科技创新

混凝土结构温度场的系统性文献综述

陆亦云[1]，代 绳[2]，黄 龙[3]，李银录[4]，谢启育[2]，尚祖峰[5]

（1. 广西柳梧铁路有限公司，南宁 530000；2. 中铁四局集团第五工程分公司，九江 332000；
3. 中铁四局集团第五工程分公司，临汾 031400；4. 中国铁路南宁局集团有限公司，南宁 530000；
5. 哈尔滨工业大学土木工程学院，哈尔滨 150090）

摘要：近年来混凝土结构温度场相关研究取得了显著进展，主要聚焦于温度场建模、温控技术、高温破坏机制、特殊结构响应及材料敏感性及裂缝控制等多个方面。系统回顾了2015—2025年期间发表的共98篇文献并对其进行全面分析，主要针对梳理混凝土温度模拟方法以及控温等保护措施，采用包括文献计量检索、定量分析和定性分析的三步研究方法，确定并归纳出6个关键研究主题，分别为数值模拟方法与技术、温控措施的影响分布、高温火灾的破坏机制、特殊结构的温度响应、混凝土材料的温度敏感性、温度应力与裂缝控制策略。从而最终明确当前已发表研究存在的局限性，以预测未来研究发展趋势。

关键词：混凝土结构；温度场；系统性文献综述

中图分类号：TU1 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－1807(2026)06－0025－15

现如今混凝土结构的温度应力效应已成为制约工程耐久性和安全性的关键因素。随着大体积结构、超长建筑和极端环境工程的快速发展，温度场多场耦合建模与智能温控技术研究取得重要突破。本文从温度场数值模拟、环境协同温控、高温破坏机制、特殊结构响应、材料性能调控和裂缝控制六个维度系统梳理领域研究进展。

在温度场数值模拟领域，多尺度建模技术实现从宏观到细观的跨越式发展。基于动态参数修正的有限元模型[1]通过UMATHT子程序实时更新水化参数，将峰值温度预测误差降至1.5%以内。细观尺度研究[2]构建骨料-砂浆-界面三相格构模型，揭示骨料预冷对温升速率的抑制效应。多物理场耦合方面，“化-热-力”相场内聚模型[3]通过应变场与温度场0.55～0.92的强相关性，成功预测裂缝时空演化规律。

环境协同温控技术呈现主动冷却与被动保温协同发展的趋势。水管水平间距在主动冷却体系中被证实为核心控制参数[4]，而“内冷外保”复合工艺[5]实现温峰提前58小时且降幅达18%的双重优化。被动保温方面，5 cm橡塑板[6]和反射涂料[7]分别针对不同工程场景形成有效解决方案。施工工艺创新方面，跳仓法结合低热水泥[8]显著改善厚筏板裂缝控制效果。

高温环境下的材料劣化机制研究取得新突破。火灾试验揭示单面受火时混凝土内部100 ℃温度平台现象[9]，多孔结构材料[10]展现独特热阻效应。材料性能退化方面，再生骨料取代率与质量损失率呈正相关[11]，高强混凝土在500 ℃易发爆裂[12]。修复技术研究[13]证实薄壁钢管加固可有效恢复火灾后构件承载力。

特殊结构温度响应研究拓展了工程应用边界。地下粮仓[14]和海上风电承台[15]的温度场特征分析为特殊环境设计提供理论支撑。组合结构创新方面，纤维增强聚合物（fiber reinforced polymer，FRP）增强地聚物夹芯墙[16]展现优异的耐火性能，4 h耐火测试中背火面温度始终低于247 ℃。

材料热学性能调控技术向功能化方向发展。钢纤维复合体系[17]提升能量桩换热效率达37%，引气剂[18]使超低温冻融循环耐久性提升2.1倍。新

收稿日期：2025-05-09

作者简介：陆亦云(1980—)，男，广西南宁人，高级工程师，研究方向为工程管理；代绳(1992—)，男，四川泸州人，助理工程师，研究方向为工程管理；黄龙(1994—)，男，湖南长沙人，工程师，研究方向为工程管理；李银录(1982—)，男，广西南宁人，工程师，研究方向为工程管理；谢启育(2002—)，男，湖南邵阳人，工程师研究方向为工程管理；通信作者尚祖峰(1994—)，男，黑龙江哈尔滨人，博士，助理研究员，研究方向为工程管理。

型胶凝体系如碱矿渣[19]和地聚物混凝土[16]开辟高温耐受新路径。温度变化显著影响侵蚀介质在混凝土中的传输行为。忽略氯离子扩散系数的时变性会显著低估结构服役寿命，而未考虑衰减系数随机性则会高估耐久性[20]。智能修复技术方面，超低功耗监测系统[21]与神经网络模型[22]形成误差小于2.57%的闭环控制系统。

当前研究仍面临复杂环境适应性的挑战，如太阳辐射对钢筒仓[23]的非线性影响。未来研究应依托高精度监测数据(0.03 ℃级系统)，发展多尺度耦合的智能温控体系，实现从材料设计到结构运维的全生命周期温度场管理，为重大基础设施安全保障提供理论支撑和技术解决方案。

鉴于混凝土结构温度场数值研究近年增多却缺乏系统性综述，本文拟系统回顾混凝土温度模拟方法与控温/保护措施，梳理重点主题、方法特征及其与工程需求的差距，并以文献计量与定性讨论相结合刻画现状与趋势。研究遵循系统综述范式，以2015—2025 年的相关文献为对象，在阐明研究意义与问题界定后，开展文献计量学检索。随后借助CiteSpace 开展科学计量分析与知识图谱构建，揭示主题结构与演化，并在此基础上进行系统综述，对映射聚类逐一解析，汇总最新进展并提出未来方向。

1　研究方法

本文采用系统性文献综述研究方法，将科学计量分析与批判性综述相结合，以探讨近 10 年的混凝土结构热学性能领域的应用现状，以科学计量学分析作为定量标准，系统评价作为定性标准。参照系统综述与荟萃分析优先报告条目(preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses，PRISMA)的研究方法，进行文献鉴定、筛选、判断合格性，最终确定纳入定量和定性分析的文献，筛选结果如图 1 所示。

1.1　数据来源

为了明确数据库来源，选择中国知网、万方数据知识服务平台、维普期刊数据库进行检索。所选择的数据库是当前覆盖范围较大的综合性学术文献索引数据库，收录了绝大多数学术期刊、会议论文等文献，且三种搜索引擎均可使用布尔语法，可以通过设定条件以实现更为精确的检索。将三个搜索引擎结合起来，收集到的文献更为全面，具有较高可信度，能够保证文献综述的科学性和可靠性。检索文献覆盖范围从 2015—2025 年，主要包括学术期刊论文和会议论文。

本文将分别依照中国知网、万方和维普数据库的检索规则，按照正确的结构，选取合适的检索词进行搜索。使用的搜索字符串主要设定为四个部分，采用 AND 操作词连接各部分：①研究对象即混凝土材料；②研究方向：主要研究温度响应；③研究方法包括实验与数值模拟研究；④搜索范围限制条件。

采用布尔逻辑组合关键词，如表 1 所示。

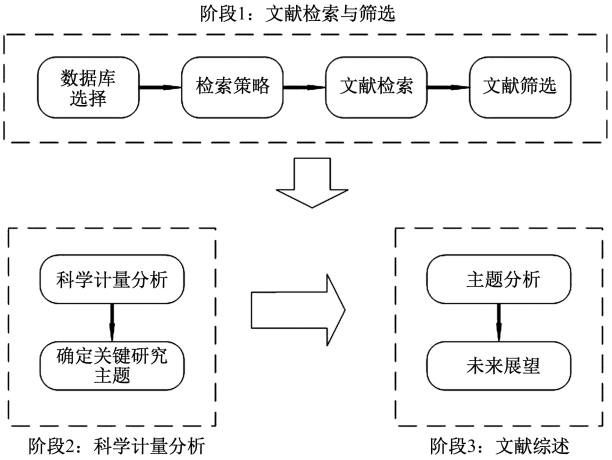


图 1　研究方法示意图[23]

表 1　检索词

维度	操作与关键词
检索项	篇关摘
研究对象	“混凝土” OR “水泥基材料”
研究方向	“温度” OR “热学性能” OR “温度应力” OR “温度变形”
研究方法	“数值模拟” OR “实验研究” OR “智能监测”
限制条件	发表年限
	文献类别
	研究领域

检索词的设定主要是为了确保能够概括同义表达的词语，准确检索到需要的文献，以减少后续筛查工作量。

并且规定文献研究范围首先要满足规定的入选标准：期刊文章、会议论文集，排除综述、书评等文章类型；采用发表年限为 2015—2025 年的文献；入选时排除不相关研究领域文献；纳入北大核心、工程索引(EI)等收录期刊的期刊论文。

提出以上入选标准是为了确保所有候选记录都经过同行评审，保证后续科学分析质量。

1.2　入选标准

通过设置检索词与入选标准进行的文献检索会出现与研究主题无关的文献。为了保证最终的文献分析样本与研究问题高度相关，还需要制定文

献筛选标准,以剔除不符合要求的材料。筛查阶段主要分为三个阶段。

(1)识别阶段。将知网和万方、维普数据源检索库检索到的论文标题、关键词、摘要等信息导出,在 Excel 工具中将多组数据合并为同一组,对导出文献的标题去除重复,得到去重后的待筛选文献列表。

(2)筛选阶段。此阶段将由两名研究人员进行完整的筛选程序,由两人分别独立判断文献是否符合研究范围,主要判断内容为文献标题、摘要和关键词。将评估结果用打分制分类:0(研究范围外)、0.5(不确定项)、1(研究范围内),并由评估结果筛除超出研究范围的论文,能够消除判读过程中的潜在偏差和主观因素,提高判读结果的准确性和可靠性,主要评判依据是文献是否以混凝土结构温度场的研究为重点研究范围,不相关的文章将筛除。

(3)入选资格评定。此阶段将分类为 0 的文献筛除,保留分类为 0.5 和 1 的文献列表,下载并阅读全文。对于没有全文可查的文献,或关注非混凝土结构温度场研究的文献将被排除在研究范围外。并在阅读文献过程中采用向后检索法和向前检索法方法纳入参考或引用已入选文献的文章,将符合主题且未被检索到的文章纳入全文审查范围中。

通过筛选审查得到最终的文献样本,作为样本计量分析与系统评价的基础。

1.3 选择性偏倚风险

由于文献检索和筛选过程中可能存在选择性偏倚的风险,本文在数据选择与检索策略上采取多项措施以降低偏倚风险的影响。

选择性偏倚的主要风险源于数据库覆盖不全和检索关键词的设定。因此为了减少影响,在自动检索的基础上,将结合人工补充检索专业期刊,以提高检索的全面性。此外,尽管检索词已尽可能涵盖了混凝土结构温度场研究中出现的关键词,但仍可能存在遗漏。因此,在筛选阶段采用了双盲判读法,由两名研究人员分别独立筛选文献,以避免个体主观因素对研究结果的影响,提高了判读质量,保证最终的文献列表的可靠性,一定程度上减少了存在的选择性偏倚风险。

综上所述,本文通过多数据库检索、科学的筛选流程及双盲判读法的研究方法,最大限度降低了选择性偏倚的风险,确保最终入选文献的质量和代表性,为后续分析提供坚实基础。

2 结果

基于上文介绍的文献计量检索方法,在完成文献样本的筛选后,将进行科学计量分析。计量分析主要采用统计方法和可视化技术。涵盖两部分内容:一是外部特征分析,主要描述研究机构的发展现状,包括发文量增长趋势分析和期刊分析;二是内容分析,结合文本挖掘和可视化,以表现各研究主题的相关性,包括关键词聚类分析、时间线分析。首先使用 Excel 完成文献数据的去重与筛选,再基于 CiteSpace 对最终的研究文献目录进行计量分析,并使用科学计量方法分析参与理论或技术研究的样本个体,根据关键词共现聚类分析对文献主题分类,以揭示研究现状并可视化展示研究成果

2.1 检索结果

按照上文的研究方法,利用布尔运算搜索表 1 列出的关键词,首次检索提供了 100 篇知网文献和 79 篇万方文献、96 篇维普平台期刊文献、91 篇 Engineering Village 平台文献,然后依据制定的筛选审查标准对文献进行筛选,得到最终的文献样本,由 98 篇文献组成,具体流程如图 2 所示,接下来将依据整理的文献目录进行定量分析,并结合文献分布情况探讨近年来的研究热点。

2.2 发文量分析

选取的 98 篇文献发表于 2015—2025 年,重点关注近年来的研究主题及发展趋势。对筛选的文

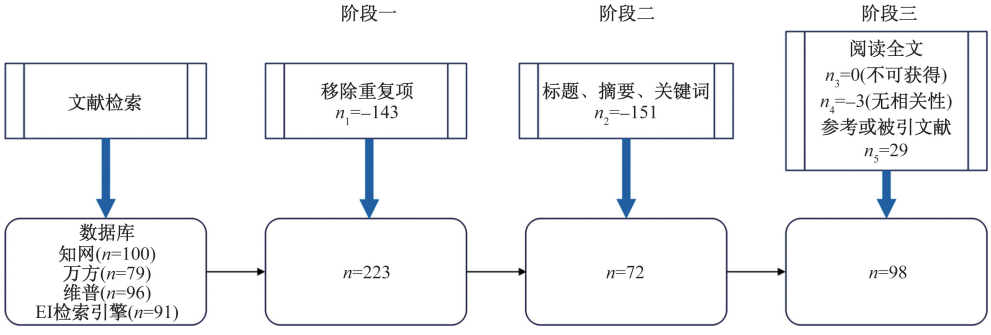


图 2 检索过程流程

献样本进行发文量统计，图 3 展示了 2015—2025 年的文献发表量的趋势。根据图 3 文献出版情况知，国内对混凝土温度场领域的研究一直处于较高关注状态，除了 2025 年最低（4 篇），2025 年目前有三篇相关文献发布。

此外，图 4 展示了发表量多的研究机构在该领域的研究贡献。结果表明，该方向的研究主要由高校主导，且与企业合作较多，体现学术和工程界对混凝土温度场研究的高度关注。

2.3　出版期刊分析

表 2 列出了文献集合中发表量排名前 6 的期刊。从数据来看，混凝土温度场研究的相关论文主要集中在《混凝土》期刊。在相关期刊中，《中国公路学报》的影响因子最高（4.75），表明其在该研究领域具有较高的学术影响力。

需要注意的是，由于各篇论文的引用量存在差异，可能导致一定程度的计量偏差。然而，从整体来看，所选文献大多发表于高影响力期刊，确保了研究的科学性和可靠性。

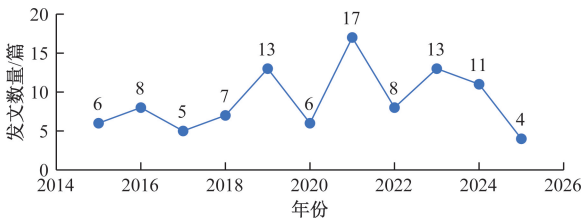


图 3　年度发文量

表 2　来源分析

期刊	复合影响因子	文献数/篇
混凝土	1.34	5
中国公路学报	4.75	3
建筑结构学报	3.00	3
建筑结构	0.99	3
东南大学学报（自然科学版）	1.88	3
材料导报	2.44	3

2.4　聚类分析及研究热点

关键词是研究者对文章主旨的概括，能够有效反映研究主题的核心内容。因此，利用 CiteSpace 进行关键词共现聚类分析，以识别混凝土温度场研究的高频关键词，并可视化展示研究热点及领域发展趋势。

图 5 所示的 Citespace 科学分析图中将文献集合中的主要聚类分为：温度场、数值模拟、温降收缩、温度控制、温度效应、冷却水管、温度荷载 6 个。

通过分析关键词密度及计算模块性值 Q 与平均轮廓系数 S，可以判断聚类结构的合理性。当 Q 较高时（$Q>0.674\ 1$），表明聚类结构较为显著；当 S 接近 1 时（$S>0.911\ 2$），说明聚类划分较为可信[25]。

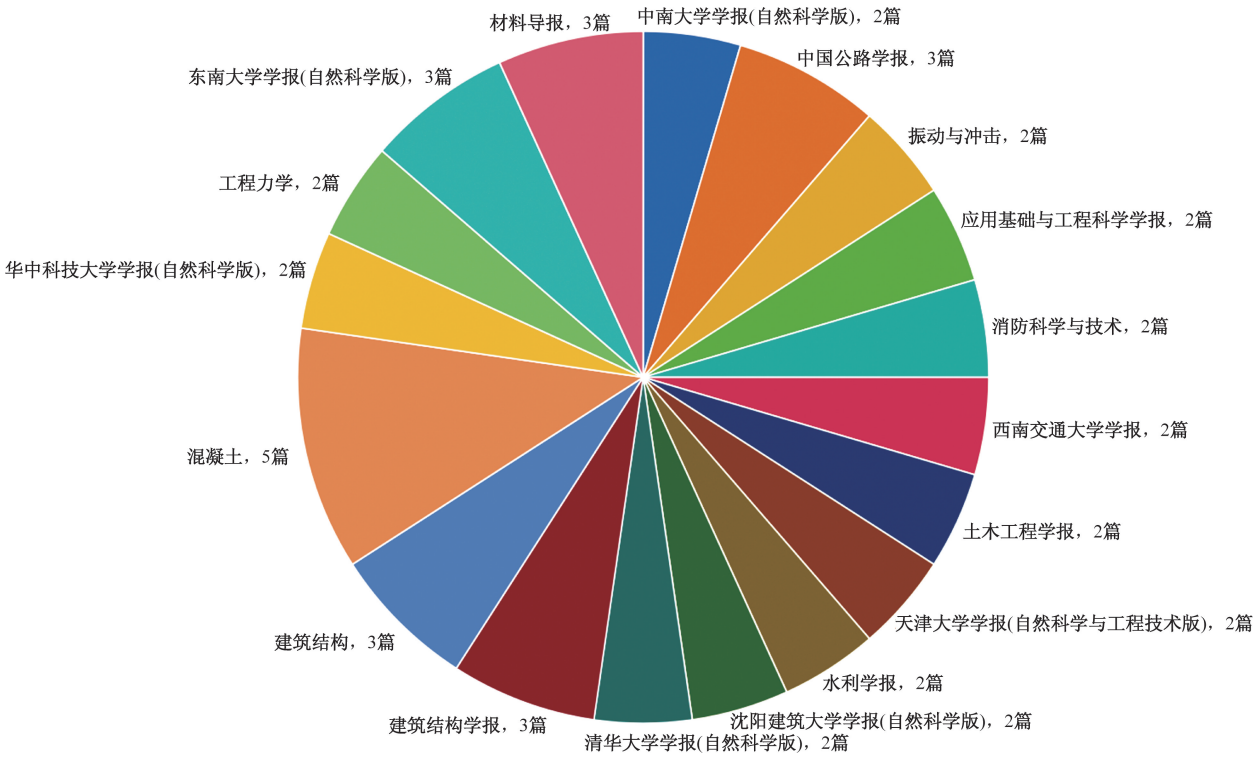


图 4　机构发表量

而本文样本分析得到的模块性值 $Q=0.674\ 1$,平均轮廓系数 $S=0.911\ 2$,可以说明生成的关键词网络聚类结构和分类是合理的。

结合表 3 的聚类高频关键词和图 6 的关键词聚类时间线图进行分析,可以看出以下聚类的关键词所包含的研究主题,基本反映了近年来的研究热点和研究现状。聚类 0 是混凝土温度场研究必然包含的关键词;聚类 4 的数值模拟是近年来进行温度场研究的重要工具;聚类 3、聚类 6 和聚类 8 是对混凝土温度变化下生成裂缝的研究;而聚类 2 和聚类 7 都是对混凝土结构进行温控的措施方法;聚类 1 和聚类 5 则说明了对混凝土温度场研究的环境条件。综上可以判断本文献样本的研究内容与混凝土温度场领域高度相关。

经过对混凝土温度场相关文献的系统计量分析与关键词共现聚类研究,可以看出,本领域的研究热点主要聚焦于温度效应及其引发的多方面问题。因此将总结上述研究,归纳混凝土温度场研究的主要主题为数值模拟方法与技术、温控措施的影响分布、高温火灾的破坏机制、特殊结构的温度响应、混凝土材料的温度敏感性、温度应力与裂缝控制策略。

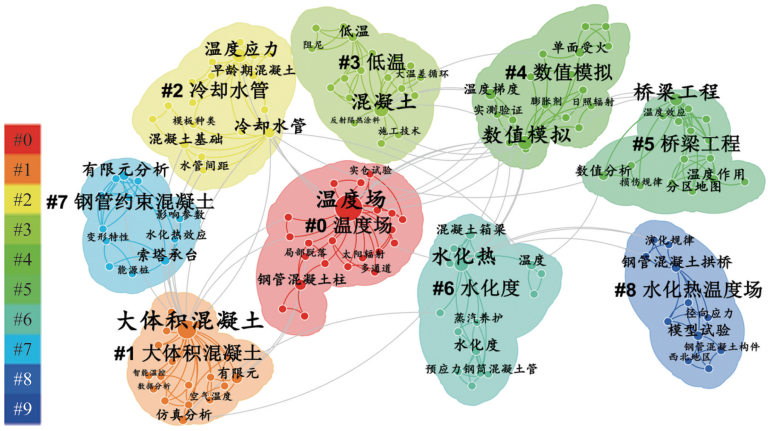


图 5　关键词聚类科学分析

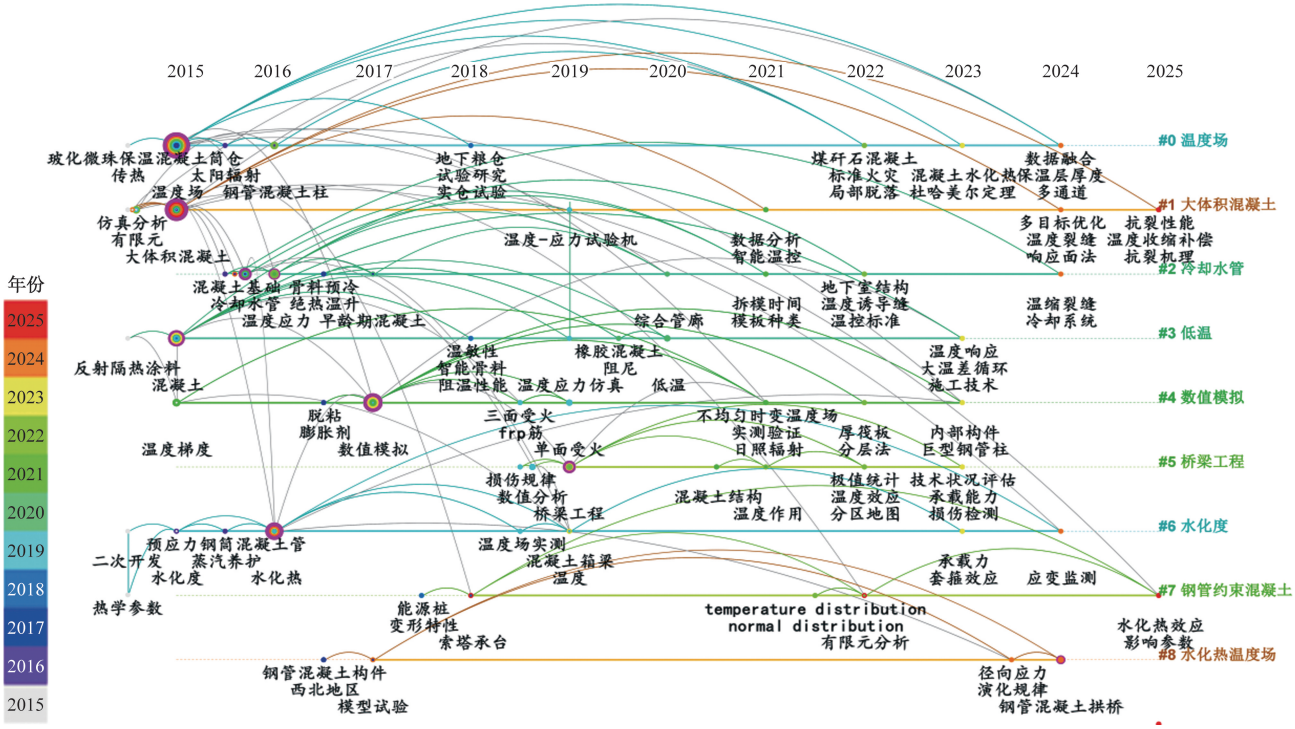


图 6　关键词聚类时间线

表 3 聚类高频关键词

聚类	关键词
#0 温度场	温度场；钢管混凝土柱；超低功耗；ansys；玻化微珠保温混凝土
#1 大体积混凝土	大体积混凝土；筏板基础；主动控温；响应面法；温度场模拟
#2 冷却水管	冷却水管；水管间距；超厚防辐射混凝土；最高温度；温度应力
#3 低温	低温；孔结构；橡胶混凝土；热学性能；阻尼
#4 数值模拟	数值模拟；frp 拉结件；预制夹芯保温墙体；混凝土连续箱梁桥；frp 筋
#5 桥梁工程	桥梁工程；温度作用；数值分析；分区地图；整体桥极限桥长
#6 水化热	水化度；水化热；测温点阵；热学参数；预应力钢筒混凝土管
#7 钢管约束混凝土	钢管约束混凝土；normal distribution；beams and girders；solar radiation；temperature distribution
#8 水化热温度场	水化热温度场；纵向应力；钢管混凝土拱桥；不均匀温度场；脱空机理

3 讨论

根据样本文献计量分析的结果，归纳为六个主题，通过研究主题回顾该领域的研究进展，对当前混凝土结构的温度场作用的研究主题和发展趋势进行详细介绍，样本文章的发表年限为 2015—2025 年。

3.1 数值模拟方法与技术

混凝土温度场的建模与仿真是预测结构内部温度分布、优化施工工艺及预防温度裂缝的核心手段。近年来，基于有限元方法的数值模拟技术因其灵活性与高精度得到广泛应用，而模型参数的动态修正和多物理场耦合分析成为提升预测可靠性的关键方向。崔溦等[1]通过试验证实，早期混凝土热学参数（导热系数、比热容）随水化度显著变化，忽略这一特性将导致峰值温度误差超过 4.6 ℃，达到峰值的时间误差超过 5 h；基于 ABAQUS 二次开发的 UMATHT 子程序通过动态更新热学参数，使模拟误差控制在 1.5%以内，验证了水化度依赖模型的必要性。戴俊等[26]通过热成像实验发现，微波照射下混凝土因介电特性主动吸热升温，而钢筋被动传热形成显著温度梯度（如功率 800 W 时梯度达 47 ℃），传统模型需耦合电磁场方程以描述此非均匀加热机制。张宁等[27]采用 479 个热电偶阵列的实测进一步支持该结论：箱梁水化温度沿竖向中心轴对称分布，腹板区域最高温度达 64.8 ℃，顶板、底板与腹板的最高水化热比例为 1∶1.1∶1.4，且温峰出现时间分别为浇筑后 13 h、11 h 和 12 h。

在宏观尺度方面，有限元方法（FEM）因其灵活性与高精度成为主流工具。吕学涛等[28]针对钢管混凝土柱提出温度场简化计算公式，通过 80 种工况的有限元分析，发现钢管厚度与截面尺寸是影响温度分布的主导因素，其公式误差小于 5%。戴公连等[29]建立混凝土箱梁双对流边界模型，通过积分变换法求得级数解，前八项级数和与数值解的最大误差为 4%，与实测数据最大误差为 11%；分析表明太阳辐射是温度场主控因素，箱室内气温可简化为常数（取实测平均值），综合换热系数为 15.23 W/(m^2·K)，可逼近最不利温差工况。李志鹏等[30]基于 Duhamel 定理推导大体积混凝土墙解析解，揭示混凝土温度随时间变化符合指数函数叠加规律，空间分布遵循三角函数特征，并量化了混凝土厚度、入模温度、绝热温升值及胶凝材料系数对核心温度的敏感性影响。徐小蓉等[31]在整体浇筑堆石混凝土拱坝监测中发现预填块石对下层混凝土具有“保温效应”，自密实混凝土（self-compacting concrete，SCC）浇筑后下层混凝土出现二次温升（影响深度不超过单层厚度）；通过等效入模温度、加权导热系数和等效绝热温升参数建立均匀化模型，成功模拟了水化及降温过程的等效温度场。徐小蓉等[32]进一步开发非均质材料温度仿真方法，揭示堆石混凝土早龄期温度三阶段演化规律：初始浇筑填充期（非均匀入仓温度快速均匀化，耗时＜5 h）；共同温升期（堆石体与自密实混凝土协同放热，堆石温升速率低 30%，持续 2～3 d）；稳定降温期（整体温度趋匀缓降）；分层填充导致堆石率空间差异，堆石率每增 10%区域平均温度降 0.8 ℃，无堆石区（如模板边界）夏季温峰高 40%，上层浇筑引发下层浅表 6 ℃二次温升（影响深度＜1.0 m）。

在细观尺度建模方面，王立成等[2]创新性地将混凝土视为骨料、砂浆及界面过渡区的三相复合材料，建立了细观格构网络模型，模拟结果表明骨料预冷可显著降低早龄期混凝土内部温度。

对于大体积混凝土结构，采用 ADINA 软件对筏板基础进行三维热-力耦合模拟，结果显示温度场预测值与实测数据基本吻合[33]；而陆汝林等[34]进一步表明，采用正弦函数模拟外界温度动态变化时，最大误差可控制在 12%以内。

多物理场耦合模型的发展则进一步拓展了温度场分析的维度。吴建营等[3]提出“化-热-力”多场耦合的相场内聚裂缝模型，通过引入水化度与温度梯度的交互作用，成功预测了早龄期混凝土裂缝萌

生与扩展的时空规律,其模拟结果与实测应变场标准差相关系数达 0.55～0.92。张跃等[35]基于格子玻尔兹曼法建立考虑温度时变效应的氯离子侵蚀模型,通过双分布函数分别描述温度演化与氯离子浓度扩散,揭示水灰比增大显著加剧氯离子扩散,混凝土饱和度超过 75%时扩散速率趋于稳定,昼夜温差对扩散系数影响显著但对服役寿命预测值影响有限。

然而,现有模型仍面临复杂环境适应性不足的挑战。例如,太阳辐射对钢筒仓温度场的影响显著,马越等通过研究美国采暖、制冷与空调工程师学会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,ASHRAE)辐射模型和瞬态热传导有限元理论分析发现,储料导热系数增大会导致仓壁温度明显升高,而钢筋混凝土筒仓受此影响较小[22,36]。卫俊岭等[37]结合局部气象参数与太阳辐射半经验公式,建立混凝土连续箱梁桥二维瞬态温度场模型,实测验证了晴天与阴天工况下的温度分布,并指出规范中的竖向温度梯度模型会低估箱梁应力响应。总体而言,当前建模技术已从单一传热分析转向多尺度、多物理场集成,但仍需通过高精度监测数据(如朱国鑫等[21]提出的 0.03 ℃精度超低功耗系统)持续优化模型参数与算法。

3.2 温控措施的影响分布

温控措施通过调控混凝土内部热量生成与外部散热过程,实现温度梯度与应力的主动管理,其效果高度依赖措施类型、施工时序及环境条件的协同作用。在主动冷却技术中,水管冷却是应用最广泛的方法。魏德敏等[4]通过参数化分析发现,冷却水管水平间距缩小可显著降低大体积混凝土基础最高温度,但竖向间距过小会加剧内部应力集中。王修山和侯宁[38]表明,增大冷却水流量可有效降低内外温差,但需避免因降温速率过快引发内部微裂缝。康瑞强等[39]提出基于响应面与粒子群算法的多目标优化方法,通过优化入模温度(13.2 ℃)、养护温度(31.2 ℃)和冷却水入口温度(15.8 ℃),使地铁站大体积混凝土内表温差峰值降低 19.4%,应力安全系数提高 16.2%,实现全过程无裂缝。对于超厚墙体,采用“内部冷却＋外部保温”复合工艺,结果显示冷却水管使内部温峰提前 58 h 出现,峰值降低 18%(约 57 ℃),同时木模板保温使表面应力减少 50%,内外温差稳定在 17 ℃以内[5]。宁泽宇等开发实时温度监测移动平均算法,通过时间-空间-质量多维动态分析,显著降低白鹤滩、乌东德拱坝监测数据的系统误差与随机误差,为智能冷却控制提供高精度数据支撑[40]。

被动保温措施的核心在于延缓表面散热速率,降低温度梯度。刘亚朋等[6]通过现场试验证明,8.25 m 厚筏板表面覆盖 5 cm 橡塑板可控制里表温差在 24.7 ℃以内。张烈霞[41]针对深基坑饱和土层上的混凝土筏板,通过有限元模拟优化温控方案,提出结合热传导原理的精准冷却方法,在保证强度前提下实现节能减碳。对比玻化微珠保温混凝土与普通混凝土墙体,张玉等[42]发现前者在冬季极端气候下的阻热性能接近外贴保温层的普通混凝土。反射隔热涂料可显著降低混凝土表面温度及温度梯度,例如在高铁桥梁高墩中,涂覆反射隔热涂料后桥墩温度幅值最大降低 8.69 ℃,且白色涂料效果优于灰色[7,43]。王海峰和严捍东[44]开发 Z 形结构智能骨料,发现掺 3%碳纤维时负温度系数(negative temperature coefficient,NTC/PTC)、正温度系数(positive temperature coefficient)效应临界温度为 65 ℃/80 ℃,电阻率峰值提前预警结构破坏(峰值后 10～20 s 发生失效)。拆模时间的选择同样关键:李潘武等[5]表明,对超厚防辐射混凝土墙体来说,3 d 拆模时墙体中心降温速率达 3.85 ℃/d,而延迟至 10 d 拆模可将其降至 1.96 ℃/d,建议在温峰后 3 d 拆模并辅以喷雾养护。黄维等[45]研究能量桩中纤维混凝土的热力学性能:掺 1.3%钢纤维时导热系数达 2.44 W/(m·K),钢纤维与聚丙烯纤维分别减少温度应变 62.43%和 61.11%,钢纤维混凝土在冷热循环中膨胀/收缩应变最小。安瑞南等[46]在龙门桥锚碇基础(58 606 m^3)开发温度梯度数字监测系统,定义空间梯度阈值(－3.00～3.00 ℃/m)和时间梯度阈值(0.002/h·m),重构温度场显示热演化分三阶段(热积累→热释放→热传递),核心区稳定温度 53.60～54.50 ℃。

施工工艺优化对温度控制具有间接但深远的影响。朱兆聪等[8]对比跳仓法与分层法的厚筏板施工效果,发现跳仓法结合低水化热水泥可有效降低温度应力。常虹谷复光[17]通过掺入钢纤维与铁矿砂的配合比优化,使能量桩换热效率显著提升,且桩间距增大可避免热干扰。对于超长结构,研究证明凹槽型温度诱导缝可有效释放温度应力,如北京工人体育场采用 S 形弯折钢筋诱导缝构造,通过引导结构在诱导缝处开裂进一步释放温度应力,同时需加强主梁配筋以补偿局部强度损失[44,48]。杨新

浩等[49]通过斜拉桥索塔承台案例进一步揭示：分层浇筑时上层混凝土会使下层产生二次升温现象，升温幅度与距分界面的距离呈负相关；采用前期恒温＋后期动态调控的冷却策略比恒温冷却更有效控制降温速率，且二次温峰值与浇筑间隔时间直接相关。值得注意的是，温控措施需与环境条件动态适配：张泽众等[50]表明，低温环境下风速对大体积混凝土温度场的影响显著高于高温环境。康瑞强等[36]的优化模型证明，提高养护温度同时降低入模温度与冷却水温度，可协同降低温差并提升应力安全系数。

詹新彬等[51]通过300 h监测试验揭示，大体积承台在51 h温峰后表面应变由压变拉，最大拉应变达107.5 με，此时需同步实施内部通水与外部保温以避免裂缝贯通。刘军等[52]依托杭州西站公共交通导向型开发(transit-oriented development，TOD)项目，通过优选C50混凝土配合比(胶凝材料总量≤450 kg/m^3)降低水化热峰值，并基于有限元模拟与现场实测动态调控水管冷却参数，实现炎热气候下混凝土内部温升降幅达18%，验证了“材料优化＋主动冷却”协同策略对裂缝防控的有效性。未来研究需进一步探索智能温控系统，如超低功耗监测[21]与神经网络预测结合[22]，实现温度场的实时反馈与动态调控。

3.3 高温火灾的破坏机制

高温与火灾对混凝土温度场的影响不仅体现在瞬态热传导行为的改变上，更通过材料性能退化与结构损伤的耦合作用加剧工程风险。火灾试验与高温后力学分析表明，混凝土在受火过程中呈现显著的非均匀温度分布特征。邢德进等[9]通过单面与三面受火试件的对比发现，单面受火时，当混凝土内部温度达到100 ℃时出现温度平台，伴随表面潮湿现象。许肇峰等[53]对服役多年的空心板进行180 min ISO-834标准火灾试验，发现空心板内部温度在火灾早期快速上升后期趋缓，梁高方向呈非线性递减且温度梯度逐渐减小；500 ℃等温线法计算显示截面折减系数随火灾时间呈指数下降。这一现象与自由水蒸发吸热密切相关，而有研究进一步指出，钢管煤矸石混凝土柱因煤矸石的多孔结构延缓了热量传递，其截面温度显著低于普通钢管混凝土[10]。王明年等[54]在变高温环境下进行喷混凝土-岩石界面剪切试验，发现养护温度升高使峰值剪应力呈负增长，峰值剪位移正增长，法向应力会弱化温度损伤特征；据此建立考虑温度损伤的本构模型，理论曲线与试验高度吻合。

防火措施失效会显著放大火灾危害：模拟防火涂料局部脱落后发现，脱落区域的钢管温度急剧升高，而相邻未脱落区域温升速率显著降低，脱黏长度随涂料导热系数的减小而增大[55]。郝建文等[56]通过解析模型揭示：端部锚固使CFRP-混凝土界面(碳纤维增强聚合物，carbon fiber reinforced polymer)的脱黏荷载提高，有效抑制温度变化引起的界面滑移和剪应力；当温度低于胶黏剂玻璃化转变温度时，界面承载力随温度升高而增大。

高温导致的材料性能退化是结构承载能力下降的主因。李建沛和周莹莹[11]通过再生混凝土高温试验证实，再生混凝土在高温后抗压强度显著下降，再生粗骨料取代率较高的试件性能退化更明显。周昱程等[57]在沿海金属矿离子浓度与温度环境下试验发现：复合盐腐蚀使混凝土抗压强度提高但爆裂倾向增强，高温加速腐蚀进程；非蒸养超高性能混凝土(non-steam cured ultra-high performance concrete，NSC-UHPC)在腐蚀后仍保持韧性且无爆裂倾向。对于组合结构，袁晓辉等[19]发现复合相变储能材料可有效控制大体积混凝土内部温度场。火灾后修复技术的有效性高度依赖温度场历史，通过有限元分析证明，彻底处理脱黏层后，外包薄壁钢管加固的火灾后柱承载力可恢复甚至超过原设计水平[13]。钟元和王磊[58]进一步建立桥梁火灾后评估技术体系：通过表观损伤(混凝土剥落深度、裂缝分布)推定过火温度场分布，结合截面损失计算材料折减系数，实现灾后承载能力的定量评估，为混凝土结构火灾安全诊断提供标准化流程。在此背景下，声发射技术通过信号特征参数分析、波形分析和损伤定位分析，为火灾下混凝土损伤检测提供了多维度解决方案，可实时捕捉高温引发的微破裂演化过程[59]。刘宇森等[60]表明，CFRP加固混凝土结构在高温高湿耦合环境(如温度60 ℃/湿度95%)中暴露15 d后，界面极限荷载下降26.11%，CFRP应变衰减40.33%；湿热介质渗入黏结层导致应变传递加速，显著削弱修复结构的长期耐久性。此外，高强混凝土(C60)在500 ℃时易发生爆裂，其孔隙率和界面裂纹扩展速度显著高于普通混凝土[12]。杨海涛等[61]通过激光闪射法分析低温高性能混凝土(cold high-performance concrete，CHC)：在－90 ℃时CHC基体峰值应力比C60混凝土高，热扩散系数上升但导热系数下降；－36 ℃出现热流峰值，毛细孔体积和总孔隙率均低

于 C60 混凝土。

火灾升降温路径对混凝土损伤机制的影响不容忽视。对比 ISO-834 标准火灾与真实火灾的作用效果,发现真实火灾因升温速率波动大,导致混凝土内部温度梯度显著高于标准火灾,降温阶段的收缩应力进一步加剧裂缝扩展[62]。基于升降温全曲线模拟发现,截面内部温度在受火面停止升温后仍持续升高,形成内外温差,加速保护层剥落[63]。针对火灾后评估,有研究提出通过高温后界面黏结滑移试验可反推历史最高温度,为损伤诊断提供依据[64]。

3.4 特殊结构的温度响应

特殊混凝土结构因其功能与形态的独特性,温度场分布规律显著区别于常规结构,需针对性设计温控策略。陈先华等[65]通过瞬态热有限元分析发现:寒冷地区无砟轨道路基温度场呈水平双 U 形非均匀分布,月平均温度梯度正负交替;路基 0.4 m 深度内日温度波动显著,2.5 m 深度内月温度波动明显;路基表面沥青混凝土薄层使日均温升高 1～7 ℃但对整体分布形态无显著改变。这一特性要求仓储设计时上层需加强隔热,而下层可依赖地温自然稳定。对于综合管廊,有限元模拟表明,早龄期混凝土浇筑长度超过 60 m 后,温度应力不再增长,但墙体内外温差仍随环境温度日波动呈现周期性变化,建议在长度超过 60 m 时增设变形缝[66]。严仁章等[67]基于贵州香火岩特大桥建立温度-应力耦合模型,揭示太阳辐射下钢管混凝土拱肋截面温度场时空非线性分布:核心混凝土温度滞后于外层钢管,钢管与核心混凝土最大温差超 25 ℃,界面拉应力达 1.4～1.5 MPa 导致环向脱空高度 0.11～0.13 mm。对于大跨空间结构,通过斜拉桥钢混桥塔的温度场分析发现,日照导致桥塔温差显著,需在设计中预埋伸缩补偿装置[68]。

组合结构与新型材料在温度场调控方面展现独特优势。对比玻化微珠保温混凝土墙体与普通混凝土墙体的传热性能,发现前者在极端气候下内部稳态温差显著低于普通混凝土[42]。新型高性能的复合材料纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP),在不同领域的应用广泛,中外学者针对 FRP 在土木工程领域的应用做了大量的研究和实践[69]。针对 FRP 增强地聚物混凝土夹芯墙的火灾试验显示,受火 4 h 后背火面温度始终低于 247 ℃,且玄武岩纤维增强聚合物(basalt fiber reinforced polymer,BFRP)筋替换钢筋可降低整体温度场,证明复合材料的耐高温优势[16]。

极端环境下的混凝土结构温度响应呈现复杂时空特征。针对西北大温差地区钢管混凝土柱的试验表明,大温差环境下截面阳角与阴角温差显著[70]。石涛等[71]基于川藏铁路混凝土箱梁实测与实时阴影算法,发现太阳辐射引起的竖向温度梯度值从成都至拉萨呈“上升-下降-上升”趋势且服从正态分布,推荐 95%置信区间的梯度设计值为 25 ℃。研究超低温冻融循环对引气混凝土的影响,发现超低温环境下引气剂可有效改善混凝土孔隙结构[18]。对于海洋环境,有研究指出海上风电承台在内部降温 80 ℃与外部年温差 20 ℃共同作用下,内部拉应力可达 5.0 MPa[15]。

特殊结构的温度响应研究为工程实践提供了关键设计依据。针对高寒地区斜拉桥的组合梁,发现太阳辐射导致钢梁与混凝土桥面板的日温差达 10.8 ℃,最大竖向挠度 87 mm,需将合龙时间控制在凌晨以减小温度变形[72]。王达等[73]基于电辅热原理开发温度梯度加载装置,发现钢-混组合桥面板在竖向温度梯度下混凝土板与钢梁的极限应力与温度梯度呈线性关系,热应力影响不可忽略。刘永健等[74]提出考虑横向变形的钢管混凝土拱三维温度应力解析法,揭示传统方法低估轴向自平衡应力(误差范围－31.67%～－30.24%),并给出界面脱黏的极限温差(4.37～15.39 ℃)。周谦等[75]在雅鲁藏布江大桥足尺模型试验中建立水化热温度场与太阳辐射、风速的直接理论关系,发现径向温度场夜间呈对称三折线分布(影响深度 $D/4$),午后呈非对称分布(阳侧 $D/8$～$3D/8$ 区间温度突变)。通过足尺冷成型钢复合剪力墙火灾试验,叶继红和陈文文[76]提出需增加节点处防火涂料厚度以补偿热桥效应。关于蜂窝型空腹夹层板的研究得出 Y 形剪力键的截面面积、箍筋配箍率及混凝土强度是受剪承载力的主控参数,其参数化设计结论可为空间结构温度应力分析提供参考依据[77]。这些案例表明,特殊结构的温度控制需深度融合材料特性、环境荷载与功能需求,通过多尺度建模与实时监测实现精准调控[20-21]。

3.5 混凝土材料的温度敏感性

混凝土材料的热学性能与配合比设计直接影响其温度场演化及抗裂能力,尤其在极端环境或特殊功能需求下,需通过材料创新与配合比优化实现温度响应的精准调控。

水化热调控是高温敏感工程的核心挑战之一。

卢春鹏等[78]通过温度-应力试验机测定热膨胀系数，发现其具有明显时变特性：引入等效龄期概念建立热膨胀系数数学模型，在大岗山特高拱坝模拟中证实，考虑时变性的应力水平高于传统方法，尤其对水流导致早龄期温降速率快的混凝土更为显著。高强混凝土因其胶凝材料用量大，水化放热更为剧烈，需通过掺入矿物掺合料优化温控[79]。

环境适应性优化是提升混凝土耐久性的关键。研究表明，反射隔热涂料可显著降低混凝土表面温度及温度梯度[7,80]。需要特别注意的是，氯盐侵蚀环境下，温度波动会显著影响氯离子扩散衰减系数的时变性。最新可靠度分析表明：忽略扩散系数时变性会低估服役寿命30%以上，而未考虑其随机性则会高估耐久性能；其中扩散衰减系数与保护层厚度共贡献超65%的敏感性，且前者的温度敏感性权重随时间持续递增。薛刚等[81]通过轴向压-压滞回试验发现：低温作用使橡胶混凝土的滞回曲线更饱满，耗能性能明显提升；橡胶掺量越大，阻尼损耗因子的增长率越显著，且低温下滞回总耗能增长率高于常温。有研究指出太阳辐射对钢筒仓温度场影响显著，而钢筋混凝土筒仓受储料热工参数影响较小[82]。张少辉等[87]进一步揭示高地热环境(40～80 ℃)与硫酸盐侵蚀的耦合效应：凝胶孔(<10 nm)占比下降43.17%，毛细孔(100～1 000 nm)占比激增573.10%，过渡孔表面粗糙度变化对损伤层抗压强度影响最显著；耦合作用使混凝土整体抗压强度比单因素作用降低22.5%～30.0%，证实温度-化学协同劣化对孔隙分形特征的支配性影响。这种温度-化学协同劣化机制在氯盐环境中同样显著：温度波动导致的扩散衰减系数变异，与保护层厚度共同控制着65%以上的耐久性敏感度[84]。过震文等[85]测试超高性能混凝土(UHPC)在－30～90 ℃环境下的力学性能：抗弯强度13.4～16.3 MPa，抗压强度121.5～133 MPa，抗拉强度6.6～7.0 MPa；低温对性能影响小，高温下性能下降但仍保持较高水平，30 ℃时基体最密实。

新型胶凝体系的开发为温度调控提供了新途径。黄俊旗等的研究表明，地聚物混凝土在火灾下的温度场特性与普通混凝土相近[16]。元强等研究聚氨酯混凝土在－25～75 ℃的静动态力学性能：25～50 ℃区间力学性能变化最显著，轴压强度和弹性模量分别下降超过30 MPa和一个数量级，归因于聚氨酯从玻璃态向黏弹态转变；傅立叶红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy，FT-IR)证实氢键官能团随温度升高逐渐弱化[86]。研究表明，膨胀剂掺入会提高碱矿渣混凝土核心温度[19]。刘鑫等[87]分析温度(－15～70 ℃)对泡沫混凝土性能及微孔结构的影响：干密度随温度升高呈阶梯式下降，抗压强度呈先降后升再降趋势；基于图像分析发现等效孔径呈增-减-增趋势，推荐浇筑温度为－5～40 ℃。

对于大体积结构，提出的水化放热修正模型，可更准确地模拟预应力混凝土钢筒管(prestressed concrete cylinder pipe，PCCP)蒸养阶段温度场[88]。未来研究需结合材料时变特性与环境耦合效应，进一步优化温控设计标准。

3.6 温度应力与裂缝控制策略

温度应力引发的裂缝是混凝土结构耐久性的主要威胁，其控制需从应力释放、监测预警到修复加固的全链条技术创新。在应力释放方面，结构设计与施工工艺优化至关重要。通过凹槽型温度诱导缝可有效释放温度应力，并通过加强配筋解决主梁局部强度问题[47]；缓黏结预应力筋和后浇带协同控制可有效管理楼板温度应力[89]；结构刚度与桩基约束优化能显著降低温度应力[90]。邱意坤等提出的新型S形弯折钢筋诱导缝构造在北京工人体育场超长混凝土结构(周长约800 m)中成功应用，通过引导结构在诱导缝处开裂释放温度应力，现场实测表明弯折钢筋可充分利用变形能力[48]。徐兆全等[91]针对大尺寸混凝土楼板(80 m×20 m×0.4 m)建立的解析模型表明，当温度或收缩应变增至350×10^{-6}时，裂缝分五次开展，裂缝位置、宽度及间距与钢筋滑移长度、自由位移值直接相关。张敏等[92]提出的钢筋环扣连接节点在装配式框架结构中，通过低周往复加载试验证实其承载力与刚度退化性能优于现浇节点(如弯折高度优化后承载力下降速率减缓40%)，为温度应力集中区的裂缝控制提供新型解决方案。

实时监测与智能预警技术的进步为裂缝防控提供了动态手段。开发的超低功耗测温系统精度达0.03 ℃，待机电流仅139.13 μA，支持多通道数据融合与卡尔曼滤波，可精准捕捉大体积混凝土内部温差突变[21]。王洋洋[93]在大明宫雁塔购物广场工程中进一步优化温度测量装置，通过数值模拟指导施工措施设计，实现同一测点多方向应力-温度同步监测，在保证精度前提下提升监测效率40%，为动态冷却调控提供高维度数据支撑。结合有限元与神经网络模型，实现温度场预测误差小于

2.57%,并通过薄弱区识别指导冷却水管布置,使某大坝核心区温差减少25%[22]。通过温湿度传感器实时监测环境参数,结合夜间保温与动态冷却水调节,有效控制混凝土内外温差,同时利用自动喷淋系统维持表面湿度,显著降低了温度裂缝风险[94]。

修复技术需兼顾温度场历史与材料相容性。高温后圆钢管再生混凝土界面黏结强度计算模型为损伤评估提供量化依据[95];超低温冻融循环后需针对性修复孔隙损伤[18]。虞庐松等[95]表明,超低温环境(−40 ℃)下钢管混凝土短柱承载力提升27.8%～34.3%,但延性大幅降低,基于此提出的温度修正承载力公式为高寒大温差地区设计提供依据。周倩等[96]针对山区430 m跨度钢管混凝土拱桥的足尺模型试验揭示,运营阶段钢管-混凝土界面径向拉应力达2.06 MPa(超过黏结强度),纵向应力差达61.95 MPa。李扬等[97]开发的超低温(−100 ℃)力学试验设备证实,混凝土与钢筋线膨胀系数差异引发的约束内力需重点考虑。

未来研究方向应聚焦于多尺度协同控制。从材料层面,需开发低热、高韧性与耐高温的新型混凝土[7,16];白文博等[99]通过温度收缩补偿材料实现收缩变形向膨胀变形的转换,提出的抗裂值Φ评估体系证实了全时段补偿效果及抗裂性能时效性特征,其微观机理分析显示孔隙结构优化及水化产物调整是改善抗裂性的关键。从结构层面,应深化智能监测系统与施工技术的集成,实现全生命周期温度应力管理[20-21];从环境适配层面,需建立地域性温控标准库,如高寒地区以保温为主,滨海地区侧重抗盐雾-温度耦合侵蚀[15,71]。随着建筑产业现代化进程加速,装配式混凝土结构研究呈现持续快速增长态势,其热点集中于结构性能理论与试验(如创新节点构造对温度应力的适应性优化)、政策关联性应用等五大方向[100]。唯有通过全链条技术创新,结合装配式规模化发展需求,方能破解混凝土温度裂缝这一持久性难题。

4 结论

本文对混凝土结构温度场研究的文献进行了全面系统的整理,并采用三步法展开研究。首先通过中国知网、万方和维普数据库检索相关文献;然后基于给定的科学计量分析方法,由两名研究人员进行深入的文献筛选与审查,着重于研究方向发展状况,包括2015—2025年共98篇文献样本进行分析,确定当前近年来的主要研究主题;最后,对文献目录进行定性分析,深入研究文献,分析各主题研究方法与实际需求的差距,揭示未来研究发展方向。本文主要研究结论如下。

(1)科学计量分析展示了混凝土温度场研究领域的最新发展状况。通过对各国出版量、作者、地理合作、来源及高被引文章的统计评估,发现该方向研究自2018年以来数量逐渐减少,主要贡献集中于长安大学和天津大学等机构。通过关键词共现聚类分析确定六个核心主题,即数值模拟、温控、高温火灾破坏机制、特殊结构温度响应、材料温度敏感性、温度应力与裂缝控制。各主题的定性回顾揭示了当前多尺度建模不足、复杂环境适应性弱等局限性。

(2)数值模拟方法向多尺度多场耦合深化。宏观尺度上,有限元法(FEM)通过UMATHT子程序动态更新水化度依赖的热学参数,使早期混凝土温度场模拟误差降至1.5%以内[1];细观尺度建立的骨料-砂浆-界面三相格构模型,成功预测骨料预冷对早龄期混凝土温升的抑制效果[2]。多物理场耦合模型(如“化-热-力”相场内聚模型)通过应变场与温度场0.55～0.92的强相关性,精准预测裂缝时空演化规律[3]。但太阳辐射对钢筒仓的非线性影响[23]等复杂环境适应性仍是挑战。

(3)温控技术呈现“主动冷却+被动保温”协同优化趋势。主动冷却中,水管水平间距为核心控制参数,缩小间距可降低大体积基础峰值温度,但竖向过密易引发应力集中[4];“内冷外保”复合工艺使超厚墙体内部温峰提前58 h出现,峰值降低18%,内外温差稳定于17 ℃以内[5]。被动保温方面,5 cm橡塑板覆盖使8.25 m厚筏板里表温差控制在24.7 ℃以下[6];白色反射隔热涂料可降低混凝土表面温度梯度达30%[7]。施工工艺上,跳仓法结合低热水泥显著改善厚筏板裂缝控制效果[8];超低功耗监测系统(精度0.03 ℃)[21]与神经网络预测模型(误差<2.57%)[22]为智能动态调控奠定基础。

(4)高温破坏机制聚焦非均匀温度场与材料退化耦合效应。单面受火时混凝土内部100 ℃温度平台现象与自由水蒸发吸热密切相关[9];钢管煤矸石混凝土因多孔结构延缓热量传递,截面温度显著低于普通钢管混凝土[10]。材料层面,再生混凝土高温后抗压强度随骨料取代率升高显著下降[11];C60高强混凝土在500 ℃时孔隙率和界面裂纹扩展速度骤增,易发爆裂[12]。修复技术需结合温度历史,外包薄壁钢管可有效恢复火灾后构件承载力[13]。真实

火灾因升温速率波动大，导致混凝土内部温度梯度显著高于标准火灾[63]。

(5)特殊结构温度响应具有鲜明时空特征。地下粮仓粮堆纵向温度分层显著：上层(埋深 4 m 以上)年波动达 7 ℃，下层受地温滞后影响变化不足2 ℃[14]；海上风电承台在内部降温 80 ℃与外部年温差 20 ℃耦合作用下，内部拉应力可达5.0 MPa[15]。组合结构中，FRP 增强地聚物夹芯墙受火 4 小时后背火面温度始终低于 247 ℃[16]；玻化微珠保温混凝土墙体在冬季极端气候下阻热性能接近外贴保温层的普通混凝土[42]。极端环境工程需针对性设计，如高寒地区斜拉桥需控制合龙时间以减小钢-混凝土日温差(10.8 ℃)导致的挠曲变形[73]。

(6)混凝土材料温度敏感性通过配合比创新精准调控。钢纤维与铁矿砂复合体系使能量桩换热效率提升 37%[17]；引气剂显著优化超低温冻融循环下的孔隙结构，耐久性提升 2.1 倍[18]。新型胶凝体系如碱矿渣混凝土[19]与地聚物混凝土[16]为高温耐受设计提供新路径；聚氨酯混凝土在 25～50 ℃因玻璃态向黏弹态转变，轴压强度和弹性模量分别下降超 30 MPa 和一个数量级[74]。

(7)裂缝控制策略融合设计优化与智能技术。结构设计上，凹槽型温度诱导缝[47]及 S 形弯折钢筋构造[91]有效释放超长结构温度应力。监测预警中，超低功耗系统实现 0.03 ℃级温差突变捕捉[21]；神经网络模型通过薄弱区识别指导冷却水管布置，使大坝核心区温差减少 25%[22]。修复技术需适配温度历史，高温后圆钢管混凝土界面黏结强度模型为损伤评估提供量化依据[65]。

(8)本文的贡献主要有三方面：建立现有研究知识结构，确定重点研究主题；确认该研究方向最主要的研究主题并对各主题进行文献回顾；分析当前热点，预测未来发展趋势。

希望能够通过本文系统性综述帮助研究人员们了解当前混凝土温度场领域现状，并为其创新研究提供参考。

参考文献

[1] 崔溦，吴甲一，宋慧芳. 考虑水化度对热学参数影响的早期混凝土温度场分析[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2015，45(4)：792-798.

[2] 王立成，吴迪，鲍玖文，等. 早龄期混凝土温度场分布的细观数值仿真分析[J]. 水利学报，2017，48(9)：1015-1022.

[3] 吴建营，陈万昕，黄羽立. 基于统一相场理论的早龄期混凝土化-热-力多场耦合裂缝模拟与抗裂性能预测[J]. 力学学报，2021，53(5)：1367-1382.

[4] 魏德敏，洪川海，李重阳，等. 大体积混凝土基础的水管冷却温度场研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2016，49(4)：437-442.

[5] 李潘武，梁肖倩，门凡，等. 内外温控条件对超厚防辐射混凝土墙体的温度应力影响研究[J]. 混凝土，2021(12)：147-152.

[6] 刘亚朋，李盛，王起才，等. 大体积混凝土温度场仿真分析与温控监测[J]. 混凝土，2019(2)：138-141.

[7] 刘文涛，元强，谢宏，等. 热反射隔热涂料对混凝土温度场的影响规律研究[J]. 新型建筑材料，2015，42(7)：27-31.

[8] 朱兆聪，李涛，刘洋. 跳仓法与分层法对厚筏板基础温度应力模拟分析[J]. 建筑结构，2022，52(S2)：2922-2926.

[9] 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.

[10] 李帼昌，李龙，李晓. 火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2022，38(4)：577-584.

[11] 李建沛，周莹莹. 高温后再生混凝土力学性能研究[J]. 消防科学与技术，2018，37(12)：1609-1613.

[12] 赵东拂，高海静，贾朋贺，等. 高强混凝土经不同高温历程后性能劣化研究[J]. 振动与冲击，2018，37(4)：240-248.

[13] 丁楠，罗漪，欧婷茹，等. 火灾后外包薄壁钢管加固钢筋混凝土轴压柱力学性能的数值模拟[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2017，38(2)：158-163.

[14] 王振清，田栋杰，刘海燕. 钢筋混凝土圆形地下粮仓温度场试验研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2018，39(3)：99-102.

[15] 陈进贵，黎扬佳，雒翔宇，等. 海上风电承台混凝土温度应力反演分析与防裂研究[J]. 水利水电技术(中英文)，2022，53(10)：110-120.

[16] 黄俊旗，戴建国，徐玉野，等. 带有纤维增强复材拉结件的地聚物混凝土夹芯保温墙单面受火下温度场研究[J]. 工业建筑，2019，49(9)：184-189.

[17] 常虹，谷复光. 能量桩混凝土配合比试验及温度场模拟研究[J]. 混凝土，2020(2)：170-174.

[18] 谢剑，唐静，孙雅丹. 超低温条件下引气剂对混凝土抗冻性能影响的试验研究[J]. 硅酸盐通报，2020，39(1)：12-19.

[19] 袁晓辉，张昊，邵浙渝. 钢管密封条件下碱矿渣混凝土温度场研究[J]. 混凝土，2017(10)：12-14.

[20] 马川义，渠广镇，李帆，等. 基于长期暴露试验的海工混凝土氯离子扩散规律研究[J]. 建筑科学与工程学报，2025，42(4)：115-123.

[21] 朱国鑫，周达左，焦竹青. 混凝土内部温度场超低功耗测量系统设计[J]. 仪表技术与传感器，2024(8)：71-77.

[22] 郭生根，周双喜. 基于有限元仿真及神经网络模型相结

合的大体积混凝土温度预测方法[J]. 水利水电技术，2018，49(11)：188-196.
[23] 马越，杨应华. 大直径落地式筒仓结构在太阳辐射下的温度场分布[J]. 空间结构，2016，22(4)：71-77.
[24] MA Z. Review on automated quality inspection of precast concrete components[J]. Autom. Constr，2023，150：104828.
[25] CHEN Y，CHEN C，HU Z. Principles and applications of analyzing a citation space[M]. Beijing：Science Press，2014.
[26] 戴俊，李慧，李栋烁. 微波照射下钢筋混凝土升温特性[J]. 科学技术与工程，2020，20(2)：785-789.
[27] 张宁，周鑫，刘永健，等. 基于点阵式测量的混凝土箱梁水化热温度场原位试验[J]. 土木工程学报，2019，52(3)：76-86.
[28] 吕学涛，米振伟，王微微，等. 钢管混凝土柱温度场简化计算方法[J]. 火灾科学，2016，25(3)：158-164.
[29] 戴公连，张强强，葛浩，等. 基于积分变换法的混凝土箱梁温度场研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2021，49(11)：77-82.
[30] 李志鹏，罗奇星，韩庆华，等. 大体积混凝土墙水化放热温度场分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版)，2023，56(8)：878-885.
[31] 徐小蓉，余舜尧，金峰，等. 整体浇筑堆石混凝土拱坝施工期温度监测与等效均质仿真研究[J]. 水利学报，2023，54(12)：1404-1414.
[32] 徐小蓉，肖安瑞，梁婷，等. 考虑分层填充的非均质堆石混凝土温度研究[J]. 水力发电学报，2023，42(3)：141-152.
[33] 王健，延森，王锦力. 筏板基础大体积混凝土温度场实测与数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版)，2015，34(3)：364-368.
[34] 陆汝林，吴炎，李荟楠，等. 筏板基础大体积混凝土放热温度场数值模拟研究[J]. 混凝土，2024(2)：188-192.
[35] 张跃，申林方，王志良，等. 考虑温度时变效应氯离子侵蚀混凝土的格子 Boltzmann 数值模型[J]. 材料导报，2021，35(16)：16035-16041.
[36] 杨应华，马越. 太阳辐射作用下钢筒仓结构温度场分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2016，48(1)：52-57.
[37] 卫俊岭，王浩，茅建校，等. 混凝土连续箱梁桥温度场数值模拟及实测验证[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2021，51(3)：378-383.
[38] 王修山，侯宁. 水管冷却对大体积混凝土温度应力的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品，2019(8)：15-18.
[39] 康瑞强，施成华，孙晓贺，等. 基于响应面-粒子群算法的大体积混凝土温度裂缝控制方法[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2024，55(12)：4505-4518.
[40] 宁泽宇，林鹏，彭浩洋，等. 混凝土实时温度数据移动平均分析方法及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2021，61(7)：681-687.
[41] 张烈霞. 大体积混凝土筏板基础温度场的精确控制[J]. 科学技术与工程，2024，24(16)：6862-6869.
[42] 张玉，李珠，马钢. 玻化微珠保温混凝土墙体温度场数值模拟与分析[J]. 中国科技论文，2015，10(5)：528-531.
[43] 元强，刘文涛，饶惠明，等. 涂覆反射隔热涂料对高铁桥梁高墩日照温度效应的影响[J]. 铁道学报，2019，41(7)：95-101.
[44] 王海峰，严捍东. 混凝土智能骨料及其温度和力学性能研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2018，26(3)：631-639.
[45] 黄维，谢中识，杨永刚，等. 温度和应力下能源桩桩身加筋混凝土变形性质试验研究[J]. 岩土力学，2018，39(7)：2491-2498.
[46] 安瑞楠，林鹏，陈道想，等. 超大混凝土结构温度梯度监测与温度场演化[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2023，63(7)：1050-1059.
[47] 李涛，梁汝鸣，和西良，等. 温度诱导缝对超长结构温度应力的影响研究[J]. 建筑结构，2022，52(3)：13-18.
[48] 邱意坤，盛平，慕晨曦，等. 北京工人体育场超长混凝土结构温度效应和S形弯折钢筋诱导缝研究[J]. 建筑结构学报，2023，44(4)：98-106.
[49] 杨新浩，张凌云，董军，等. 承台现浇大体积混凝土温度效应及影响参数分析[J]. 混凝土，2025(3)：12-19.
[50] 张泽众，辛全才，张帆. 不同温度下外界风速对大体积混凝土温度场变化的影响[J]. 水电能源科学，2015，33(5)：109-112.
[51] 詹新彬，白晨阳，张羽，等. 大体积混凝土低桩承台温度场分布及温度效应研究[J]. 混凝土，2024(10)：171-177.
[52] 刘军，夏子川，章玉容，等. 炎热气候下大体积混凝土施工全过程控温技术[J]. 浙江工业大学学报，2024，52(4)：437-442.
[53] 许肇峰，陈映贞，饶瑞. 火灾下混凝土空心板温度场及损伤规律研究[J]. 中国公路学报，2019，32(1)：87-98.
[54] 王明年，胡云鹏，童建军，等. 高温变温环境下喷射混凝土-岩石界面剪切特性及温度损伤模型研究[J]. 岩石力学与工程学报，2019，38(1)：63-75.
[55] 周威，毕颖，赵磊. 防火涂料局部脱落的钢管混凝土柱温度场有限元分析[J]. 消防科学与技术，2022，41(1)：41-47.
[56] 郝建文，董坤，蒋济同，等. 端部锚固对温度作用下CFRP-混凝土界面黏结行为影响[J]. 哈尔滨工业大学学报，2021，53(4)：62-70.
[57] 周昱程，刘娟红，纪洪广，等. 温度-复合盐耦合条件下纤维混凝土井壁冲击倾向性试验研究[J]. 材料导报，2019，33(16)：2671-2676.
[58] 钟元，王磊. 混凝土桥梁火灾后损伤检测与技术状况评估[J]. 公路，2023，68(3)：228-232.
[59] 段进涛，仇培云，刘建勇，等. 混凝土结构损伤声发射分析方法研究进展[J]. 科学技术与工程，2023，23(11)：4487-4501.

[60] 刘宇森，姚国文，向文，等. 湿热耦合环境下碳纤维布加固混凝土界面耐久性能[J]. 科学技术与工程，2019，19(15)：266-271.

[61] 杨海涛，段品佳，吴瑞东，等. 借助激光闪光法研究高强混凝土的低温热学性能[J]. 材料导报，2020，34(16)：16043-16048.

[62] 张家铭，陈俊，霍静思，等. 火灾升降温模式对高温后钢筋混凝土轴压力学性能影响的试验研究[J]. 实验力学，2017，32(1)：70-78.

[63] 傅传国，刘玮，孔唯一，等. 基于升降温全曲线的钢筋混凝土梁温度场分析[J]. 山东建筑大学学报，2015(4)：307-317.

[64] 陈宗平，刘祥，周文祥. 高温后圆钢管高强混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 工程力学，2018，35(8)：192-200.

[65] 陈先华，马丽莉，杨国涛，等. 寒区高铁沥青混凝土基床表层的温度场特性[J]. 西南交通大学学报，2019，54(6)：1196-1202.

[66] 贾彦武，张萌，周晓平，等. 综合管廊早龄期混凝土温度应力仿真模拟[J]. 应用力学学报，2020，37(2)：866-872.

[67] 严仁章，刘佳奇，刘时龙，等. 太阳辐射作用下钢管混凝土拱不均匀温度场及其引起的脱空分析与试验研究[J]. 中国公路学报，2021，34(1)：79-92.

[68] 杨吉新，程旭东，刘前瑞，等. 斜拉桥钢混桥塔温度效应分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版)，2016，40(3)：402-406.

[69] 闫清峰，张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程，2021，21(36)：15314-15322.

[70] 祁强，张戎令，胡锐鹏，等. 大温差寒冷地区钢管混凝土构件温度场分析[J]. 铁道建筑，2017(5)：16-19.

[71] 石涛，盛兴旺，郑纬奇，等. 川藏铁路混凝土箱梁日照辐射竖向温度梯度研究[J]. 浙江大学学报(工学版)，2022，23(5)：375-387.

[72] 韩石，刘永健，王振华，等. 高寒地区组合梁斜拉桥施工阶段温度效应研究[J]. 建筑科学与工程学报，2021，38(5)：107-117.

[73] 王达，谭本坤，赵鹏鑫. 钢-混凝土组合桥面板温度梯度效应的试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构学报，2021，42(S2)：74-82.

[74] 刘永健，闫新凯，刘江，等. 钢管混凝土拱温度效应的解析计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2025，56(1)：283-296.

[75] 周倩，冯鹏程，周建庭，等. 不均匀温度场下钢管混凝土拱桥管内混凝土脱空分析[J]. 桥梁建设，2024，54(1)：103-109.

[76] 叶继红，陈文文. 真实火灾下足尺冷成型钢复合剪力墙结构耐火性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2021，42(6)：59-71.

[77] 刘捷，马克俭，卢亚琴. 蜂窝型混凝土空腹夹层板剪力键静力参数化分析[J]. 科学技术与工程，2023，23(10)：4286-4292.

[78] 卢春鹏，刘杏红，赵志方，等. 热膨胀系数时变性对混凝土温度应力仿真影响[J]. 浙江大学学报(工学版)，2019，53(2)：284-291.

[79] 王强，刘蕴文，陈宇，等. 巨型钢管高强混凝土柱水化热温度场分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2023，39(6)：1033-1041.

[80] 刘文涛，元强，谢宏，等. 功能填料对反射隔热涂料隔热性能影响的研究[J]. 涂料工业，2016，46(12)：22-28.

[81] 薛刚，张宪法，曹美玲. 考虑温度效应的橡胶混凝土阻尼耗能性能试验研究[J]. 振动与冲击，2020，39(19)：94-100.

[82] 元强，李海洋，郑新国，等. 聚氨酯混凝土力学性能温度响应及机理[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2024，54(6)：1346-1353.

[83] 张少辉，王艳，郭冰冰，等. 温度场与硫酸盐侵蚀耦合作用混凝土孔结构分形特征演化规律[J]. 硅酸盐学报，2024，52(2)：474-484.

[84] 蒋琼明，吉学宽，农忠霖. 时变扩散系数对混凝土结构服役寿命的影响[J]. 科学技术与工程，2020，20(33)：13833-13838.

[85] 过震文，刘小方，段昕智，等. 超高性能混凝土在环境温度变化下的力学性能试验研究[J]. 复合材料学报，2021，38(10)：3495-3503.

[86] 刘鑫，姚云龙，张思卿，等. 浇筑期温度对泡沫混凝土性能和微孔结构的影响[J]. 西南交通大学学报，2024，59(5)：1123-1131.

[87] 李东，张晔琛. 混凝土水化放热模型的实验分析和计算[J]. 上海大学学报(自然科学版)，2021，27(4)：795-802.

[88] 王忠楠. 济南唐冶奥特莱斯购物中心结构温度应力分析[J]. 建筑结构，2016，46(S2)：111-115.

[89] 姜文辉，何诚. 超长地下结构降低温度应力设计方法[J]. 结构工程师，2023，39(4)：193-199.

[90] 王非非，李成. 大温差环境下道路混凝土裂缝控制策略与应用研究[J]. 越野世界，2024(23)：106-107.

[91] 徐兆全，苏成，范学明. 大型混凝土底板温度与收缩裂缝分布特征计算[J]. 工程科学与技术，2019，51(6)：146-151.

[92] 张敏，蒋鸿民，陈宜虎，等. 钢筋环扣连接的叠合梁柱节点力学性能分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(12)：4912-4919.

[93] 王洋洋. 基础筏板大体积混凝土温度场分析及施工控制[J]. 施工技术(中英文)，2023，52(22)：111-114.

[94] 贾恒瑞，陈宗平，陈俊睿. 高温后圆钢管再生混凝土界面黏结滑移性能及本构方程研究[J]. 工程力学，2021，38(10)：119-133.

[95] 虞庐松，刘彪，王力，等. 高寒环境温度下圆钢管混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报，2023，56(10)：20-31.

[96] 周倩，周建庭，任伟，等. 钢管混凝土拱肋水化热温度

场足尺节段试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报，2024，32(2)：546-567.

[97] 李扬，方昊天，蔡元奇，等. 超低温下钢筋混凝土钢筋温度约束应力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2021，49(5)：104-109.

[98] 白文博，周浩一，朱兰飞，等. 大体积混凝土温度收缩补偿材料及抗裂性能研究[J]. 中国农村水利水电，2025(1)：182-187.

[99] 钟元，王磊. 混凝土桥梁火灾后损伤检测与技术状况评估[J]. 公路，2023，68(3)：228-232.

[100] 孙国帅，刘占坤，冯娇，等. 中国装配式混凝土结构研究态势的知识图谱分析——基于1992—2019年文献计量数据[J]. 科学技术与工程，2021，21(16)：6807-6814.

A Systematic Literature Review of the Temperature Field of Concrete Structures

LU Yiyun[1]，DAI Sheng[2]，HUANG Long[3]，LI Yinlu[4]，XIE Qiyu[2]，SHANG Zufeng[5]

(1. Guangxi Liuwu Railway Co. Ltd.，Nanning 530000，China；2. The Fifth Engineering Co. Ltd. of China Railway Fourth Engineering Bureau Group Co. Ltd.，Jiujiang 332000，China；3. The Fifth Engineering Co. Ltd. of China Railway Fourth Engineering Bureau Group Co. Ltd.，Linfen 031400，China；4. China Railway Nanning Group Co. Ltd.，Nanning 530000，China；5. School of Civil Engineering，Harbin Institute of Technology，Harbin 150090，China)

Abstract：In recent years，significant progress has been made in the research of temperature fields in concrete structures，focusing on temperature field modeling，temperature control technologies，high-temperature failure mechanisms，responses of special structures，material sensitivity and crack control. Therefore，98 literature articles published between 2015 and 2025 were systematically reviewed and a comprehensive analysis was conducted，mainly aimed at clarifying concrete temperature simulation methods and temperature control measures. A three-step research method was used combining bibliometric search，quantitative analysis and qualitative analysis. Six key research topics were identified and summarized，concluding numerical simulation methods and techniques，distribution of temperature control measures，high-temperature fire damage mechanisms，temperature response of special structures，temperature sensitivity of concrete materials，and temperature stress and crack control strategies. Finally，the limitations of existing published research are identified for predicting future research trends.

Keywords：concrete structures；temperature field；systematic literature review