

高温环境下混凝土结构的损伤机理研究

张源明

浙江大东吴集团建材构配件有限公司 浙江湖州 313100

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18472

[摘要] 本文聚焦高温环境下混凝土结构的损伤机理研究。通过对高温作用下混凝土物理化学变化的分析, 探讨其内部结构损伤的过程与机制。研究涵盖不同温度梯度、作用时间对混凝土力学性能的影响, 旨在明确高温导致混凝土结构损伤的关键因素, 为高温环境下混凝土结构的设计、维护及修复提供理论依据。

[关键词] 高温环境; 混凝土结构; 损伤机理

引言:

在工业生产、火灾等场景中, 混凝土结构常面临高温考验。高温会使混凝土内部发生复杂变化, 导致结构性能劣化, 严重影响其安全性和耐久性。目前, 对高温环境下混凝土结构损伤机理的研究尚不完善。深入探究该机理, 对于准确评估高温后混凝土结构的剩余承载力、制定合理修复方案具有重要意义, 故开展此项研究。

1. 高温下混凝土的物理变化

1.1 热膨胀特性

混凝土是多组分复合材料, 各组分热膨胀系数差异显著, 高温环境下易因热膨胀不协调引发内部应力。水泥石热膨胀系数约为 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 骨料热膨胀系数则随种类不同波动, 石英质骨料约为 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 石灰石骨料约为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。我国建筑工程中常用的普通混凝土, 在 200°C 以下热膨胀表现相对均匀, 超过该温度后, 各组分膨胀差异加剧, 水泥石与骨料界面出现微裂缝。温度升至 600°C 时, 混凝土整体热膨胀率可达 $0.5\% \sim 0.8\%$, 界面裂缝持续扩展并相互贯通, 导致结构整体性下降。此过程中, 骨料颗粒自身也可能因热应力产生劈裂, 尤其石英质骨料在 573°C 时会发生晶型转变, 体积突变约 0.85% , 进一步加剧内部损伤, 这一特性已在国内多项火灾后结构检测中得到验证。

1.2 水分蒸发与迁移

混凝土内部水分包括自由水、吸附水和化学结合水, 高温下不同类型水分的蒸发与迁移规律存在差异。常温至 100°C 阶段, 自由水快速蒸发, 水分从内部向表面迁移, 形成孔隙通道, 此时混凝土质量损失率可达 $5\% \sim 8\%$, 具体数值与初始含水率、配合比相关。 $100^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$ 区间, 吸附水逐步脱附, 水分迁移速度放缓, 内部孔隙压力升高, 易在薄弱区域产生内鼓裂缝。超过 300°C 后, 水泥水化产物中的化学结合水开始分解逸出, 伴随明显质量损失, 同时水分迁移路径因

孔隙结构改变变得复杂。我国南方高温地区混凝土结构, 长期处于高温高湿环境, 水分反复蒸发与迁移会加速内部损伤累积, 降低结构耐久性, 这一问题在工业厂房、高温储罐基础等工程中尤为突出。

1.3 孔隙结构改变

高温通过水分逸出、组分变形等作用, 显著改变混凝土孔隙结构, 孔隙率、孔径分布及连通性均发生规律性变化。常温下普通混凝土孔隙率约为 $15\% \sim 20\%$, 以毛细孔和凝胶孔为主。温度升至 400°C 时, 自由水和吸附水完全逸出, 毛细孔扩张, 孔隙率增至 $25\% \sim 30\%$, 且孔径由纳米级向微米级转化。 600°C 以上, 水泥石基质发生收缩开裂, 孔隙相互贯通形成连通孔隙网络, 孔隙率进一步提升至 30% 以上, 此时混凝土渗透性大幅增加。国内试验研究表明, 高温后混凝土孔隙结构的改变具有不可逆性, 即使降温至常温, 孔隙率也无法恢复至初始状态, 这种结构变化直接导致混凝土力学性能和抗侵蚀能力下降, 是高温损伤的重要物理表征。

2. 高温引发的化学变化

2.1 水泥水化产物分解

水泥水化产物是混凝土强度的核心来源, 高温下其分解过程具有明显的温度依赖性, 且受国内常用水泥品种影响。我国建筑工程主流使用的硅酸盐水泥, 水化产物主要为水化硅酸钙(C-S-H)、氢氧化钙(CH)和钙矾石(AFt)。 $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 时, CH开始脱水分解为氧化钙(CaO)和水, 体积收缩约 30% , 导致水泥石基质出现微裂缝。 $500^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 区间, C-S-H凝胶发生脱硅反应, 结构崩解为无定形二氧化硅和CaO, 强度急剧下降。 800°C 以上, 剩余水化产物基本完全分解, 水泥石失去胶结能力。

2.2 骨料的化学稳定性

骨料占混凝土体积的 $60\% \sim 70\%$, 其高温化学稳定性直接决定混凝土整体抗高温性能, 国内常用骨料的化学特性差异

明显。石灰石、白云石等碳酸盐骨料,在 $600^{\circ}\text{C}\sim 700^{\circ}\text{C}$ 时会发生分解反应,释放二氧化碳,生成氧化钙和氧化镁,伴随体积膨胀和强度下降,分解产物易受环境湿度影响再次水化,引发二次损伤。石英质骨料化学稳定性较强,但在 573°C 时发生 α -石英向 β -石英的晶型转变,体积突变导致骨料开裂。玄武岩、辉绿岩等岩浆岩骨料,化学稳定性最优,在 800°C 以下基本不发生明显化学变化,仅出现物理膨胀。我国不同地区骨料资源分布不均,北方多使用石英质骨料,南方常用碳酸盐骨料,这种差异导致混凝土高温损伤程度存在地域差异,需针对性优化配合比。

2.3 碳化反应的影响

高温环境会加速混凝土碳化反应,且与常温碳化存在显著区别,对结构耐久性产生叠加损伤。常温下混凝土碳化是二氧化碳与水化产物缓慢反应的过程,而高温会提升二氧化碳扩散速度,同时促进水化产物分解,为碳化反应提供更多反应物。 400°C 以下,碳化反应主要消耗 CH ,生成碳酸钙,使水泥石结构致密化,一定程度上抵消部分物理损伤;超过 400°C 后, C-S-H 凝胶分解产生大量 CaO ,碳化反应加剧,生成的碳酸钙晶体在孔隙中沉积,虽能填充部分孔隙,但伴随体积膨胀,易引发新的微裂缝。国内研究表明,火灾后混凝土结构碳化深度显著增加,尤其在高温与潮湿环境交替作用下,碳化与钢筋锈蚀相互促进,加速结构失效,这一现象在既有建筑火灾后评估中较为常见。

3. 温度与时间对力学性能的影响

3.1 抗压强度变化

抗压强度是混凝土核心力学性能,高温下其变化规律受温度等级、恒温时间及混凝土配合比共同影响,国内相关试验数据已形成系统性结论。 200°C 以下,混凝土抗压强度略有上升,增幅约 $5\%\sim 10\%$,原因是高温加速剩余水泥水化,使结构进一步致密。 $200^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ 时,抗压强度开始缓慢下降,降幅约 $10\%\sim 30\%$,主要由物理损伤累积导致。 $400^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$ 为强度急剧下降阶段,降幅可达 $40\%\sim 70\%$,此时化学损伤与物理损伤叠加,水泥石胶结能力大幅丧失。超过 600°C 后,抗压强度降至常温的 30% 以下,结构基本失去承载能力。恒温时间延长会加剧强度损失,如在 600°C 下恒温2小时与4小时,抗压强度降幅分别为 60% 和 75% ,这一规律为国内高温环境混凝土结构设计提供了重要依据。

3.2 抗拉强度变化

混凝土抗拉强度对高温更为敏感,其变化趋势与抗压强度存在差异,且受界面粘结性能影响显著。常温下混凝土抗

拉强度仅为抗压强度的 $1/10\sim 1/15$,高温下界面裂缝的产生与扩展会进一步放大这一差距。 100°C 以下,抗拉强度基本保持稳定,部分试件因水分蒸发出现小幅波动。 $100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时,抗拉强度开始明显下降,降幅可达 $30\%\sim 50\%$,主要因水泥石与骨料界面脱粘、微裂缝萌生。 300°C 以上,抗拉强度下降速率加快, 600°C 时抗拉强度仅为常温的 $10\%\sim 20\%$,此时界面裂缝完全贯通,混凝土呈现脆性断裂特征。

3.3 弹性模量变化

弹性模量反映混凝土抵抗变形的能力,高温下其下降速率快于抗压强度,是表征混凝土高温损伤的敏感指标,国内已建立相关量化模型。 200°C 以下,弹性模量下降幅度较小,约为 $10\%\sim 20\%$,此时混凝土内部损伤以轻微物理变化为主,变形协调性较好。 $200^{\circ}\text{C}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 时,弹性模量快速下降,降幅可达 $50\%\sim 80\%$,原因是孔隙结构改变、界面裂缝扩展及水化产物初步分解,混凝土刚度大幅降低。超过 500°C 后,弹性模量下降趋势放缓,但绝对值极低, 600°C 时弹性模量仅为常温的 10% 以下,混凝土基本失去弹性变形能力,表现为塑性破坏。此外,降温过程会导致弹性模量进一步下降,尤其在高温后遇水冷却时,热冲击与水化产物二次反应叠加,使弹性模量额外降低 $10\%\sim 15\%$,这一特性需在火灾后结构评估中重点考虑。

4. 损伤演化过程分析

4.1 初始损伤阶段特征

初始损伤阶段主要发生在 200°C 以下,损伤以微观物理变化为主,宏观表现不明显,易被忽略但对后续损伤演化影响显著。此阶段核心损伤形式为自由水蒸发、热膨胀不协调引发的界面微裂缝及毛细孔扩张。微裂缝主要产生于水泥石与骨料界面,宽度多在微米级,无明显贯通性,混凝土宏观力学性能基本保持稳定,甚至因水化加速出现小幅强度提升。国内试验通过扫描电子显微镜(SEM)观察发现,初始损伤阶段微裂缝密度随温度升高线性增加, 200°C 时界面微裂缝密度可达常温的 $3\sim 5$ 倍。该阶段损伤具有一定可逆性,降温至常温后部分微裂缝可闭合,但孔隙结构变化无法完全恢复。

4.2 发展阶段损伤模式

发展阶段对应温度范围为 $200^{\circ}\text{C}\sim 600^{\circ}\text{C}$,损伤形式由微观向宏观转变,物理损伤与化学损伤叠加,损伤程度快速累积。此阶段界面微裂缝持续扩展、贯通,形成宏观裂缝,裂缝宽度可达数百微米,且沿骨料边缘或水泥石基质延伸。同时,水化产物分解引发水泥石强度下降,骨料与水泥石界面粘结力丧失,出现剥离现象。碳酸盐骨料在该温度区间发生

分解反应,生成的氧化物体积膨胀,进一步加剧裂缝扩展;石英质骨料则因晶型转变产生劈裂损伤。宏观表现为混凝土表面出现细微裂纹、质量持续损失,力学性能大幅下降,抗压强度和弹性模量降幅均超过50%。国内火灾事故调查显示,该阶段损伤持续时间越长,后续结构破坏风险越高,且损伤具有不可逆性,无法通过修复完全恢复初始性能。

4.3 破坏阶段的临界条件

破坏阶段发生在600℃以上,此时混凝土结构达到损伤临界状态,宏观裂缝贯通,承载能力完全丧失,表现为脆性或塑性破坏。破坏阶段的临界条件主要包括温度阈值、应力水平及环境因素,其中温度是核心触发条件,600℃为多数普通混凝土的破坏临界温度。当温度超过临界值时,水泥石完全失去胶结能力,骨料相互分离,混凝土结构溃散,破坏形式以压溃、断裂为主。若混凝土同时承受荷载,临界温度会显著降低,如承受0.3倍常温抗压强度荷载时,破坏临界温度可降至500℃左右,荷载越大,临界温度越低。环境湿度也会影响临界条件,高温下潮湿环境会加速水化产物分解和骨料损伤,使破坏临界温度降低50~100℃。国内相关规范明确,火灾后混凝土结构温度超过600℃的区域,需进行拆除更换处理。

5. 损伤评估方法

5.1 基于力学性能的评估

基于力学性能的评估是国内混凝土高温损伤评估的常用方法,通过测试高温后混凝土力学指标,量化损伤程度,具有操作简便、结果直观的优势。核心评估指标包括抗压强度、抗拉强度、弹性模量及损伤变量,其中损伤变量可通过常温与高温后力学性能的比值计算得出。评估过程中,需按照我国《混凝土结构试验方法标准》选取试件,模拟实际高温历程进行加热,冷却后测试力学性能。对于既有结构,可采用钻芯法取样测试,结合结构荷载工况,评估剩余承载能力。该方法可建立力学性能与损伤程度的量化关系,如当抗压强度损失率超过50%时,判定为中度损伤;超过70%时,判定为重度损伤。但该方法属于破坏性检测,对结构会造成二次损伤,适用于抽样检测或灾后应急评估。

5.2 微观结构检测评估

微观结构检测评估通过分析高温后混凝土内部微观形貌、组分及孔隙特征,揭示损伤机理,为精准评估提供依据,国内已形成成熟的检测技术体系。常用检测手段包括扫描电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)、压汞法(MIP)等。SEM可观察界面裂缝形态、水化产物微观结构变化,明确损伤分

布特征;XRD可定量分析水化产物分解程度及新生成相含量,如CaO、碳酸钙的含量变化;MIP可测试孔隙率、孔径分布及连通性,量化微观结构损伤。国内研究通过微观检测发现,高温后混凝土损伤程度与C-S-H凝胶含量、孔隙率呈显著相关性,可建立微观指标与宏观力学性能的关联模型。该方法为非破坏性或微损检测,适用于精细化评估,尤其对重要建筑结构的损伤诊断具有重要意义。

5.3 综合评估指标构建

综合评估指标构建需整合宏观力学性能、微观结构特征及环境影响因素,形成多维度评估体系,弥补单一指标评估的局限性,符合国内结构评估的实际需求。评估体系应包括核心指标与辅助指标,核心指标选取抗压强度损失率、弹性模量损失率、孔隙率及C-S-H凝胶保留率,反映损伤核心特征;辅助指标选取裂缝宽度、质量损失率、骨料损伤程度,补充评估细节。结合国内工程实践,采用层次分析法确定各指标权重,建立综合损伤评估模型,将损伤等级划分为轻度、中度、重度、极重度四个等级,对应不同的修复或处置方案。该体系需考虑地域差异、骨料类型、水泥品种等国内实际工程特点,确保评估结果的准确性和适用性。目前,该方法已在国内大型建筑火灾后评估、高温厂房结构耐久性评估中得到应用,为工程决策提供了科学依据。

结束语:

综上所述,本研究系统地分析了高温环境下混凝土结构的损伤机理。明确了高温引发的物理化学变化是导致结构损伤的根源,掌握了温度、时间与力学性能的关系及损伤演化规律。所提出的损伤评估方法有助于准确判断高温后混凝土结构的损伤程度。未来可进一步研究不同因素耦合作用下的损伤机理,完善评估与修复技术。

[参考文献]

- [1]郭煦阳.高温作业环境下的大体积混凝土结构温度控制施工技术研究[J].工程技术研究,2025,10(05):83-85.
- [2]何倍,张红恩,朱新平,等.高温环境下超高性能混凝土力学性能及劣化机制研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(11):3470-3481.
- [3]胡海东.高温环境下矩形污水处理池结构设计要点研究[J].产业科技创新,2023,5(02):66-68.
- [4]张秋实,周川胜,孙春平,等.高温环境下钢筋混凝土结构温度传播规律研究[J].现代隧道技术,2021,58(04):185-193.
- [5]王璐.高温下嵌入式FRP与混凝土粘结性能研究进展[J].四川建材,2018,44(05):7-8.