倒塌性能的影响机理还需厘清。

2.4.2 抗连续倒塌评估方法与评价指标体系

武志玮等[97]基于能量法研究了损耗因子识别理论,结果表明子系统损耗因子变化体现了空间杆系结构内力重分布变化的剧烈程度,子系统划分越细对结构杆件重要性的预测越准确。利用该方法也解释了弦支网壳结构极限承载力提高、整体破坏倾向加大的现象。李雄彦等[98]基于构件拆除后上部网壳总应变能变化量峰值和上部网壳杆件应变能变化率标准差提出一种改进应变能法,用于评价无环索弦支网壳不同部位的拉索重要性。

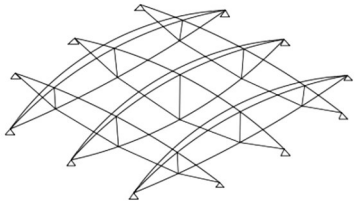
2.4.3 复杂工况下的结构响应与优化加固策略

针对带有特殊荷载或复杂连接形式的弦支网壳结构,研究人员通过评估与优化提出了多种抗倒塌策略。舒赣平等[99]针对国内少见的带有大质量悬挂子结构的屋盖进行了评估,明确指出拉索及支座处径向桁架下弦杆是此类体系的关键构件。为了提升结构的整体性与抗倒塌能力,吴逸枫等[95]以瓯海奥体中心体育馆为例,建议通过设置构造钢拉杆来增加结构整体性,使其在断索后起到拉结作用,从而防止连续倒塌。何云明等[100]则通过青少年户外培训基地综合体育馆的方案优化证明,将外侧网架与单层网壳弦支穹顶连接成整体,并通过悬挑桁架和环向桁架加强整体刚度,能有效避免单层网壳转折点受力集中,大幅提高整体稳定性并防止连续倒塌。

当前,有关弦支网壳抗连续倒塌的研究大多集中于传统构造形式,即上部网壳采用刚接节点,分析重点因而常集中于下部环索、撑杆等关键构件。然而,随着新型全铰接弦支网壳的应用,上部网壳构件在连续倒塌过程中的潜在失效也需纳入研究体系。同时,传统弦支穹顶中下部关键连接节点的失效机理及其对整体稳定性的影响,仍有待深入探讨。此外,作为连接上部刚性网壳与下部张拉索杆的关键构件,下部撑杆的连接方式及其失效行为,对结构的抗连续倒塌性能具有重要影响;而长期服役中预应力可能发生的损失及其效应,同样需要系统分析与重视。

2.5　张弦梁结构

张弦梁结构由上部的刚性梁或拱、下部的柔性拉索以及中间的撑杆连接而成。拉索通过撑杆对上弦梁施加反向荷载，将梁原本纯粹的受弯状态转变为更有利的压弯状态，从而大幅降低了梁的截面高度，实现了刚柔并济的受力效果，如图 6(a)所示。中国最大的机场建筑之一上海浦东机场 T2 航站楼就采用了该结构形式，其具体应用如图 6(b)所示。



(a) 张弦梁结构



(b) 上海浦东机场 T2 航站楼

图 6　张弦梁结构构造与应用实例

Fig. 6　Configuration and application examples of beam-string structures

2.5.1　局部失效机理与整体结构响应特征

在失效机制与关键参数敏感性方面，张弦梁结构的初始倒塌本质主要表现为上弦结构的受压屈曲与下弦索的受拉屈服[101]。基于交替路径法的大量分析表明，虽然单根构件失效通常不足以直接引发整体连续倒塌[102]，但上弦抗弯刚度[103]、结构跨度、撑杆数量[104]决定了断索或断杆后内力重分布的能力与结构的整体抗力表现。针对空间协同与新型结构构造，单榀张弦梁的失效响应与结构整体的空间抗倒塌性能存在显著关联且相互区别[105]。针对轮辐式张弦体系[106]，研究证实，强化空间维度的联系刚度如合理设置柱间与檩条间斜撑、优化榀间距，或采用“管内穿索配合交叉撑杆”等新型防断裂构造[107-108]，能够大幅提升结构的传力冗余度与防连续倒塌能力。在倒塌动态效应与评估不确定性方面，连续倒塌过程伴随着强烈的动力特征。文献[109]研究了构件突发失效后引发的剩余结构动力振荡与瞬态响应。近年来的研究进一步将制造与施工误差等不确定性参数引入连续倒塌的计算模型中[110]，Lu 等[111]则结合实验与数值模拟验证了张弦梁结构倒塌过程及有限元模型的准确性。

总结来看，不管是何种张弦梁结构，拉索始终是结构中重要的关键构件，对于单向张弦梁结构，每榀结构之间的连接构件则会显著地影响结构整体性能，在双向张弦梁结构中，拉索失效造成的影响则与撑杆数量联系紧密。在轮辐式张弦梁结构中，关键构件进一步包括了支座处构件与内环梁。在接下来的研究中，应更加深入地关注撑杆与拉索在抗连续倒塌中的协同工作机理，从单一平面构件研究向空间整体结构协作延伸。

2.5.2　抗连续倒塌评估方法与评价指标体系

在张弦梁结构的性能评价与分析方法上，研究人员致力于开发更高效的预测模型与指标体系。郑义凡等[112]在梁柱单元修正混合强化本构模型的基础上，结合非线性屈曲材料模型，提出了张弦桁架连续倒塌快速分析方法。随着新技术的发展，Liu 等[113]尝试将机器学习引入到抗连续倒塌的预测分析中。在具体评价指标方面，张超等[114]针对动力放大系数在张弦梁中的分布规律进行了专门研究；李志安等[115]则根据易损性曲线预测了结构在超越荷载和罕遇地震下的失效概率，得出大跨度张弦梁结构易损性较低的结论，并指出适当提高预应力水平可改善结构易损性。

2.5.3　复杂工况下的结构响应与优化加固策略

针对环境侵蚀、火灾等复杂条件及结构加固需求，现有研究提供了多元化的抗倒塌解决方案。在环境与灾害耦合效应方面，研究不仅探究了沿海环境下腐蚀与预应力综合作用对结构性能的影响[116]，也验证了在火灾工况下，合理增设辅助撑杆能有效改善双向张弦梁的抗连续倒塌能力[117]。在加固设计与抗倒塌装置研发方面，除了探讨纵向连系桁架、山墙及抗风柱等常规构件的实际工程作用外，还提出了新型双索布置装置[118]以及具有二次刚度的抗倒塌套管构件[119]以增强防倒塌效能。此外，备用索技术的应用与优化也是重要方向，基于变换荷载路径法的研究指出其更适用于支座水平刚度较小的结构[120]，并通过模拟与实验进一步明确了备用索在张弦梁中的最佳布置位置[121]。

空间张弦梁结构通常以平面张弦梁为基本单元组合而成。现有研究多集中于双向单弦梁或辐射式张弦梁等单一形式，所提出的评价指标与性能提升方案往往受限于特定结构形式，普适性不足。

此外，上部屋面结构与下部支撑体系的差异对不同结构构型的影响亦不相同。因此，有必要依据其组合规律与整体受力特点，建立更具普遍性的结构性能评价体系，并提出适用于各类空间张弦梁的高效性能提升策略。在此过程中，需考虑结构拉索预应力的变化以及基本单元间连接节点的失效影响。

2.6 空间结构抗连续倒塌研究对比分析

对比五类典型空间结构不难发现，不同体系在冗余度、预应力损失敏感性以及分析方法成熟度上存在显著差异，这直接导致各类型结构在抗连续倒塌现实设计中侧重点的不同。

冗余度呈现刚性向柔性降低的趋势。网架作为高度超静定体系冗余度最高，单根至多根构件失效仍能有效抵抗倒塌；网壳冗余度较低且呈区域化特征，关键圈层局部破坏易导致承载力大幅下降；索穹顶及弦支网壳等预应力体系由关键构件控制冗余度，外圈环索等核心构件失效会切断自平衡路径，易引发连续倒塌。

在预应力损失方面，结构刚度的建立方式决定了结构对预应力损失的敏感性。索穹顶结构作为全张力体系，其刚度的建立完全依赖于初始的预应力水平，预应力的损失会直接动摇结构刚度基础并削弱抗倒塌性能。网架与网壳结构的刚度主要依靠杆件截面与几何形态建立，常规使用下并不涉及预应力损失导致的抗连续倒塌能力衰减问题。张弦梁与弦支网壳结构对预应力损失的敏感性则介于二者之间，因此在长周期的使用与研究中同样不容忽视。综上，五类结构对预应力损失的敏感性呈现清晰的三级梯度：索穹顶极高，弦支网壳与张弦梁中等，网架与网壳可基本忽略。

分析方法成熟度方面，网架与网壳分析体系最为成熟，拆除构件法的应用已覆盖多灾害耦合、锈蚀、支撑类型影响等，并完成了实际事故验证；弦支网壳与张弦梁研究正逐步深化，但对刚柔协同失效机制等关键因素分析不足；索穹顶分析成熟度相对更低，动力放大系数等参数存在较大偏差，且普遍采用“理想索杆”简化模型，未考虑索的松弛、滑移等实际行为，理论分析与工程应用存在脱节。

3 结论

（1）近年来，空间结构抗连续倒塌研究在精细化分析方法和设计理论方面取得了显著进展。对网架和网壳等刚性结构，揭示了其依靠杆系内力重分布形成次生抗力机制的特征；对索穹顶、弦支网壳及张弦梁等预应力体系，明确了外圈环索、关键脊索与撑杆失效是诱发整体连锁倒塌的主导因素。研究场景已从单一构件移除延伸至火灾、强风、地震等多灾害耦合作用，并据此提出了增设连系梁、引入阻尼器及配置备用拉索等多种防倒塌增强策略。

（2）当前针对结构抗连续倒塌的研究方法主要源自钢筋混凝土框架结构，因此实际设计中采用的动力放大系数等关键参数在应用于空间结构时，其适用性需重新审视。空间结构在受力特性、冗余机制和破坏模式上具有独特性，直接沿用原有参数可能带来偏差。这要求我们根据其结构特点，对现有设计参数与方法进行针对性修正，或发展全新的、适用于空间结构的抗连续倒塌分析与设计方法体系。

（3）现代工程创新常表现为不同结构体系的融合与协同工作。例如，郑州奥体中心体育场[122]融合了轮辐式索承网格、双层网架与平面桁架，形成杂交结构体系，其传力路径与冗余特性均有别于传统单一结构形式，因而抗连续倒塌性能也呈现不同特征。因此，相关研究不应局限于索穹顶、网架等单一类型，而应拓展至多种体系协同作用的复杂混合结构，并发展相应的分析理论与设计策略。此外，对同一类型空间结构体系的研究往往较为分散，有必要对现有成果进行系统梳理与整合，从而提出更具普适性的评价与设计标准，这也是推动空间结构发展的重要方向。

（4）现有抗连续倒塌分析普遍将上部空间结构进行孤立建模与评估，忽视了其与下部支撑体系、屋面围护系统以及内部附属设施之间的相互作用。然而，下部支撑的约束条件与失效模式、屋面板的刚度与质量贡献、以及悬挂荷载的动力耦合效应，均会深刻改变结构的传力路径、动力响应及最终破坏机制。因此，未来研究需突破“主体结构孤立分析”的传统范式，致力于构建并研究“主体-支撑-围护”协同工作的整体系统模型，以更真实地揭示空间结构在极端事件下的系统行为与抗倒塌性能。

（5）在预应力结构体系中，节点作为构件间传力的关键枢纽，其作用至关重要。然而，现有研究对关键节点失效如何影响空间结构的抗连续倒塌性能尚缺乏精细认识；同时，长期服役中预应力损失对结构抗连续倒塌性能的影响仍是当前评估的盲区。因此，有必要突破目前将“构件”与“节点”简

化为理想单元的常规做法，发展能够模拟预应力传递路径、捕捉节点局部破坏细节的精细化分析理论与实验方法。

（6）空间结构抗连续倒塌的评价指标体系仍缺乏能够深刻揭示其系统本质与破坏共性的统一理论框架。现有研究多局限于针对特定结构形式或单一破坏场景的孤立指标罗列，指标之间缺乏系统性关联，难以客观评估不同结构体系在抗倒塌机制方面的内在差异与优劣。因此，未来研究亟需构建一个基于多维数据融合的结构抗连续倒塌性能综合评价体系，以更全面、系统地反映其整体行为与失效机理。

参考文献（References）

[1] ASCE/SEI 7-10 Minimum design loads for buildings and other structures [S].

[2] TBR2010 Approved document a3: dis-proportionate collapse[S].

[3] ENV 1991-1:1994 Eurocode-basis of structural design[S].

[4] UFC 4-023-03 Design of buildings to resist progressive collapse [S].

[5] T/CECS 392—2021 建筑结构抗倒塌设计标准[S].
T/CECS 392—2021 Collapse-resistant design standards for building structures[S].

[6] GB 55001—2021 工程结构通用规范[S].
GB 55001—2021 General code for engineering structures[S].

[7] Griffiths H, Pugsley A, Saunders O. Report of the inquiry into the collapse of fats at Ronan Point, Canning Town [R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1968.

[8] U.S. Department of Commerce. Final report on the collapse of the World Trade Center Towers [R]. NIST: U. S. National Institute of Standards and Administration, 2005.

[9] 陈素文，魏鑫纳，李国强. Q690D-QT高强钢材的高温动态拉伸力学性能[J]. 建筑结构学报，2024，45(1)：47-57.
Chen Suwen, Wei Xinna, Li Guoqiang. Tensile mechanical properties of Q690D-QT at high temperatures and high strain rate[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(1): 47-57.

[10] 朱军，盛冬发，幸美秀，等. 国产Q420D低合金高强度钢的高温拉伸性能[J]. 塑性工程学报，2023，30(7)：172-179.
Zhu Jun, Sheng Dongfa, Xing Meixiu, et al. High temperature tensile properties of domestic Q420D low-alloy high-strength steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(7): 172-179.

[11] 孙世鹏，陈一鸣，刘壮，等. H型钢加强螺纹锚固单边螺栓连接钢管节点抗火性能研究[J]. 建筑结构，2025，55(14)：122-129.
Sun Shipeng, Chen Yiming, Liu Zhuang, et al. Study on fire resistance behavior of thread-fixed one-side bolted tube connection with H-shaped internal strengthening component[J]. Building Structure, 2025, 55(14): 122-129.

[12] 滕黛洁. 大跨空间机库建筑火灾温度场及烟气蔓延研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2024：27-40.
Teng Daijie. Study on fire temperature field and smoke spread of large-span space hangar building[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2024: 27-40.

[13] 王成，王雪桃，李涛，等. 复杂结构内爆炸冲击波传播的大规模计算方法研究[J]. 北京理工大学学报，2024，44(1)：39-50.
Wang Cheng, Wang Xuetao, Li Tao, et al. Study on large scale calculation method of explosive shock wave propagation in complex structure[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(1): 39-50.

[14] 毛新平. 低温环境下Q690qE桥梁钢断裂韧性试验研究[J]. 铁道建筑，2024，64(12)：1-5.
Mao Xinping. Experimental study on fracture toughness of Q690qE bridge steel under low temperature environment[J]. Railway Engineering, 2024, 64(12): 1-5.

[15] 杜平，刘书贤，谭广柱，等. 台风作用下网壳结构的风振响应分析[J]. 工业建筑，2012，42(增刊1)：311-314，342.
Du Ping, Liu Shuxian, Tan Guangzhu, et al. The wind vibration response analysis of latticed shell under typhoon load[J]. Industrial Construction, 2012, 42(S1): 311-314, 342.

[16] 张玉琢. 考虑节点初始损伤的网壳结构风致疲劳损伤值的研究[D]. 大连：大连理工大学，2024：33-42.
Zhang Yuzhuo. Study on the wind-induced fatigue damage value of reticulated shell structure considering the initial damage of the node [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024: 33-42.

[17] Fu F, Parke G A R. Assessment of the progressive collapse resistance of double-layer grid space structures using implicit and explicit methods[J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(3): 831-842.

[18] 宋怀金，刘桥. 江门站复杂支承屋盖结构稳定及抗连续性倒塌分析[J]. 建筑结构，2022，52(1)：17-23.
Song Huaijin, Liu Qiao. Stability analysis and anti-continuous collapse analysis on complex supporting roof structure of Jiangmen Railway Station[J]. Building Structure, 2022, 52(1): 17-23.

[19] 吴军，何远明，黄用军，等. 龙华文体中心体育馆钢屋盖结构设计[J]. 建筑结构，2021，51(增刊1)：452-458.
Wu Jun, He Yuanming, Huang Yongjun, et al. Structural design of steel roof of Longhua Sports Center Gymnasium[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 452-458.

[20] 丁北斗，吕恒林，李贤，等. 基于重要杆件失效网架结构连续倒塌动力试验研究[J]. 振动与冲击，2015，34(23)：106-114.
Ding Beidou, Lü Henglin, Li Xian, et al. Tests for dynamical progressive collapse of a grid structure based on key member failure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(23): 106-114.

[21] Liu H J, Lü Y J, Wang F M, et al. Dynamic experimental study on anti-progressive collapse of polyline-shaped large-

span double-layer grid space structure[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 35999.

[22] 韩庆华, 邓丹丹, 徐颖, 等. 网架结构连续倒塌破坏模式及倒塌极限位移研究[J]. 空间结构, 2018, 24(1): 9-16, 61.
Han Qinghua, Deng Dandan, Xu Ying, et al. Research on progressive collapse modes and ultimate displacements of square pyramid spatial grids[J]. Spatial Structures, 2018, 24(1): 9-16, 61.

[23] Mao J W, Cai W L, Ju J S. Progressive collapse dynamic analysis of a long-span space grid structure with special braces [J]. Strength of Materials, 2022, 54(5): 871-879.

[24] 石城林. 基于关键构件失效的大开洞钢屋盖稳定性分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(1): 186-190.
Shi Chenglin. Stability analysis of steel roof with large opening based on failure of key components[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45(1): 186-190.

[25] 邢哲, 崔维久, 杨春贺, 等. 基于RBF神经网络的网架结构损伤识别试验研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(4): 70-76.
Xing Zhe, Cui Weijiu, Yang Chunhe, et al. Experimental study on damage identification of grid structure based on RBF neural network[J]. Structural Engineers, 2019, 35(4): 70-76.

[26] 王悦, 周清. 高温下钢网架重要构件评估方法[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 539-542.
Wang Yue, Zhou Qing. Evaluation method of important members of steel grid frame at high temperature[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 539-542.

[27] Zhou G P, Song Q N, Li A Q, et al. Assessment on the progressive collapse resistance of a long-span curved spatial grid structure with main trusses[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(3): 1239-1253.

[28] 彭俊. 襄阳东站超长复杂钢屋盖结构设计关键技术[J]. 建筑结构, 2025, 55(17): 16-23.
Peng Jun. Key technologies for the design of the super-long and complex steel roof structure of Xiangyang East Railway Station[J]. Building Structure, 2025, 55(17): 16-23.

[29] 柳子通, 袁理明, 肖志杨, 等. 汉川东站大跨度钢网架屋盖结构设计[J]. 建筑结构, 2024, 54(17): 54-59.
Liu Zitong, Yuan Liming, Xiao Zhiyang, et al. Structural design on large-span steel grid roof of Hanchuan East Railway Station[J]. Building Structure, 2024, 54(17): 54-59.

[30] 李忠献, 李鹿宁, 师燕超, 等. 天津港"8·12"特别重大火灾爆炸事故轻轨东海路站网架结构破坏分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(10): 1-7.
Li Zhongxian, Li Luning, Shi Yanchao, et al. Failure analysis of light rail station structure at Donghai Road in the "Aug 12th" accident of great fire explosion at Tianjin Port[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 1-7.

[31] 赵祥, 刘忠华, 王社良, 等. 多维地震作用下大跨空间结构的减震控制分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3): 398-405.
Zhao Xiang, Liu Zhonghua, Wang Sheliang, et al. Seismic control analysis of large-span space structures under multidimensional earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 398-405.

[32] 谢俊乔, 刘宜丰, 夏循, 等. 成都天府国际机场指廊钢结构设计[J]. 建筑结构, 2020, 50(19): 43-50.
Xie Junqiao, Liu Yifeng, Xia Xun, et al. Steel structural design of airside concourses of Tianfu International Airport [J]. Building Structure, 2020, 50(19): 43-50.

[33] Tian L M, Nie X N, Zhong W H, et al. Comparison of the progressive collapse resistances of different single-layer latticed domes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105697.

[34] Tian L M, Wei J P, Bai R, et al. Dynamic behavior of progressive collapse of long-span single-layer spatial grid structures [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, 35(2): 04021002.

[35] 屈显华,杜书朝.单层球面网壳结构抗连续性倒塌研究[C]// 天津大学,天津市钢结构学会.第十七届全国现代结构工程学术研讨会论文集.天津:天津大学,2017:315-320.
Qu Xianhua, Du Shuchao. A study on the resistance to progressive collapse of single-layer spherical grid shell structures [C]// Tianjin University, Tianjin Association for Science and Technology. Proceedings of the 17th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: Tianjin University, 2017:315-320.

[36] 王媛, 聂晓宁, 田黎敏. 大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能影响因素分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(3): 464-471, 479.
Wang Yuan, Nie Xiaoning, Tian Limin. Influence factors on progressive-collapse resistance of large-span single-layer latticed domes[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(3): 464-471, 479.

[37] 沈金, 王俊, 王成志, 等. 某超长异形曲面单层网壳结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(20): 33-39.
Shen Jin, Wang Jun, Wang Chengzhi, et al. Design and analysis of a super-long profiled curved single-layer reticulated shell structure[J]. Building Structure, 2023, 53(20): 33-39.

[38] 石瑛莉. 基于构件拆除法的大跨度网壳结构抗连续倒塌分析[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2020年工业建筑学术交流会论文集(下册).北京:中冶建筑研究总院2020:446-451.
Shi Yinli. Analysis of continuous collapse resistance of long-spanlatticed shell structure based on component removal method [C]// China Metallurgical Construction Research Institute Co. Proceedings of the 2020 Academic Symposium on Industrial Architecture (Volume 2). Beijing: China Metallurgical Construction Research Institute 2020:446-451.

[39] 张晓辉, 龙海芳, 申波, 等. 大跨预应力钢网壳结构连续倒塌分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2016, 33(4): 112-117.
Zhang Xiaohui, Long Haifang, Shen Bo, et al. Progress collapse analysis of Large-span prestressed steel reticulated shell structure [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sci-

ences)，2016，33(4)：112-117.

[40] Shan Z W，Ma H H，Yu Z W，et al. Dynamic failure mechanism of single-layer reticulated (SLR) shells with bolt-column (BC) joint [J]. Journal of Constructional Steel Research，2020，169：106042.

[41] Xu Y，Zhang X N，Han Q H. Research on the progressive collapse resistance of single-layer cylindrical latticed shells with AH joints[J]. Thin-Walled Structures，2021，158：107178.

[42] Xu Y，Zhang X N，Han Q H，et al. Progressive collapse analysis of single-layer latticed domes with fabricated joints [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures，2023，64(2)：8-17.

[43] Tian L M，Wei J P，Hao J P，et al. Dynamic analysis method for the progressive collapse of long-span spatial grid structures [J]. Steel and Composite Structures，2017，23(4)：435-444.

[44] Wei J P，Tian L M，Hao J P. Improving the progressive collapse resistance of long-span single-layer spatial grid structures [J]. Construction and Building Materials，2018，171：96-108.

[45] 江虹，葛金刚，丁阳. 考虑下部结构的单层球面网壳倒塌机理[J]. 建筑·建材·装饰，2018(12)：155-157.
Jiang Hong，Ge Jinggang，Ding Yang. A study on the collapse mechanism of single-layer spherical grid shells considering the substructure [J]. Jianzhu Jiancai Zhuangxiu，2018(12)：155-157.

[46] Zhang Q，Huang W，Xu Y，et al. Analysis of key elements of single-layer dome structures against progressive collapse [J]. Steel and Composite Structures，2022，42(2)：257-264.

[47] Yan S，Zhao X Z，Rasmussen K J R，et al. Identification of critical members for progressive collapse analysis of single-layer latticed domes[J]. Engineering Structures，2019，188：111-120.

[48] 黄建铭，刘翔，王香茹，等. 考虑网壳结构失效特征的修正Park-Ang地震损伤评估研究[J]. 地震工程学报，2025，47(2)：468-479.
Huang Jianming，Liu Xiang，Wang Xiangru，et al. Seismic damage assessment of reticulated shell structures using a modified Park-Ang model with consideration of failure characteristics[J]. China Earthquake Engineering Journal，2025，47(2)：468-479.

[49] 徐颖，韩庆华，练继建. 单层球面网壳抗连续倒塌性能研究[J]. 工程力学，2016，33(11)：105-112.
Xu Ying，Han Qinghua，Lian Jijian. Progressive collapse performance of single-layerlatticed shells [J]. Engineering Mechanics，2016，33(11)：105-112.

[50] San B B，Ren G K，Shan Z W，et al. Intelligent assessment method of progressive collapse resistance of corroded latticed shell structures considering time-varying effect [J]. Engineering Structures，2025，345：121477.

[51] Zhou H T，Zhang Y G，Fu F，et al. Progressive collapse analysis of reticulated shell structure under severe earthquake loading considering the damage accumulation effect [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities，2018，32(2)：04018004.

[52] Du W F，Li X L，Zhu L M. Collapse mechanism of double-layer latticed shell structures in view of energy dissipation under seismic excitation[J]. Structures，2025，81：110318.

[53] Zhu Z C，Xiang Y，Peng Y Y，et al. Earthquake-induced collapse of steel latticed shell：energy criterion implementation and experimental validation [J]. Engineering Structures，2021，236：112102.

[54] 袁良健，赵才其，郑腾腾，等. 强震作用下铝合金蜂窝板组合网壳的连续倒塌性能研究[J]. 钢结构，2023，38(4)：41-48.
Yuan Liangjian，Zhao Caiqi，Zheng Tengteng，et al. Study on progressive collapse performance of aluminum alloy honeycomb plate composite reticulated shell under strong earthquake [J]. Steel Construction，2023，38(4)：41-48.

[55] 翟永梅，刘瑶，陈贻辉，等. 单层连方型球面网壳与下部支承结构协同工作的强震失效研究[J]. 地震工程学报，2020，42(2)：299-303，310.
Zhai Yongmei，Liu Yao，Chen Yihui，et al. Failure modes of single-layer lamellar spherical reticulated shells under cooperative work with lower supporting structures and severe earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal，2020，42(2)：299-303，310.

[56] 赵伟. 下击暴流对单层球面网壳结构的损伤破坏研究[D]. 大连：大连理工大学，2021：26-35.
Zhao Wei. Study on damage and failure of single-layer reticulated dome under downburst[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2021：26-35.

[57] Lu W，Wang J L，Guo H，et al. Wind-induced dynamic collapse analysis of single-layer cylindrical reticulated shells considering roof slabs and support columns[J]. International Journal of Heat and Technology，2020，38(1)：180-186.

[58] Tian L M，Li D Y，Li W，et al. Progressive collapse resistance of single-layer latticed domes under different failure conditions at the same joint[J]. Journal of Building Engineering，2021，36：102132.

[59] 尹越，方喆立，刘红波，等. 火灾下双层柱面网壳结构连续倒塌分析[J]. 空间结构，2022，28(1)：13-20，63.
Yin Yue，Fang Zheli，Liu Hongbo，et al. Progressive collapse analysis of a double-layer lattice shell under fire [J]. Spatial Structures，2022，28(1)：13-20，63.

[60] Cui J，Hu G，Zhan Y，et al. Investigation on load path of a latticed shell structure under localized fire based on member sensitivity[J]. Buildings，2022，12(11)：1938.

[61] 高祁. 锈蚀对网壳结构抗连续性倒塌性能的影响[J]. 水泥技术，2023(2)：83-92.
Gao Qi. Effect of corrosion on continuous collapse resistance of reticulated shell structures [J]. Cement Technology，2023(2)：83-92.

[62] Fu Y Q，Yang X D，Zhang H D，et al. Influence of welding deformation on anti-collapse performance of single-layer reticulated shell structures with prestressed cables [J]. Journal of Physics：Conference Series，2021，2045(1)：012018.

[63] 浦沪军. 支座沉降对双层球面网壳抗连续性倒塌能力的影响

[J]. 工程质量, 2020, 38(7): 44-49.
Pu Hujun. Influence of support settlements on progressive collapse resistance of double-layer spherical latticed shells[J]. Construction Quality, 2020, 38(7): 44-49.

[64] Zhou F, Kong L Y, Huang T L, et al. Collapse failure analysis of the single-layer reticulated shell dome for a large-scale slag oil tank[J]. Engineering Failure Analysis, 2026, 186: 110464.

[65] Nie G B, Shi Y J, Zhang C X, et al. Shaking table test on progressive collapse of the double-layer cylindrical reticulated shell with infilled wall[J]. Structures, 2024, 67: 106946.

[66] 葛金刚,刘晗晗.单层球面网壳结构抗连续倒塌设计[J].建筑钢结构进展,2013,15(6):20-24,57.
Ge Jingang, Liu Hanhan. Progressive collapse resisting design of single-layer reticulated shells[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(6): 20-24, 57.

[67] Zheng T T, Zhao C Q, Xu Y, et al. Progressive collapse resistance analysis of plate-member composite reticulated shell structure[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(8): 3333-3343.

[68] 张辰朔, 王孟鸿, 姚志恒. 关键杆件加固的双层网壳结构抗倒塌分析[J]. 钢结构(中英文), 2025, 40(1): 18-25.
Zhang Chenshuo, Wang Menghong, Yao Zhiheng. Collapse resistance analysis of a double-layer reticulated shell structure reinforced with critical rods[J]. Steel Construction, 2025, 40(1): 18-25.

[69] 王媛, 聂晓宁. 大跨度单层球面网壳抗连续倒塌性能提升方法研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(11): 54-57.
Wang Yuan, Nie Xiaoning. Research on the method of progressive collapse resistance improvement of longspan single-layer spherical reticulated shells[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(11): 54-57.

[70] 许笑冰, 邱璐, 宋红召, 等. 某混凝土联方网壳结构抗连续倒塌设计[J]. 建筑结构, 2024, 54(2): 65-69.
Xu Xiaobing, Qiu Lu, Song Hongzhao, et al. Progressive collapse design of a union square reticulated concrete shell structure[J]. Building Structure, 2024, 54(2): 65-69.

[71] Tian L M, Wei J P, Hao J P. Optimisation of long-span single-layer spatial grid structures to resist progressive collapse [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 394-405.

[72] Bai C, Tian L M, Lu J Q, et al. Probabilistic analysis and improvement of progressive collapse resistance for single-layer latticed domes considering multiple uncertainties[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 116: 11471

[73] 张微敬, 李鹏伟, 李永梅. 开口索穹顶结构抗倒塌性能及参数影响研究[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(9): 40-51.
Zhang Weijing, Li Pengwei, Li Yongmei. Study on collapse resistance and parameter influence of open cable dome structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(9): 40-51.

[74] 张微敬, 苏岩杰, 于敬海. 复合式索穹顶结构连续倒塌分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(3): 97-102, 115.
Zhang Weijing, Su Yanjie, Yu Jinghai. Progressive collapse analysis of composite cable dome structure[J]. Building Structure, 2023, 53(3): 97-102, 115.

[75] Zhang W J, Li P. Progressive collapse analysis of Levy type open cable domes[C]//Proceedings of IASS Annual Symposia. Beijing, China: Innovation Sustainability Legacy, 2022: 1-10.

[76] 袁文俊, 张爱林, 张艳霞, 等. 空间三撑杆双环索索穹顶抗连续倒塌分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊2): 366-373.
Yuan Wenjun, Zhang Ailin, Zhang Yanxia, et al. Anti-continuous collapse analysis of cable dome with spatial three-struts and double-hoop cables[J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 366-373.

[77] Zhang H, Lü H, Zhu Z Y, et al. Study on the dynamic response of the component failure of drum-shaped honeycomb-type Ⅲ cable dome with quad-strut layout[J]. Buildings, 2023, 13(8): 1894.

[78] Zhang W, Hu Y. Progressive collapse analysis of Geiger type cable domes with partial CFRP cables[C]//Proceedings of IASS 2024 Symposium. Zurich Switzerland: IASS, 2024, 2024(6): 1-10.

[79] 陈联盟, 黄奔程, 曾一洪, 等. Geiger型索穹顶冲击动力响应与失效机理研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(18): 145-154.
Chen Lianmeng, Huang Bencheng, Zeng Yihong, et al. Dynamic response and failure mechanism of Geiger cable dome stractures under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(18): 145-154.

[80] Chen L M, Li Z B, Liu Y J, et al. Analysis and evaluation of the progressive collapse behaviour of a cable dome structure [J]. Buildings, 2022, 12(10): 1700.

[81] Chen L M, Huang K Y, Liu Y J, et al. Analysis and evaluation of the progressive collapse of cable dome structures induced by joint damage[J]. Buildings, 2023, 13(8): 2072.

[82] 惠卓, 秦卫红, 许剑武, 等. Geiger型碳纤维索穹顶结构连续倒塌性能非线性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(15): 114-122.
Hui Zhuo, Qin Weihong, Xu Jianwu, et al. Nonlinear analysis of progressive collapse behavior of Geiger type carbon fiber cable dome structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(15): 114-122.

[83] Chen L M, Zhou W C, Li Z B, et al. Resistance of cable dome structures to progressive collapse under the effects of typhoons[J]. International Journal of Steel Structures, 2025, 25(5): 1084-1096.

[84] 张连飞, 区彤, 刘雪兵, 等. 顺德德胜体育馆含悬挂斗屏索穹顶结构防连续倒塌分析研究[J]. 钢结构(中英文), 2022, 37(1): 21-30.
Zhang Lianfei, Ou Tong, Liu Xuebing, et al. Progressive collapse resistance analysis and research on cable dome structural system with suspended bucket screen of desheng sports center in Shunde[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2022, 37(1): 21-30.

[85] Abedi K, Asghari R, Chenaghlou M, et al. Modifying the configuration and members of hybrid cable dome to mitigate

the progressive collapse[C]//Proceedings of IASS 2024 Symposium. Zurich Switzerland：IASS，2024：11-18.

[86] 冯远，王立维，张彦，等. 成都凤凰山专业足球场结构设计[J]. 建筑结构，2020，50(19)：15-21.
Feng Yuan，Wang Liwei，Zhang Yan，et al. Structural design of Chengdu Fenghuangshan professional football field [J]. Building Structure，2020，50(19)：15-21.

[87] Asghari R，Abedi K，Chenaghlou M R，et al. Retrofit strategies for mitigating progressive collapse of hybrid and traditional cable domes [J]. Journal of Constructional Steel Research，2023，204：107807.

[88] Chen L M，Yan S K，Jiang Z C，et al. Design optimisation for cable dome structures based on progressive collapse resistance[J]. Buildings，2023，13(9)：2353.

[89] Zhang W J，Zhang P，Niu G K. Nonlinear dynamic progressive collapse analysis of suspend dome structure[C]//Proceedings of IASS Symposium 2013. Poland：Wroclaw University of Technology，2013：1-5.

[90] Xu Z Y，Zhao X Z，Yan S. Numerical analysis and theoretical studies on progressive collapse of suspend dome structures [C]// IABSE Symposium，Nantes 2018：Tomorrow′s Megastructures. Zurich：International Association for Bridge and Structural Engineering，2018：S28-S65.

[91] 傅学怡，董石麟，张志宏. 济南奥体中心主体育馆球面弦支穹顶结构设计[C]//中国建筑学会建筑结构分会2012年年会论文集. 厦门：中国建筑学会，2012：1-10.
Fu Xueyi，Dong Shilin，Zhang Zhihong. Design of the spherical cable-supported dome structure at the main stadium of Ji′nan Olympic Sports Centre [C]// Proceedings of 2012 Annual Conference of the Structural Engineering Branch of the Architectural Society of China. Xiamen：Architectural Society of China，2012：1-10.

[92] Xu Z Y，Yan S. Progressive-collapse mechanism of suspended-dome structures subjected to sudden cable rupture[J]. Buildings，2023，13(6)：1533.

[93] Xu Z Y，Zhu D Y. Impact of continuous cable-strut joints on the anti-progressive-collapse performance of suspended-dome structures[J]. Buildings，2023，13(9)：2225.

[94] 区彤，陈进于，谭坚. 肇庆新区体育馆连体弦支穹顶结构防连续倒塌分析[J]. 建筑结构，2016，46(21)：75-79.
Ou Tong，Chen Jinyu，Tan Jian. Progressive collapse resistance analysis on conjoined suspendome structure of Zhaoqing New District Stadium[J]. Building Structure，2016，46(21)：75-79.

[95] 吴逸枫，李宏胜，陈念，等. 瓯海奥体中心体育馆100m跨无环索弦支网壳结构设计[J]. 建筑结构，2024，54(2)：54-58，64.
Wu Yifeng，Li Hongsheng，Chen Nian，et al. Structural design of a 100m-span crossover cable-supported reticulated shell in gymnasium of Ouhai Olympic Center [J]. Building Structure，2024，54(2)：54-58，64.

[96] Li D，Lü H，Zhu Z Y，et al. Study on dynamic characteristics and resistance to progressive collapse of large opening drum honeycomb four-pole type Ⅲ fully articulated chord-supported dome structure[J]. Structures，2025，73：108395.

[97] 武志玮，刘国光，申晓静，等. 基于损耗因子法的弦支穹顶结构杆件重要性分析[J]. 建筑结构，2018，48(21)：66-71.
Wu Zhiwei，Liu Guoguang，Shen Xiaojing，et al. Component importance analysis of suspend-dome structure based on the loss factor theory[J]. Building Structure，2018，48(21)：66-71.

[98] 李雄彦，刘人杰，邹瑶，等. 基于改进应变能法的无环索弦支穹顶拉索重要性评价[J]. 钢结构，2020，35(7)：43-53.
Li Xiongyan，Liu Renjie，Zou Yao，et al. Importance evaluation for cables in the loop-free suspen-dome based on an improved strain energy method[J]. Steel Construction，2020，35(7)：43-53.

[99] 舒赣平，潘睿，王四清，等. 张家界马戏城主馆带悬挂子结构的弦支穹顶屋盖抗连续倒塌分析与评估[J]. 建筑结构，2022，52(16)：37-44.
Shu Ganping，Pan Rui，Wang Siqing，et al. Analysis and assessment of progressive collapse resistance of a chord dome roof with suspended substructure in the main hall of Zhangjiajie Circus City[J]. Building Structure，2022，52(16)：37-44.

[100] 何云明，许利文，李金哲，等. 青少年户外培训基地综合体育馆屋盖优化设计[J]. 建筑结构，2021，51(22)：56-60.
He Yunming，Xu Liwen，Li Jinzhe，et al. Optimal design on complex gymnasium′s roof of teenagers′ training base [J]. Building Structure，2021，51(22)：56-60.

[101] Liu W H，Zeng B，Zhou Z，et al. Theoretical study on progressive collapse of truss string structures under cable rupture [J]. Journal of Constructional Steel Research，2022，199：107609.

[102] 王静峰，陈经纬，崇劲松，等. 大跨度张弦桁架空间钢结构抗连续倒塌分析及评估[J/OL]. 建筑钢结构进展，2026-01-10.https://doi.org/10.13969/j.jzgjgjz.20250420001.
Wang Jingfeng，Chen Jingwei1，Chong Jingso，et al. Analysis and evaluation on the collapse performance of the large-spantruss-string space steel structure [J/OL]. Progress in Steel Building Structures，2026-01-10. https://doi. org/10.13969/j.jzgjgjz.20250420001.

[103] 蔡建国，朱奕锋，冯健，等. 撑杆失效对张弦结构抗连续倒塌性能的影响[J]. 建筑结构学报，2015，36(6)：78-85，100.
Cai Jianguo，Zhu Yifeng，Feng Jian，et al. Influence of loss of struts on progressive collapse resistance performance of string structures[J]. Journal of Building Structures，2015，36(6)：78-85，100.

[104] 张微敬，胡帅领，张毅刚. 双向张弦梁结构连续倒塌仿真分析与抗倒塌设计[C]//第十三届空间结构学术会议论文集. 北京：北京工业大学，2010：260-265.
Zhang Weijing，Hu Shuailing，Zhang Yigang. Simulation analysis of progressive collapse and anti-collapse design of two-way tensioned beam structures [C]// Proceedings of the 13th Academic Conference on Spatial Structures. Beijing，China：Beijing University of Technology，2010：260-265.

[105] 王媛，王文斌. 大跨度空间张弦桁架结构抗连续倒塌性能研究[J]. 结构工程师，2021，37(2)：45-53.

Wang Yuan, Wang Wenbin. Progressive collapse-resistant behavior of large-span spatial truss string structures [J]. Structural Engineers, 2021, 37(2): 45-53.

[106] 陈宇, 艾辉军, 王四清, 等. 某网球中心轮辐式张弦梁屋盖结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(18): 95-102.
Chen Yu, Ai Huijun, Wang Siqing, et al. Design and analysis on spoke type beam string roof structure of a tennis center [J]. Building Structure, 2024, 54(18): 95-102.

[107] 蒋友宝, 王艺珺, 吴春成, 等. 管内穿索下弦与交叉撑杆的张弦梁结构连续倒塌抗力计算模型[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(11): 237-249.
Jiang Youbao, Wang Yijun, Wu Chuncheng, et al. Calculation model of progressive collapse resistance of beam string structure with cable-in-pipe lower chords and crossed struts [J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(11): 237-249.

[108] 蒋友宝, 张梦华, 周浩. 下弦与撑杆新构型张弦梁结构的抗连续倒塌性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 12-20.
Jiang Youbao, Zhang Menghua, Zhou Hao. Progressive collapse resistance of beam string structure based on a new configuration of bottom chord and strut[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 12-20.

[109] Zhang H Y, Lu J Y, Wu X L, et al. Progressive collapse behavior of large-span truss string structures subjected to cable failure[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2024, 28(4): 1379-1391.

[110] Liu W H, Zeng B, Zhou Z, et al. Probabilistic evaluation of progressive collapse resistance of truss string structures considering structural uncertainties [J]. International Journal of Steel Structures, 2023, 23(5): 1238-1250.

[111] Lu J Y, Zhang H Y, Wu X L. Experimental study on collapse behaviour of truss string structures under cable rupture[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 185: 106864.

[112] 郑义凡, 曾滨, 周臻, 等. 基于非线性屈曲材料模型的张弦桁架连续倒塌分析[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 152-160.
Zheng Yifan, Zeng Bin, Zhou Zhen, et al. Analysis on progressive collapse of cable-stayed arch-truss based on nonlinear buckling material model [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 152-160.

[113] Liu W H, Zeng B, Zhou Z, et al. Machine learning-based models for predicting the progressive collapse resistance of truss string structures [J]. Engineering Structures, 2024, 307: 117946.

[114] 张超,周桢干,赖志超,等.多自由度体系的动力放大系数解析研究[J].振动工程学报,2025,38(3):550-557.
Zhang Chao, Zhou Zhengan, Lai Zhichao, et al. Analytical research on dynamic amplification factor of multi-degree-of-freedom system [J]. Journal of Vibration Engineering, 2025, 38(3):550-557.

[115] 李志安, 何江飞, 高博青. 大跨度张弦梁结构易损性及评估分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(2): 41-44.
Li Zhian, He Jiangfei, Gao Boqing. Fragility analysis and assessment of large-span beam string-structures[J]. Building Structure, 2013, 43(2): 41-44.

[116] Liu W H, Zeng B, Wu C, et al. Progressive collapse behavior of prestressed steel structures in coastal areas[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2026, 237: 110101.

[117] 殷志祥, 王孟玉. 考虑火灾全过程的空间双向张弦梁结构倒塌分析[J]. 空间结构, 2021, 27(3): 25-31.
Yin Zhixiang, Wang Mengyu. Collapse analysis of spatial two-way beam string structure considering the whole process of fire[J]. Spatial Structures, 2021, 27(3): 25-31.

[118] 蔡建国,朱奕峰,冯健,等. 张弦结构抗连续倒塌措施研究[C]//第二届建筑结构抗倒塌学术交流会论文集. 北京:中国建筑学会,2012:185-195.
Cai Jianguo, Zhu Yifeng, Feng Jian, et al. Research on anti-progressive collapse measures of cable-string structures [C]// Proceedings of the Second Academic Conference on Structural Collapse Resistance. Beijing: The Architectural Society of China,2012:185-195.

[119] 刘文豪, 曾滨, 周臻, 等. 预应力张弦桁架的抗连续倒塌分析与性能提升[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2025, 55(1): 9-15.
Liu Wenhao, Zeng Bin, Zhou Zhen, et al. Anti-progressive collapse analysis and performance enhancement of prestressed truss string structures[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2025, 55(1): 9-15.

[120] 曾滨, 陆金钰, 董霄, 等. 增设备用索对张弦桁架抗连续倒塌性能影响研究[J]. 空间结构, 2017, 23(4): 49-54.
Zeng Bin, Lu Jinyu, Dong Xiao, et al. Progressive collapse resistance of truss string structures when installing fuse cables [J]. Spatial Structures, 2017, 23(4): 49-54.

[121] Liu W H, Zeng B, Zhou Z, et al. Investigation on the progressive collapse resistance and failure mechanism of truss string structure with alternate cables[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 99: 111590.

[122] 冯远, 向新岸, 王立维, 等. 郑州奥体中心体育场钢结构设计研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 11-22.
Feng Yuan, Xiang Xinan, Wang Liwei, et al. Steel structural design of Zhengzhou Olympic Center stadium[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 11-22.

(本文编辑:贾源源)