

文章编号:1673-2049(2006)01-0023-06

火灾高温下玻璃纤维筋的力学性能研究

周长东,吕西林,金 叶

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘要:针对土木工程中所用的纤维筋耐火能力问题,对 27 组,共 100 根玻璃纤维(GFRP)筋试件在火灾高温时的力学性能进行了试验研究,试验中主要考虑了温度和受火时间的影响,得到了火灾高温中和火灾高温后玻璃纤维筋的抗拉强度和弹性模量。试验结果证明:玻璃纤维筋的力学性质表现出明显的阶段性,110 °C 时粘接胶体逐渐软化而丧失粘接能力,但温度下降后其粘接强度还可以恢复;190 °C 时粘接胶体已基本碳化,其粘接性能将不能再恢复。因为受到火灾高温的影响,玻璃纤维筋的强度和弹性模量均会下降,若所经历的最高温度低于 190 °C,其力学性能还可恢复;若高于 190 °C,将不能再恢复。这些试验结果可以用于玻璃纤维筋增强混凝土结构抗火设计中。

关键词:粘接强度;玻璃纤维筋;火灾;高温;力学性能

中图分类号:TU541

文献标志码:A

Research on Mechanical Behavior of GFRP Bars in High Temperature

ZHOU Chang-dong, LU Xi-lin, JIN Ye

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The fire-resistance behavior of FRP bars is lower than that of steel reinforcement. Experimental studies were carried out on 100 (27 groups) GFRP bars exposed to high temperature under axial load to investigate the mechanical behavior of GFRP bars under fire and after fire. The parameters considered are temperature variation and the time exposed to high temperature. The tensile strength and the elastic modulus of GFRP bars were investigated through test. The test results were obtained during and after high temperature exposure and indicate that the mechanical behavior of GFRP bars has obvious phasic changes: the resin will soften when temperature is higher than 110 °C. At this point, the resin will no longer be able to transfer stresses from fiber to fiber, but the bond strength of resin will be recovered when temperature decreased. The resin will be carbonized when temperature is higher than 190 °C. At this point, the bond strength of resin will not be recovered. When the strength and the elastic modulus of GFRP bars decrease with the rise of temperature, it can be recovered when the highest temperature experienced is under 190 °C. The results can be applied to fire resistance design of GFRP reinforced concrete structures.

Key words: bond strength; GFRP bar; fire; high temperature; mechanical behavior

收稿日期:2005-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50321803);中国博士后科学基金项目(20040350492);上海市博士后科研计划项目(200412)

作者简介:周长东(1971-),男,山东聊城人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:goldenleaf12@hotmail.com。

0 引 言

FRP 筋是由连续纤维材料和粘结胶体组成的复合材料,单根纤维丝的直径非常小,纤维丝之间通过粘结胶体粘合在一起^[1-5]。当 FRP 筋承受外部荷载时,众多粘合在一起的纤维丝可以均匀受力,并且具有良好的共同工作性能。由于粘结树脂对高温比较敏感,当温度高于一定限值时会发生玻化,即处于流塑状态,它对纤维丝的粘结作用会逐渐退化乃至丧失;处于高温环境中的连续纤维丝的性能也会发生不同程度的变化。因为高温下 FRP 筋的各种组成材料本身的变化,造成 FRP 筋的力学性能也会发生相应的变化。

Rehm 和 Franke 以及 Sen 研究发现^[6-7],E-玻璃的熔化温度为 1 260 °C,但在 200 °C 时其强度比 20 °C 时要下降很多,当温度达到 550 °C 时,玻璃纤维的抗拉强度仅是室温条件下的 1/2;粘结树脂的玻化点一般在 100 °C~200 °C,超过这一温度树脂将会发生玻化、热分解和碳化,从而失去粘结能力;由粘结材料和玻璃纤维丝共同组成的整体——GFRP 筋材在 100 °C 时的强度大约是 20 °C 时的 70%(钢材大约是 95%),若温度高于 400 °C 时,则下降到 30%(钢材大约是 50%)。由此可以看出:高温对 GFRP 筋材的影响是巨大的。

当火灾发生时,处于火场中的建筑构件均受到高温环境的影响,虽然处于混凝土保护层之内的 FRP 筋不直接暴露在火场中,但其周围的环境温度会随过火时间的延长而逐渐升高。虽然因为缺氧不会产生明火,但是 FRP 筋中的粘结树脂和连续纤维本身均会受到高温的影响,致使纤维筋的强度随温度的升高而发生变化。

笔者主要研究火灾高温环境对 GFRP 筋的力学性能的影响和火灾高温环境降至室温后 GFRP 筋力学性能的变化,以及恒定温度持续不同的时间对 GFRP 筋材料力学性能的影响,研究结果可以在抗火设计中用于确定 GFRP 筋材料性能。

1 试验概况

1.1 试件设计

本研究选用广东省中山市浦美复合材料有限公司生产的直径 6mm 的 GFRP 筋,为了增加和混凝土之间的粘结,对这种 GFRP 筋的表面进行了纤维缠绕和喷砂处理;为了对 GFRP 筋进行加载试验,采用广西柳州欧维姆(OVM)机械股份有限公司专

门开发生产的粘结型锚具。为了安装和试验方便,对这种锚具的内外壁均进行了套丝处理,考虑到试验装置的实际情况,GFRP 筋试件(以下简称试件)的设计见图 1。

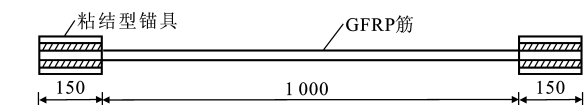


图 1 试件结构(单位:mm)

Fig. 1 Structure of Specimen (Unit:mm)

1.2 试件分组

试件分组情况见表 1。试验温度取为:5 °C(室温)、60 °C、90 °C、110 °C、130 °C、150 °C、170 °C、190 °C、210 °C、230 °C、250 °C、270 °C,共计 12 个工况。为了研究升温 and 降温过程对 GFRP 筋材料造成的影响,在每个温度条件下分别有一组试件在高温时直接试验,并有另一组试件进行“室温—高温—室温”后的拉伸试验;为了研究火灾高温持续时间对 GFRP 筋材料性能的影响,在 230 °C 时,对恒温 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h 共 5 种工况下的 GFRP 筋进行了试验研究;为了保证试验结果的可靠性,每种工况中保证有至少 3 个以上的试件,共计 27 组,100 根试件。

表 1 试件分组

Tab. 1 Grouping of Specimens

试验工况	不同试验温度(°C)下的组数											
	5	60	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270
高 温	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	1
室温—高温—室温	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

1.3 试验装置

通过图 2 的自制试验装置进行试件升温加载试验,荷载由油压穿心千斤顶施加,通过自动控温电炉进行控温。试验前将试件一端的粘结型锚具旋入地脚螺栓固定,再将试件另一端的粘结型锚具旋入连接件(连接件另一端与高强螺杆相连,高强螺杆套在穿心千斤顶中),随后将千斤顶上面的螺帽旋紧,试件安装完毕。

试验时通过安装在千斤顶上的荷载传感器进行力的量测和控制;位移计安装在试件的上下锚具之间,用于量测整个试验段的位移。当位移计等量测装置安装调试好时,即可进行加载试验。

1.4 数据量测和加载制度

本试验主要量测 3 方面的内容:温度、荷载和与荷载相对应的位移,通过荷载可以得到试件的应力和强度,通过位移可以得到试件的应变和弹性模量。

升温过程通过自动控温电炉上自带的仪表控制

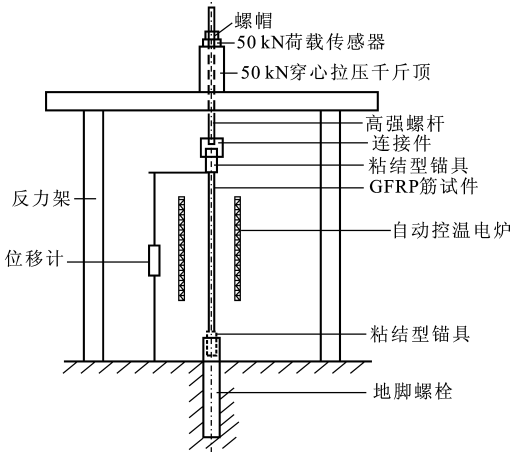


图 2 试验装置

Fig. 2 Test Setup

升温,当升高到预定温度后电炉可以自动保持温度的恒定,误差一般在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,温度值可以在控制仪表上实时显示。

当温度升至预定温度并恒定 3 h 后,进行加载试验。试验时逐级缓慢加载直至试件断裂破坏,加载速度控制在 $2\text{ kN}\cdot\text{min}^{-1}$,每级荷载为 2 kN,荷载通过 50 kN 穿心千斤顶上部的 50 kN 荷载传感器进行量测和控制。

试验所用的自动控温电炉的炉膛尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 350\text{ mm}$,试件有 350 mm 的试验段处于炉膛内承受高温,这一区段的应变情况无法直接量测,采用位移计量测整个试件的位移变化,再由此得到试件的名义应变和名义弹性模量。

2 试验过程

2.1 试件表面颜色

GFRP 筋的自然颜色为白色,因为表面经过喷(黄)砂处理,呈现黄白色,颜色较浅;当 GFRP 受热后,在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度时,试件的表面颜色没有改变,仍然呈较浅的黄白色;在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高温试验段的 GFRP 筋表面呈焦糊状,为很浅的黄黑色;在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四种温度时,高温试验段的表面颜色逐渐加深,在 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高温试验段的表面颜色已经接近于炭黑色;在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 四种温度时,高温试验段的表面颜色均呈炭黑色,这几种温度条件下 GFRP 筋高温试验段的表面颜色已没有明显的区别。

试件表面颜色的变化是因为粘结胶体的碳化引起的。从表面颜色的变化可以看出试件随温度的变化过程:在温度低于 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,粘结胶体没有碳化,

所以 GFRP 筋材表面颜色并未发生改变;在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,粘结胶体开始发生碳化,并且随温度的升高碳化程度加剧,所以在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随温度的升高,试件表面的颜色逐渐加深;在 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试件中粘结胶体的碳化程度已经很高,所以高于 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试件表面颜色均呈炭黑色。

2.2 试件状态

试验中发现,当试验温度高于 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,高温试验段的 GFRP 筋开始明显变软,说明从 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 起,粘结胶体的热分解和碳化已经非常严重,对玻璃纤维丝的粘结作用已经基本丧失;在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种温度时,试件非常容易在高温试验段折断,说明从 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 起,GFRP 筋材中的玻璃纤维丝的强度也因为受热而变得不稳定。

2.3 试验现象及试件破坏形态

试件的典型破坏形态见图 3。从图 3 中可以看出:随受热温度不同,试件的破坏形态有着很大的不同,并且有着明显的阶段性。

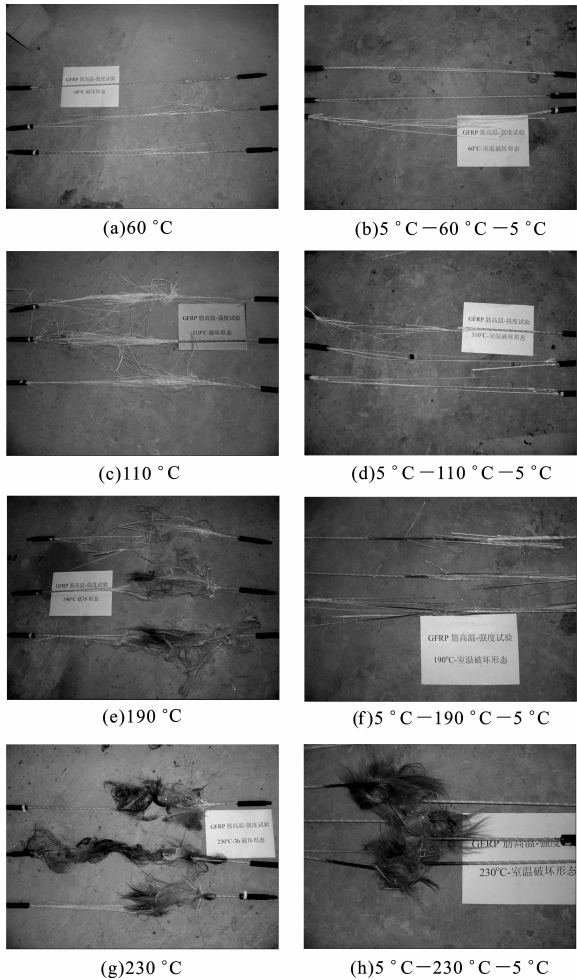


图 3 试件典型破坏形态

Fig. 3 Typical Failure Modes of Specimen

2.3.1 室温试验

在试验温度为室温,试件临近破坏极限荷载前,可以听到较大的“劈、啪”声,达到试极限荷载时,伴随着巨大的声响,试件迅速失去承载能力而突然爆裂破坏,断口裂处的 GFRP 筋呈白色的放射性条状。这是因为粘结胶体的粘结作用使玻璃纤维丝具有良好的共同工作性能,当试件破坏时并不是单丝断裂,而是部分玻璃纤维丝集体突然脆断,所以声音较大,GFRP 筋呈条形破坏状态。

2.3.2 升温试验

当温度较低时(60°C 、 90°C),试件的试验现象和破坏形态类似于室温试件的,试件均在高温试验段断裂破坏,但在 90°C 时,试件的破坏处为放射性条状 GFRP 筋碎片夹有少量的白絮状玻璃纤维丝,表明此时表面的粘结胶体已经开始受热玻化,但 GFRP 筋的断口处仍呈白色,说明粘结胶体还未发生碳化。

当试验温度升高到 110°C 、 150°C 、 170°C 时,临近破坏前的“劈、啪”声减弱,但破坏时的声音却仍然很大,伴随着“啪”的一声爆响,试件突然破坏,破坏处仍为放射性的条状夹有絮状的玻璃纤维丝。在 $110^{\circ}\text{C}\sim 170^{\circ}\text{C}$ 时,随温度的升高,断口处的 GFRP 颜色从白色逐渐变为焦黄色,但即使在 170°C 时仍然较浅;随温度的升高,破坏处夹杂的絮状物逐渐增多,当温度接近 170°C 时,破坏处的条状物已经很少,多数为稍显蓬松的絮状物。这些现象说明:在 $110^{\circ}\text{C}\sim 170^{\circ}\text{C}$ 时,GFRP 筋中的粘结胶体开始由外及内逐渐玻化,玻璃纤维丝之间力的交换和传递逐渐减弱,破坏前的微弱声响是较少的玻璃纤维丝因为受力过大而断裂所发出的,但粘结胶体还未完全玻化,还有许多玻璃纤维丝共同工作,这样因为少数玻璃纤维丝而断裂引起的“多米诺”效应,从而导致试件最终突然的脆性破坏;在 170°C 时,GFRP 筋内外的粘结胶体已经全部玻化,几乎不能在玻璃纤维丝之间传力,所以试件中的玻璃纤维丝已不能共同工作,当荷载达到玻璃纤维丝的断裂荷载时,玻璃纤维丝逐渐顺次断裂,从而导致断裂处是以玻璃纤维丝组成的絮状物为主。试验时的数据采集仪显示,在 170°C 时,试件的荷载应力-应变曲线已有短暂但很明显的下降段,即试件在达到其极限荷载之后并不是迅速失去承载能力,而是能继续承载直至达到其极限应变而破坏,试件的破坏荷载是其极限荷载的 90% 左右,但是这一温度区段内粘结胶体的碳化程度并不高,所以破坏处的颜色并不深。

在 190°C 时,试件破坏前已经没有声音,但破

坏时仍然伴随声音,破坏处为蓬松的絮状物,颜色为黄黑色;在 210°C 、 230°C 、 250°C 、 270°C 时,试件的破坏过程与 190°C 时非常相似,破坏处均为蓬松的絮状物,且随温度的升高颜色逐渐加深;在 230°C 、 250°C 、 270°C 时,破坏处的絮状物颜色已经呈炭黑色。在 210°C 时,高温区段内的 GFRP 筋已经开始变软,在温度高于 250°C 时,高温区段的 GFRP 筋不但变软,还非常容易折断。这些现象说明:在 $190^{\circ}\text{C}\sim 270^{\circ}\text{C}$ 时,玻璃纤维丝之间的粘结已经完全丧失,它们不能协调工作,破坏时玻璃纤维丝逐次断裂,导致这一温度区段内试件的应力-应变曲线均有明显但很短暂的下降段;粘结胶体已经严重碳化和热分解,导致试件在高温区段开始变软和颜色加深;当温度高于 250°C 时,玻璃纤维丝的性能已经发生变化,导致试件容易折断。

为了研究受热时间的长短对试件的影响,对 230°C 时不同受火时间的 GFRP 筋材的力学性能进行了试验研究。在试验过程中发现,当恒温 1.0 h 后外部玻璃纤维丝已经呈黄黑色,破坏处为蓬松的絮状物,由外及内逐渐变浅,内部为浅黄色,具有明显的层次感;恒温 1.5 h 后破坏处的絮状物外部颜色已经很深,呈炭黑色,但仍是外深内浅,有层次;恒温 2.0、2.5 h 的试件已经和恒温 3.0 h 的试件破坏现象和过程基本相同,破坏处内外层的颜色已经没有任何明显差别。从这些现象可以看出:在恒温 230°C (1.0、1.5 h) 时,GFRP 筋中的粘结胶体已经完全丧失了粘结能力,但仅是外层的粘结胶体发生了碳化,内层的粘结胶体并未碳化;当恒温 230°C (2.0 h) 之后,内外层的粘结胶体已经全部碳化。

2.3.3 室温—高温—室温试验

对于加温 3.0 h 然后冷却至室温后再进行试验的试件,破坏形态和过程也具有明显的阶段性。试件破坏时的颜色变化和高温试验时相同。

在温度低于 190°C 时,下降至室温后试件的破坏过程和 GFRP 筋的室温试验相同,试件均在高温区段内断裂破坏,证明经过室温—高温—室温过程这一区段内的 GFRP 筋的强度已经有所降低;破断处呈现放射性的条状破坏,说明降温后玻璃纤维丝之间恢复了粘结,可以共同受力。

经历过 210°C 的试件,破坏处出现了少许絮状物,说明降温后虽然粘结胶体的粘结性能有所恢复,但粘结胶体已经碳化和热分解,降温后有一部分玻璃纤维丝之间的粘结性能不能再恢复。

在温度高于 230°C 时,破坏处为蓬松的絮状

物,试件的应力-应变曲线有短暂但很明显的下降段,说明在温度高于 230 °C 时,粘结胶体已完全碳化分解,温度降低后其粘结性能将不能再恢复。

3 试验结果及分析

试件的典型应力-应变关系见图 4,从图 4 中可以看出:直至试件破坏前,这些试件的应力-应变关系基本上是呈理想的线弹性变化的,但在试验过程中发现,在 170 °C 之后,以及室温—高温—室温试验过程中,210 °C 以上的试件的应力-应变关系曲线有了短暂的下降段,因为试验条件所限,这一过程并未体现在试件的应力-应变关系曲线中。

3.1 温度-时间-强度试验

为了研究温度持续时间对 GFRP 筋材料性能的影响,在 230 °C 时进行了不同恒温时间的试验,试验结果见表 2。从表 2 中可以看出:随恒温时间的延长,GFRP 筋的强度呈下降趋势,这也体现了粘结胶体逐渐玻化、碳化和热分解的过程;弹性模量的变化和强度的变化基本相对应,但变化幅度很小。

表 2 230 °C 时不同恒温时间的试验结果

Tab. 2 Test Results of Specimens at 230 °C in Different Lasting Time

恒温时间/h	平均强度/MPa	平均名义弹性模量/GPa
1. 0	972. 38	46. 889
1. 5	912. 93	45. 495
2. 0	905. 71	45. 693
2. 5	930. 53	45. 604
3. 0	912. 48	48. 065

3.2 升温试验和室温—高温—室温试验

表 3 为各种工况下试件的强度和名义弹性模量的试验结果,其中 f_1 为升温试件的平均抗拉强度, E_1 为升温试件的平均名义弹性模量, f_2 为室温—高温—室温试件的平均抗拉强度, E_2 为室温—高温—室温试件的平均名义弹性模量。

从表 3 中可以看出:随温度的升高,GFRP 筋的强度逐渐下降。造成 GFRP 筋抗拉强度下降的主要原因有 3 个:①粘结胶体逐渐玻化、碳化和热分解,对于抗拉强度的贡献逐渐变小乃至丧失;②缺少粘结作用,玻璃纤维丝之间的共同工作效果逐渐减弱,导致 GFRP 筋强度的下降;③玻璃纤维丝本身的强度受到温度的影响而下降。

在 130 °C 时,GFRP 筋的抗拉强度比室温时下降了 10% 左右,这一阶段主要是因为粘结胶体的玻化和粘结作用减弱引起的;在 250 °C 时,GFRP 筋的抗拉强度比室温时下降了 20% 左右,这一阶段主

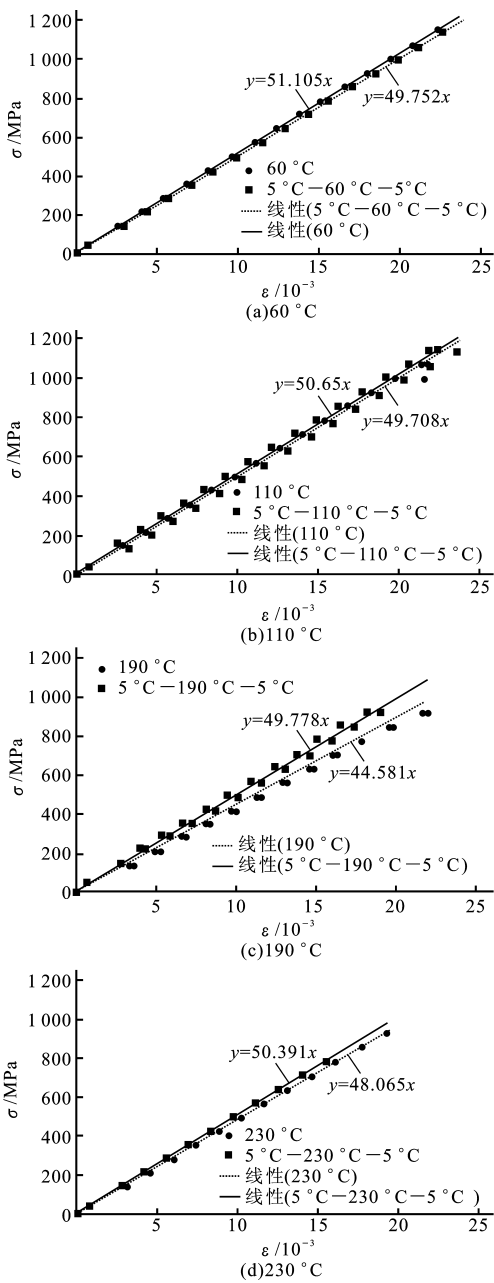


图 4 试件应力-应变关系

Fig. 4 Relation of Stress and Strain of Specimen

要是因为粘结胶体的热分解和碳化,导致粘结作用的丧失而引起的;在 270 °C 时,GFRP 筋的抗拉强度比室温时下降了 32% 左右,这一阶段主要是因为此时玻璃纤维丝的强度下降所造成的。

从室温—高温—室温试验可以看出粘结胶体对 GFRP 筋抗拉强度的影响过程:在温度低于 170 °C 时,是粘结胶体逐渐玻化的过程,降温后粘结作用可以恢复,玻璃纤维丝恢复共同工作,而 GFRP 筋的强度也恢复到室温时的强度;在温度高于 190 °C 时,因为粘结胶体的热分解和碳化加剧,降温后粘结作用已不能恢复,所以 GFRP 筋的强度也不能再恢

复;在温度高于 210 °C 时,因为高温和冷却过程对玻璃纤维丝造成的不利影响,GFRP 筋的强度比其高温下的强度还要低。

随温度的升高,GFRP 筋的名义弹性模量呈下降趋势,其主要原因也是粘结胶体的玻化、碳化和热分解以及玻璃纤维丝本身性质的变化所致,但其下降的幅度并不大,这是因为影响 GFRP 筋弹性模量的主要原因是其中的玻璃纤维丝,而在试验温度范围内,对玻璃纤维丝的弹性模量的影响并不显著。

表 3 不同温度下试件的试验结果

Tab.3 Test Results of Specimens Under Different Temperatures

试验温度/°C	f_1 / MPa	f_2 / MPa	$(f_2 \cdot f_1^{-1}) / \%$	E_1 / GPa	E_2 / GPa	$(E_2 \cdot E_1^{-1}) / \%$
5	1 138.05	1 138.05	100.0	51.521	51.521	100.0
60	1 059.16	1 161.71	109.7	51.105	49.752	97.4
90	1 046.53	1 144.39	109.4	48.473	50.842	104.9
110	1 033.35	1 204.99	116.6	49.708	50.654	101.9
130	1 046.36	1 189.76	113.7	49.092	47.949	97.7
150	1 003.15	1 190.82	118.7	46.693	47.755	102.3
170	998.88	1 164.39	116.6	48.645	49.100	100.9
190	972.38	972.58	100.0	44.581	49.778	111.7
210	981.11	936.07	95.4	46.354	50.188	108.3
230	912.48	794.33	87.1	48.065	50.391	104.8
250	939.97	773.76	82.3	47.944	47.972	100.0
270	775.91	753.50	97.1	44.956	51.873	115.4

4 结 语

(1)随温度的升高,GFRP 筋的强度和弹性模量均会下降,强度受温度的影响更加明显,在温度高于 270 °C 时,GFRP 筋的强度急剧下降。

(2)当试件经历高温再恢复到室温后,在温度低于 190 °C 时,GFRP 筋的强度可以恢复至室温时的强度,在温度高于 190 °C 时,GFRP 筋的强度不能恢复。

(3)试件内的粘结胶体在温度低于 190 °C 时,逐渐受热玻化而失去粘结作用,但降温后其粘结性能可以得到恢复,在温度高于 190 °C 时,粘结胶体将会碳化和热分解,其粘结性能不能再恢复。

(4)在 5 °C~270 °C 时,GFRP 筋的强度可以通过表 3 中的强度试验结果插值得到。

(5)在加 GFRP 筋增强混凝土结构强度设计时,为了安全起见,取 230 °C 时的 GFRP 筋的抗拉强度为其极限抗拉强度。

参考文献:

References:

[1] 吕志涛. 高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):1-5.
LU Zhi-tao. Application of High Performance FRP and Innovations of Structure Engineering [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(1):1-5.

[2] 楼梦麟,白建方. FRP 加固梁模态分析的摄动解法[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):21-24.
LOU Meng-lin, BAI Jian-fang. Perturbation Solution for Modal Characteristics of Beam Strengthened By FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(2):21-24.

[3] 何 飞,袁 勇. PVA 纤维混凝土梁的抗弯性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):34-39.
HE Fei, YUAN Yong. Experiment on Anti-Bending Performance of PVA Fiber-Reinforced Concrete Beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,22(2):34-39.

[4] 贺拴海,吕颖钊. 考虑材料耐久性的在役混凝土结构可靠度研究[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(1):71-75.
HE Shuan-hai, LU Ying-zhao. Reliability Research of Existing Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22 (1): 71-75.

[5] 贺拴海,任 伟. 纤维增强塑料加固混凝土结构研究 [J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(3):20-24.
HE Shuan-hai, REN Wei. Research on Rreinforced Concrete Structure with FRP[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2005,22(3):20-24.

[6] MOHAMED S. Effect of Fire on FRP Reinforced Concrete Members[J]. Composite Structures,2002,58(1): 11-20.

[7] PISANI M A. A Numerical Survey on the Behaviour of Beams Pre-stressed With FRP Cables[J]. Construction and Building Materials,1998,12(4):221-232.