

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.039



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



锈蚀钢筋混凝土单向板火灾后的弯曲性能

王砚^{1a}, 巴光忠^{1b}, 桂松^{1b}, 刘才玮²

(1. 上海海事大学 a. 海洋科学与工程学院; b. 商船学院, 上海 201306; 2. 青岛理工大学 土木工程
学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 锈蚀与火灾高温耦合作用是钢筋混凝土板在服役中很可能面临的损伤模式, 严重影响其安全性与耐久性。目前对两者共同作用后混凝土单向板的力学行为尚不明确。设计8块不同锈蚀率(0、0.05、0.10、0.15)与受火时间(0、60 min)的钢筋混凝土单向板, 采用电化学加速锈蚀与 ISO 834 标准火灾试验模拟耦合损伤, 并进行静载受弯试验, 系统研究其破坏特征、荷载-挠度关系与应变发展规律。结果表明: 随锈蚀率提高, 试件由弯曲破坏逐渐转为钢筋拉断的脆性破坏; 锈蚀与高温共同作用显著加速承载力与刚度退化, 锈蚀率为0.15且受火60 min试件承载力降幅达46.9%; 基于平截面假定, 考虑材料高温损伤与黏结退化建立的抗弯承载力计算模型与试验结果吻合良好。

关键词: 钢筋混凝土板; 锈蚀; 火灾; 弯曲性能; 承载力模型; 试验研究

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Bending performance of corroded reinforced concrete one-way slabs after fire

WANG Yan^{1a}, BA Guangzhong^{1b}, GUI Song^{1b}, LIU Caiwei²

(1a. School of Ocean Science and Engineering; 1b. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, P. R. China)

Abstract: The coupled effect of corrosion and high-temperature fire exposure is a damage scenario that reinforced concrete slabs are likely to encounter during service, significantly compromising their safety and durability. Currently, the mechanical behavior of concrete one-way slabs under the combined influence of these two factors remains unclear. In this study, eight reinforced concrete one-way slabs with different corrosion rates (0, 0.05, 0.10, 0.15) and fire exposure durations (0, 60 min) were designed. Electrochemical accelerated corrosion and ISO 834 standard fire tests were employed to simulate the coupled damage, followed by static bending tests to systematically investigate their failure characteristics, load - deflection relationships, and strain development patterns. The results indicate that with increasing corrosion rates, the failure mode of specimens gradually shifts from flexural failure to brittle tensile fracture of the reinforcement. The combined action of

收稿日期: 2026-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51708319)

作者简介: 王砚(2001-), 男, 主要从事钢筋混凝土结构研究, E-mail: 2432801912@qq.com。

巴光忠(通信作者), 男, 博士, E-mail: gzba@shmtu.edu.cn。

Received: 2026-03-04

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51708319)

Author brief: WANG Yan (2001-), main research interest: concrete structures, E-mail: 2432801912@qq.com.

BA Guangzhong (corresponding author), PhD, E-mail: gzba@shmtu.edu.cn.

corrosion and high temperature significantly accelerates the degradation of bearing capacity and stiffness. For instance, specimens with a corrosion rate of 0.15 and 60 min of fire exposure experienced a reduction in bearing capacity of up to 46.9%. Based on the plane-section assumption and considering material damage due to high temperature and bond degradation, a proposed bending capacity calculation model shows good agreement with the experimental results. This study provides a reference for the residual bearing capacity assessment and strengthening design of corroded concrete one-way slabs after fire exposure.

Keywords: reinforced concrete slab; corrosion; fire; bending performance; bearing capacity model; experimental study

混凝土板是混凝土结构的重要水平承重构件,因其厚度相对较小,在长期服役过程中,更容易因氯离子侵蚀或混凝土碳化引起钢筋锈蚀现象。锈蚀不仅削弱了钢筋的有效截面积,降低其承载力和变形能力,还导致钢筋与混凝土间黏结性能的严重退化^[1]。与此同时,火灾作为建筑面临的主要灾害之一,钢筋混凝土板因其厚度相对较小且发生火灾时通常受火面积大,高温作用会使钢筋、混凝土材料,以及结构构件强度下降更为严重,进一步威胁结构的安全性^[2]。

目前,学者针对单一锈蚀损伤或单一火灾高温作用后混凝土板的力学性能已开展了大量研究。例如,方亮等^[3]研究了锈蚀混凝土板的抗弯性能,发现试件抗弯承载力和变形性能退化明显,提出了考虑钢筋锈蚀影响的抗弯承载力计算模型。常召群等^[4]提出了锈蚀混凝土单向板破坏模式判别方法,并针对不同的破坏模式给出相应的抗弯承载力计算模型。Chung等^[5]等发现钢筋轻微锈蚀能提高混凝土板的抗弯性能,当钢筋截面锈蚀率超过2%时,混凝土板的承载力开始降低,并证实了锈蚀钢筋混凝土板抗弯性能退化的主要原因是黏结强度降低。Wu等^[6]通过对8块在海洋环境下服役7a的锈蚀钢筋混凝土板力学性能开展试验研究,发现板的承载力随锈蚀率增加呈非线性下降,锈蚀率越高承载力下降越多,而抗弯刚度随锈蚀率增加近似呈线性下降。

关于火灾后混凝土板的力学性能,李玉梅等^[7]考虑升降温阶段材料不同的本构模型,通过数值计算研究发现受火后混凝土板的承载能力降低较大,且存在明显的残余变形。Wang等^[8]研究了火灾后足尺混凝土双向板的残余力学性能,并提出了采用钢筋应变差方法来预测其荷载-挠度曲线。余江滔^[9]研究了两跨连续混凝土板在受火后的剩余承载能力,指出随着受火时间的增加,残余承载力和初始结构刚度逐渐降低。郑文忠等^[10]研究了火灾后无黏结预应力混凝土连续楼板的力学性能,发现随着加热时间和载荷水平的增加,预应力板的承载能力下

降速率增加。

混凝土板在已经发生锈蚀损伤的情况下仍有可能遭遇火灾高温作用。现有的“锈蚀-火灾”耦合研究多集中于混凝土柱或梁构件,针对锈蚀单向板受火后的残余性能研究相对匮乏,且对于高温如何加剧锈蚀试件可能发生脆性破坏机制尚不明确。笔者通过对8块经历不同锈蚀程度(0~0.15)和受火时间(0或60 min)处理的混凝土板进行静载试验,分析其破坏模式、荷载-挠度关系,基于理论分析提出混凝土板承载力计算方法。

1 试验设计

1.1 试件设计制作

设计制作8块钢筋混凝土板,其中6块板进行加速锈蚀试验。试件设计参数与试验工况见表1。混凝土板尺寸为4 200 mm×1 400 mm×120 mm,采用C40商品混凝土浇筑。纵向受力筋为直径12 mm的HRB400热轧带肋钢筋,分布筋为直径10 mm的HRB400热轧带肋钢筋。为便于后续电化学加速锈蚀试验,纵向受力筋在板端外露100 mm用于接线通电。板的尺寸及配筋详见图1。

表1 混凝土板的设计参数

Table 1 Design parameters of concrete slabs

编号	目标锈蚀率	保护层厚度/mm	受火时间/min
FR-1	0	15	60 min
FR-2	0.05	15	
FR-3	0.10	15	
FR-4	0.15	15	
FR-5	0	15	不受火
FR-6	0.05	15	
FR-7	0.10	15	
FR-8	0.15	15	

1.2 试验方案及测试方法

1.2.1 钢筋加速锈蚀试验

试件标准养护28 d后,采用外加电流法进行加速锈蚀。将板置于含有5%氯化钠溶液的水池中,确保底部钢筋浸入溶液,如图2所示。每根受拉钢

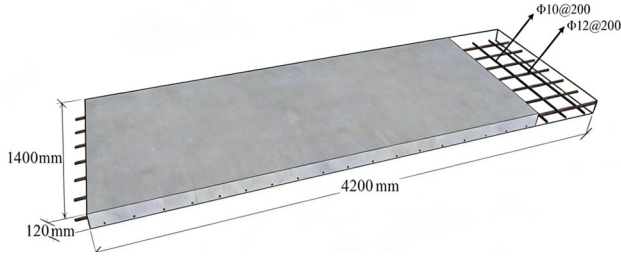


图1 混凝土板尺寸及配筋图

Fig.1 Concrete slab dimensions and reinforcement diagram

筋连接直流电源阳极,阴极连接置于溶液中的铜棒。电流密度设定为 $200 \mu\text{A}/\text{mm}^2$,该值可模拟自然锈蚀过程^[11]。通过法拉第定律(见式(1)),计算通电时间,目标锈蚀率为 0.05、0.10、0.15 时,分别对应的锈蚀时间为 24、47、71 d。锈蚀过程中定期补充溶液以减小蒸发影响。

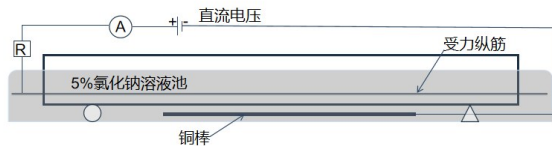


图2 加速锈蚀试验过程

Fig.2 Accelerated corrosion test process

$$t = \frac{ZF r \rho \eta_s}{2Ai} \quad (1)$$

式中: t 为锈蚀持续时间, s ; Z 为阳极化学价(铁为+2); F 为法拉第常数, $96\,500 \text{ A}\cdot\text{s}$; r 为锈蚀钢筋的半径, cm ; ρ 为铁的密度, g/cm^3 ; η_s 为质量锈蚀率; A 为锈蚀物的原子量,钢筋 $A=56 \text{ g}/\text{mol}$; i 为锈蚀电流密度, A/cm^2 。

1.2.2 火灾试验

试件达到目标锈蚀率后吊出放在室内通风环境中自然干燥。火灾试验在水平火灾炉中进行,设备采用大吨位钢结构反力架以及温度控制与采集系统,实现炉温、炉压等参数的实时采集与可视化监控,炉温按 ISO 834 标准升温曲线控制。试件底面受火,4块混凝土板平行布置在火灾炉上同时进行试验,两端简支于炉外支座。为减少热损失,炉壁、支座及板间缝隙均敷设防火棉。根据荷载规范^[12],在板顶均布 33 个 25 kg 的砝码,模拟 $2.0 \text{ kN}/\text{m}^2$ 的活荷载,如图 3 所示。

试验中采用铠装热电偶监测炉温,采用镍铬-镍硅(K型)热电偶测量板内温度。板跨中截面沿板厚布置 5 个温度测点(混凝土测点 W1、W2、W3 分别布置在板顶、板厚中部和板底位置,钢筋测点 R1、R2 分别对应布置在板底受拉主筋的上侧和下侧表面),如图 4 所示。采用差动式位移计测量板的平面



图3 砝码布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of weight arrangement

外变形,位移计布置如图 5。试验采用 Agilent 数据采集仪,数据采集间隔为 10 s。

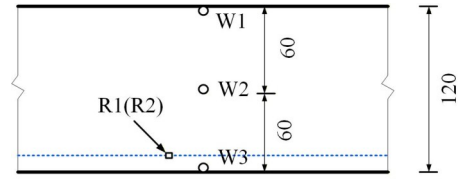


图4 板厚方向热电偶布置位置

Fig.4 Layout of thermocouples along the thickness of concrete slabs

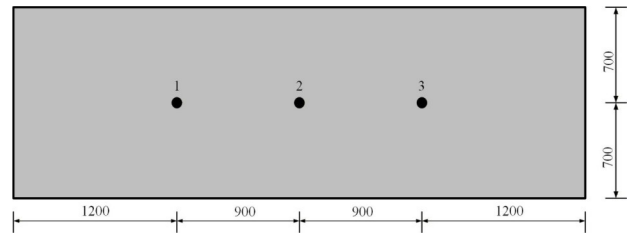


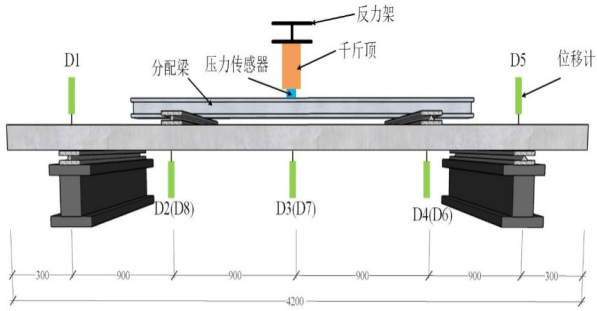
图5 平面外位移计布置图

Fig.5 Layout of displacement sensors

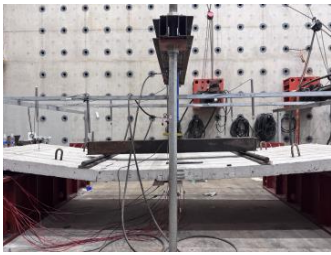
1.2.3 钢筋混凝土板受火后受弯试验

火灾试验结束并自然冷却至室温后,在试件跨中位置凿开保护层,粘贴纵向受拉钢筋应变片,并用等强度砂浆修复。加载方式参照试验标准^[13],采用四分点加载,通过千斤顶、反力架和分配梁施加荷载,压力传感器监测施加的荷载。试验装置见图 6。

试验采用单调分级加载,每级持荷 10 min。正式加载前进行 3 次预加载以消除接触间隙并检查仪器。初始荷载为 10 kN,开裂前每级增加 10 kN,接近开裂荷载后每级增加 5 kN,钢筋屈服后改用位移控制(5 mm/级)。全程记录荷载、位移、应变数据,并跟踪裂缝发展。其中,使用 8 个位移计测量混凝土板竖向挠度,最终跨中挠度值取 D3 和 D7 平均值扣除支座沉降均值。在板顶、板侧与板底跨中位置共布置 7 个应变片(C1~C7, C1 贴于板顶、距板侧 20 mm 处; C2~C4 贴于板侧; C5~C7 均布于板底表面),用于测量混凝土应变,见图 7。在受拉钢筋中部粘贴 5 个应变片(S1~S5),用于测量钢筋应变,



(a) 示意图



(b) 加载装置

图 6 加载示意图

Fig.6 Loading diagram

见图 8。

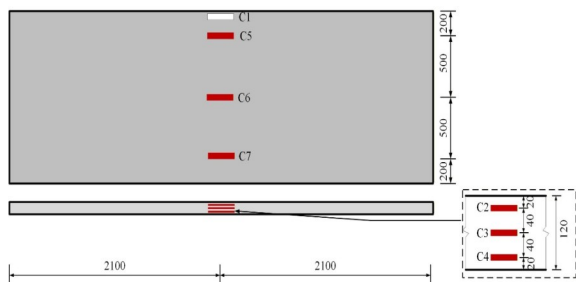


图 7 混凝土应变片位置

Fig.7 Position of concrete strain

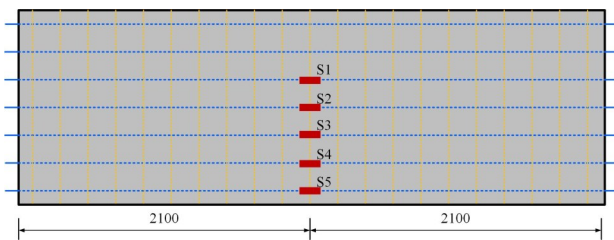


图 8 钢筋应变片位置

Fig.8 Position of reinforcement strain

2 试验结果与讨论

2.1 试验材料

2.1.1 混凝土

在浇筑试验板时,同时浇筑了混凝土立方体和棱柱体试块,标准养护 28 d 后,测得常温下混凝土立方体和棱柱体抗压强度平均值分别为……和 38.7 MPa。受火 60 min 后混凝土棱柱体抗压强度

平均值为 35.6 MPa。

2.1.2 钢筋强度及实际锈蚀率

对试验中采用的直径 12 mm 的 HRB400 级热轧带肋钢筋进行常温下拉伸试验,得到钢筋屈服强度 449 MPa,极限强度 579 MPa,弹性模量 203 GPa。

静载试验结束后,将锈蚀混凝土板破碎,取出锈蚀受拉钢筋并切割成 200 mm 长的钢筋段。除锈后按照式(2)计算质量锈蚀率 η_s 。

$$\eta_s = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (2)$$

式中: m_0 为单位长度的未锈蚀钢筋的质量,g; m 为单位长度的锈蚀钢筋的质量,g。

测得 FR-2、FR-3、FR-4、FR-6、FR-7、FR-8 的实际锈蚀率分别为 0.053、0.091、0.159、0.023、0.078、0.127,与目标值接近,表明锈蚀效果良好。

2.2 火灾试验结果

2.2.1 火灾试验现象

各试件的火灾试验现象类似,在火灾试验过程中,观察到炉内直接作用于板底的火焰明亮且燃烧充分,测得的炉温变化与标准升温曲线相符。从点火开始至 20 min 时,试验板发生了轻微的变形,并且板表面出现了大量水蒸气。同时,板顶的局部区域出现少量积水。20~40 min 随着火灾试验的持续进行,混凝土板的温度逐渐升高,在荷载和高温的共同作用下,混凝土板的变形逐步增大,混凝土板表面水汽逸出量显著减少。40~60 min 后期高温阶段,板底混凝土出现爆裂损伤,钢筋力学性能持续劣化,构件挠曲变形进一步增大,水汽现象彻底消失。试验结束后,经自然冷却,板的变形略有回弹。受火板底面呈淡黄色,分布大量细密裂缝,局部发生爆裂。锈蚀率较高的试件爆裂更明显,但爆裂深度未超过保护层厚度,见图 9。板顶未受火面无明显变化。



(a) 锈蚀率为 0

(b) 锈蚀率 0.15

图 9 爆裂现象

Fig.9 Explosion phenomenon

2.2.2 温度场

实测炉温曲线与 ISO 834 标准曲线基本吻合,如图 10 所示。

部分板内混凝土和钢筋的温度曲线如图 11

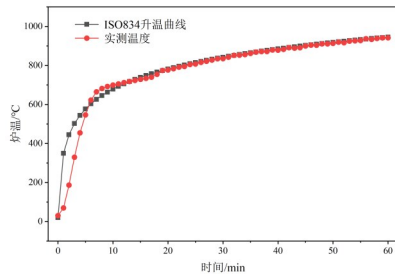


图 10 炉温与标准升温曲线对比

Fig.10 Comparison of furnace temperature and standard heating curve

(a)、(b)所示。不同测点处的温度差异较为明显,随着火灾持续作用,板内各测点的温度逐渐上升,且板内 W2 测点温度在停火后温度持续升高,体现了混凝土的热惰性。

图 11(c)为混凝土 W2 测点温度变化对比结果,测点温度随锈蚀率的升高呈显著上升趋势。锈蚀率为 0 时,温度仅通过混凝土基体进行热传导,热阻稳定。随着锈蚀率逐步提高,裂缝为热量传输提供了高效通道,大幅提升了混凝土内部的热传导效率。图 11(d)为钢筋 R1 测点的温度变化对比结果,未锈蚀试件(锈蚀率 0)的钢筋热传递效率最低,测点温度表现为全组最低;随着锈蚀率升高,混凝土裂缝宽度同步增大,裂缝将热量快速传递至钢筋表面,最终高锈蚀率混凝土板内部钢筋的热响应特性呈现明显增强的变化规律。

2.3 静载试验结果

2.3.1 破坏模式

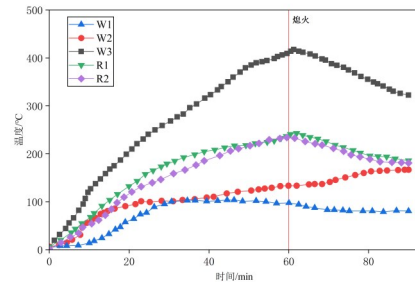
试验中 8 块混凝土板发生了混凝土压碎、锈蚀钢筋拉断两种破坏模式。其中试件 FR-1、FR-3、FR-5、FR-6、FR-7 发生了板顶混凝土压碎,属于弯曲破坏,典型破坏特征见图 12(a),虚线包围处为压碎区。试件 FR-2、FR-4 和 FR-8,其破坏模式均为锈蚀受拉钢筋被拉断,导致试件提前发生破坏,见图 12(b),整体板底破坏见图 12(c)。

2.3.2 混凝土应变

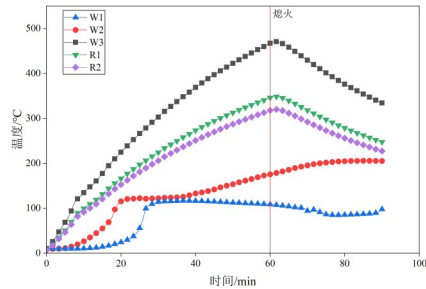
以试件 FR-6 为例,图 13 所示为混凝土荷载-应变关系,当达到屈服荷载时,混凝土应变分布斜率明显减小。另外,C2 应变片所在位置因受压区高度减少而逐渐转为受拉,故图中出现回拐。图 14 是试件跨中截面混凝土的应变沿截面高度变化情况,截面应变沿混凝土板厚度方向仍然基本呈线性分布,符合平截面假定。

2.3.3 荷载-挠度曲线

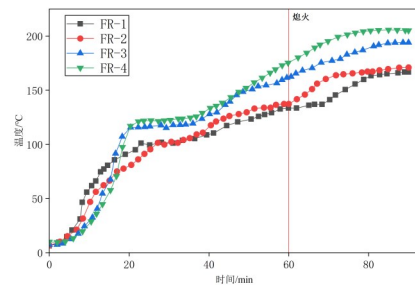
各试件荷载-挠度曲线如图 15 所示,变化趋势相似。加载初期呈线性变化,钢筋屈服后曲线斜率



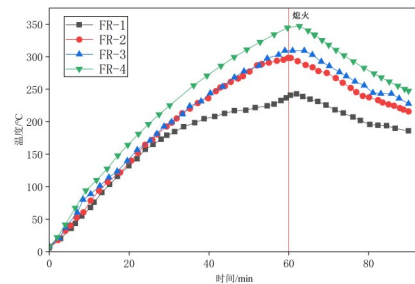
(a) FR-1



(b) FR-4



(c) 混凝土温度对比(W2 测点)



(d) 钢筋温度对比(R1 测点)

图 11 板各测点温度

Fig.11 Temperatures of measuring points in the slabs

下降,刚度降低,挠度快速发展。受火与锈蚀均使曲线下移、屈服段缩短,表明刚度和延性下降。钢筋锈蚀是承载力衰减的主导因素,高温作用会显著加剧锈蚀构件的性能劣化,且锈蚀率越高,高温的耦合放大效应越明显,FR-4 工况下承载力降幅最大,破坏最脆。未受火试件以延性弯曲破坏为主,受火试件易发生脆性破坏。主要试验结果见表 2。



(a) 板顶混凝土压碎



(b) 锈蚀钢筋断裂



(c) 弯曲破坏(板底)

图 12 锈蚀混凝土板破坏模式

Fig.12 Failure mode of corroded concrete slab

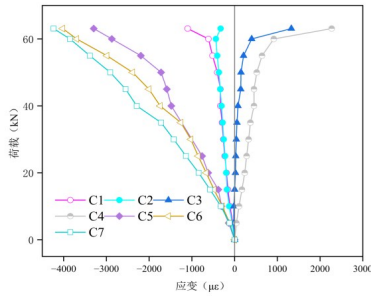


图 13 混凝土板的荷载-应变图(FR-6)

Fig.13 Load strain diagram of concrete slab

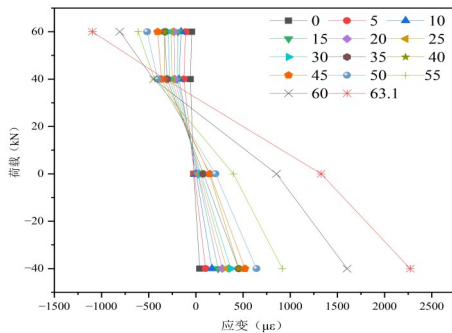


图 14 试件跨中正截面应变图(FR-6)

Fig.14 Strain diagram of the midspan section of the specimen

2.3.4 参数影响分析

1) 锈蚀率的影响

图 16 所示为锈蚀率对钢筋混凝土板受火后抗

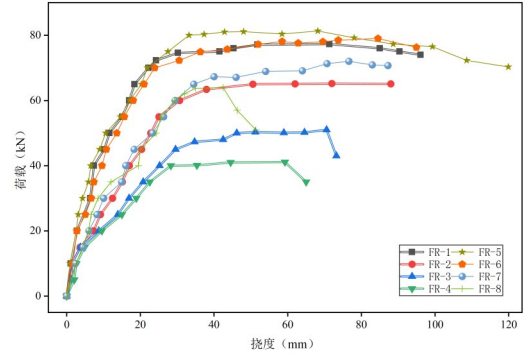


图 15 各试验板荷载-挠度曲线

Fig.15 Load deflection curves of each test plate

弯承载力的影响。从图 16 可以看出,对于未受火试件,锈蚀率为 0.05、0.1、0.15 的试件相较于未锈蚀试件,承载力分别下降了 2.8%、11.5%、14.3%,说明随着锈蚀率的增加,锈蚀钢筋混凝土板的抗弯承载力逐渐降低。然而受火时间为 60 min,锈蚀率为 0.05、0.1、0.15 的试件相较于未锈蚀试件,抗弯承载力分别下降了 15.9%、32.6%、46.9%,下降趋势明显增大,表明高温加剧了锈蚀的不利影响。这可能是因为对于高锈蚀率的板,因锈胀裂缝较大导致内部温度更高,高温后混凝土强度损失更多;而对于严重锈蚀的钢筋,高温后的力学性能下降更为明显^[14]。

2) 受火时间的影响

图 17 所示为受火时间对锈蚀钢筋混凝土板抗弯承载力的影响。从图 17 可以看出,相比未受火板,受火 60 min 后不同锈蚀程度的混凝土板承载力均出现了下降。当锈蚀率为 0、0.05、0.1、0.15 时,受火 60 min 后其承载力分别下降了 5.3%、17.7%、27.8%、41.2%,说明高温对高锈蚀率试件的损伤更为显著。

3 抗弯承载力计算模型

混凝土在高温作用下,其内部发生脱水和微结构损伤,导致抗压强度和弹性模量降低。根据试验记录,4 块受火板的最高温度范围为 400~500℃,采用自然冷却方式。参考吴波等^[15]提出的模型,将高温后混凝土抗压强度表示为

$$f_{cT} = k_{cT} f_c \quad (3)$$

式中: f_{cT} 为混凝土高温后剩余轴心抗压强度,MPa; f_c 为混凝土轴心抗压强度,MPa; k_{cT} 为混凝土抗压强度折减系数,可根据文献^[15]确定。

锈蚀不仅减小钢筋截面积,还改变其表面形态与力学性能。高温进一步加剧钢筋的强度与延性损失。根据已有研究^[14],受 400℃的高温作用后锈

表 2 各试件荷载及挠度

Table 2 Load and deflection of each specimen

试件	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	极限挠度/mm	极限弯矩试验值/(kN·m)	极限弯矩计算值/(kN·m)	计算值/试验值
FR-1	72.3	77.3	96.1	34.78	32.1	0.923
FR-2	55.6	65.1	88.0	29.29	30.9	1.056
FR-3	45.1	52.4	73.2	23.58	25.6	1.086
FR-4	37.3	41.6	65.0	18.72	23.1	1.235
FR-5	75.6	81.3	119.9	36.59	34.9	0.954
FR-6	70.1	79.0	95.0	35.55	37.2	1.046
FR-7	65.4	72.0	87.2	32.4	30.4	0.938
FR-8	60.8	69.7	51.3	31.37	28.6	0.913

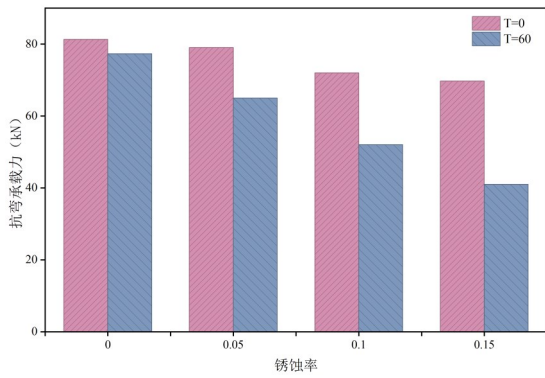


图 16 锈蚀率对抗弯承载力的影响

Fig.16 Influence of Corrosion Rate on Bending Capacity

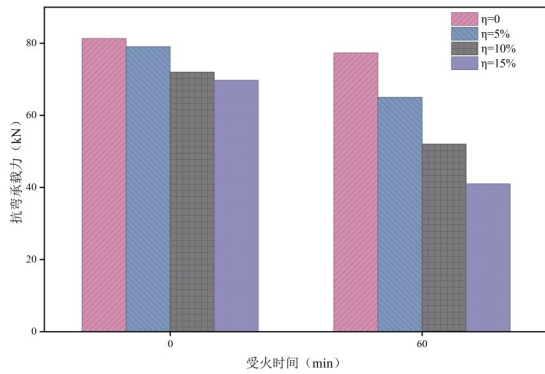


图 17 受火时间对抗弯承载力的影响

Fig.17 The Influence of Fire Time on Bending Capacity

蚀钢筋的屈服强度和极限强度为

$$\frac{f_{ycT}}{f_y} = 1.086 - 1.57\eta_s, T = 400^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\frac{f_{ucT}}{f_u} = 1.005 - 1.107\eta_s, T = 400^\circ\text{C} \quad (5)$$

式中: η_s 为钢筋锈蚀率; f_{ycT} 、 f_{ucT} 为高温后锈蚀钢筋屈服和极限强度, MPa; f_y 、 f_u 为常温下未锈蚀钢筋屈服和极限强度, MPa。

锈蚀产物体积膨胀导致保护层开裂, 高温进一步加剧裂缝扩展, 显著削弱钢筋与混凝土之间的黏结力。考虑高温后锈蚀钢筋与混凝土的黏结滑移关系, 模型可表示为^[16]

$$\tau_s = \frac{P_m [1 + (S/K_i)^\alpha]}{1 + (K_a/S)^\beta} \quad (6)$$

$$K_a = 0.68T'^2 - 0.39T' + 5.19 \quad (7)$$

$$K_i = -0.09K_a + 4.91 \quad (8)$$

$$P_m = 24.4 - 0.95T' - 1.59\eta_s' \quad (9)$$

式中: τ_s 为黏结应力; S 为平均滑移量; T' 为 $T/100$; η_s' 为 $100\eta_s$; K_a 、 K_i 、 P_m 、 α 、 β 为根据温度和锈蚀率所选用的参数, 取值可参考文献^[16]。

基于平截面假定, 并考虑材料性能退化, 建立受火后锈蚀钢筋混凝土单向板正截面抗弯承载力计算模型。

1) 受弯破坏

试验结果显示, 受火后锈蚀钢筋混凝土受弯构件仍基本符合平截面假定, 考虑单向板的钢筋锈蚀和高温影响, 对应于受弯破坏的混凝土板抗弯承载力计算公式为

$$M_u = \alpha_1 f_{cT} b x (h_0 - 0.5x) \quad (10)$$

$$x = \frac{F_t}{\alpha_1 f_{cT} b} \quad (11)$$

$$F_t = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ycT}}{4} \pi d^2 \quad (12)$$

式中: M_u 为试件抗弯承载力, N·mm; α_1 高温后混凝土等效矩形应力图系数, 通常近似取 1.0 或略低; b 为试件截面宽度, mm; F_t 为受拉钢筋提供的抗拉承载力, N; h_0 为试件截面有效高度, mm; n 为受拉钢筋根数; d 为钢筋直径, mm。

2) 黏结滑移破坏

考虑到钢筋锈蚀和高温作用均会降低钢筋与混凝土间的黏结性能, 因此高温后锈蚀混凝土板也可能发生黏结滑移破坏, 当黏结破坏控制的钢筋应力 $\sigma_s < f_{ycT}$ 时构件发生黏结滑移破坏。提出高温后发生黏结破坏的钢筋锈蚀混凝土板承载力计算模型为

$$M_u = \sigma_s A_s \left(1 - \eta_s\right) \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) \quad (13)$$

$$\sigma_s = \frac{\tau_s \pi d l_b}{A_s (1 - \eta_s)} \quad (14)$$

$$x = \frac{\sigma_s A_s (1 - \eta_s)}{\alpha_1 f_{cT} b} \quad (15)$$

式中: σ_s 为黏结破坏时钢筋应力, MPa; l_b 为钢筋锚固长度, mm; A_s 为锈蚀钢筋截面积, mm²。

试验板 FR-4 发生黏结滑移破坏, 其余板根据试验结果按照受弯破坏进行计算, 试验板理论抗弯承载力分别见表 2, 总体上计算值与试验结果吻合较好。板 FR-4 的计算值比试验值高出 23.5%, 这可能是 FR-4 锈蚀率最高(0.15)且受火 60 min, 高温加剧了锈胀裂缝导致的黏结力丧失, 使得实际承载力下降幅度超过了理论模型的预期。

4 结论

通过加速锈蚀和火灾试验结合理论分析, 研究了锈蚀与高温耦合作用下钢筋混凝土单向板的力学性能, 并通过试验结果和理论分析对受火后锈蚀板抗弯承载力进行计算。

1) 随着锈蚀率的升高, 试件破坏模式由适筋弯曲破坏逐渐转变为受拉钢筋拉断的脆性破坏。这种转变主要源于钢筋有效截面积的损失以及锈蚀导致的钢筋延性大幅降低。

2) 抗弯承载力随锈蚀率增加而持续下降。在相同受火条件下, 高锈蚀率试件(0.15)受火 60 min 后的承载力降幅(46.9%)远超未受火对比件。这表明锈胀裂缝加剧了高温对构件内部的渗透损伤。锈蚀引起的钢筋与混凝土界面黏结退化是导致荷载-挠度曲线斜率降低、屈服平台段缩短的主因。

3) 基于平截面假定并引入材料高温折减系数与黏结折减系数提出的承载力计算模型预测精度较高, 计算值与试验值比值介于 0.913~1.235 之间。

参考文献

- [1] 姜超, 丁豪, 顾祥林, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯破坏模式及承载力简化计算方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 1-10.
Jiang C, Ding H, Gu X L, et al. Bending failure modes and simplified bending capacity calculation methods for normal cross-sections of corroded RC beams[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 1-10. (in Chinese)
- [2] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 1-18.
Jin L, Zhang R B, Du X L, et al. Research progress on the influence of temperature on the mechanical perfor-

mance of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 1-18. (in Chinese)

- [3] 方亮, 周云, 易督航. 锈蚀 HRB500 钢筋混凝土板抗弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(11): 84-94.
Fang L, Zhou Y, Yi D H. Experimental study on flexural behavior of corroded reinforced concrete slabs with HRB500 bars[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(11): 84-94. (in Chinese)
- [4] 常召群, 邢国华, 杨成雨, 等. 锈蚀钢筋混凝土简支单向板抗弯性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(2): 55-59, 102.
Chang Z Q, Xing G H, Yang C Y, et al. Research on flexural behavior of corroded reinforced concrete simply supported one-way slabs[J]. Industrial Construction, 2019, 49(2): 55-59, 102. (in Chinese)
- [5] Chung L, Najm H, Balaguru P. Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(3): 184-193.
- [6] Wu S X, Liu G G, Bian H B, et al. Degradation and mechanism of the mechanics and durability of reinforced concrete slab in a marine environment[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(2): 257-270.
- [7] 李玉梅, 王广勇, 戴林. 火灾后钢筋混凝土板力学性能评估方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 389-395.
Li Y M, Wang G Y, Dai L. Post-fire mechanical performance evaluation method of reinforced concrete slabs[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 389-395. (in Chinese)
- [8] Wang Y, Guo W X, Huang Z H, et al. Analytical model for predicting the load-deflection curve of post-fire reinforced-concrete slab[J]. Fire Safety Journal, 2018, 101: 63-83.
- [9] 余江滔. 火灾后混凝土构件损伤评估的试验及理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Yu J T. Experimental and theoretical research on damage assessment of reinforced concrete member after fire[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [10] 郑文忠, 侯晓萌, 王英. 混凝土及预应力混凝土结构抗火研究现状与展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 1-18.
Zheng W Z, Hou X M, Wang Y. Progress and prospect of fire resistance of reinforced concrete and prestressed concrete structures[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 1-18. (in Chinese)
- [11] El Maaddawy T A, Soudki K A. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 41-47.
- [12] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building

structures[S].

[13] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012 Standard for test method of concrete structures[S].

[14] Ba G Z, Liu H, Zhang S G, et al. Residual mechanical properties of corroded steel bars after high-temperature exposure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(4): 04023004.

[15] 吴波, 梁悦欢. 高温后混凝土和钢筋强度的统计分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(12): 13-20.
Wu B, Liang Y H. Statistical analysis of strengths of concrete and steel bar after high-temperature treatment [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(12): 13-20. (in Chinese)

[16] 刘才玮, 闫良泰, 巴光忠, 等. 锈蚀钢筋与混凝土高温后黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 257-267.
Liu C W, Yan L T, Ba G Z, et al. Experimental investigation on bond performance of corroded reinforced concrete after exposure to high temperature[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 257-267. (in Chinese)

(编辑 XXX)