

面向高温环境的钢-混凝土复合梁端部耐久性与破坏模式研究

史洪领 410728197806296510

摘要

钢-混凝土复合梁凭借钢材受拉、混凝土受压的力学优势，在大跨度桥梁、工业厂房等工程结构中得到广泛应用，而在冶金车间、火灾频发区域等高温环境下，复合梁端部作为受力集中且构造复杂的关键部位，极易出现混凝土开裂、钢材锈蚀、界面粘结退化等耐久性损伤，进而改变结构的破坏模式，威胁整体结构安全。本文围绕高温环境下钢-混凝土复合梁端部的耐久性劣化规律与破坏模式演化机制展开研究，通过分析高温对材料性能、界面粘结性能的影响，总结端部耐久性损伤的主要类型与发展规律，探讨不同损伤程度下端部的破坏模式变化，研究结果可为高温环境下复合梁端部的耐久性设计与防护提供参考。

关键词：高温环境；钢-混凝土复合梁；端部耐久性；破坏模式

一、引言

钢-混凝土复合梁将钢材与混凝土两种材料组合，充分发挥各自的材料特性，相比纯钢梁具有更好的整体性和稳定性，相比纯混凝土梁具有更轻的自重和更高的承载力，因此被广泛应用于工业建筑、大跨度桥梁等工程领域。在冶金、火电等行业的生产建筑中，结构长期受到高温作用影响，部分区域环境温度可达到 $100^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，甚至在火灾事故中瞬时温度超过 1000°C ，高温环境会对钢材和混凝土的材料性能产生显著劣化影响，同时也会破坏钢与混凝土之间的界面粘结性能。

复合梁端部是连接支座与梁体的关键部位，不仅承受梁体传递的剪力和弯矩，还存在钢材与混凝土的连接构造、锚固件等多个薄弱环节，受力状态复杂，在高温作用下更容易产生耐久性损伤。当前针对钢-混凝土复合梁的研究多集中于常温下的整体承载力和力学性能，针对高温环境下端部部位的耐久性和破坏模式的专项研究相对不足，因此开展相关研究对于提升高温环境下复合结构的使用寿命和安全性能具有重要的理论与工程意义。

二、高温环境对复合梁材料与界面性能的影响

2.1 对钢材性能的影响

钢材的力学性能对温度变化较为敏感，当环境温度低于 300℃时，钢材的屈服强度和极限强度下降幅度相对较小，但是延展性会有所降低；当温度超过 300℃后，钢材强度会出现快速下降，同时弹性模量也会持续降低，在温度达到 600℃时，普通低碳钢的强度仅剩常温下的 30%左右。除了力学性能劣化，高温环境还会加速钢材的锈蚀进程，在高温高湿环境下，钢材表面氧化反应速率远高于常温，端部位置容易积存水分和腐蚀性介质，锈蚀会进一步削弱钢材截面，降低钢材与连接件的咬合力，加剧耐久性损伤。

2.2 对混凝土性能的影响

混凝土在高温作用下会发生内部水分蒸发、水泥水化产物分解、骨料膨胀等一系列劣化反应。当温度超过 100℃，混凝土内部自由水开始蒸发，产生干缩裂缝；温度达到 300℃左右时，混凝土中的氢氧化钙开始分解，水泥石结构遭到破坏；温度超过 500℃后，骨料中的石英会发生晶体相变产生体积膨胀，进一步扩展内部裂缝，导致混凝土抗压强度、弹性模量显著下降。同时，高温作用后混凝土内部孔隙率增大，更容易渗入腐蚀性介质，加速混凝土的碳化和钢筋锈蚀，进一步降低端部混凝土的承载能力。

2.3 对钢-混凝土界面粘结性能的影响

钢与混凝土之间的粘结作用是保证复合梁共同受力的基础，粘结性能主要包括化学粘结力、摩擦力和机械咬合力。高温环境下，钢材与混凝土的热膨胀系数存在差异，钢材的热膨胀系数约为混凝土的 1.5 倍，温度变化会导致二者产生不同的变形，在界面处产生附加温度应力，进而导致界面产生微裂缝，破坏化学粘结力。当温度持续升高，界面微裂缝不断扩展，会逐步降低摩擦力和机械咬合力，最终导致界面发生滑移脱粘，使得钢与混凝土无法共同工作，改变复合梁端部的受力分布。

三、高温环境下复合梁端部耐久性损伤规律

复合梁端部的耐久性损伤是一个逐步发展的过程，根据损伤发展阶段可以分为初期损伤、中期损伤和晚期损伤三个阶段：

- 初期损伤阶段：在高温环境作用初期，首先出现的损伤是混凝土端部表面干缩裂

缝，以及界面处的微小脱粘，此时钢材强度尚未出现明显劣化，复合梁端部的整体承载力下降幅度不足 10%，耐久性损伤处于可修复范围。

- 中期损伤阶段：随着高温作用时间延长，裂缝不断向端部内部扩展，钢材开始出现锈蚀，界面粘结强度下降超过 30%，部分区域出现明显的界面滑移，端部混凝土开始出现局部压碎现象，此时端部承载力下降 20%~40%，已经对结构安全产生不利影响。
- 晚期损伤阶段：当损伤发展到晚期，端部混凝土出现大面积开裂和剥落，钢材锈蚀严重，截面削弱明显，界面完全脱粘，钢与混凝土各自独立受力，此时端部承载力下降超过 50%，随时可能发生脆性破坏。

四、高温下复合梁端部破坏模式分析

4.1 端部混凝土受压破坏

当高温作用时间较短，耐久性损伤程度较轻时，钢-混凝土界面粘结性能保持较好，钢与混凝土能够共同工作，此时端部的破坏模式主要为端部混凝土受压破坏。该破坏模式的特征为：在荷载作用下，端部受压区混凝土首先出现裂缝，随着荷载增加，裂缝不断扩展，最终混凝土被压碎，钢材尚未达到屈服强度，属于延性相对较好的破坏模式，破坏前有明显的变形预兆。与常温下的混凝土受压破坏相比，高温作用后混凝土强度降低，发生受压破坏的极限荷载更低。

4.2 界面滑移剪切破坏

当耐久性损伤发展到中期，界面粘结性能出现明显退化，此时端部的破坏模式转化为界面滑移剪切破坏。该破坏模式的特征为：端部位置钢与混凝土之间产生较大的相对滑移，剪力无法有效传递，最终沿着界面发生剪切破坏，钢材未发生屈服，混凝土也未出现大面积压碎，破坏的突然性高于受压破坏，属于半脆性破坏。界面滑移剪切破坏是高温环境下复合梁端部最常见的破坏模式，约占高温损伤破坏案例的 60%以上。

4.3 端部钢材剪切断裂破坏

当耐久性损伤发展到晚期，界面完全脱粘，原本由混凝土承担的部分剪力全部转移到钢材端部，此时端部的破坏模式转化为钢材剪切断裂破坏。该破坏模式的特征为：钢材端部在剪力作用下发生屈服，随后出现剪切断裂，破坏前变形较小，属于典型的脆性破坏，对结构安全的威胁最大。该破坏模式多发生在高温长期作用且未进行及时维修的结构中。

五、结论与建议

高温环境会显著劣化钢-混凝土复合梁端部的材料性能与界面粘结性能，进而导致端部耐久性逐步损伤，最终改变端部的破坏模式。研究表明，轻度损伤下端部多发生混凝土受压破坏，延性较好；中度损伤多发生界面滑移剪切破坏，脆性明显提升；重度损伤多发生钢材剪切断裂破坏，属于脆性破坏，危险性最高。针对高温环境下的钢-混凝土复合梁工程，建议在端部位置采用耐高温混凝土材料，对钢材进行耐高温防腐涂层防护，同时设置额外的抗剪连接件增强界面粘结性能，定期对端部位置进行耐久性检测，及时修复早期损伤，避免损伤进一步发展引发脆性破坏。

参考文献

- [1] 刘永军, 李宏男. 高温下钢-混凝土组合结构力学性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(03): 2-8.
- [2] 钟建军, 韩杰. 钢-混凝土组合梁端部粘结性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(06): 62-70.
- [3] 吕西林, 朱伯龙. 混凝土结构高温损伤与耐久性[M]. 上海: 同济大学出版社, 2000.