

文章编号:1007-9629(2026)03-0340-07

硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC 界面劣化机理

卢丽敏^{1,2,*}, 孙锦文², 吴少华³, 张莹莹¹

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点试验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116;
3. 徐州市建设工程检测中心有限公司, 江苏 徐州 221003)

摘要:以受硫酸盐侵蚀的玄武岩纤维混凝土(BFRC)为研究对象,系统探究温度(20~700 °C)与侵蚀龄期(0~210 d)对钢筋/BFRC 界面黏结性能的影响,并建立了相应的黏结-滑移模型。结果表明:在耦合作用下,当温度低于 300 °C 时,界面黏结强度随侵蚀龄期总体上呈先增后减趋势;当温度高于 300 °C 时,界面黏结强度随侵蚀龄期持续下降。高温促使硫酸盐侵蚀产物分解,既抵消了侵蚀初期对钢筋与 BFRC 界面黏结性能的提升效应,又进一步加剧了钢筋与 BFRC 界面结构的劣化。

关键词:玄武岩纤维混凝土;硫酸盐侵蚀;耦合损伤;黏结性能;本构模型

中图分类号:TU528.57

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.008

Degradation Mechanism of Steel Bar and BFRC Interface under Coupled Action of Sulfate Erosion and High Temperature

LU Limin^{1,2,*}, SUN Jinwen², WU Shaohua³, ZHANG Yingying¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Xuzhou Construction Engineering Testing Center Co., Ltd., Xuzhou 221003, China)

Abstract: Basalt fiber reinforced concrete (BFRC) subjected to sulfate attack was taken as the research object. The effects of temperature (20–700 °C) and exposure duration (0–210 d) on the bond performance at the steel bar and BFRC interface were systematically investigated, and a corresponding bond-slip model was established. The results show that under the coupled action, when the temperature is below 300 °C, the bond strength generally first increases and then decreases with the increased exposure ages; when the temperature is above 300 °C, the bond strength continuously declines with the prolonged exposure ages. High temperature promotes the decomposition of sulfate attack products, which not only offsets the enhancing effect on the interfacial bond performance in the initial stage of attack but also further exacerbates the deterioration of the interface structure between the steel bar and BFRC.

Key words: basalt fiber reinforced concrete; sulfate erosion; coupled damage; bonding performance; constitutive model

中国西部地区广泛分布的盐湖及盐渍土环境中富含硫酸盐介质,在此类环境中服役的混凝土结构

(尤其是隧道结构)长期受硫酸盐侵蚀,不仅会导致混凝土材料性能退化,还会造成钢筋与混凝土的黏

收稿日期:2025-05-22; 修订日期:2025-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808544)

第一作者(通讯作者):卢丽敏(1982—),女,吉林延边人,中国矿业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:limin.lu@cumt.edu.cn

结性能下降,严重威胁混凝土结构的整体性与安全性^[1-5]。此外,隧道在服役期间火灾事故频发^[6],其火灾后的结构安全评估,依赖于侵蚀损伤与火灾高温耦合作用下的材料性能及界面黏结性能^[7-8]。研究表明,钢筋/BFRC界面黏结强度的下降与高温后混凝土物理力学性能的衰减规律密切相关,温度对黏结强度的影响尤为显著^[9-11]。

玄武岩纤维混凝土(BFRC)能够有效延缓硫酸盐侵蚀造成的混凝土劈裂抗拉强度的损失^[12],提高钢筋/混凝土界面的黏结性能和耐久性^[13-14]。同时,玄武岩纤维具备优越的高温性能,能有效抑制火灾下混凝土裂缝的扩展,提高其残余黏结强度^[15]。目前,针对单一影响因素下钢筋/BFRC界面的黏结性能已有较多研究^[16-17],但其在耦合作用下的退化机理仍需要进一步探索。

本研究借助非中心拉拔试验,获得了硫酸盐侵

蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC的界面性能特征,定义了硫酸盐侵蚀损伤系数与高温损伤系数,进而建立了耦合作用下钢筋/BFRC界面的黏结-滑移(τ - s)模型,以期为复杂服役环境中结构的耐久性设计及火灾安全评估提供理论支撑。

1 试验

1.1 原材料及配比

钢筋混凝土拉拔试验选用C40等级混凝土,其基准材料用量依据JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》确定。试验用纤维为长度18 mm的短切玄武岩纤维(BF),其主要物理性能如表1所示。为兼顾BFRC的抗压强度(f_c)与劈裂抗拉强度优化目标,通过系列试验验证,将玄武岩纤维最优掺量(体积分数)确认为0.15%^[18],对应的BFRC配合比如表2所示。

表1 玄武岩纤维物理性能
Table 1 Physical property of basalt fiber

Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Elongation/%	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Length/mm	Diameter/ μm
2 650	3.1	4 500	102	18	22

表2 BFRC配合比
Table 2 Mix proportion of BFRC

Mixing proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)					$\varphi(\text{BF})/\%$	m_w/m_c
Cement	Sand	Stone	Water-reducing admixture	Water		
400.00	703.06	1 054.59	0.80	175.00	0.15	0.43

Note: m_w/m_c —Water-cement ratio.

1.2 构件设计

试件依据GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》设计制作。试件成型后自然养护24 h拆模,随后移入标准养护室($(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度95%)继续养护至28 d,养护期满时测得BFRC抗压强度为48.32 MPa。拉拔试件尺寸为160 mm \times 160 mm \times 160 mm,无黏结段布置于有黏结段的两端,黏结长度设计为钢筋直径的5倍(对应长度80 mm);保护层厚度(c)控制为20 mm,钢筋采用形式偏向放置。图1为拉拔试件的结构及尺寸示意图。

同时制作尺寸为100 mm \times 100 mm \times 100 mm的立方体试件,用于同步测定硫酸盐侵蚀深度(h)与抗压强度,每组设置3个平行试件,试验结果取其平均值。

1.3 硫酸盐侵蚀试验

为加速硫酸盐侵蚀进程,采用质量分数为10%的 Na_2SO_4 溶液开展干湿循环试验,以“室温浸泡5 d+室温干燥5 d”为1个干湿循环周期。试验设定目标侵蚀龄期(t)为0、90、120、150、180、210 d。针对拉拔试件,采用单面硫酸盐侵蚀方案,通过玻璃胶密封试件除保护层一侧的其余表面,仅保留该侧作为侵蚀面;随后

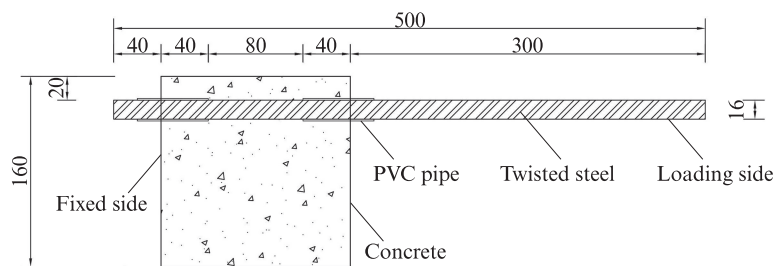


图1 拉拔试件的结构及尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and dimension of pull-out specimen(size:mm)

安装定制封闭水槽,将 Na_2SO_4 溶液注入水槽中,确保侵蚀面与溶液充分接触。与拉拔试件同期浇筑的立方体试件,同步开展相同试验参数的硫酸盐干湿循环试验。硫酸盐含量(w ,质量分数)测定采用化学滴定法,具体流程如下:对不同侵蚀龄期的试件,沿深度方向精准钻取不同层位的混凝土粉末样品;向样品中加入 BaCl_2 溶液,反应生成 BaSO_4 白色沉淀;通过沉淀定量分析,计算得到混凝土中的 SO_4^{2-} 含量。

1.4 高温试验

当试件达到侵蚀龄期后,立即取出并开展高温试验。试验采用高温电炉加热,设定升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,将试件分别加热至目标温度($T=100、300、500、700\text{ }^\circ\text{C}$);待炉温达到预设目标温度后,恒温保持3 h,确保试件内外温度均匀一致;恒温结束后关闭电炉,让试件自然冷却至室温。

1.5 拉拔试验

拉拔试验采用WAW-500J型万能试验机开展。试验加载速率设定为 $0.01\text{ mm}/\text{s}$,自动采集荷载数据。同时,在加载端与固定端分别布置位移计,用于测量两端的滑移值。

基于试验数据,利用式(1)计算得到常温下钢筋/BFRC界面的黏结强度(τ_u ,MPa)。

$$\tau_u = \frac{F_u}{\pi dL} \quad (1)$$

式中: F_u 为极限荷载,kN; d 为钢筋直径,mm; L 为锚固长度,mm。

由于加载过程中钢筋发生弹性变形,直接影响加载端钢筋滑移量的测量精度。因此,计算加载端滑移量时,需扣除加载端钢筋的弹性变形量(Δs),钢筋/BFRC界面滑移量(s ,mm)取两端滑移量的均值,表达式为:

$$s = \frac{(s_L - \Delta s) + s_F}{2} \quad (2)$$

式中: s_L 为加载端钢筋滑移值,mm; s_F 为自由端钢筋滑移值,mm。

2 结果与分析

2.1 不同深度处的硫酸盐含量及硫酸盐侵蚀深度

图2展示了BFRC不同深度处的硫酸盐含量。由图2可见:BFRC基体初始硫酸盐含量约为0.31%;表层0~5 mm处硫酸盐含量随腐蚀龄期快速上升,90 d后趋于稳定;5~10 mm深度硫酸盐含量在90 d后开始增加,峰值约为0.67%;10~15 mm深度硫酸盐含量在210 d开始出现小幅上升,说明硫酸盐侵蚀深度约为15 mm。

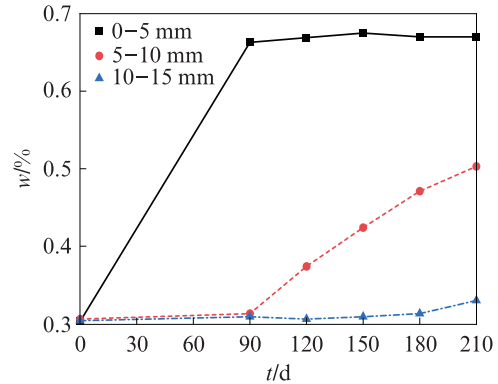


图2 BFRC不同深度处的硫酸盐含量

Fig. 2 Sulfate contents at different depths in BFRC

2.2 硫酸盐侵蚀对BFRC力学性能和黏结性能的影响

以强度折减系数(η)来表征BFRC的抗压强度、劈裂抗拉强度以及钢筋/BFRC界面黏结强度随侵蚀龄期的变化。强度折减系数随侵蚀龄期的变化曲线如图3所示。由图3可见:(1)常温环境下,BFRC的抗压强度、劈裂抗拉强度及钢筋/BFRC界面黏结强度均随侵蚀龄期的延长呈先增后降的变化特征。(2)侵蚀初期,硫酸盐与混凝土组分反应生成的石膏和钙矾石填充内部孔隙,使混凝土结构更趋密实,进而提升了其抗压强度;同时,胶凝材料与硫酸盐的反应过程增加了钢筋/BFRC界面的表面粗糙度,显著改善了劈裂抗拉强度。(3)进入侵蚀中后期,胶凝材料因持续反应过度消耗导致胶结能力减弱,劈裂抗拉强度随之下降,此时钢筋/BFRC界面黏结强度与劈裂抗拉强度呈一致的变化趋势;而抗压强度在侵蚀产物持续填充孔隙作用下达到峰值,随后受内部微裂缝扩展与贯通的影响而逐渐衰减。

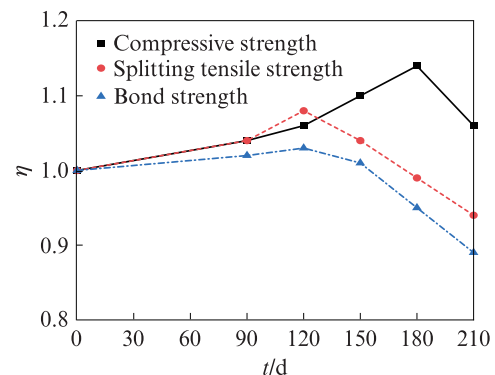


图3 BFRC抗压强度、劈裂抗拉强度以及钢筋/BFRC界面黏结强度随侵蚀龄期的变化

Fig. 3 Changes of compressive strength, splitting tensile strength of BFRC and bond strength between steel bars and BFRC with increased erosion ages

2.3 硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC界面的黏结-滑移曲线

图4为硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC界面的黏结-滑移(τ - s)曲线。由图4可见:(1)随温度升高,钢筋/BFRC界面黏结强度降低,峰值滑移(s_p)增大。(2)温度低于300℃时,黏结强度随滑移量线性上升,此时黏结强度主要依靠钢筋横肋与混凝土的机械咬合力,黏结-滑移曲线无下降段,呈脆性劈裂破坏;温度高于500℃时,破坏过程分为滑移、下降和残余3个阶段,且下降段随温度升高趋于平缓,高温加剧两者变形差异,进而引发膨胀裂缝,导致机械咬合力减小,破坏模式转变为劈裂-拔出破坏。(3)硫

酸盐侵蚀对钢筋/BFRC界面黏结-滑移曲线形态影响较小,但会降低峰值黏结强度,使下降段趋于平缓。

2.4 硫酸盐侵蚀-高温耦合作用对钢筋/BFRC界面黏结强度和滑移量的影响

图5为钢筋/BFRC界面黏结强度和峰值滑移随高温和侵蚀龄期的变化。

由图5可见:(1)随温度升高,钢筋/BFRC界面黏结强度大幅下降,同一温度下界面黏结强度随侵蚀龄期变化较小,高温损伤抵消了硫酸盐侵蚀前期对混凝土强度的增益效果(图5(a));与黏结强度变化趋势相似,峰值滑移量随温度升高迅速增大(图5(b))。(2)温度低于300℃时,侵蚀产物对钢筋/

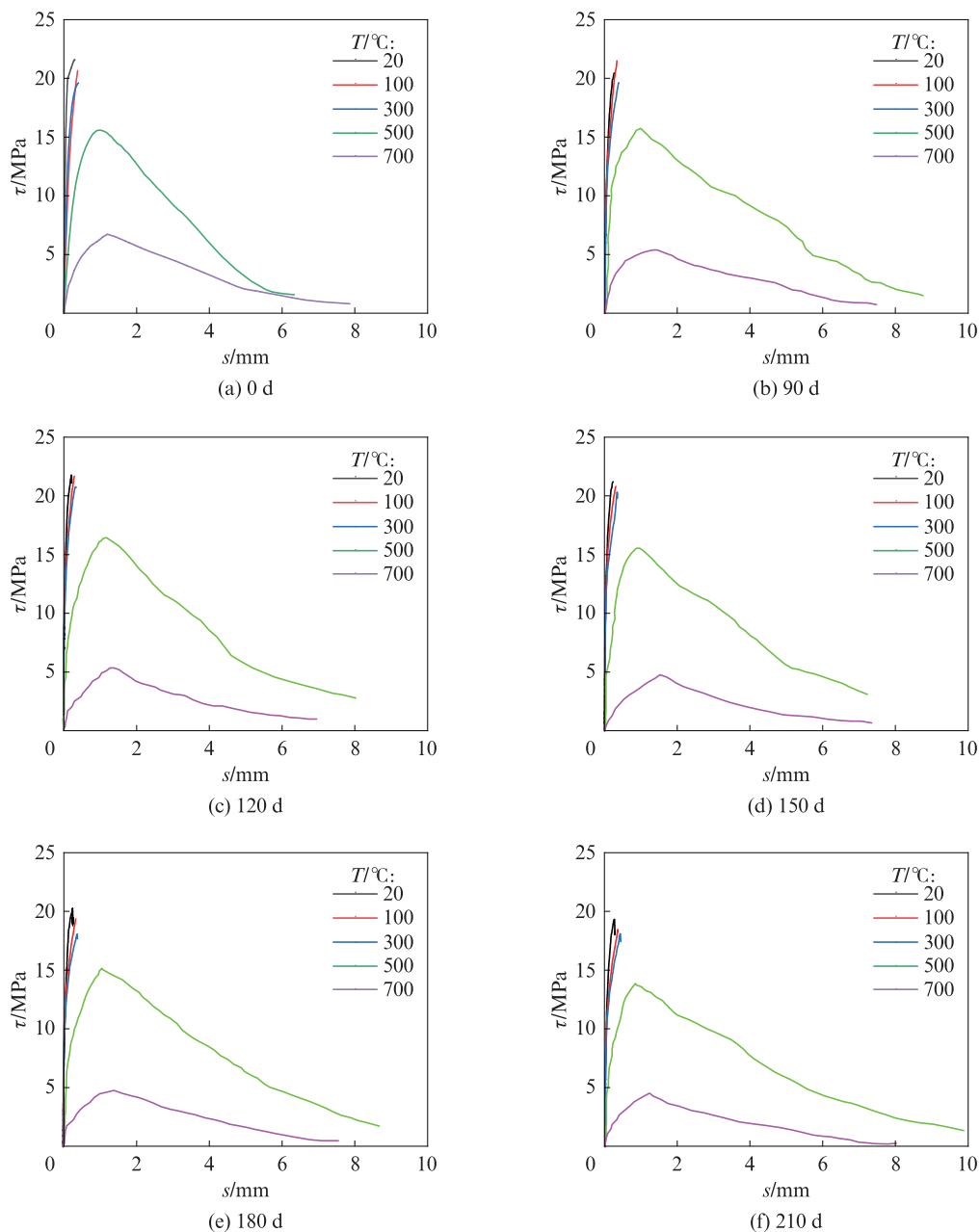


图4 硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC界面的黏结-滑移曲线

Fig. 4 Interface bond-slip curves between steel bars and BFRC after coupled action of sulfate erosion and high temperature

BFRC 界面黏结强度影响呈两阶段:120 d内因孔隙填充,强度小幅上升;150 d后因产物膨胀损伤,强度下降。虽BFRC内部水蒸发、石膏及钙矾石分解导致强度略降,但曲线仍有上升段。(3)500 °C时,水化硅酸钙(C-S-H)凝胶的脱水、氢氧化钙的碳化破坏了化学黏结力,硫酸盐侵蚀产物脱水分解加剧不均匀热膨胀,引发沿钢筋方向的裂缝,黏结强度随侵蚀龄期持续下降且无上升阶段。(4)700 °C时,碳酸钙分解使黏结强度进一步降低,降幅达69.5%~75.7%。硫酸盐侵蚀后的BFRC在高温下,除C-S-H凝胶脱水、骨料-水泥石界面热膨胀差异外,侵蚀产物分解与膨胀引发更严重的界面剥离。当温度高于500 °C时,钢筋/BFRC界面黏结强度降幅比未侵蚀试件高15%~20%^[10,19]。(5)温度超过500 °C后,峰值滑移量大幅增加,700 °C时增幅达3.48~3.64倍。因BFRC强度剧降,钢筋/BFRC界面黏结性能随之急剧劣化,钢筋拔出过程中能量更易耗散,导致滑移提前出现且增速加快。硫酸盐侵蚀龄期对峰值滑移影响不显著,500、700 °C且侵蚀龄期大于120 d时峰值滑移曲线波动属0.01量级,大概率为误差。综上,高温对峰值滑移的影响远大于硫酸盐侵蚀。

3 硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋/BFRC界面的黏结-滑移模型

本文基于文献[8]的三段式钢筋/混凝土界面黏结-滑移本构模型,代入耦合作用下实测的黏结强度与峰值滑移值,提出了硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下的钢筋/BFRC黏结-滑移本构模型。

耦合作用下钢筋/BFRC界面黏结强度($\tau_{T,t}$, MPa)的表达式为:

$$\tau_{T,t} = \alpha_T \cdot k_u \cdot \tau_u \quad (3)$$

式中: α_T 为高温损伤系数; k_u 为硫酸盐侵蚀损伤系数。

其中, k_u 由式(4)确定:

$$k_u = \tau'_u / \tau_u \quad (4)$$

式中: τ'_u 为常温下不同硫酸盐侵蚀龄期时钢筋/BFRC界面黏结强度,MPa。

以硫酸盐侵蚀深度与保护层厚度的比值(h/c)为自变量,以硫酸盐侵蚀损伤系数为因变量,回归得到:

$$k_u = f(h/c) = 17.81 \times (h/c) - 26.41 \times (h/c)^2 + (h/c)^3 - 2.85 \quad (5)$$

以温度为自变量,高温损伤系数为因变量,回归得到:

$$\alpha_T = g(T, t) = aT + bT^2 + cT^3 + d \quad (6)$$

式中: a 、 b 、 c 和 d 为拟合参数。

通过MATLAB软件拟合高温损伤系数,获得钢筋/BFRC界面黏结强度高温损伤系数的拟合参数(表3),拟合结果的相关系数 $R^2 > 0.95$,均方根误差小于0.03,预测值与试验值吻合良好,验证了所建耦合损伤模型可准确描述双参数作用下钢筋/BFRC界面黏结性能的退化规律。

在分析钢筋/BFRC界面峰值滑移特性时,鉴于温度对其影响程度远大于硫酸盐侵蚀作用,故仅考虑温度这一单一影响因素。本文引入高温后峰值滑移增长系数(γ),则高温作用下的峰值滑移($s_{T,t}$, mm)表达式为:

$$s_{T,t} = \gamma \cdot s_p \quad (7)$$

以温度为横坐标,耦合作用下峰值滑移增长系数为纵坐标,绘制曲线,回归得到:

$$\gamma = -0.87 + 1.74 \times \exp(T/600) \quad (8)$$

当温度达到500 °C及以上时,钢筋/BFRC界面黏结-滑移曲线出现完整的下降段。本文定义残余黏结强度系数($\beta_{T,t}$),以表征下降段的力学性能,其表达式为:

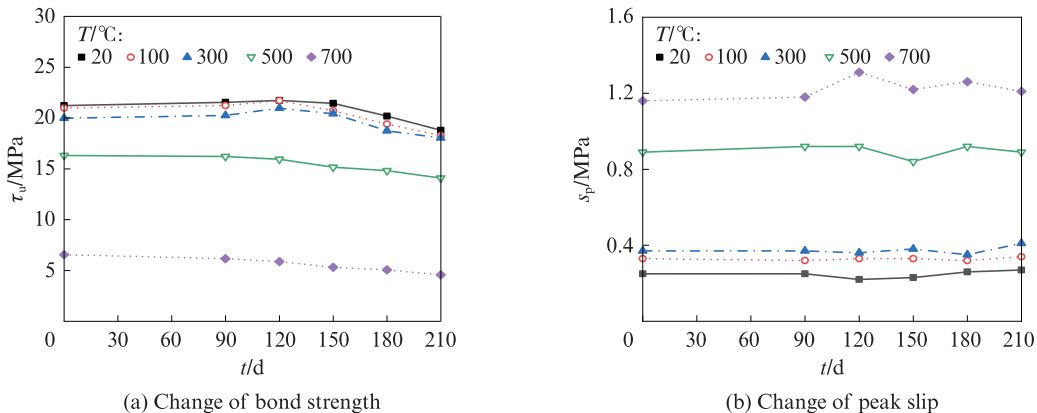


图5 钢筋/BFRC界面黏结强度和峰值滑移随高温和侵蚀龄期的变化

Fig. 5 Bond strength and peak slip between steel bars and BFRC changed with high temperature and erosion age

表3 高温后钢筋/BFRC界面黏结强度高温损伤系数的拟合参数

t/d	h/mm	Fitting parameter				R ²
		a×10 ⁹	b×10 ⁶	c×10 ⁴	d	
0	0	-3.147 7	1.182 1	-2.812 3	1.006 2	0.999 9
90	10.06	-2.978 3	0.954 7	-2.337 9	1.003 7	0.997 1
120	11.16	-1.608 2	-0.687 0	2.376 2	0.991 5	0.999 6
150	12.29	-2.046 1	-0.152 1	0.492 9	0.987 2	0.997 1
180	13.98	-3.729 4	1.730 9	-4.610 2	1.003 3	0.999 4
210	15.66	-3.495 9	1.197 0	-2.043 5	0.996 6	0.999 0

$$\beta_{\tau, t} = \tau_r / \tau_{T, t} \quad (9)$$

式中:τ_r为残余黏结强度,MPa。

在硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下,钢筋/BFRC界面残余黏结强度系数并未表现出显著的变化规律,但其数值稳定分布在某一特定范围附近,变化幅度较小。具体而言,当温度为500℃时,该系数主要集中在11%~14%的区间内,平均值为12.78%;当

温度升至700℃时,系数集中集中在15%~18%之间,平均值为16%。

以未受侵蚀及侵蚀龄期210 d的数据为例,将式(3)、(7)、(9)代入三段式黏结-滑移模型^[8],可获得无量纲化的钢筋/BFRC界面黏结-滑移曲线,如图6所示。图6显示,该模型预测值与试验值吻合良好。

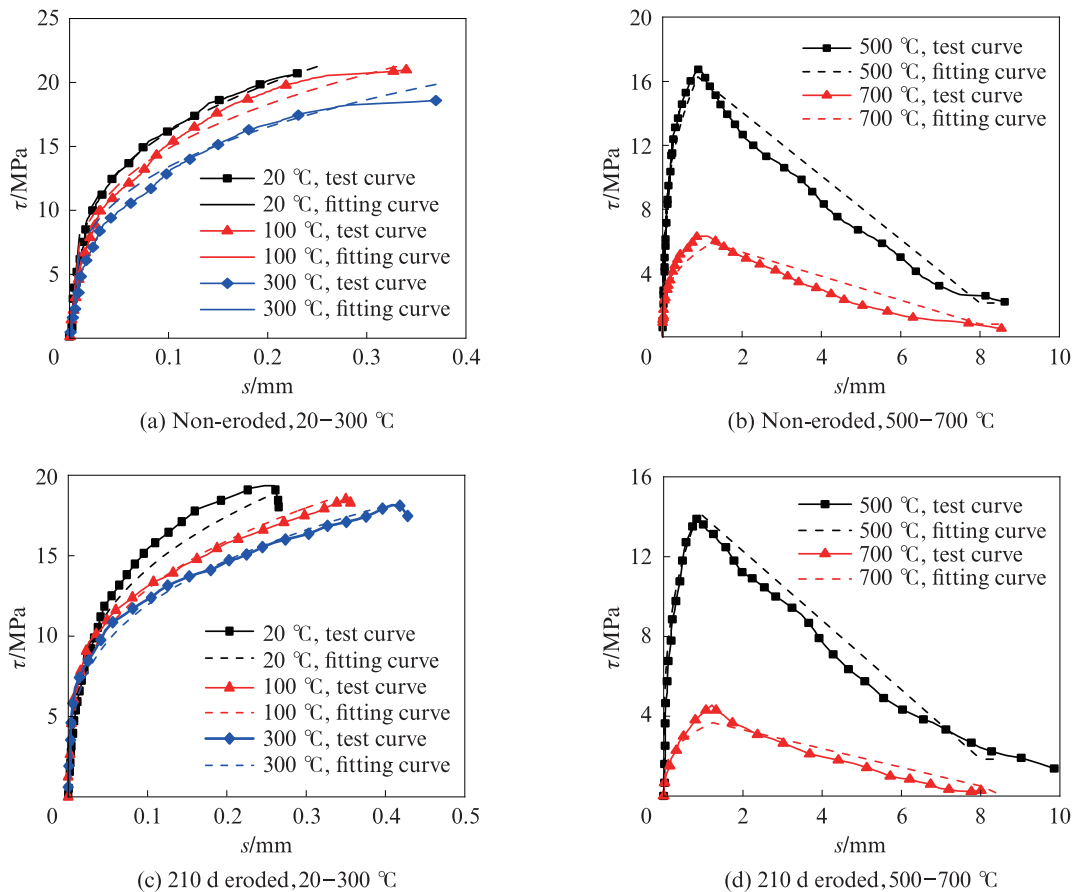


图6 不同温度下钢筋/BFRC界面黏结-滑移曲线的预测值与试验值对比

Fig. 6 Comparison between predicted and experimental values of bond-slip curves at the interface of steel bars and BFRC under different temperatures

4 结论

(1)硫酸盐侵蚀初期,钢筋/BFRC界面黏结强度

随侵蚀龄期的延长先增后降,与BFRC抗压强度变化趋势一致。

(2)随着温度的升高,钢筋/BFRC界面黏结强度

持续降低,500℃后因化学黏结力破坏与热膨胀不均,黏结强度显著下降,峰值滑移激增,破坏模式由劈裂破坏转为劈裂-拔出破坏;温度超过500℃时,高温损伤抵消了硫酸盐侵蚀初期对钢筋/BFRC的界面黏结性能的改善,导致黏结强度持续下降,且高温影响较硫酸盐侵蚀更显著。

(3)本文所建黏结-滑移本构模型能够有效预测,硫酸盐侵蚀-高温耦合作用下钢筋与BFRC的界面性能,为结构抗火安全评估提供理论依据。

参考文献:

- [1] 金雁南,周双喜. 混凝土硫酸盐侵蚀的类型及作用机理[J]. 华东交通大学学报, 2006, 23(5):4-8.
JIN Yannan, ZHOU Shuangxi. Types and mechanism of concrete sulfate attack[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2006, 23(5):4-8. (in Chinese)
- [2] 孙菁楠,余红发,吴成友,等. 察尔汗盐湖腐蚀混凝土的长龄期损伤劣化规律[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(10):980-985.
SUN Jingnan, YU Hongfa, WU Chengyou, et al. Long-term damage and deterioration law of concrete under corrosive environment in Qarhan Salt Lake [J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(10):980-985. (in Chinese)
- [3] 温勇,孙晓燕,赵瑞翔,等. 硫酸盐侵蚀对水泥基材料物理组成及孔结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(10):966-973.
WUN Yong, SUN Xiaoyan, ZHAO Ruixiang, et al. Effect of sulfate attack on phase composition and pore structure of cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(10):966-973. (in Chinese)
- [4] 蒋金洋,郑皓睿,孙国文,等. 硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10):1047-1053.
JIANG Jinyang, ZHENG Haorui, SUN Guowen, et al. Numerical simulation of sulfate attack in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1047-1053. (in Chinese)
- [5] CASANOVA I, AGUADO A, AGULLO L. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation-II. Physico-chemical modeling of sulfate attack[J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(11):1627-1632.
- [6] 闫治国,朱合华,彭芳乐. 隧道火灾场景设计及衬砌结构防火研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(8):1320-1325.
YAN Zhiguo, ZHU Hehua, PENG Fangle. Study on fire scenario and fire safety of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(8):1320-1325. (in Chinese)
- [7] ZHANG H Y, KODUR V, WU B, et al. Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163:277-285.
- [8] ZHANG B, ZHU H, CHEN J, et al. Evaluation of bond performance of corroded steel bars in concrete after high temperature exposure[J]. Engineering Structures, 2019, 198:109479.
- [9] JIN L, LI X Y, ZHANG R B, et al. Bond-slip behavior between concrete and deformed rebar at elevated temperature: Mesoscale simulation and formulation[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 205:106622.
- [10] 李兆光,王艳,郭冰冰,等. 温度影响下混凝土硫酸盐侵蚀行为数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(4):315-322.
LI Zhaoguang, WANG Yan, GUO Bingbing, et al. Numerical simulation of concrete sulfate attack behavior under temperature influence [J]. Journal of Building Materials, 2025, 28(4):315-322. (in Chinese)
- [11] MUCIACCIA G, CONSIGLIO A N. Local bond properties of reinforcement in concrete subjected to elevated temperatures: Effects of clear cover, bonded length and heating and loading procedures[J]. Engineering Structures, 2021, 230:111594.
- [12] LI Y, YE L F, GU Z C, et al. Study on resistance of basalt fiber reinforced concrete to sulfate erosion after cryogenic freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98:111123.
- [13] SÖYLEV T A. The effect of fibers on the variation of bond between steel reinforcement and concrete with casting position[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4):1736-1746.
- [14] 侯利军,周秉轩,刘泓,等. 锈蚀钢筋与纤维水泥基材料的界面黏结性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6):862-869.
HOU Lijun, ZHOU Bingxuan, LIU Hong, et al. Interfacial bond behavior between corroded reinforcement and fiber reinforced cementitious materials[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(6):862-869. (in Chinese)
- [15] 赵燕茹,刘明,王磊,等. 高温后钢筋与玄武岩纤维混凝土黏结性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9):3776-3782.
ZHAO Yanru, LIU Ming, WANG Lei, et al. The bonding property of steel bar and basalt fiber concrete after high temperature[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9):3776-3782. (in Chinese)
- [16] VARONA F B, BAEZA F J, BRU D, et al. Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176:359-370.
- [17] SMARZEWSKI P. Study of bond strength of steel bars in basalt fibre reinforced high performance concrete[J]. Crystals, 2020, 10(6):436.
- [18] LU L M, HAN F, WU S H, et al. Experimental study on durability of basalt fiber concrete after elevated temperature[J]. Structural Concrete, 2022, 23(2):682-693.
- [19] ALBERO V, HERNANDEZ-FIGUEIRIDO D, ROIG-FLORES M, et al. High-temperature effects on bond behaviour between concrete and corrosion resistant steel reinforcements [J]. Construction and Building Materials, 2024, 447:138086.