

BFRP钢筋-混组合梁高温后力学性能试验

武芳文 陈中村 何岚清 左剑 樊州

Mechanical properties experiment of steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars after high temperature

WU Fangwen, CHEN Zhongcun, HE Lanqing, ZUO Jian, FAN Zhou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220804.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

BFRP钢筋纤维高强混凝土梁受弯承载力试验与理论

Experimental and theoretical study on the flexural capacity of high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and steel fiber

复合材料学报. 2018, 35(12): 3313–3323 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180319.004>

玻化微珠保温混凝土高温后性能劣化及微观结构

Performance degradation and microscopic structure of glazed hollow bead insulation normal concrete after exposure to high temperature

复合材料学报. 2019, 36(12): 2932–2941 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190118.001>

高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO₃晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响

Influence of high temperature on flexural properties and micro structure of steel fiber-polyvinyl alcohol fiber-CaCO₃ whisker multi-scale fibers/cement composite

复合材料学报. 2021, 38(7): 2326–2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200907.001>

超高性能混凝土在环境温度变化下的力学性能试验研究

Experiment study on mechanical properties of ultra-high performance concrete under ambient temperature change

复合材料学报. 2021, 38(10): 3495–3503 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201208.001>

高温下双搭接钢-CFRP板胶粘界面力学性能试验

Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature

复合材料学报. 2021, 38(2): 449–460 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.002>

高温后聚丙烯纤维增强水泥基复合材料导热的多尺度方法

Multi-scale method for thermal conductivity of polypropylene fiber reinforced cementitious composites after high temperature

复合材料学报. 2021, 38(10): 3541–3552 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201211.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

BFRP 筋钢-混组合梁高温后力学性能试验

武芳文*, 陈中村, 何岚清, 左剑, 樊州

(长安大学 公路学院, 西安 710064)



分享本文

摘要: 设计了常温 (25℃)、200℃、400℃ 和 600℃ 四个工况, 通过模型试验方法探究了玄武岩纤维增强树脂复合材料 (Basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 筋钢-混组合梁高温后的破坏形态和力学性能。通过分析试验梁裂缝开展、挠度变形、温度场和破坏过程规律, 研究 BFRP 筋和普通钢筋-混组合梁的破坏模式和承载能力。结果表明: 经历 400℃ 高温后, BFRP 筋劣化导致力学性能大幅降低; 筋体膨胀导致混凝土板开裂, 其裂缝开展与普通钢筋-混组合梁显著不同, 主裂缝沿横向筋材规律开展, 且裂缝较宽。温度低于 400℃ 时, 由于混凝土的包裹, BFRP 筋未达到劣化温度, 两种钢-混组合梁承载能力和外观差别较小; 600℃ 后, BFRP 筋劣化, 削弱了混凝土板刚度和强度, 导致 BFRP 筋钢-混组合梁承载能力比普通钢筋-混组合梁降低更多; BFRP 筋钢-混组合梁因整体刚度较小, 加载后变形更大。高温后两种钢-混组合梁破坏模式相似, 均为剪切破坏, 有明显弹性、弹塑性和破坏阶段; 600℃ 时, 两种钢-混组合梁延性大幅降低, 塑性变形减少, 破坏较为突然。研究成果可为 BFRP 筋在钢-混组合梁中的应用提供参考。

关键词: 钢-混组合梁; 模型试验; 高温; BFRP 筋; 力学性能

中图分类号: TB332; U441.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)05-2938-13

Mechanical properties experiment of steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars after high temperature

WU Fangwen*, CHEN Zhongcun, HE Lanqing, ZUO Jian, FAN Zhou

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Four working conditions of room temperature (25℃), 200℃, 400℃ and 600℃ were designed. The failure modes and mechanical properties of steel-concrete composite beams reinforced with basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars after high temperature were studied by the model experiment method. The failure modes and bearing capacity of steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars and steel bars were studied by analyzing the test beam's crack development, deflection deformation, temperature field and failure process. The results show that the mechanical properties of BFRP bars are significantly reduced after a high temperature of 400℃. The mechanical properties of composite beams are significantly reduced after the high temperature of 400℃ due to the deterioration of BFRP bars. The expansion of BFRP bars leads to the cracking of concrete slab, and the crack development is obviously different from that of steel-concrete composite beams reinforced with steel bars. The main cracks regularly develop along with the transverse reinforcements, and the cracks are wider. When the temperature is lower than 400℃, BFRP bars do not reach the deterioration temperature due to the wrapping of concrete, and the bearing capacity and appearance of the two steel-concrete composite beams have little difference. After 600℃, the deterioration of BFRP bars weakens the stiffness and strength of concrete slabs, resulting in a decrease in the bearing capacity of steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars more than steel bars. The steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars have larger deformation after loading due to the

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2022-07-18; 录用日期: 2022-07-20; 网络首发时间: 2022-08-05 09:12:19

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220804.004>

基金项目: 中央高校基本科研业务费 (300102212212); 陕西省自然科学基金研究计划重点项目 (2022 JZ-32)

Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102212212); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2022 JZ-32)

通信作者: 武芳文, 工学博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为钢-混凝土组合结构理论与应用 E-mail: wufangwen@chd.edu.cn

引用格式: 武芳文, 陈中村, 何岚清, 等. BFRP 筋钢-混组合梁高温后力学性能试验 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(5): 2938-2950.

WU Fangwen, CHEN Zhongcun, HE Lanqing, et al. Mechanical properties experiment of steel-concrete composite beams reinforced with BFRP bars after high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(5): 2938-2950(in Chinese).

small overall stiffness. After high temperature, the failure modes of the two steel-concrete composite beams are similar, which are shear failure with evident elastic, elastoplastic and failure stages. At 600℃, the ductility of the two steel-concrete composite beams is significantly reduced, the plastic deformation is reduced, and the failure is more sudden. The research results can provide a reference for applying BFRP bars in steel-concrete composite beams.

Keywords: steel-concrete composite beam; model test; high temperature; BFRP bars; mechanical properties

钢-混组合梁因其优越的力学性能、卓越的经济效益和快速施工的工程特性,在我国得到了广泛的应用^[1-2]。但钢-混组合梁在海洋环境、应用除冰盐的寒冷地区长期使用过程中,混凝土易开裂,钢筋会受到环境的侵蚀发生锈蚀膨胀,导致钢-混组合梁耐久性和承载能力降低^[3]。为解决钢筋腐蚀问题,学者们将耐腐蚀性能强的玄武岩纤维增强树脂复合材料(Basalt fiber reinforced polymer, BFRP)筋代替普通钢筋应用于钢-混组合梁中^[4-8]。BFRP筋是将玄武岩纤维与树脂类高分子聚合物经高温固化后拉拔而成的一种新型复合材料,与普通钢筋相比,BFRP筋具有抗拉强度高、耐腐蚀、质量轻的优点,与混凝土线膨胀系数接近,两者能较好地协同工作^[8-9]。并且玄武岩在我国有着极为丰富的矿藏储量,材料成本较低,作为一种纯天然纤维,其具有环境友好的特点,有广泛的应用前景^[10]。因此,有必要对BFRP筋钢-混组合梁开展相关研究。

在桥梁运营过程中,桥梁火灾是极具毁灭性的主要灾害之一。钢-混组合结构在功能上有着明显的优势,但由于截面钢材占比大,其对高温表现出较高的敏感性^[11]。同时,相较于普通钢筋受热后呈现稳定的材料性能,BFRP筋中的树脂胶体是高分子化合物,受高温会产生玻化和碳化的现象,材料发生劣化,失去胶结作用,从而导致BFRP筋力学性能退化甚至丧失^[12]。高温后筋材还会变性膨胀,致使混凝土开裂,影响整体结构性能,严重威胁结构安全^[13-15]。因此,研究高温后BFRP筋钢-混组合梁的力学性能对钢-混组合梁的发展应用有重要意义。

目前对高温后钢-混组合梁的研究还较少,姚伟发等^[11,16]进行了火灾环境下的钢-混组合梁力学性能试验,并推导了火灾后钢-混组合梁剩余承载力的计算公式,用于火灾后钢-混组合桥梁承载力评估。张岗等^[17-18]进行了混凝土梁耐火试验和火灾下的钢-混组合梁数值模拟分析,分析了受火位置和钢梁类型对高温后钢-混组合梁力学性能的影响,并提出了损伤等级规则。有关高温后筋材对钢-混组合梁整体结构的影响研究甚少,近几年,

关于BFRP筋材料性能方面的研究逐渐趋于成熟,学者们主要针对BFRP筋混凝土梁展开了研究,Hu等^[15]对高温后纤维增强树脂复合材料(Fiber reinforced polymer, FRP)筋混凝土梁进行了静力试验,发现高温对FRP筋梁的开裂性能影响十分显著,并且对梁的刚度、挠度也有一定影响。Hakem等^[19]和刘雅静等^[20]研究了BFRP加固材料在各类复杂环境下的正常使用和承载能力。Ahmed等^[21]以BFRP筋与钢筋的比例为主要参数,研究了不同配筋梁在高温下的力学性能,发现钢筋与BFRP混合配筋梁的抗剪强度较高,开裂刚度增强,破坏脆性程度较低。

上述研究和分析表明,高温后筋材对钢-混组合梁的破坏形态及力学性能产生显著影响,尤其对于BFRP筋钢-混组合梁,BFRP筋高温后力学性能不稳定,对整体结构承载力影响较大。相较于对负弯矩区高温后抗裂性能的研究,正弯矩区在高温后的承载能力对结构影响更大。因此,本文通过高温和力学性能试验,分析筋材高温后力学性能劣化规律,结合高温后钢-混组合梁模型静载试验,分析高温后钢-混组合梁正弯矩区破坏形态与残余承载力,揭示高温后BFRP筋钢-混组合梁损伤机制,为BFRP筋在钢-混组合桥梁应用提供理论支撑。

1 试验概况

1.1 原材料

BFRP筋采用山西晋投玄武岩开发有限公司生产的直径10 mm的螺纹状表面喷砂BFRP筋。常温下实测抗拉强度953 MPa,弹性模量45.2 GPa,伸长率2.33%,密度为1.9 g/cm³,树脂基体为热固性材料环氧树脂。树脂基体在常温下呈固态,与玄武岩纤维丝紧密粘结。BFRP筋玻璃态转化温度为120℃,碳化温度350℃。

钢筋为标准生产的12 mm热轧带肋钢筋HRB400,屈服强度459 MPa,弹性模量200.3 GPa。钢梁采用Q345低合金钢,实测屈服强度346 MPa,弹性模量206.5 GPa。混凝土采用P•O52.5级普通硅酸盐水泥,矿粉系数20%,水胶比0.41,抗压

强度 61.7 MPa，配合比见表 1。为实现局部受火工况，试验梁两端采用隔热棉包裹。隔热棉采用容重 128 kg/m³ 含锆纤维毯，最高耐热温度为

1 430℃，长期工作温度为 1 350℃，具有较低导热率、较好的热稳定性，便于塑型、缠绕等施工操作，以便对梁进行包裹隔温。

表 1 C50 混凝土配合比
Table 1 C50 concrete mix proportion

kg/m ³					
Cement	Mineral fines	Sand	Crushed stone	Water	Water reducer
335.2	83.2	655	1 116	170	8.1

1.2 试件设计

参考《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB/T 50917—2013)^[22] 有关尺寸设计的规定拟定试件尺寸，制作了 8 片钢-混组合试验梁。钢梁规格为 HN200 mm×100 mm×6 mm×7 mm，钢梁两侧支座处左右对称设置一道加劲肋；钢-混组合梁桥面板宽度为 400 mm，厚 50 mm，长度为 1 100 mm；均采用 C50 普通混凝土整体浇筑，具体结构如图 1

所示。按照最不利跨中控制截面承载力相近的原则进行混凝土配筋计算，普通钢筋钢-混组合梁纵向配筋率为 2.26%，横向配筋率为 1.96%。由于 BFRP 抗拉性能高于普通钢筋，经过计算 BFRP 筋钢-混组合梁纵向配筋率为 1.18%，横向配筋率为 1.36%。布置两排直径 A10 的栓钉，横向间距 40 mm，纵向间距 110 mm。钢-混组合梁按照筋材和温度不同进行编号，如表 2 所示。

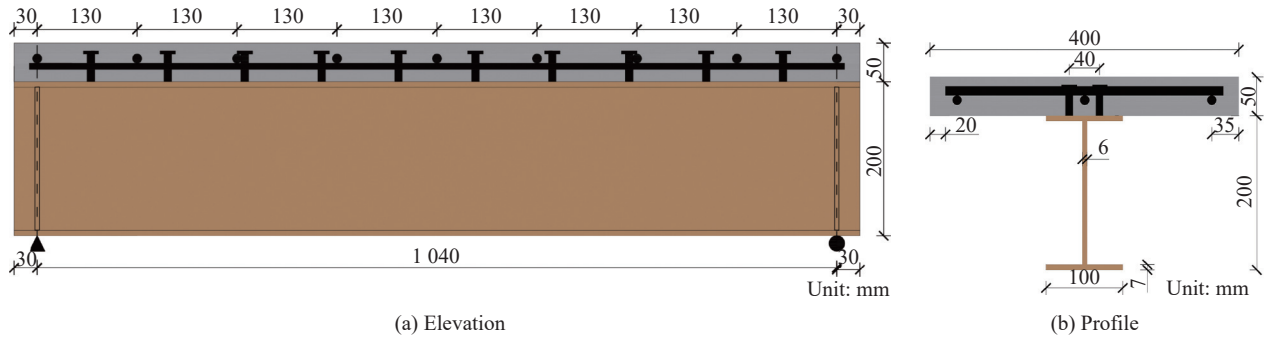


图 1 试验梁尺寸
Fig. 1 Test beam size

表 2 钢-混组合梁设计参数
Table 2 Design parameters of steel-concrete composite beams

Number	Material composition	Test temperature/℃
S-SCB-25	C50+HRB400	25
S-SCB-200	C50+HRB400	200
S-SCB-400	C50+HRB400	400
S-SCB-600	C50+HRB400	600
BFRP-SCB-25	C50+BFRP bars	25
BFRP-SCB-200	C50+BFRP bars	200
BFRP-SCB-400	C50+BFRP bars	400
BFRP-SCB-600	C50+BFRP bars	600

Notes: S, BFRP—Type of reinforcement; SCB—Steel-concrete composite beam; Figure—Test temperature; such as BFRP-SCB-200—Steel-concrete composite beam with BFRP bars at 200℃.

1.3 试验设备及测点布置

需要测定的主要参数包括裂缝宽度、变形、

温度及静力荷载。以下为使用的主要设备及参数。

1.3.1 高温试验炉

试验采用嘉华炉业生产的高温炉，以通电硅碳棒作为发热源，具有较稳定的升温及温度控制性能，便于控制炉内温度恒定，减少试验误差，如图 2 所示，高温炉内空间可满足试验梁高温试验的需要。

1.3.2 温度测量

采用嘉翔电热电器科技公司生产的 WRNK-191 型 K 型热电偶进行温度测量，测温范围为 -40~1 000℃，允许误差限为 ±2.5℃ 或 ±0.75%|t|(t 为实测温度)。

1.3.3 变形测量

采用成都电测传感科技有限公司生产的应变片，室温应变极限为 20 000 μm/m，机械滞后

1.2 μm/m, 灵敏系数 (2.1±2)%。混凝土采用 BX120-50 AA 应变片, 钢梁采用 BX120-3 AA 应变片, 位移计采用溧阳市仪表厂生产的 YHD-50 型位移传感器, 测量范围为 ±25 mm。应变及位移测点布置见图 3。

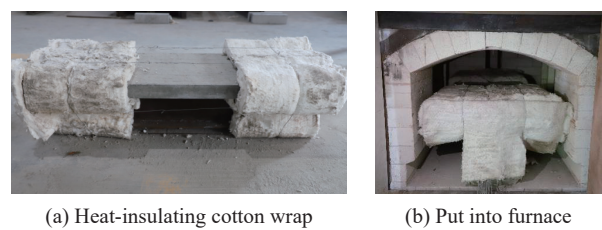


图 2 高温试验
Fig. 2 High temperature test

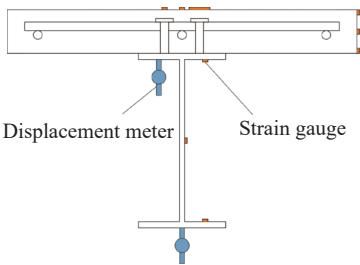
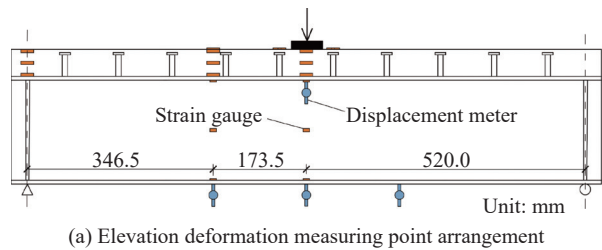


图 3 变形测点布置
Fig. 3 Layout of deformation measuring points

1.3.4 加载装置

采用多通道电液伺服结构试验系统进行加载。加载系统由反力装置、分配梁、伺服系统、控制系统组成。可由电脑操作, 直接进行伺服加载, 能有效控制加载速度及加载时间。

1.4 高温试验

为更好地模拟实际工程中桥梁受火状态, 考虑最不利工况的温度布置, 所有梁均采用跨中区段局部受热的加热模式, 总受热区段长 520 mm, 钢梁和混凝土桥面板共同受热, 不受热区域包裹耐火隔热棉。高温试验分为 3 个阶段: 首先将两端包裹好隔热棉的试验梁放置于炉内受温区域, 按图 4 所示升温曲线进行加热; 待达到预定温度, 持温 1 h; 最后从高温炉中取出, 拆掉隔热棉, 自然冷却降温。在试验梁内部及外表面布置热电偶,

布置位置如图 5, 使用采集设备每 10 s 自动采集 1 次, 在试验梁升温、持温、降温各阶段持续监控整梁各个区域的温度。

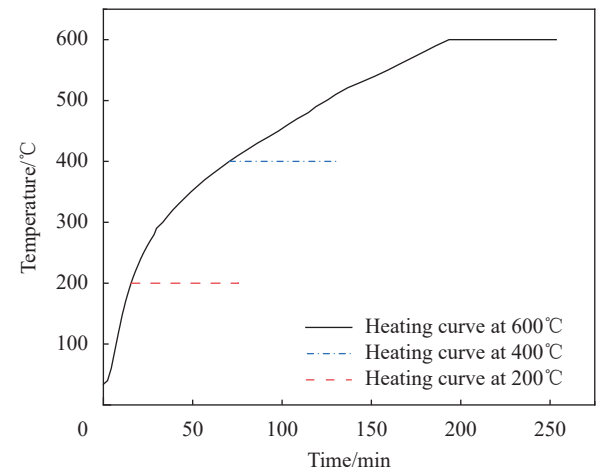


图 4 高温炉升温曲线
Fig. 4 Heating curves of furnace

1.5 高温后静力试验

钢-混组合梁温度降至常温后进行跨中单点静力加载, 数据采集使用 TDS-530。将试验梁放置于一端为固定三角支座, 一端为可自由滚动的钢圆棒组成的支架上, 模拟力学模型中的固定铰支座和滑动铰支座, 如图 6 所示。在试验梁的放置过程中采用水平仪进行光学对中; 然后进行预加载, 预加载大小不超过试验梁开裂荷载计算值的 70%, 取 10 kN。正式加载时, 加载水平按破坏荷载施加, 弹性阶段以荷载控制加载, 加载速率为 10 kN/min; 加载至曲线出现明显拐点, 改用位移控制加载, 加载速率为 0.7 mm/min; 待结构承载力降至极限承载力的 85% 时停止加载。

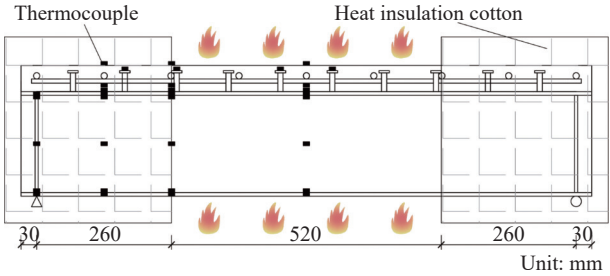
2 高温试验现象与分析

2.1 材料高温损伤特征

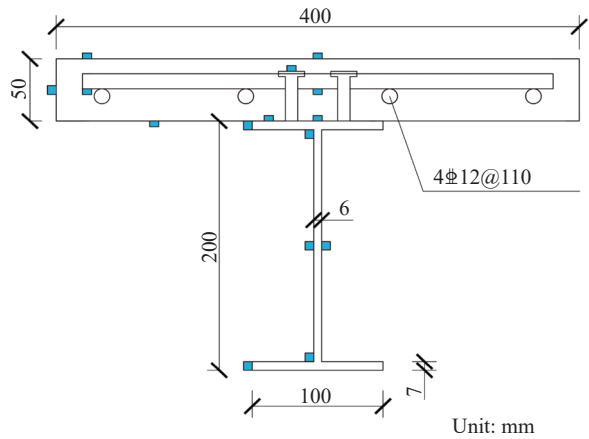
高温试验时, 在高温炉有效受温区域内一同放入 3 根 BFRP 筋和普通钢筋, 与试验梁保持同等受温条件进行材料的高温试验。为保证后续 BFRP 筋在进行拉伸试验时的端头锚固质量, 在筋材两端 30 cm 长的区段包裹上耐火隔热棉, 如图 7 所示, BFRP 筋在常温下呈现灰黑色, 外缠白色线。200℃ 高温后, 筋材表面颜色加深, 呈灰褐色, 面层为黄褐色。300℃ 高温后, 筋材表面变为颜色更深的黑棕色。400℃ 高温试验时, 当温度加到 350℃ 时, 炉顶冒出青灰色烟雾, 并散发刺激



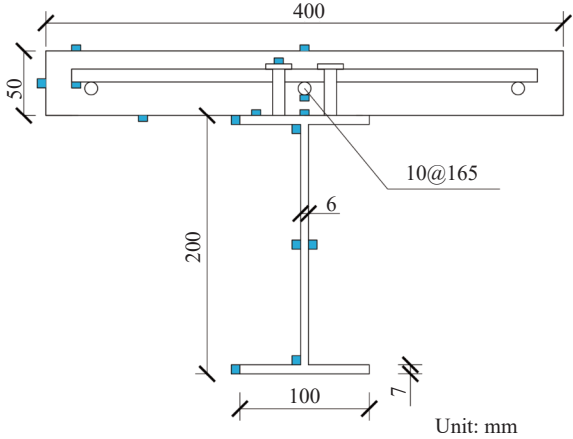
(a) Thermocouple arrangement



(b) Diagram of high temperature test beam



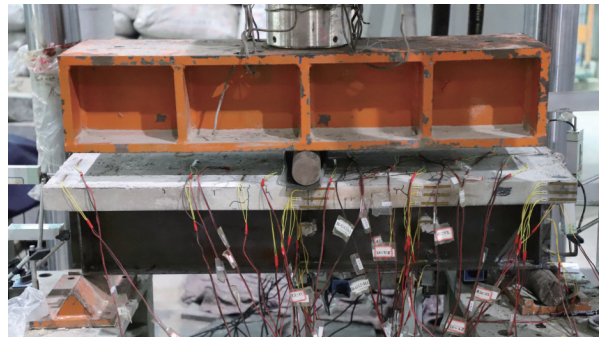
(c) S-SCB thermocouple layout



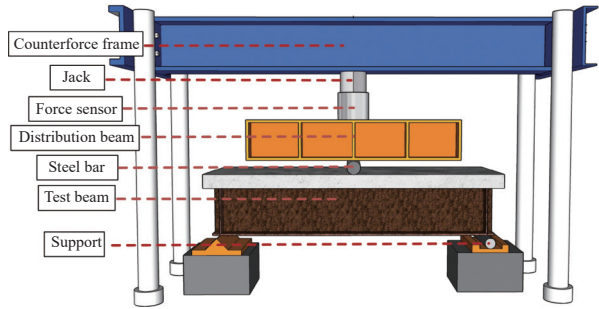
(d) BFRP-SCB thermocouple layout

图5 热电偶布置

Fig. 5 Thermocouple arrangement



(a) Real drawing of loading device



(b) Schematic diagram of loading device

图6 加载装置图

Fig. 6 Loading scheme

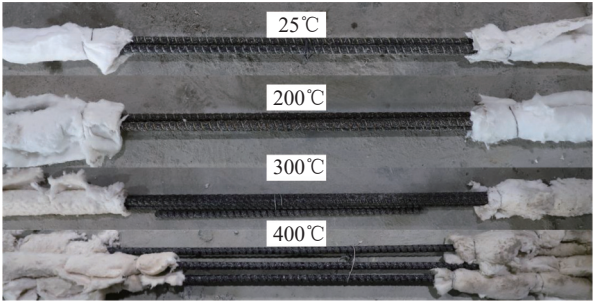


图7 高温后的玄武岩纤维增强树脂复合材料 (BFRP) 筋

Fig. 7 Basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars after high temperature

性气味，在持温过程中烟雾逐渐变淡，400℃高温后的筋材表面呈明显炭黑色，筋体膨胀，表现出明显的高温变性特征，基材树脂部分脱落，暴露出玄武岩纤维丝，此时 BFRP 筋已基本丧失强度。普通钢筋高温后筋材表面轻微泛蓝，外观无其他明显变化。

材料拉伸和抗压试验如图 8 所示，3 个试件为一组，按照标准试验方法进行，试验结果如图 9 所示。根据试验结果可知，200℃高温后，温度

已经超过树脂玻化温度 120℃, 高温下发生部分玻化, 常温冷却后玻化部分能够基本恢复, 因此对筋材强度的影响较小, BFRP 筋抗拉强度仅降低了 2.8%, 整体未出现明显损伤; 300℃ 后, 玻化程度加大, 冷却后大部分强度能够恢复, 但树脂与玄武岩纤维丝的粘结程度降低, 导致 BFRP 筋抗拉强度降低了 11.9%, 下降幅度增大; 400℃ 时, 抗拉强度下降了 84.1%, 大部分树脂胶体已经玻化、热分解和碳化, 基本丧失承载能力。李趁趁等^[13]、唐利等^[14]和 Zhu 等^[23]通过 BFRP 筋高温试验也得到类似结果。普通钢筋和钢板材料力学性能受高温影响较小, 且弹性模量在高温后也无明显变化。试验中 C50 混凝土立方体抗压强度在 400℃ 后比 200℃ 增加了 1.7 MPa, 主要由于未熟化的水泥水化对强度有增强作用^[24]及混凝土中结合水的蒸发、孔隙压力的降低^[25]。混凝土抗压强度在其他温度则是呈降低趋势。

2.2 钢-混组合梁高温损伤特征

普通钢筋钢-混组合梁 (S-SCB) 在 200℃ 后, 混凝土板中心位置出现一条贯穿裂缝, 但钢梁外

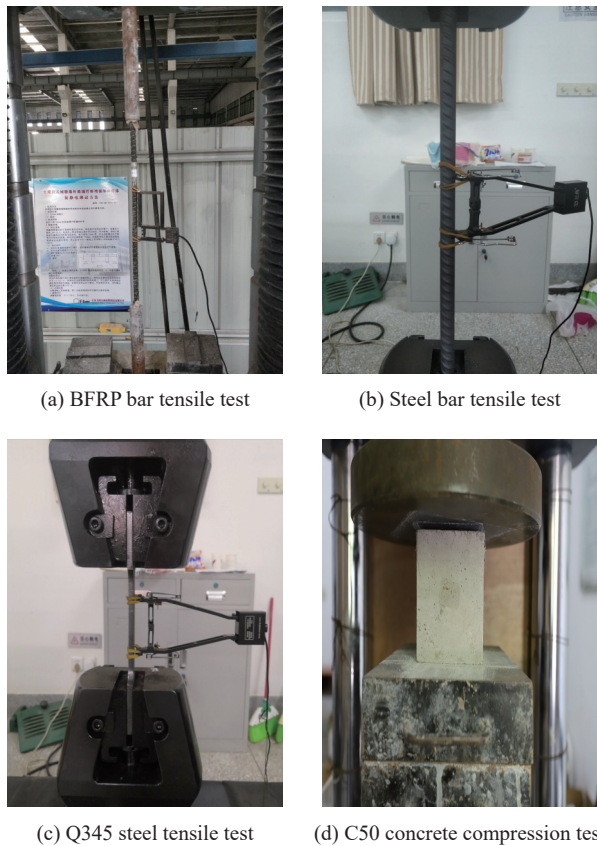


图 8 材料力学性能试验

Fig. 8 Material mechanical properties test

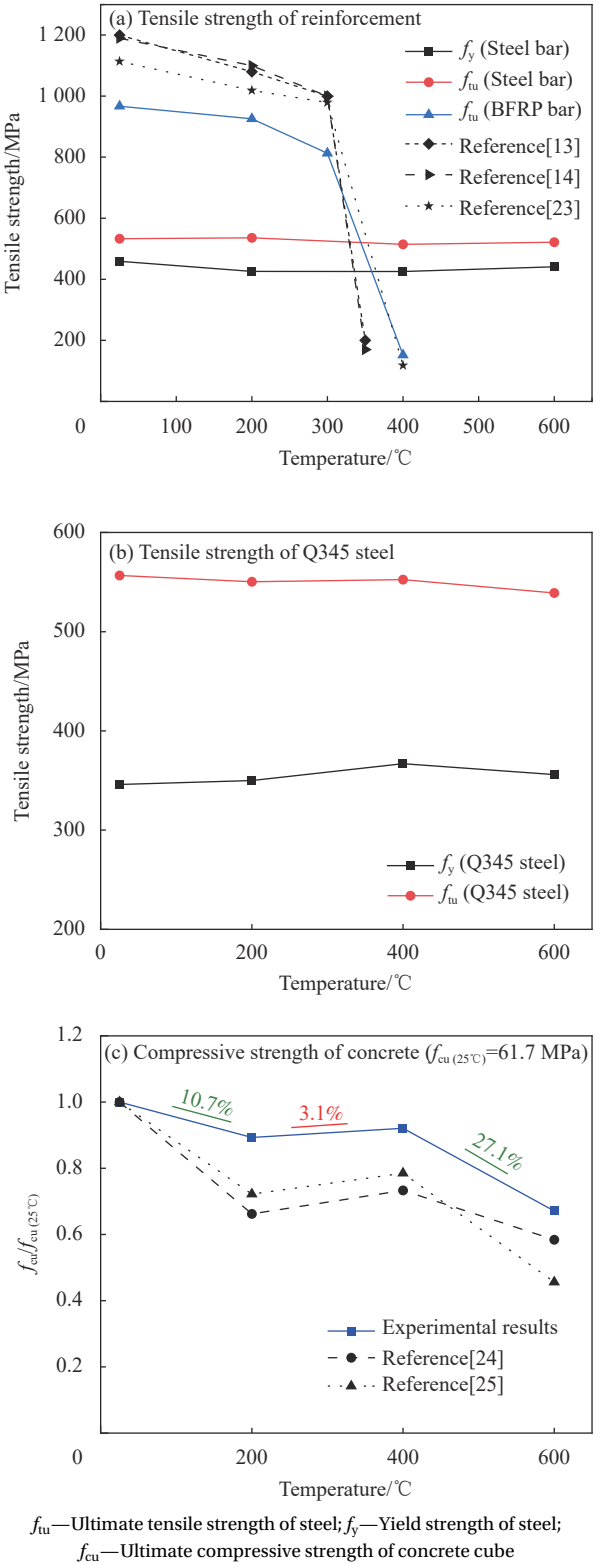
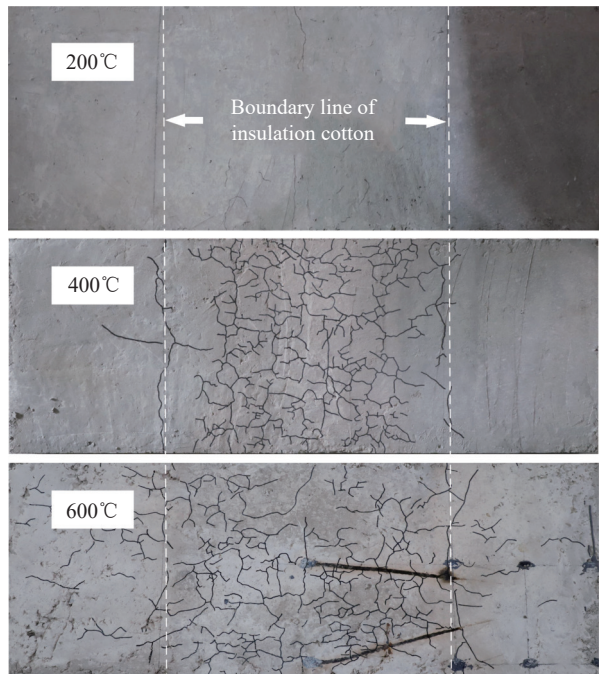


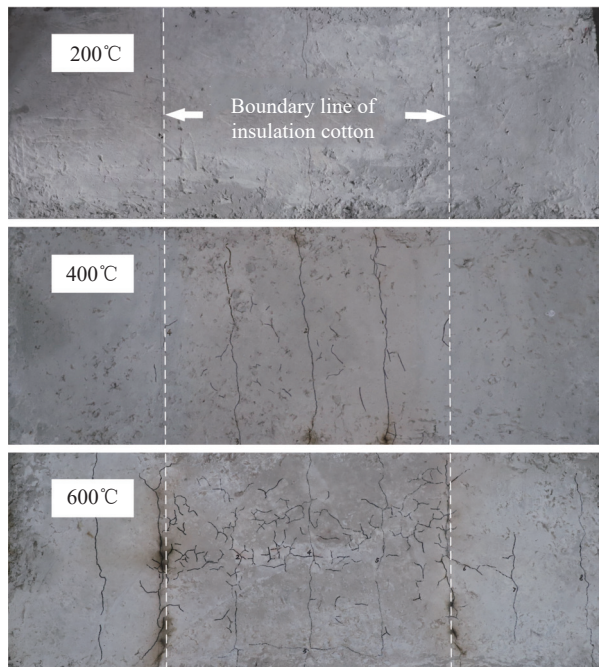
图 9 高温后各材料力学性能

Fig. 9 Mechanical properties of materials after high temperature

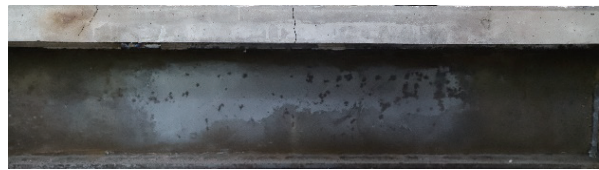
表无明显变化, 如图 10 所示。400℃ 后, 混凝土板出现网状的龟裂裂纹, 满布于受热区段混凝土表面, 发展为宽度约为 0.3 mm 左右不规则的条状



(a) S-SCB appearance characteristics after high temperatures



(b) BFRP-SCB appearance characteristics after high temperatures



(c) Steel appearance after 600℃

图 10 高温后钢-混组合梁外观

Fig. 10 Appearance of steel-concrete composite beams after high temperature

裂缝，混凝土颜色由原来的青灰色变成了略微泛白的红灰色。受高温处钢梁颜色由暗红变成蓝紫色；高温棉包裹处的混凝土和钢梁没有出现明显外观变化。600℃ 时，混凝土表面颜色变为白灰与黑灰相间，相较于 400℃，此时龟裂裂纹宽度增大，其他条状主裂缝长度和宽度进一步扩展，宽度达到了 1.5 mm，裂纹进一步向隔热区发展，隔热区出现了若干条沿纵向分布的裂缝，裂缝开展无明显规律。此时钢梁颜色由暗红变成了蓝色，表面出现不规则蓝白色区块。高温后，普通钢筋-混凝土组合梁的裂缝扩展较均匀、分散，裂缝宽度普遍较小，但裂缝数量多。

高温后，BFRP 钢筋-混凝土组合梁 (BFRP-SCB) 混凝土板损伤状况与普通钢筋-混凝土组合梁存在显著差异。200℃ 后，在 BFRP 钢筋-混凝土组合梁中心处出现 1 条宽 0.2 mm 的贯穿裂缝，从混凝土顶面延伸至侧面约一半高度处。从 400℃ 开始，高温时炉顶有少许青烟冒出，伴随有刺激性味道，出现少量龟裂裂纹，钢-混凝土组合梁受热区沿横向 BFRP 筋布置位置出现 3 条平行贯穿裂纹，在裂纹部分区段有 BFRP 筋高温后形成的黄褐色斑块。由于 BFRP 筋的布置形式为横向筋材在上，纵向筋材在下，横筋距离混凝土顶板的距离更近。BFRP 筋高温膨胀后，靠近混凝土表面的横筋对裂缝开展的影响较大，会较早出现横向裂缝。并且部分树脂发生热分解，氧化产生气体在混凝土表面形成黄色斑块。600℃ 后，横向贯穿裂缝增多，分布于受热区和隔热区，且均沿横向 BFRP 筋扩展，最大缝宽 2.1 mm；靠近隔热棉分界线的两条横向裂缝有明显的黄黑色斑纹。BFRP 钢筋-混凝土组合梁高温后混凝土板裂缝呈现规律分布，横向主裂缝宽而长。可见，BFRP 筋受热分解膨胀，同时产生气体撑开混凝土形成规则裂纹，削弱了混凝土板刚度。

2.3 钢-混组合梁温度场

采用密闭高温炉加热，高温炉受温区各部位温度一致，钢-混凝土组合梁整体协同受温，且两种不同配筋钢-混凝土组合梁受热升温一致。600℃ 时钢-混凝土组合梁温度沿梁长的变化如图 11 所示，隔热区与受温区温差 406℃。从跨中到端部，隔热棉包裹越长，隔温度效果越显著。由于材料之间存在热传导，隔热区温度向端部递减。隔热棉将隔热区最高温度降低了 67.6%，充分发挥其隔热功能，从而实现结构跨中局部受热状态，即沿梁长度方向，梁体空间温度场分布不一致。

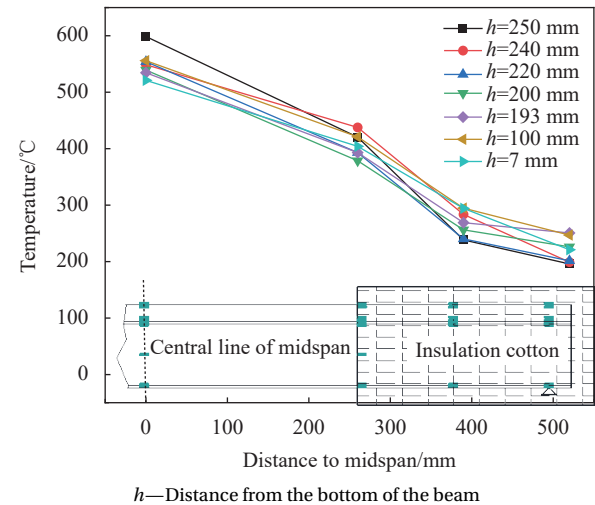


图 11 600℃ 时温度沿钢-混组合梁梁长的变化

Fig. 11 Temperature changes along beam length of steel-concrete composite beam at 600℃

钢梁各点温度接近，升温较快；混凝土板顶部温度与钢梁一致，混凝土内部升温较钢梁慢，前期混凝土内部温度由中心向外表面升高，上下表面温度较接近；升温后期温度由上至下降低，温度变化如图 12 所示。炉温升高至 600℃ 时，钢梁 S2 处温度与炉温仅相差 22℃，而混凝土最低温 C4 处与之相差 60℃。C4 为钢梁与混凝土相交处，钢梁因受混凝土板吸热的影响，温度较其他部位偏低。因此，混凝土板的吸热作用对钢梁温度场空间分布有一定的影响。

钢-混组合梁温度变化经过升温、持温、降温 3 个阶段，600℃ 两种钢-混组合梁混凝土板中心各点升温曲线如图 13 所示。两种类型试验梁受热

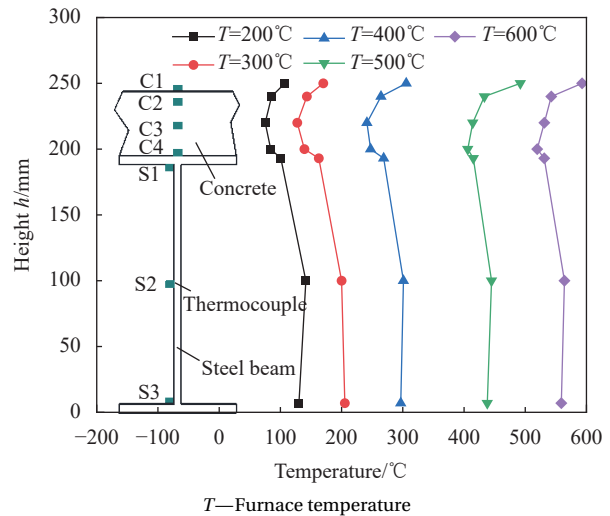


图 12 温度沿钢-混组合梁梁高的变化

Fig. 12 Temperature change along the height of steel-concrete composite beam

区混凝土最高温度分别为 554.5℃ 和 555.1℃，筋材类型对混凝土板吸热并无显著影响。包裹隔热棉区域，普通钢筋钢-混组合梁和 BFRP 筋钢-混组合梁混凝土板最高温度分别为 254.9℃ 和 225.4℃，两者相差 13.1%。由此可知，钢筋作为热的优良传播介质，热量能够通过纵筋传导至试验梁不受温处，提高该区域温度，而 BFRP 筋导热系数低，传递热量相对较少，导致两种类型试验梁不受温区段混凝土板出现明显温度差，因此，筋材类型对钢-混组合梁温度空间分布的影响不容忽视。

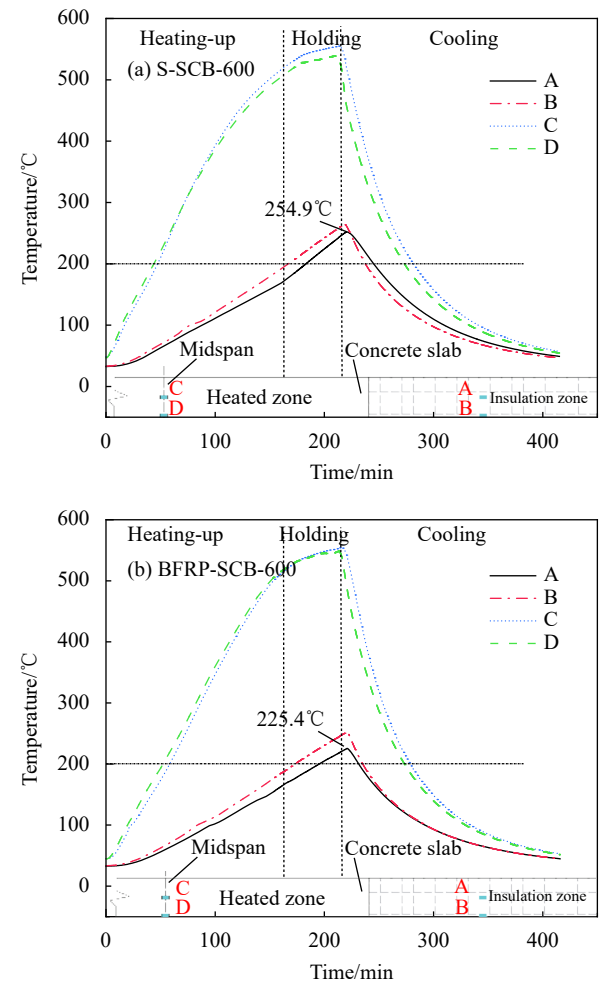


图 13 钢-混组合梁混凝土板升温曲线

Fig. 13 Heating curves of steel-concrete composite beam concrete slab

3 高温后静力试验结果与分析

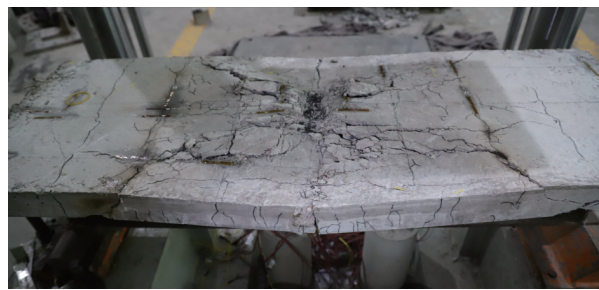
3.1 钢-混组合梁结构破坏形态

常温下普通钢筋钢-混组合梁在加载初期整体性能较好，钢板与混凝土连接紧密，呈现出组合弹性状态；荷载加至 320 kN 时，钢-混组合梁四分点附近混凝土表面出现肉眼可见对称开展的斜

裂缝，跨中位置混凝土底板处出现细小的竖向裂缝，此时试验梁处于弯剪受力状态；随着荷载增加，裂缝宽度增大，钢-混组合梁整体挠度发展较之前缓慢，此时钢梁已经屈服；502 kN 时，加载区混凝土出现局部压碎；荷载至 512 kN 时，钢-混组合梁发出响声，两侧裂缝骤然增大，斜裂缝两端出现明显的错动，持续加载至荷载降低到 $0.85P_u$ (P_u 为极限荷载) 时停止加载。钢-混组合梁高温后破坏形态与常温状态基本类似，由于高温后混凝土材料性能变化较大，内部和表面出现较多微裂缝，加载至钢梁屈服后，混凝土板裂缝开展速度较快，且裂缝发展也会沿着加载前高温后产生的裂缝进一步的扩大，局部受压区混凝土压碎，如图 14 所示。



(a) S-SCB-600 failure pattern



(b) BFRP-SCB-600 failure pattern

图 14 钢-混组合梁破坏图

Fig. 14 Failure diagram of steel-concrete composite beams

常温时 BFRP 筋钢-混组合梁加载初期同样表现出良好的组合作用，加载至 305 kN 时，混凝土板侧面靠近四分点处出现第一条斜裂缝，随后侧

面斜裂缝向顶面中心处斜向发展；至 480 kN 时，混凝土板跨中两侧也对称开展了两条斜裂缝；加载至 506 kN 时，靠近支座处的斜裂缝崩开，加载区混凝土局部压碎，侧面有块状混凝土掉落。高温后混凝土板表面沿横向 BFRP 筋出现规则条状裂缝，继续加载后，裂缝在此基础上进一步发展。BFRP 筋钢-混组合梁混凝土板表面破碎程度更加严重。

两种试验梁都呈剪切破坏，四分点位置翼缘首先出现斜裂缝，随后裂缝逐渐向上发展，直至相交于混凝土板中心位置。随着温度的升高，混凝土板内部微裂缝增多，造成混凝土强度下降，钢-混组合梁塑性变形减少。BFRP 筋钢-混组合梁比普通钢筋钢-混组合梁裂缝开展更早，裂缝数量更多，600℃ 时 BFRP 筋钢-混组合梁混凝土板表现出较显著的脆性破坏。由于 BFRP 筋在 400℃ 时内部树脂基体失效，力学性能丧失，材料失去刚度，原本的连接、支撑骨架作用消失，致使混凝土更加松散，局部承压区混凝土破碎范围更大，变形随之也更大。

3.2 钢-混组合梁残余承载能力

试验梁不同温度后的剩余承载能力结果如表 3 所示。在常温、200℃、400℃ 时，两种试验梁的剩余承载力差值在 0.4%~2.1% 之间。结合试验现象，在常温下两者破坏形态基本一致，破坏后 BFRP 筋和普通钢筋均没有出现明显的脱粘和受剪破坏现象。200℃ 时，由于混凝土抗压强度下降了 15.4%，而 BFRP 筋的强度下降不明显，仍能与普通钢筋发挥同等作用，此时两种类型钢-混组合梁整体承载力均下降 7%。400℃ 后混凝土抗压强度比 200℃ 时略有提高，由于 BFRP 筋有混凝土的包裹，未达到劣化温度，性能损失较小，因此该温度下的 BFRP 筋钢-混组合梁承载能力与 200℃ 相比仅退化 8%，且与普通钢筋钢-混组合梁承载能力相近。600℃ 后，BFRP 筋达到碳化温度，树脂胶体分解膨胀，筋材抗剪强度大幅下降，加之筋体膨胀使混凝土产生多条宽裂缝，导致混凝

表 3 钢-混组合梁残余承载能力

Table 3 Residual bearing capacity of steel-concrete composite beams

Test beam	P_u (25℃)/kN	P_u (200℃)/kN	P_u (400℃)/kN	P_u (600℃)/kN
S-SCB	512.8	476.2	439.1	390.0
BFRP-SCB	506.3	465.9	441.1	332.7

Note: P_u —Ultimate bearing capacity.

土板强度降低, 承载能力下降了 34.3%。当筋材温度超过 BFRP 筋热分解温度时, BFRP 筋钢-混组合梁的承载力削弱程度比普通钢筋钢-混组合梁显著, 不宜继续承载。

3.3 钢-混组合梁荷载-挠度曲线

两种不同配筋钢-混组合梁的实测荷载-跨中挠度曲线如图 15 所示。从试验数据分析可知, 两种试验梁的荷载-挠度曲线大致可分为整体弹性阶段、钢梁屈服, 混凝土受压出现塑性损伤的弹塑性阶段、混凝土板开裂破坏退出工作的破坏阶段这三个阶段。

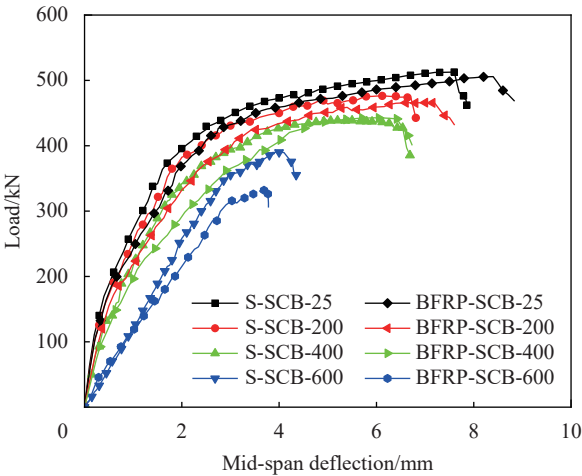


图 15 钢-混组合梁荷载-挠度曲线

Fig. 15 Load-deflection curves of steel-concrete composite beams

弹性阶段, 400℃ 前钢-混组合梁荷载挠度曲线初始斜率较接近, 表明不同温度后钢-混组合梁的初始刚度接近。此时主要由钢梁承载, 而高温后钢梁的材料性能变化较小, 因此各曲线在此阶段无较大差别。600℃ 时, 混凝土板刚度削弱较多, 试验梁初始刚度明显降低。在弹塑性阶段, 钢梁屈服, 混凝土板更多地参与承载, 此时曲线呈非线性状态, 温度对混凝土及筋材强度有较大影响, 导致此时曲线分离较大, 具体表现为随着温度升高, 整体刚度减小。在破坏阶段, 混凝土性能的变化对挠度发展影响较大, 400℃ 前, 两种试验梁均有明显的塑性发展, 600℃ 时, 混凝土性能退化显著, 两者均无典型的破坏阶段, 混凝土在弹塑性阶段迅速退出工作, 导致试验梁快速达到极限承载力。

BFRP 筋钢-混组合梁的荷载-挠度曲线较平缓, 初始斜率较小, 初始刚度低。由于 BFRP 筋的弹性模量约为钢筋的 1/4, 加之 BFRP 筋的受压蠕变

效应, 致使 BFRP-SCB 混凝土板整体刚度低, 挠度发展快。常温下, 两种不同配筋钢-混组合梁的荷载-挠度曲线线型类似。高温后普通钢筋钢-混组合梁的承载能力下降了 7.1%~23.9%, 而 BFRP 筋钢-混组合梁承载能力下降了 8.0%~34.2%, 下降程度更大; 在温度高于 400℃ 时, 承载力下降幅度增大, 延性也随着温度的升高而降低。经过高温后, 混凝土内部出现较多微裂缝, 随着温度的升高, BFRP 筋树脂基体变质膨胀, 混凝土板出现明显的贯穿裂缝, 严重降低混凝土板刚度和强度。随着挠度的增大, 钢梁屈服, 600℃ 时试验梁在破坏阶段塑性变形发展很小, 比常温状态更早退出工作, 尤其 BFRP 筋钢-混组合梁无明显塑性变形, 破坏较突然。

3.4 钢-混组合梁应变分析

BFRP 筋钢-混组合梁和普通钢筋钢-混组合梁跨中截面沿梁高方向的应变分布如图 16 所示, 由于试验梁高温后混凝土板已经开裂, 影响混凝土板的应变数据质量, 此处不考虑。从钢梁的应变可知, 钢-混组合梁在钢梁屈服前, 应变近似呈线型变化, 基本符合平截面假定。图中应变为 0 对应的梁高即为每个加载时期中性轴位置, 可见所有钢-混组合梁中性轴均在钢梁截面上, 使混凝土板完全处于受压的理想状态。常温下, 由于 S-SCB 混凝土板有较高的初始刚度, 其初始中性轴比较靠上。600℃ 高温后, 两种钢-混组合梁的中性轴高度均下降, 下降后的中性轴高度接近, 此时两种试验梁的混凝土板刚度削弱程度相当。由于弹塑性阶段和破坏阶段混凝土开裂后刚度和强度的丧失, 每一片梁的中性轴随着荷载的增加, 都在缓慢降低; 对于高温后的试验梁, 混凝土强度丧失更明显, 中性轴下降的速度也更快。

加载初期, 两种钢-混组合梁均处于弹性阶段, 其应变的变化趋势基本相同。随着荷载增加, 两者的应变变化也明显不同。常温时, BFRP-SCB-25 钢梁顶部应变比 S-SCB-25 大, 由于 BFRP 筋对混凝土板刚度的削减, 加载后期 BFRP 筋钢-混组合梁中性轴下移较多, 钢板顶部压应力变大。高温后, 由于温度对 BFRP 筋钢-混组合梁的混凝土板削弱程度更加严重, 混凝土板较早退出工作, BFRP-SCB-600 底部受拉区钢材比 S-SCB-600 更早屈服, 进入强化阶段。普通钢筋钢-混组合梁在高温后比 BFRP 筋钢-混组合梁有更好的组合作用, 能较好发挥材料性能。

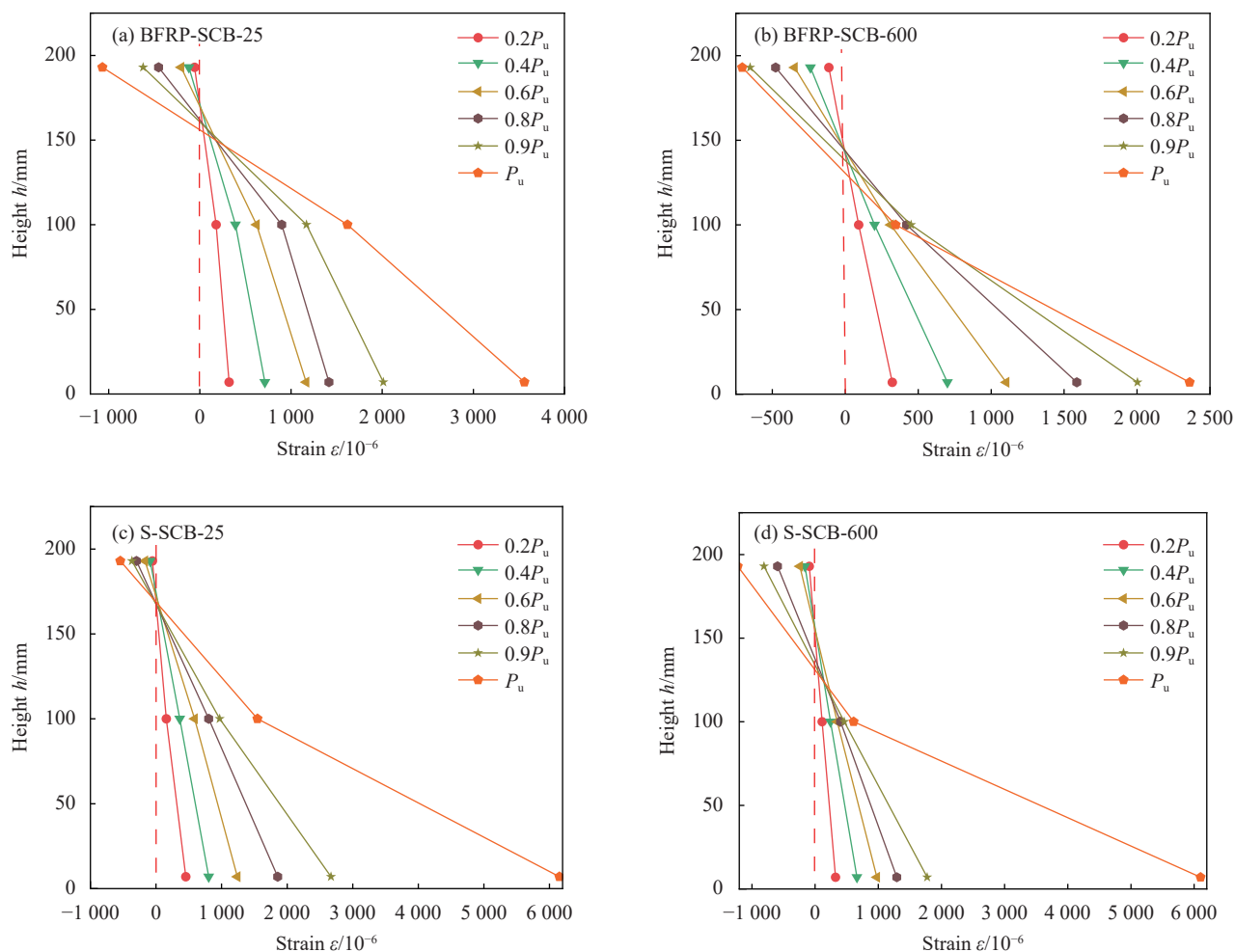


图 16 钢-混组合梁跨中截面应变分布

Fig. 16 Strain distribution at mid-span section of steel-concrete composite beams

4 结论

(1) 普通钢筋经过 600℃ 的高温后, 仍能保持其材料力学性能; 而玄武岩纤维增强复合材料 (Basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 筋在 400℃ 高温后, 树脂基体碳化导致材料抗拉强度降低了 84.1%, 脆性明显增强, 不适于继续承载; BFRP 筋破坏前, 温度对其弹性模量的影响并不显著。

(2) 钢-混组合梁局部受温时, 筋材能够通过热传导将热量传递到不受温处, 影响钢-混组合梁温度场分布, 而 BFRP 筋相对普通钢筋热传导效率较低, 对温度分布影响较小, 由此造成的隔热区混凝土板温差可达 13.1%。此外, 靠近混凝土板区域的钢梁温度较低, 表明混凝土板的吸热作用对钢梁温度场空间分布有一定的影响。

(3) BFRP 筋和普通钢筋钢-混组合梁破坏模式相似, 均为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段, 但 BFRP 筋较低的弹性模量导致混凝土板刚度降

低, 组合梁在荷载下变形增大。600℃ 后, 两种钢-混组合梁延性大幅降低, 塑性变形减少, 其中 BFRP 筋钢-混组合梁更早退出工作。

(4) 温度低于 400℃ 时, 由于混凝土的包裹, BFRP 筋未达到劣化温度, 两种钢-混组合梁承载能力差别较小; 但 600℃ 时, BFRP 筋劣化, 筋体膨胀使混凝土板开裂, 其裂缝开展与普通钢筋钢-混组合梁显著不同, 主裂缝沿横向筋材规律开展, 且裂缝较宽, 降低了混凝土板刚度和强度, 导致 BFRP 筋钢-混组合梁承载能力降低了 34.3%。

参考文献:

- [1] 卫星, 肖林, 温宗意, 等. 钢混组合结构桥梁 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(S1): 107-119.
WEI Xing, XIAO Lin, WEN Zongyi, et al. State-of-the-art review of steel-concrete composite bridges in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021,

- 43(S1): 107-119(in Chinese).
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述:2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97(in Chinese).
- [3] 王言磊, 孙会杰, 曹明敏. 环境侵蚀下钢-混凝土组合梁耐久性使用寿命分析[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(S1): 355-359.
WANG Yanlei, SUN Huijie, CAO Mingmin. Analysis of durability service life for steel-concrete composite beams under[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(S1): 355-359(in Chinese).
- [4] ABED F, ALHAFIZ A R. Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars[J]. *Composite Structures*, 2019, 215: 23-34.
- [5] AHMED M O, WADDAH A H, MOHAMMAD K. Durability and mechanical properties of concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars: Towards sustainable infrastructure[J]. *Polymers*, 2021, 13(9): 1402.
- [6] GARBACZ A, URBANŃSKI M, ŁAPKO A. BFRP bars as an alternative reinforcement of concrete structures-Compatibility and adhesion issues[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 3903(1129): 233-241.
- [7] HOU W, LI Z Q, GAO W Y, et al. Flexural behavior of RC beams strengthened with BFRP bars-reinforced ECC matrix[J]. *Composite Structures*, 2020, 241: 112092.
- [8] DUIC J, KENNO S, DAS S. Performance of concrete beams reinforced with basalt fibre composite rebar[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 470-481.
- [9] 霍宝荣, 张向东. BFRP筋的力学性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(4): 626-630.
HUO Baorong, ZHANG Xiangdong. Experimental study of mechanical properties of the BFRP bar in different diameters[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, 27(4): 626-630(in Chinese).
- [10] 吴智深, 汪昕, 史健喆. 玄武岩纤维复合材料性能提升及其新型结构[J]. *工程力学*, 2020, 37(5): 1-14.
WU Zhishen, WANG Xin, SHI Jianzhe. Advancement of basalt fiber-reinforced polymers (BFRPs) and the novel structures reinforced with BFRPs[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(5): 1-14(in Chinese).
- [11] 姚伟发, 黄侨, 张娟秀. 火灾环境下钢-混凝土组合梁力学性能试验研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 58-65.
YAO Weifa, HUANG Qiao, ZHANG Juanxiu. Experimental study on mechanical performance of steel-concrete girders under fire loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 58-65(in Chinese).
- [12] 李光辉. 高温后FRP筋混凝土梁静力与疲劳受弯性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- LI Guanghui. Flexural behavior of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced concrete beams under static and fatigue loads after elevated temperature exposure[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019(in Chinese).
- [13] 李趁趁, 王英来, 赵军, 等. 高温后FRP筋纵向拉伸性能[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1076-1081.
LI Chenchen, WANG Yinglai, ZHAO Jun, et al. Longitudinal tensile properties of FRP bars after high temperature[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(6): 1076-1081(in Chinese).
- [14] 唐利, 张春涛, 李彪, 等. 高温作用下BFRP筋力学性能试验研究[J]. *建筑科学*, 2017, 33(1): 36-40.
TANG Li, ZHANG Chuntao, LI Biao, et al. Experimental research on the mechanical properties of BFRP under high temperature[J]. *Building Science*, 2017, 33(1): 36-40(in Chinese).
- [15] HU Y J, JIANG C, LIU W, et al. Degradation of the in-plane shear modulus of structural BFRP laminates due to high temperature[J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3361.
- [16] 姚伟发, 黄侨, 张娟秀. 钢-混组合梁的火灾试验及剩余承载力[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(2): 347-352.
YAO Weifa, HUANG Qiao, ZHANG Juanxiu. Fire experiment and residual strength of steel-concrete composite girders[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(2): 347-352(in Chinese).
- [17] 张岗, 宋超杰, 李徐阳, 等. 燃油火灾下预应力混凝土梁耐火试验[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(1): 210-221.
ZHANG Gang, SONG Chaojie, LI Xuyang, et al. Experimental study on fire resistance of prestressed concrete girders under fuel fire exposure[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(1): 210-221(in Chinese).
- [18] 张岗, 宗如欢, 施颖, 等. 钢-混组合简支箱梁耐火性能研究[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(3): 41-46.
ZHANG Gang, ZONG Ruhuan, SHI Ying, et al. Study of fire resistance performance of simply-supported steel and concrete composite box girder[J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(3): 41-46(in Chinese).
- [19] HAKEM A, HAYA M, NOOR T, et al. Serviceability and flexural behavior of concrete beams reinforced with basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to harsh conditions[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 2110.
- [20] 刘静雅, 霍静思, 刘艳芝. CFRP约束高温后混凝土力学性能试验研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(9): 158-166.
LIU Jingya, HUO Jingsi, LIU Yanzhi. Experimental study on the mechanical performance of post-fire concrete confined by CFRP sheets[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(9): 158-166(in Chinese).

[21] AHMED H, FOUAD K, HEND E, et al. Behaviour of concrete beams reinforced using basalt and steel bars under fire exposure[J]. [Engineering Structures](#), 2021, 238: 112251.

[22] 上海市城市建设设计研究总院. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB/T 50917—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013. Shanghai Urban Design Research Institute. Code for design of steel and concrete composite bridges: GB/T 50917—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013(in Chinese).

[23] ZHU B, LIU H, LIU G, et al. Bond behavior between BFRP bars and hybrid fiber recycled aggregate concrete after high temperature[J]. [Journal of Renewable Materials](#), 2021, 9(3): 507-521.

[24] 陆燕青, 周星宇, 周济, 等. 火灾高温后混凝土的轴心抗压强度及评估方法[J]. [混凝土](#), 2021(7): 22-27. LU Yanqing, ZHOU Xingyu, ZHOU Ji, et al. Axial compressive strength and assessment of concrete after fire temperature[J]. [Concrete](#), 2021(7): 22-27(in Chinese).

[25] HAGER I. Behaviour of cement concrete at high temperature[J]. [Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences](#), 2013, 61(1): 145-154.