

建筑结构混凝土结构在高温环境下的力学性能退化研究

黄 婷

江西玛可隆建设有限公司 江西抚州 344000

摘 要：混凝土作为建筑结构中应用最广泛的材料之一，其在高温环境下的力学性能退化直接关系到结构的安全性和耐久性。本文围绕建筑结构混凝土在高温环境下的力学性能退化展开研究，首先阐述了高温对混凝土内部微观结构的影响机制，包括水泥水化产物脱水、骨料与水泥石界面过渡区损伤等；随后系统分析了高温作用下混凝土的抗压强度、弹性模量、劈裂抗拉强度等关键力学性能指标的退化规律及其影响因素，如温度升高幅度、高温持续时间、冷却方式以及混凝土自身配合比等；最后总结了现有研究的不足，并对未来研究方向进行了展望，旨在为高温环境下混凝土结构的设计、评估与加固提供理论依据和技术支持。

关键词：混凝土结构；高温环境；力学性能；性能退化；微观结构

引言

随着现代建筑向高层化、大型化发展，混凝土结构在各类建筑中占据核心地位。然而，火灾、工业高温作业等极端高温环境对混凝土结构的安全构成严重威胁。混凝土在高温作用下会发生一系列物理化学变化，导致其力学性能显著下降，可能引发结构开裂、变形甚至倒塌。因此，深入研究建筑结构混凝土在高温环境下的力学性能退化规律，揭示其内在机理，对于提升混凝土结构的抗火设计水平、灾后评估与修复能力具有重要的理论意义和工程应用价值。国内外学者已对此开展了大量研究，取得了一定成果，但在复杂高温历程、多因素耦合作用下的性能退化模型及实用化评估方法等方面仍有待深化。本文将综合现有研究成果，从微观机制、宏观性能退化规律、影响因素及评估方法等方面进行系统梳理与探讨。

一、高温对混凝土微观结构的影响机制

（一）水泥水化产物的变化

水泥浆体是混凝土关键胶结组分，主要水化产物有氢氧化钙（CH）、水化硅酸钙（C-S-H）凝胶等。不同温度区间，水化产物会分解或相变。50-100℃时，自由水和吸附水蒸发，水泥浆体干缩，对水化产物影响小。100-200℃，C-S-H凝胶脱水，结构破坏，部分AFt分解为AFm。200-400℃，CH大量分解成CaO和水，内部产生孔隙，CaO冷却与水反应加剧微裂纹。400-600℃，C-S-H凝胶进一步分解，胶结能力减弱，水化铝酸钙等分解增加孔隙压力。超600℃，CaCO₃分解，水泥浆体结

构严重受损^[1]。

（二）骨料的变化

骨料在混凝土中起骨架作用，高温稳定性很重要。不同矿物组成的骨料高温行为有差异。石英骨料573℃相变膨胀，产生微裂纹。石灰岩骨料700-900℃分解，强度降低。花岗岩骨料因矿物热膨胀系数差异易产生微裂纹。骨料与水泥浆体热膨胀系数不同，高温下界面易产生热应力，加速裂缝扩展。

（三）界面过渡区的损伤

界面过渡区作为混凝土内部最薄弱的结构环节，其微观组成以氢氧化钙（CH）晶体、不规则孔隙及原生微裂纹为主要特征。在高温环境下，该区域损伤呈现显著加剧趋势：一方面，骨料与水泥浆体因热膨胀系数差异产生显著温度应力差，当拉应力超过过渡区界面抗拉强度阈值时，会引发新的微裂纹或促使原有裂纹持续扩展；另一方面，水泥浆体在高温下发生脱水收缩，C-S-H凝胶等水化产物逐步分解为无定形SiO₂和CaO，直接导致界面黏结强度大幅衰减。此外，骨料在特定温度区间可能发生相变（如石英的α-β相变）或热分解反应，进一步劣化界面过渡区的完整性，最终造成骨料与水泥浆体协同受力能力的丧失^[2]。

（四）孔隙结构的演变

高温作用下混凝土孔隙结构经历复杂的劣化过程，具体表现为孔隙数量激增、特征孔径持续增大及空间分布均匀性显著降低。孔隙率的增加主要源于水分迁移与水化产物分解的双重作用：升温初期（通常<100℃），毛细孔中自由水快速蒸发逸出，使孔隙体积略有增加；

随着温度升高(100–600℃),凝胶孔吸附水脱出及C–S–H、Ca(OH)₂等水化产物分解产生的CO₂、H₂O等气体积聚,导致孔隙持续扩展并相互贯通,形成连通性孔隙网络,甚至发展为宏观裂缝。冷却阶段,由于混凝土内部各组分(骨料、水泥浆体、孔隙)的热收缩系数差异及相变体积变化,会进一步诱发新的微孔隙和微裂纹。孔隙结构的这种劣化直接破坏混凝土的密实性,是导致其抗压、抗折等力学性能下降的关键内在因素。

二、高温下混凝土宏观力学性能的退化规律

(一) 抗压强度的退化

抗压强度是混凝土最基本且高温下退化显著的力学性能指标。其随受火温度升高总体呈下降趋势,不同温度阶段退化速率不同。常温至300℃,抗压强度有小幅波动,部分情况轻微提高,因低温下水泥浆体水分蒸发使混凝土更密实,未水化水泥颗粒继续水化抵消部分早期损伤。但超200℃,C–S–H凝胶脱水、CH初步分解,抗压强度缓慢下降,300℃时下降10%–30%。300℃至600℃是急剧退化关键区间,C–S–H凝胶大量脱水、CH持续分解,浆体结构受损,界面过渡区损伤加剧,微裂纹扩展,600℃时下降50%–80%^[3]。600℃至800℃,抗压强度持续快速下降,水化产物大部分分解,骨料相变或分解,内部形成连通裂缝,结构整体性破坏,800℃时仅剩常温强度10%–30%。800℃以上,混凝土几乎失去承载能力,结构濒临崩溃。此外,高温持续时间也影响抗压强度退化,相同温度下持续越久,强度退化越显著,达一定时间后趋于稳定。

(二) 弹性模量的退化

弹性模量表征材料抵抗弹性变形能力,对高温的敏感性高于抗压强度,相同温度下下降幅度更大,因其对材料内部微裂纹和孔隙更敏感。常温至200℃,混凝土弹性模量开始缓慢下降,主要因水分蒸发和早期微观结构损伤,下降幅度不超20%。200℃至400℃,弹性模量明显下降,水泥浆体水化产物分解和界面过渡区损伤使微裂纹增多,刚度降低加快,至400℃下降50%–60%。400℃至600℃,弹性模量急剧退化,内部结构损伤严重,大量微裂纹连通成宏观裂缝,弹性变形能力大幅丧失,至600℃仅为常温值的10%–30%^[4]。600℃以上,弹性模量极低,混凝土表现出明显塑性变形特征,基本丧失弹性性能。弹性模量退化还受冷却方式影响,喷水冷却后的弹性模量通常比自然冷却更低,因为快速冷却会加剧内部微裂纹扩展。

(三) 抗拉强度的退化

混凝土抗拉强度远低于抗压强度,对内部缺陷和微裂纹更敏感,高温下其退化比抗压强度更严重且更早。常温至200℃,混凝土劈裂抗拉强度逐渐下降,因抗拉强度依赖水泥浆体黏结力和界面过渡区强度,低温下界面过渡区因热应力产生微裂纹,水泥浆体黏结力因早期水化产物分解降低,至200℃下降20%–40%。200℃至500℃,劈裂抗拉强度快速下降,温度升高使界面过渡区损伤加剧和水泥浆体结构劣化,抗拉能力急剧降低,至500℃下降60%–80%,此时混凝土构件受拉区极易开裂。500℃以上,劈裂抗拉强度极低,混凝土几乎丧失抗拉能力,结构整体性难保证。目前研究多集中于劈裂抗拉强度,总体趋势是高温下抗拉强度退化速率快于抗压强度,这是火灾中混凝土结构易出现受拉裂缝的重要原因。

(四) 应力–应变关系的变化

常温下混凝土应力–应变曲线有明显上升和下降段,有一定塑性特征。高温作用后,应力–应变关系显著变化。峰值应力降低,因高温使混凝土抗压强度下降,应力–应变曲线峰值应力点下移。峰值应变增大,高温损伤使内部微裂纹增多,受力时微裂纹闭合和扩展消耗更多变形,峰值应变随受火温度升高而增大。弹性阶段缩短,塑性变形增加,高温后弹性模量降低,应力–应变曲线初始切线斜率减小,弹性阶段缩短,塑性阶段变形能力增强,曲线上升段平缓,峰值点后下降段不明显或更陡峭,表现出更明显的脆性破坏特征。割线模量降低,相同应变水平下,高温后割线模量显著低于常温混凝土。这些变化直接影响混凝土结构在高温下及灾后的受力行为和承载能力计算。

三、影响混凝土高温力学性能退化的主要因素

混凝土在高温环境下的力学性能退化是一个复杂的过程,受到多种内外因素的综合影响,深入理解这些影响因素对于精准评估高温后混凝土性能至关重要^[5]。

(一) 温度相关因素

最高受火温度:是影响混凝土性能退化最关键的因素,如前所述,温度越高,混凝土内部微观结构损伤越严重,宏观力学性能退化越显著。

升温速率:升温速率对混凝土的热应力分布和损伤发展有重要影响。快速升温会导致混凝土内外温差急剧增大,产生较大的温度梯度和热应力,可能在混凝土内部引发更多的微裂纹,尤其是对于大截面构件。而缓慢升温则可能使温度分布更均匀,热应力相对较小,但更长的高温持续时间可能导致更充分的水化产物分解。

高温持续时间：在达到最高温度后，持续时间越长，水化产物分解越彻底，孔隙和裂纹发展越充分，混凝土性能退化越严重，直至达到一个稳定的损伤状态。

冷却方式：高温后的冷却方式（自然冷却、喷水冷却、强制通风冷却等）对混凝土力学性能有显著影响。一般而言，喷水冷却（尤其对于高温混凝土）会因热冲击导致内部微裂纹急剧扩展，同时可能使CaO快速水化膨胀，从而造成比自然冷却更严重的性能退化，其抗压强度和弹性模量通常比自然冷却低10%~30%。

（二）混凝土自身因素

混凝土强度等级：通常，高强度（HSC）和超高强度混凝土（UHSC）高温性能退化比普通强度混凝土（NSC）更严重。因HSC和UHSC水泥用量大、水胶比低、密实度高，高温下气体难排出，易形成高孔隙压力致内部开裂，且HSC脆性大、高温后延性差。不过，有研究表明，在200℃以下，HSC可能热稳定性更好。

骨料类型：骨料类型影响混凝土高温力学性能，源于其热稳定性和与水泥浆体的相容性。如石英骨料573℃相变膨胀、石灰岩高温分解会加剧损伤；玄武岩、花岗岩等在一定温度范围较稳定。轻质骨料混凝土因含封闭孔隙，隔热好，可延缓高温传递，但强度低。

水胶比与水泥用量：水胶比越小，混凝土常温强度越高，但过低水胶比会使高温气体压力大，加剧损伤。水泥用量越多，高温分解气体和收缩多，易产生内部裂纹。

矿物掺合料：粉煤灰、矿渣、硅灰等矿物掺合料广泛用于混凝土。适量掺合料（尤其粉煤灰和矿渣）可改善界面过渡区结构，降低水泥用量和水化热，提高高温性能。如粉煤灰可二次水化减少CH分解；硅灰可填充孔隙，但过量会增加脆性。

外加剂：减水剂、引气剂、纤维等影响混凝土高温性能。引气剂引入的气泡可缓解气体压力，助于抗火；钢纤维、PP纤维等可抑制微裂纹扩展，提高抗拉强度和延性，PP纤维高温熔化形成通道，助水蒸气排出，降低孔隙压力，是有效抗火改性措施。

（三）构件特征与受力状态

构件截面尺寸：大截面混凝土构件在受火时，截面温度分布不均匀，表层混凝土受火温度高、损伤严重，而内部混凝土可能仍保持较好性能，这种“截面效应”

使得构件的整体性能退化与标准圆柱体或立方体试块的性能退化存在差异，通常构件的残余承载力高于同等受火温度下的试块。

受力状态：高温下混凝土构件可能处于不同的受力状态（轴压、偏压、受弯、受剪等），受力状态会影响混凝土内部的应力分布和损伤发展。例如，轴心受压状态下，高温引起的膨胀变形会受到约束，可能产生附加压力，加剧混凝土的损伤；而受拉状态则会促进微裂纹的扩展。

结语

综上所述，混凝土结构在高温环境下的力学性能退化是一个多因素耦合的复杂过程。从微观结构的变化到宏观力学性能的显著下降，再到各类内外因素的综合影响，这一过程揭示了混凝土材料在极端条件下的脆弱性。未来的研究应进一步聚焦于复杂高温历程下性能退化的定量描述，探索多因素耦合作用的内在机制，并建立更加精确且实用的评估模型。此外，针对不同工程场景，开发具有优异抗火性能的新型混凝土材料和结构设计方法也至关重要。这些努力将为提升混凝土结构在高温环境中的安全性、可靠性和耐久性提供重要的理论支撑和技术保障。

参考文献

- [1] 荣华, 荆玉翔, 王誉林, 等. 高温辐照对混凝土结构性能损伤影响研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(11): 133-138.
- [2] 杨虹, 王海龙, 王红珊, 等. 碳纤维轻骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(11): 108-112.
- [3] 申海洋, 刘凌晖, 任磊. 高温作用下轻骨料混凝土力学性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(10): 2976-2983.
- [4] 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): 9. DOI: 10.13801/j.cnki.fhchxb.20201208.001.
- [5] 曹琛. 氯离子环境下钢筋混凝土棱柱体抗压力学性能试验研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(1): 6. DOI: CNKI: SUN: JGGC.0.2020-01-020.