

引用本文:巴光忠,郑欣欣,刘才玮,等.火灾后锈蚀混凝土梁抗弯性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(1):138-145.

BA Guangzhong, ZHENG Xinxin, LIU Caiwei, et al. Experimental study on flexural performance of corroded reinforced concrete beams after fire exposure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 138-145.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04005

火灾后锈蚀混凝土梁抗弯性能试验研究

巴光忠¹,郑欣欣¹,刘才玮²,刘 浩²

(1. 上海海事大学 海洋科学与工程学院,上海 201306; 2. 青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033)

摘要:为研究既有锈蚀混凝土结构受火后的残余力学性能,设计并制作了9根钢筋混凝土梁,通过电化学加速锈蚀的方法获得不同锈蚀程度(目标锈蚀率为5%和15%)的混凝土梁,然后按照ISO834标准升温曲线进行不同受火时间(1 h和2 h)的火灾试验,最后对所有混凝土梁进行静力加载试验。结果表明:锈蚀钢筋混凝土梁的破坏过程和模式与普通混凝土梁相似,表现为适筋弯曲破坏,相比普通梁,其荷载-挠度曲线会发生下移并表现出带裂缝工作阶段和破坏阶段特征,挠度变形也更大;对于经历不同受火时间的混凝土梁,钢筋锈蚀均明显降低其屈服荷载,但常温下钢筋锈蚀对混凝土梁极限荷载的影响相对较小,火灾作用明显降低混凝土梁的极限承载力;受火后微锈蚀梁的残余承载力变化规律与未锈蚀梁相似,钢筋锈蚀几乎不会削弱构件的抗弯承载力;对于严重锈蚀梁,由于锈蚀引起截面削弱以及锈胀裂缝的影响,锈蚀混凝土梁在火灾下经历的最高温度更高,火灾后其残余极限承载力加速下降,相同受火时间下锈蚀率为13.5%的混凝土梁残余极限承载力比锈蚀率为6.2%的混凝土梁下降15.9%。

关键词:钢筋锈蚀;火灾;温度场;破坏模式;残余抗弯承载力

中图分类号:TU312

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)01-0138-08

Experimental study on flexural performance of corroded reinforced concrete beams after fire exposure

BA Guangzhong¹, ZHENG Xinxin¹, LIU Caiwei², LIU Hao²

(1. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: In order to study the residual mechanical properties of existing concrete structures after fire, 9 reinforced concrete beams were designed and fabricated. The corroded concrete beams with different corrosion degrees (target corrosion degree was 5% and 15%) were obtained by electrochemical accelerated corrosion tests. The fire tests were conducted for different fire durations (1 h and 2 h) according to the ISO834 standard heating curve. Finally, the static loading tests were conducted on all concrete beams. The results show that the failure process and mode of the corroded reinforced concrete beams are similar to those of the ordinary concrete beams, which shows bending failure mode. Compared to ordinary beams, their load-deflection

curve will shift downwards and exhibit characteristics of working with cracks and failure stages, and the deflection deformation is also greater. For concrete beams that have undergone different fire exposure time, steel corrosion significantly reduces their yield load, but the effect of steel corrosion on the ultimate load of concrete beams at room temperature is relatively small. The effect of fire significantly reduces the ultimate bearing capacity of concrete beams. The variation pattern of residual bearing capacity of slightly corroded beams after fire is similar to that of non corroded beams, and the corrosion of steel bars hardly weakens the bending bearing capacity of the components. For severely corroded beams, due to the weakening of the cross-section caused by corrosion and the influence of rust expansion cracks, the highest temperature experienced by corroded concrete beams under fire is higher, and their residual ultimate bearing capacity accelerates to decrease after the fire. The residual ultimate bearing capacity of concrete beam with corrosion rate of 13.5% for the same fire exposure time is 15.9% lower than that of concrete beam with corrosion rate of 6.2%.

Key words: corroded reinforcement; fire; temperature field; failure mode; residual bending bearing capacity

0 引言

当前,中国火灾安全形势仍然严峻,每年均有大量的建筑受到火灾作用^[1]。作为应用最广泛的混凝土结构的抗火性能持续受到国内外科研人员的关注。对于既有混凝土结构,随着使用年限的增加,出现耐久性问题也愈发明显。Metha 等^[2]认为影响混凝土耐久性的因素按重要性递减的顺序排列依次为钢筋锈蚀、冻融破坏、侵蚀环境下材料的物理化学变化。锈蚀引起钢筋混凝土结构性能退化的主要原因有三点^[3]:①锈蚀使得钢筋截面面积减小,蚀坑附近发生应力集中;②锈蚀导致钢筋与混凝土之间的黏结性能发生退化;③混凝土保护层开裂、剥落,构件的有效受力面积减小。国内外开展了大量锈蚀钢筋混凝土构件的力学性能研究。Maaddawy 等^[4]研究发现,锈蚀会导致混凝土梁极限荷载降低,且与钢筋横截面面积的减少成正比。Du 等^[5]指出,锈蚀不仅会降低混凝土梁的抗弯能力,还会改变其破坏模式。Jnaid 等^[6]研究发现,对于严重锈蚀混凝土梁,其承载力下降的主要原因是锈蚀钢筋截面面积和极限荷载均下降;对于微锈蚀混凝土梁,其力学性能降低的主要原因是钢筋与周围混凝土之间的黏结性能下降。Sobhan 等^[7]通过试验得出结论,所有暴露火灾中的锈蚀混凝土梁剩余抗弯承载力都显著低于暴露火灾中的未锈蚀混凝土梁。刘文^[8]试验发现,相比未锈蚀混凝土梁,相同条件下纵筋锈蚀率为 2.37% 的混凝土梁极限承载力下降 9.88%,证明锈蚀损伤对结构高温承载力有一定的影响。

既有混凝土结构出现钢筋锈蚀后仍可能需要继续服役,因此仍有可能遭受火灾作用。Ba 等^[9]的研究发现,由于空气的热扩散系数高于混凝土,锈蚀导致的裂缝增加了混凝土内部锈蚀钢筋的升温速率,加剧混凝土结构高温时的承载力退化。Porcari 等^[10]的试验研究得出,在火灾暴露期间,随着钢筋混凝土梁锈蚀率的增加,在任何给定时间内达到的挠度都会增大,如与未锈蚀混凝土梁相比,锈蚀率为 7.5% 的梁受火后 40 min 的挠度高出 40%。Ba 等^[9]指出受拉钢筋锈蚀改变混凝土梁的破坏模式,明显降低其耐火极限。锈蚀率为 17.4% 的梁耐火极限仅为未锈蚀梁的 58%。王吉祥等^[11]研究了锈蚀钢筋混凝土梁在热力耦合共同作用下的力学性能变化趋势,得出高温作用会加剧锈蚀钢筋混凝土梁发生破坏。苗吉军等^[12]对不同锈蚀程度的混凝土梁进行火灾试验,结果表明,钢筋锈蚀对混凝土梁抗火性能影响显著,锈胀裂缝宽度愈大,试件高温后受弯承载力损失越大,最大下降比例达到 25.6%。Tariq 等^[13]研究了高温(400 °C 和 600 °C)后锈蚀混凝土梁(锈蚀率为 4% 和 8%)的残余力学性能,结果表明,高温后锈蚀梁的载荷-挠度行为显著劣化。

目前关于钢筋锈蚀和火灾共同影响下的混凝土梁力学性能的研究仍然相对较少,且主要集中在锈蚀混凝土梁耐火极限的研究上,对火灾后锈蚀混凝土梁的残余力学性能鲜有研究。本文考虑锈蚀率和受火时间的影响,按照 ISO834 标准升温曲线,进行 9 根锈蚀钢筋混凝土梁的火灾试验,并研究其受火后的残余抗弯性能变化规律。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

考虑纵筋锈蚀率和受火时间对钢筋混凝土梁力学性能的影响,设计并制作了9根钢筋混凝土梁试件,试件尺寸均为 $3000\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,均在底部配置2根16号受拉纵筋、顶部配置2根12号的架立筋,箍筋为 $\phi 8@100$,试件尺寸与配筋如图1所示。纵筋设计锈蚀率分别为0%、5%、15%,受火时间为0、60、120 min,保护层厚度均为20 mm,各试件设计参数见表1。试件采用强度等级为C30的商品混凝土进行浇筑,该混凝土标准养护28 d后其常温下测得的立方体抗压强度为45.2 MPa,棱柱体抗压强度为26.9 MPa。钢筋的材性试验结果见表2。

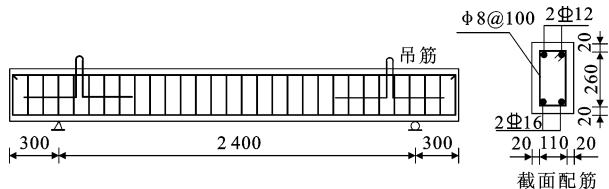


图1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Size and reinforcement of specimen (unit:mm)

表1 试验设计参数

Table 1 Experimental design parameters

试件编号	目标锈蚀率/%	实际锈蚀率/%	通电时间/d	受火时间/min
B1	0	0.0	0.0	0
B2	0	0.0	0.0	60
B3	0	0.0	0.0	120
B4	5	4.9	31.5	0
B5	5	5.6	31.5	60
B6	5	6.2	31.5	120
B7	15	11.0	94.5	0
B8	15	10.0	94.5	60
B9	15	13.5	94.5	120

图2 热电偶布置(单位:mm)

Fig. 2 Thermocouple arrangement (unit:mm)

表2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of reinforcements

钢筋类别	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%
Ⅱ 16	421	563	2.04	17.6
Ⅱ 12	423	559	2.03	17.9
Φ8	312	423	2.01	22.3

为了研究火灾试验过程中混凝土梁内部的温度变化情况,在梁试件内部布置镍铬-镍硅K型热电偶,截面温度测点布置见图2。

1.2 试验方案

1.2.1 电化学加速锈蚀试验

本文采用半浸泡电化学加速锈蚀方法获得锈蚀混凝土梁,诱发钢筋锈蚀的主要原因是氯盐介质^[14],因此试件养护完成后将其置于5%的氯化钠溶液中,充分湿润后,将纵筋上引出的导线连接到直流稳压电源的阳极,阴极连接到铜棒并将其置于溶液中,见图3。为了保证纵筋锈蚀时箍筋不发生锈蚀,在绑扎钢筋时对二者接触位置进行了绝缘处理。

根据法拉第定律制定了加速锈蚀方案。已有研究表明,当电化学加速锈蚀的电流密度不大于 $200\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,加速锈蚀与自然锈蚀的锈蚀产物、锈胀应力等差别不大^[15],并且加速锈蚀与自然锈蚀钢筋力学性能退化规律相似^[16],因此本文电流密度大小控制在 $200\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右。为了确定锈蚀钢筋的实际锈蚀率,在梁试件静载试验结束后,对其进行破型,取出受拉锈蚀纵筋,然后对其进行清洗和干燥后称重,得到其质量锈蚀率,质量锈蚀率 η_s 计算方法见式(1),通电时间与实际锈蚀率见表1。

$$\eta_s = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (1)$$

式中: m_0 为钢筋在锈蚀前的质量; m 为钢筋在锈蚀后的质量。

1.2.2 火灾试验

火灾试验在水平火灾炉中进行,梁试件三面(底

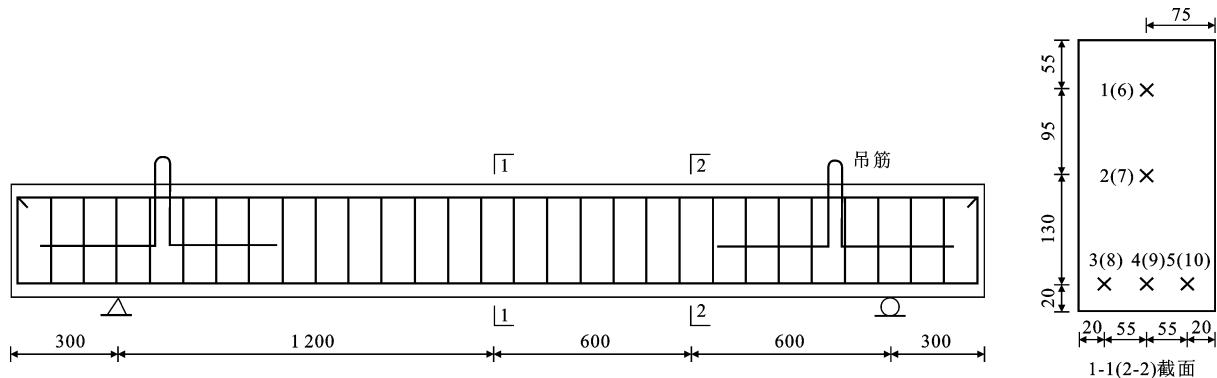




图3 加速锈蚀装置

Fig. 3 Accelerated corrosion device

面及两个侧面)受火,水平火灾炉现场见图4。本文梁试件分2批进行火灾试验,其中第1批为受火时间60 min的B2、B5和B8,第2批为受火时间120 min的B3、B6和B9。升温曲线采用ISO834标准升温和曲线,炉内各点温度及炉温均采用计算机自动采集。待达到受火时间后熄火,自然冷却至室温,此过程中继续采集温度数据。



图4 水平火灾炉现场

Fig. 4 Horizontal fire furnace site

1.2.3 高温后静载试验

静载试验采用最大荷载为500 kN的电液伺服万能试验机进行,按照两点对称加载方式进行加载,试件两端简支在支座上,支座固定在钢底座上,上部千斤顶通过分配梁进行加载,加载装置及测点布置见图5。

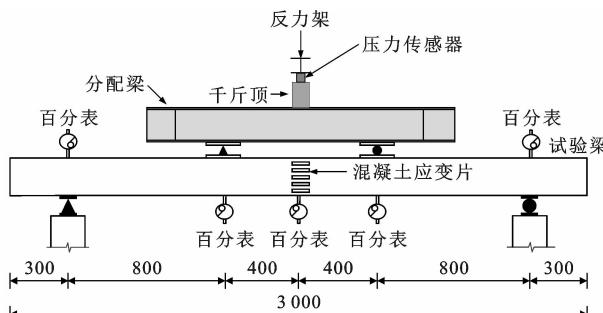


图5 加载装置及测点布置(单位:mm)

Fig. 5 Loading device and measurement point arrangement (unit:mm)

加载试验按照《混凝土结构试验方法标准》^[17]进行,即先进行预加载,然后正式加载,首先按力控制进行加载,每级加载为6 kN(极限承载力的5%),对于破坏十分严重的情况可采用2 kN荷载级)。加载至接近预估极限荷载后采用位移控制加载,按照跨中挠度每增加3 mm为一级进行加载直至试件破坏,试件的破坏标准参见《混凝土结构试验方法标准》^[17]。试验过程中通过压力传感器测得施加的荷载,通过百分表测得梁试件的跨中挠度。

2 试验结果及分析

2.1 加速锈蚀试验结果

加速锈蚀试验结束后,对锈胀裂缝的宽度及分布状况进行了观察并记录。借助裂缝观测仪可以发现在梁侧面纵向钢筋所在位置处出现时断时续的细小纵向裂缝,裂缝处会有一定的溢锈存在。加载试验结束后测量底部纵向受拉钢筋的实际锈蚀率,其实际锈蚀率如表1所示。

2.2 火灾试验结果及分析

2.2.1 表观现象

待试件自然冷却至室温,取出试件并观察其表观形态,发现受火面呈黄棕色,未受火面呈青灰色,侧面呈现出水分蒸发后留下的水渍,部分试件的两个侧面及底面发生不同程度的爆裂,并且锈蚀试件的爆裂情况明显比非锈蚀试件严重,这可能与采用通电锈蚀得到的锈蚀试件含水率高于未锈蚀试件有关。

2.2.2 温度分析

钢筋和混凝土的温度测点位置如图2所示。火灾试验中各测点温度-时间关系见图6。由图6可知:不同构件的升温曲线相似,随着与受火面距离的增加,相同时刻的测点温度逐渐降低。各构件混凝土测点的温度在升温前期温度缓慢上升,停火后温度仍会继续上升一段时间,这意味着混凝土的大部分区域在达到历经最高温度时处于停火后的降温阶段。原因是停火后混凝土内部热量仍在由外部温度较高点向内部温度较低点传递,直至温度达到平衡。在100℃左右,混凝土各个测点的温度会出现一段时间长短不同的平台阶段。同时还观察到,离受火面越远,温度平台越长。各构件钢筋测点温度的升温趋势基本相同,点火后随着时间的增加,温度逐渐升高,熄火后钢筋测点温度迅速降低。这是因为钢筋温度测点位于梁的角部,底面和侧面均直接受火,因此对火场温度反应迅速,同时钢筋温度测点附近存在横向锈胀裂缝,从而加速了热量的传输。

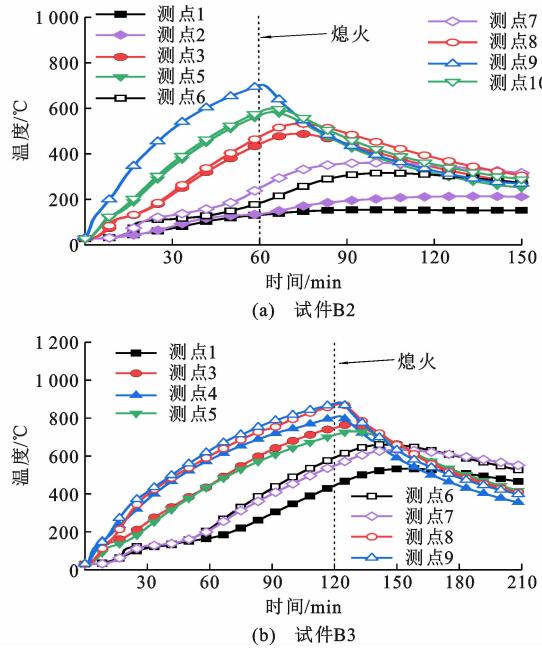


图 6 温度-时间曲线

Fig. 6 Temperature-time curves

2.3 高温后静载试验结果及分析

2.3.1 破坏过程及形态

在受荷初期,试件纯弯区底部最先出现细小裂缝。随着荷载逐渐增大,在弯剪区域,裂缝数量逐渐增多,纯弯区域的裂缝从梁底呈垂直方向向混凝土梁顶部发展。当荷载加至极限荷载时,挠度发展迅速,跨中处裂缝迅速扩展,裂缝宽度或跨中挠度达到限值,混凝土梁失去承载能力。

图 7 为各工况下梁破坏时的裂缝分布。由图 7 可知,高温后锈蚀混凝土梁的正截面破坏形态与常温下未锈蚀混凝土梁基本相同,均表现为典型弯曲破坏。整体上受火时间越长,破坏时纯弯区横向裂缝越少,这是由高温作用降低了钢筋与混凝土黏结性能引起的。另外,钢筋锈蚀使其与混凝土的黏结性能加剧劣化,但本文试验结果显示钢筋锈蚀对横向裂缝的间距影响不明显。试验结果也显示受火时间越长,加载时裂缝的发展速率越高。

2.3.2 荷载-挠度曲线分析

试验得到的高温后锈蚀混凝土梁的荷载-挠度曲线如图 8 所示。统计得到的屈服荷载和极限荷载如表 3 所示。由图 8(a)可知,相比未锈蚀梁 B1 和微锈蚀梁 B4,严重锈蚀梁 B7 极限承载力明显下降,但是未受火的锈蚀混凝土梁在锈蚀率较小(小于 5%)时,锈蚀几乎不会削弱构件的抗弯承载能力^[18]。另外相比未锈蚀梁,锈蚀梁的抗弯刚度有所下降,梁 B7 的刚度下降明显。这是因为高温(温度



图 7 梁破坏时裂缝分布

Fig. 7 Crack distribution when beam is failure

大于等于 400 °C)和严重锈蚀对黏结性能有弱化作用。由图 8(b)和图 8(c)可知:梁 B2 的荷载-挠度曲线分 3 个阶段,与常温下未锈蚀试件类似,但梁 B5 (锈蚀率为 5.6%)处于加载的后期阶段时,其荷载-挠度曲线与未锈蚀梁试件几乎重合甚至超过。这是由于在锈蚀率较小时,钢筋与混凝土的黏结应力有所增加^[19],两者协同工作能力增强。研究发现微锈蚀(锈蚀率小于 2.4%)导致黏结刚度增大趋势减缓,黏结强度小幅增大或不变。在 100~200 °C 之间时,黏结强度达到最大值。随着锈蚀率进一步增加,锈蚀混凝土梁的荷载-挠度曲线明显下移,这表明混凝土梁的刚度和承载能力受到钢筋锈蚀的影响很大。由图 8(d)可知,对于相同锈蚀程度的混凝土梁,随着受火时间的延长,钢筋和混凝土材料强度下降,黏结性能降低,这严重削弱了锈蚀梁的残余承载力和刚度,荷载-挠度曲线会发生下移并表现出明显的两阶段特征。

2.4 屈服荷载和极限承载力

2.4.1 锈蚀率对屈服荷载和极限承载力的影响

图 9 为锈蚀率对锈蚀混凝土梁高温后屈服荷载

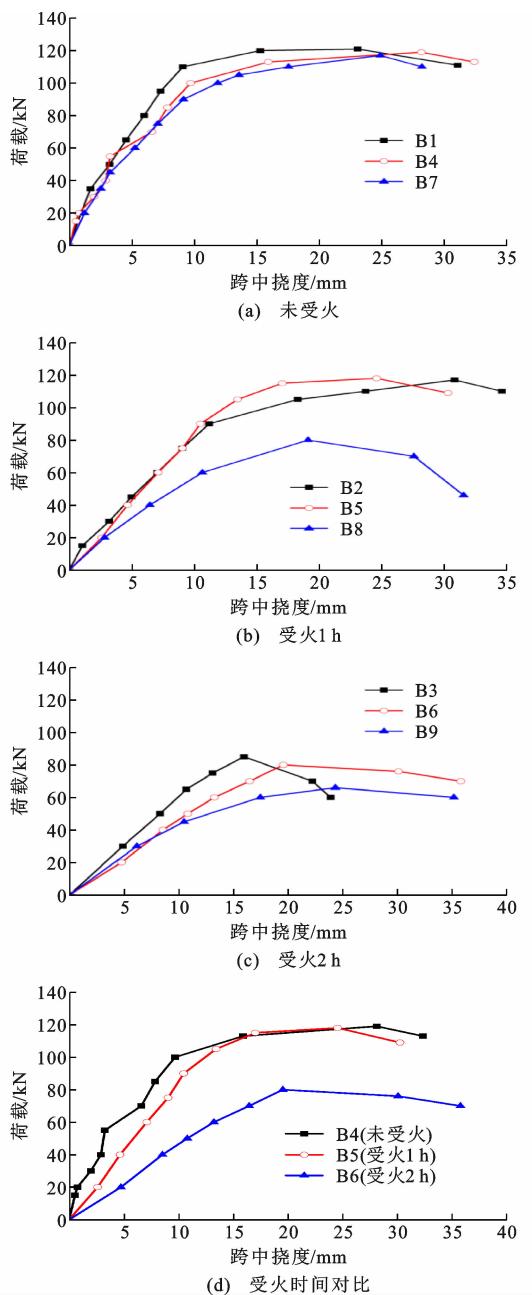


图 8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves

表 3 梁抗弯试验结果

Table 3 Bending test results of beams

试件 编号	实际锈蚀 率/%	受火时间/ min	屈服荷载/ kN	极限荷载/ kN
B1	0.0	0	110	121
B2	0.0	60	90	117
B3	0.0	120	65	85
B4	4.9	0	100	119
B5	5.6	60	90	118
B6	6.2	120	70	80
B7	11.0	0	90	117
B8	10.0	60	60	80
B9	13.5	120	60	69

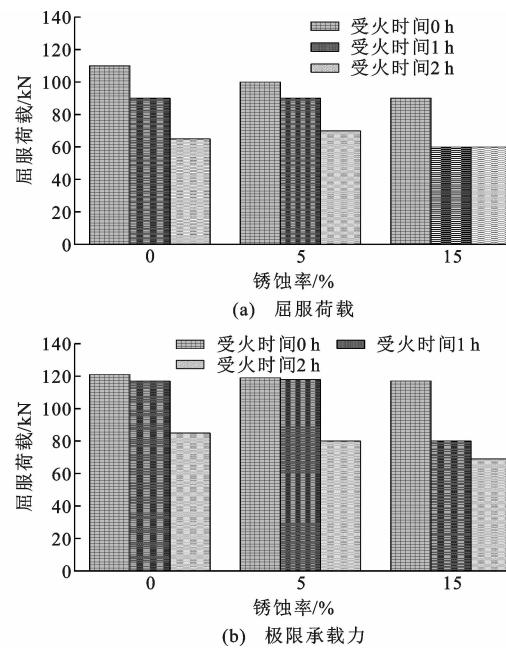


图 9 锈蚀率对锈蚀混凝土梁高温后屈服荷载和极限承载力的影响

Fig. 9 Effect of corrosion degree on yield load and ultimate load capacity of concrete beams after fire

和极限承载力的影响。可以看出,常温下锈蚀率为4.9%、11%的梁其屈服荷载分别下降了10%和20%。受火后微锈蚀梁的屈服荷载变化不大,但是相比未锈蚀梁,严重锈蚀梁的屈服荷载明显下降。这主要是由于钢筋锈蚀后其截面面积减小,屈服荷载明显下降^[20]。

对于未受火梁,随着锈蚀率的增大,混凝土梁的极限承载力有所下降,如实际锈蚀率为11%的梁B7,其极限承载力比未锈蚀梁B1减小了3.1%。在受火1 h的情况下,锈蚀率为5.6%的梁B5极限承载力下降不大,但实际锈蚀率为10%的梁B8极限承载力较相同条件下的未锈蚀梁下降了13.8%。在受火2 h的情况下表现出相似的规律,锈蚀率为6.2%的梁B6极限承载力下降不大,梁B6的极限承载力比实际锈蚀率为13.5%的梁B9大15.9%。这说明常温下钢筋锈蚀对其极限承载力影响不大,但是高温后钢筋锈蚀对混凝土梁的残余承载能力影响很大。原因是高温作用加速锈蚀钢筋力学性能下降。Topcu等^[21]研究发现当锈蚀钢筋受到高于500℃的温度作用后,相比常温下锈蚀率相同的钢筋,其力学性能将加速下降。

2.4.2 受火时间对屈服荷载和极限承载力的影响

图10为受火时间对锈蚀混凝土梁高温后屈服荷载和极限承载力的影响。从图10中可以看出,高

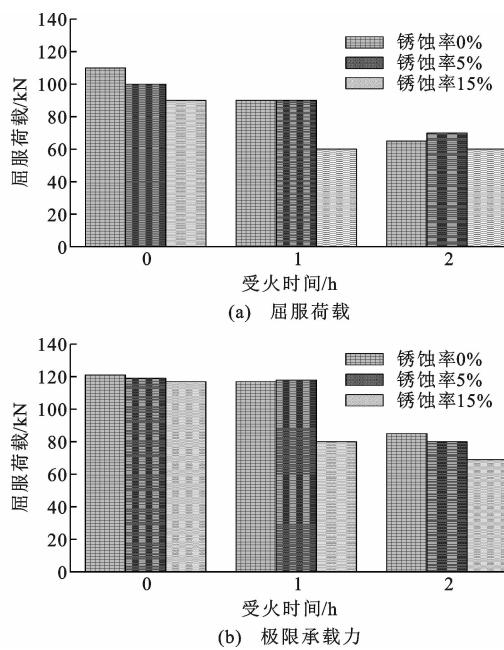


图 10 受火时间对锈蚀混凝土梁高温后屈服荷载和极限承载力的影响

Fig. 10 Effect of fire time on yield load and ultimate load capacity of corroded concrete beams after fire

温作用对混凝土梁的屈服荷载影响显著,对于未锈蚀梁,如经历 1 h 和 2 h 的火灾作用后,其屈服荷载分别下降了 18.2%,40.9%。目标锈蚀率为 5% 的混凝土梁屈服荷载变化规律与未锈蚀梁相似,但是目标锈蚀率为 15% 的混凝土梁火灾后其屈服荷载下降 30% 左右。

对于未锈蚀梁,随受火时间的延长,高温后混凝土梁的屈服荷载和极限荷载较未受火混凝土梁发生较大程度下降,其中受火时间 1 h 的梁 B2 极限荷载下降 3.3%,受火时间 2 h 的梁 B3 极限荷载下降 29.8%。对于锈蚀梁,目标锈蚀率为 5% 的梁火灾后极限承载力与未锈蚀梁表现出相近的规律。对于目标锈蚀率为 15% 的梁,尽管梁 B8 的实际锈蚀率(10%)小于梁 B7 实际锈蚀率(11%),但受火 1 h 后,梁 B8 极限承载力比未受火的梁 B7 下降了 31.6%,受火 2 h 后,承载力下降了 41.0%。这说明相比常温环境,火灾对严重锈蚀梁的承载力影响更大。原因可能是严重锈蚀构件存在明显的锈胀裂缝,受拉钢筋经历的最高温度增大,其极限强度降低更多。同时构件截面削弱较多,导致火灾下构件内部混凝土能达到更高的温度,产生更严重的高温损伤。

3 结语

(1) 火灾下混凝土梁受拉钢筋升温速度最快,且

达到的温度最高,锈胀裂缝能增大受拉钢筋的温度。由于混凝土的热惰性,其最高温度出现在停火的降温段。

(2) 火灾后锈蚀混凝土梁的破坏模式与未锈蚀梁相似,呈现典型的弯曲破坏。整体上受火时间越长,锈蚀率越大,破坏时纯弯区横向裂缝越少。由于其抗弯刚度受到高温作用和钢筋锈蚀的影响,其弯曲变形明显变大。

(3) 常温下钢筋锈蚀对混凝土梁的屈服荷载影响较大,但对其极限荷载影响较小。经历火灾作用后,微锈蚀梁的受力变化规律与常温下相似,但是严重锈蚀梁的极限荷载明显下降,如锈蚀率为 13.5% 的梁,受火 2 h 后其极限荷载下降幅度达到 15.9%。

(4) 受火时间对微锈蚀梁的力学性能影响与未锈蚀梁相似,屈服荷载和极限荷载随着受火时间的增加而逐渐下降。对于严重锈蚀梁,火灾作用加速锈蚀混凝土梁的承载力衰退,如对于锈蚀程度相近的混凝土梁,受火 1 h 后极限承载力比未受火梁下降了 31.6%,而未锈蚀梁受火 1 h 后极限承载力仅下降了 9.1%。

参考文献:

References:

- [1] 张玉涛,马婷,林姣,等.2007—2016年全国重特大火灾事故分析及时空分布规律[J].西安科技大学学报,2017,37(6):829-836.
ZHANG Yutao, MA Ting, LIN Jiao, et al. Analysis of fire incidents and characteristics of spatio-temporal distributions for serious fires from 2007 to 2016 in China[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(6): 829-836.
- [2] MEHTA P K, BURROWS R W. Building durable structures in the 21st century[J]. Indian Concrete Journal, 2001, 75(7): 437-443.
- [3] 孙晓燕,王海龙,于凤荣.锈损不锈钢钢筋混凝土梁受弯性能退化试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(6):160-168.
SUN Xiaoyan, WANG Hailong, YU Fengrong. Experimental study on degradation of flexural performance of corroded stainless steel bars reinforced concrete beam[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 160-168.
- [4] MAADDAWY T E, SOUDKI K, TOPPER T. Long-term performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5):649-656.

- [5] DU Y, CLARK L A, CHAN A. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3):285-293.
- [6] JNAID F, ABOUTAHA R S. Residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2016, 119:198-216.
- [7] SOBHAN K, REDDY D V, MARTINEZ F. Fire resistance of corroded high-strength structural concrete [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2020, 12(1):17-34.
- [8] 刘文. 锈蚀钢筋混凝土梁高温性能与残余承载力试验研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
LIU Wen. Experimental research on high temperature performance and residual bearing capacity of RC beams with corrosion damage[D]. Qingdao: Qingdao University of Tehcnology, 2018.
- [9] BA G Z, MIAO J J, ZHANG W P, et al. Influence of reinforcement corrosion on fire performance of reinforced concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213:738-747.
- [10] PORCARI G L, ZALOK E, ISGOR O. Fire performance of corrosion-damaged reinforced concrete beams [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2012, 3(4):311-326.
- [11] 王吉祥, 刘文. 钢筋混凝土梁受损工况下高温试验研究[J]. 工程建设, 2019, 51(7):13-18.
WANG Jixiang, LIU Wen. Experimental study on high temperature performance of corroded reinforced concrete beams [J]. Engineering Construction, 2019, 51(7):13-18.
- [12] 苗吉军, 刘芳, 刘延春, 等. 考虑海洋环境损伤的钢筋混凝土梁抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9):64-71.
MIAO Jijun, LIU Fang, LIU Yanchun, et al. Experimental research on fire resistance performance for RC beams with damages caused by marine environment [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (9): 64-71.
- [13] TARIQ F, GAIKWAD M, BHARGAVA P. Analysis of behaviour of corroded RC beams exposed to elevated temperatures[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42:102508.
- [14] 刘芳. 海洋环境损伤后的混凝土梁抗火性能试验研究与数值分析[D]. 青岛:青岛理工大学, 2014.
LIU Fang. Experimental research and numerical simulation on fire resistance performance for R. C. beams with damages caused by marine environment [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.
- [15] 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.
- [16] ZHANG W P, SONG X B, GU X L, et al. Tensile and fatigue behavior of corroded rebars[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34:409-417.
- [17] 混凝土结构试验方法标准:GB 50152—1992[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
Testing methods of concrete structure: GB 50152—1992 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- [18] 惠云玲, 李荣, 林志伸, 等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6):15-19, 58.
HUI Yunling, LI Rong, LIN Zhishen, et al. Experimental studies on the property before and after corrosion of rebars in basic concrete members [J]. Industrial Construction, 1997, 27(6):15-19, 58.
- [19] KEARSLEY E P, JOYCE A. Effect of corrosion products on bond strength and flexural behaviour of reinforced concrete slabs[J]. Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 2014, 56(2):21-29.
- [20] BA G Z, ZHANG W P, MIAO J J. Tensile behavior of corroded steel bars at elevated temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33 (4): 040210128.
- [21] TOPCU I B, BOGA A R, DEMIR A. The effect of elevated temperatures on corroded and uncorroded reinforcement embedded in mortar[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11):2101-2107.