

玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能

欧阳利军^{*1}, 许峰¹, 陆洲导²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 对 36 个玄武岩纤维布增强树脂基复合材料(BFRP)约束加固的高温损伤混凝土圆柱体和 15 个不同高温损伤的对比试件进行了轴压试验。试验表明, BFRP 侧向约束能显著改变混凝土圆柱体的破坏形态, 提高混凝土圆柱体的轴压强度和变形能力。其中二层 BFRP 包裹的 200℃、400℃、600℃和 800℃高温损伤混凝土圆柱体的轴压强度分别提高了 56%、82%、234%和 250%, 轴向变形分别提高了 328%、198%、232%和 136%。采用典型的纤维增强复合材料约束常温未损伤混凝土轴压强度和变形计算模型预测纤维增强复合材料约束高温损伤混凝土轴压极限强度和极限变形时存在较大的偏差。基于本文试验数据, 确定了 BFRP 约束高温损伤混凝土极限应力和极限应变计算模型中与温度相关的参量, 建议了适用于预测纤维增强复合材料约束高温损伤混凝土的极限应力计算模型和极限应变计算模型。

关键词: 玄武岩纤维; 约束; 高温损伤; 混凝土圆柱体; 轴压性能

中图分类号: TB330.1; TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)08-2002-12

Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures

OUYANG Lijun^{*1}, XU Feng¹, LU Zhoudao²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An experimental study on the axial compressive behavior of 36 elevated temperature damaged and 15 unheated concrete cylinders wrapped with basalt fiber reinforced polymer(BFRP) sheets was conducted. The test results show that confinement can significantly change failure mode, improve the strength and ductility of elevated temperature damaged concrete cylinders. After confined with two layers of BFRP sheets, the strength of the cylinders damaged by 200℃, 400℃, 600℃ and 800℃ increases by 56%, 82%, 234% and 250%, respectively; And the axial deformation increases by 328%, 198%, 232% and 136%, respectively. The typical ultimate stress models and ultimate strain models for FRP-confined undamaged concrete are not suitable for confined elevated temperature damaged concrete cylinders. Based on the test results, variables for calculation of ultimate stress and ultimate strain are determined, and ultimate stress model and ultimate strain model of confined elevated temperature damaged concrete cylinders are proposed.

Keywords: basalt fiber; confinement; elevated temperature damaged; concrete cylinders; axial compressive properties

随着我国经济的发展, 大量新型建筑材料和电器的使用, 火灾发生的频率及导致的生命财产损失

均呈迅速增长的趋势^[1]。建筑火灾除了造成生命和财产损失之外, 同时也会导致混凝土构件承载力下

收稿日期: 2017-07-12; 录用日期: 2017-08-27; 网络出版时间: 2017-09-26 07:02

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170926.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51708349; 11672185); 浙江省自然科学基金(LY13E080020)

通讯作者: 欧阳利军, 博士, 讲师, 研究方向为工程结构抗火与加固理论 E-mail: ouyang@usst.edu.cn

引用格式: 欧阳利军, 许峰, 陆洲导. 玄武岩纤维布增强树脂基复合材料约束高温损伤混凝土轴压力学性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2002-2013.

OUYANG Lijun, XU Feng, LU Zhoudao. Axial compressive behavior of basalt fiber reinforced polymer-confined damaged concrete after exposed to elevated temperatures [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2002-2013 (in Chinese).

降至房屋倒塌^[2-3]。

建筑火灾释放的热量通过辐射和对流使混凝土构件表面温度达到1 000℃, 由于混凝土具有热惰性, 核心混凝土温度较低, 减缓了构件内部混凝土强度的退化^[4-5]; 另外, 随着消防设施的不断完善及建筑防火、灭火措施的提高, 95%的建筑火灾可在2 h内被扑灭, 绝大部分火灾延续时间不超过2 h^[6]。因此, 多数混凝土结构房屋遭受火灾后, 仍可通过修复和加固继续使用^[7-10]。采用纤维增强树脂基复合材料(FRP)对混凝土柱进行横向约束可使混凝土处于三向受压状态, 既可提高混凝土柱轴压强度和变形能力, 又可提高混凝土柱的抗震性能^[10-14]。

Yaqub 等^[15]分别使用单层玻璃纤维布增强树脂基复合材料(GFRP)和碳纤维布增强树脂基复合材料(CFRP)对500℃高温损伤的混凝土圆柱和方柱进行约束, 发现两种纤维增强树脂基复合材料均能使圆柱轴压强度恢复或超过未损伤时水平, 方柱延性提高程度较圆柱低^[16]。Bisby 等^[17]对CFRP布约束高温损伤混凝土圆柱进行了轴压试验, 发现当历史温度介于300~686℃时, 约束对高温损伤混凝土柱强度提升效果显著。GB50608—2010 规范和 ACI 440.2R08 规范^[19]都提出了FRP约束常温下未损伤混凝土轴压强度和变形的计算模型, 但模型是否同样适用于高温损伤后混凝土的轴压加固设计有待考证。目前, 关于FRP约束高温损伤混凝土柱轴压性能方面的试验研究鲜有公开报道, 且仅得到了一些定性的研究结论。本文考虑高温损伤参数和FRP约束强度参数的影响, 对玄武岩纤维布增强树脂基复合材料(BFRP)约束高温损伤混凝土

圆柱体的轴压力学性能进行试验研究, 提出了BFRP约束高温损伤混凝土极限应力计算模型和极限应变计算模型。

1 试 验

1.1 试验设计

本试验制作了51个尺寸为Φ150 mm×300 mm混凝土圆柱体, 其中3个为未损伤试件, 其他48个试件按经历的高温损伤不同(200℃、400℃、600℃和800℃)分成4组, 每组分未约束、二层、三层和四层纤维布约束4种工况, 每种工况含3个试件, 试件约束方式如图1所示。各试件基本参数、混凝土配合比和BFRP材料性能如表1、表2和表3所示。

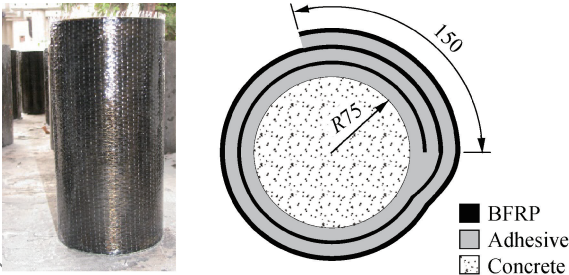


图1 玄武岩纤维布增强树脂基复合材料(BFRP)约束后的高温损伤混凝土圆柱体试件

Fig.1 Details of basalt fiber reinforced polymer(BFRP)-confined concrete cylinders damaged by elevated temperature

1.2 高温试验

为避免高温造成试件爆裂, 高温前将各试件放置于上海一恒科学仪器有限公司生产的PG2000电热鼓风恒温干燥箱内进行预干燥, 恒温(90±5)℃, 如图2所示。每12 h称重一次, 直至和前一次质量之差小于其与初始质量之差的10%。

表1 不同层数的BFRP约束不同损伤程度混凝土圆柱体试件的基本参数

Table 1 Details of damaged test specimens with different damage degrees confined by various plies of BFRP					
Number of plies	Historical temperature/℃				
	Room temperature	200	400	600	800
0	T20-L0-1	T200-L0-1	T400-L0-1	T600-L0-1	T800-L0-1
	T20-L0-2	T200-L0-2	T400-L0-2	T600-L0-2	T800-L0-2
	T20-L0-3	T200-L0-3	T400-L0-3	T600-L0-3	T800-L0-3
		T200-L2-1	T400-L2-1	T600-L2-1	T800-L2-1
2	—	T200-L2-2	T400-L2-2	T600-L2-2	T800-L2-2
		T200-L2-3	T400-L2-3	T600-L2-3	T800-L2-3
		T200-L3-1	T400-L3-1	T600-L3-1	T800-L3-1
3	—	T200-L3-2	T400-L3-2	T600-L3-2	T800-L3-2
		T200-L3-3	T400-L3-3	T600-L3-3	T800-L3-3
		T200-L4-1	T400-L4-1	T600-L4-1	T800-L4-1
4	—	T200-L4-2	T400-L4-2	T600-L4-2	T800-L4-2
		T200-L4-3	T400-L4-3	T600-L4-3	T800-L4-3

Notes: Number following letter T represents heating temperature; Number following letter L represents layers of FRP.

表 2 混凝土配合比
Table 2 Proportions of concrete mix

Strength grade of concrete	Sand ratio	Amount of each composition/(kg·m ⁻³)				
		Cement	Gravel	Sand	Water	Water reducing agent
C40	0.39	438	1103	704	206	0.47

表 3 BFRP 材料性能
Table 3 Properties of BFRP

Type	Ultimate tensile stress/MPa	Elastic modulus/GPa	Ultimate tensile strain/%	Thickness/mm	Density/(g·m ⁻²)
BF3300	2 303	105	2.18	0.121	341



图 2 未损伤混凝土圆柱体试件预干燥

Fig.2 Predrying of undamaged concrete cylinders

所有试件均采用上海电炉有限公司生产的 YFFK443/10QK-3GC 电阻炉进行高温处理，升温速率取为 5℃/min，试验中将试件高温后恒温时间设为 2 h 以模拟均匀损伤工况。电热炉额定功率为 12 kW，最高温度为 1 000℃，恒温条件下温度波动为 0~±10℃。整个升温过程由升温控制系统控制，恒温温度分别为 200℃、400℃、600℃ 和 800℃。

1.3 修复及加固方案

高温过程中试件均未发生爆裂。根据标准 GB 50367—2013^[20] 的建议，对试件表面的局部损伤用环氧砂浆修补、填平，如图 3(a)所示。修复试件在室温环境中养护 70 天后，打磨试件的端面和侧面，如图 3(b)所示，打磨完毕后用丙酮将试件表面擦拭干净。采用全段环向约束的方式约束混凝土圆柱体，如图 3(c)所示。纤维布搭接长度均为 150 mm^[18-19, 21]，如图 1 所示。为避免加载过程中试件端部发生应力集中，分别在试件两端缠绕一层 25 mm 宽的 BFRP^[22-23]，如图 3(d)所示。

1.4 加载制度及数据记录

所有试件均采用杭州邦威机电控制工程有限公司生产的 YAW-3000G 型微机控制电液伺服岩石试验机进行单调轴压加载。加载前试件两端分别垫一层聚丙烯减摩薄膜。在试件中部安装标距为 100 mm 的桥式引伸计测量试件轴向应变，如图 4 所示。试件表面的应变由电阻应变片测得。

预加载后进行正式加载，正式加载时采用位移控制，以 0.2 mm/min 的速率加载直至试件破坏。轴力、位移和应变均由 IMC 动态数据采集系统以

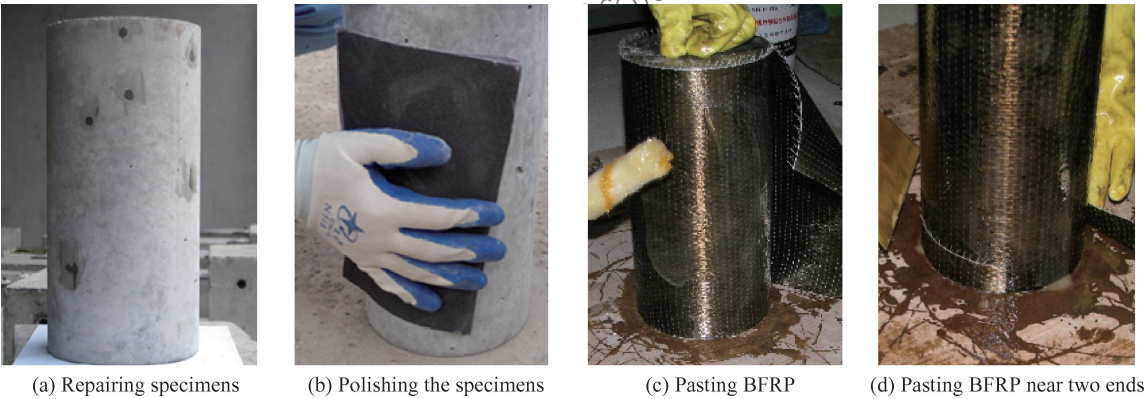


图 3 混凝土圆柱体试件损伤后采用环氧砂浆和 BFRP 修复和约束过程

Fig.3 Process of damaged concrete cylinders repaired and confined by epoxy mortar and BFRP

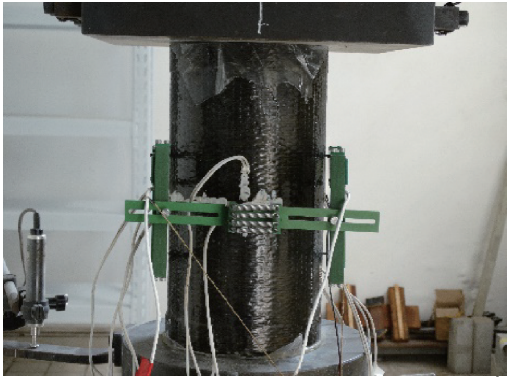


图 4 轴压试验装置
Fig. 4 Axial compressive test set-up

20 Hz 频率全程自动采集。加载过程中观察并记录试件的破坏形态。

2 试验现象及结果分析

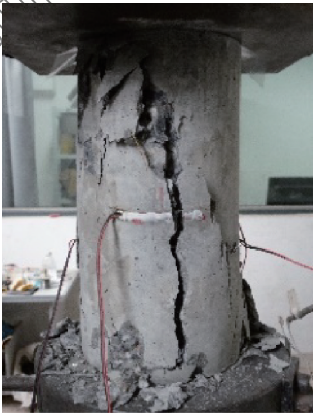
2.1 试验现象

2.1.1 未约束损伤混凝土圆柱体试件轴压过程试验现象

历史温度为常温和 200℃ 的未约束试件破坏形

态相近。在弹性阶段末期，随着轴向变形的增加，试件表面出现纵向微裂缝，达到峰值荷载的 80%~90% 时，混凝土发生局部剥离，并伴有脆裂声，试件中部出现竖向微裂缝。当荷载超过峰值荷载后，试件中部竖向裂纹迅速变宽并向两端延伸，与端部产生的竖向裂缝贯通，将柱体分割为若干小柱体，随着轴向变形的增加，小柱体失稳，承载力降低，过程中伴随着外表面混凝土大块崩裂和连续的混凝土脆裂声响。取下试件后发现试件破坏面多发生于粗骨料与砂浆界面及砂浆内部，粗骨料保持完整，两种温度工况下的破坏形态基本一致，均为纵向劈裂破坏，脆性破坏特征明显，如图 5(a) 和图 5(b) 所示。

历史温度为 400℃ 的试件破坏现象与历史温度为 200℃ 的试件相似，但在荷载超过峰值荷载后，随着轴向变形的增加，柱体中部的竖向裂缝与端部的斜裂缝和竖向裂缝贯通，柱体被分割为若干楔形体和小柱体。随着轴向变形的增加，小柱体失稳，斜裂缝扩展，楔形体与柱体分离，承载力持续降



(a) Room temperature



(b) 200℃



(c) 400℃



(d) 600℃



(e) 800℃

图 5 未约束高温损伤混凝土圆柱体试件轴压破坏形态

Fig. 5 Failure morphologies of unconfined damaged concrete cylinder specimens

低。该工况下的破坏模式如图 5(c)所示,破坏模式主要为纵向劈裂破坏。加载过程中,随着轴向变形的增加,试件裂缝扩展速率明显下降,脆性降低。

对于历史温度为 600℃ 和 800℃ 的试件,加载初期,柱体表面的已有裂缝即开始发展。随着荷载增加,试件表面斜裂缝不断变宽并向两端延伸,试件侧向变形明显。整个过程中裂缝扩展速率和脆性降低,虽然剥落破损严重但延性破坏特征显著,如图 5(d)和图 5(e)所示。

2.1.2 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件轴压过程试验现象

不同约束强度的试件破坏过程相似,如图 6 所示。加载初期(图 6 中 A 段),约束试件应力-应变曲线和未损伤混凝土应力-应变曲线基本一致。当轴向应力达到未约束混凝土峰值应力(图 6 中 B 点)时,开始听到轻微裂帛声,试件侧面部分区域外鼓。当轴向应力增加到约束混凝土柱极限应力的 85%时(图 6 中 C 点),裂帛声清脆、密集,中部部分纤维断裂、剥落。在轴向应力接近极限应力的过程中,裂帛声越发响亮和密集。当荷载达到约束试件极限荷载(图 6 中 D 点)时,伴随一声巨响,粗骨料崩离、BFRP 断裂,同时混凝土内的骨料碎屑沿着破坏面流出,且约束量越大、损伤程度越高的试件破坏时流出的碎屑越多,碎屑粒径越细。

高温损伤程度越高的试件,轴向应力达到应力-应变曲线中 B 点的时间越短。随着试件约束强度增加,不同损伤试件的破坏现象趋于一致。二层 BFRP 约束不同高温损伤混凝土柱的破坏形态如图 7 所示。由于试件端部受到加载端的约束作用,BFRP 约束高温损伤试件的破坏位置在试件中部,核心混凝土呈现具有一定倾斜角的沙漏状破坏模

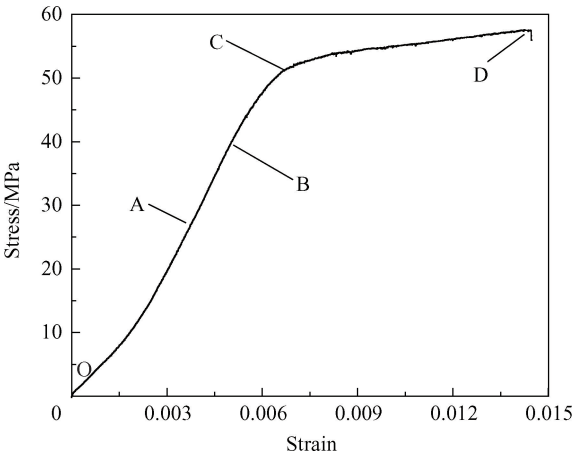


图 6 典型 BFRP 约束混凝土圆柱应力-应变曲线
Fig. 6 Typical stress-strain curve of concrete cylinders confined by BFRP wraps

式。相同约束强度下,该倾斜角随高温损伤程度的增加而变大。试件经历的温度越高,其抵抗 BFRP 提供的侧向力能力就越弱,在侧向力和端部约束的共同作用下,破坏时中部倾斜破坏角越大。

2.2 结果分析

2.2.1 未损伤和 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件轴压试验结果

所有试件均在相同的试验环境下进行单调轴压加载试验。试验结果如表 4 所示。

2.2.2 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体轴压强度

图 8 为约束高温损伤试件强度增长率与约束强度的关系。强度增长率均随约束强度的增加而增加。约束强度相同时,不同高温损伤试件强度增长率的增加程度不同,历史温度为 200℃ 和 400℃ 的试件强度增长率明显低于历史温度为 600℃ 和 800℃ 的试件。圆柱体试件核心混凝土受 BFRP 侧向约束作用时,轴压强度增加,且约束水平越高,强

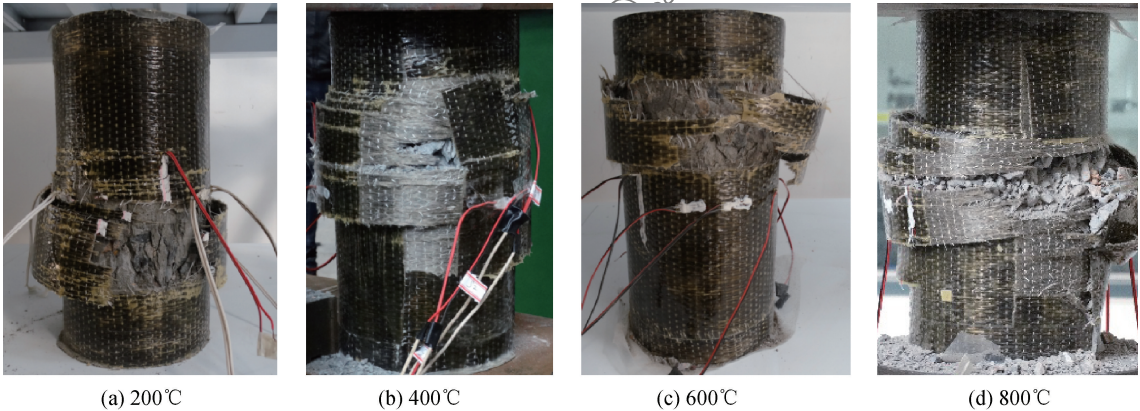


图 7 BFRP 约束高温损伤混凝土圆柱体试件破坏形态
Fig. 7 Failure morphologies of BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

表 4 未损伤和 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件试验结果

Table 4 Test results of undamaged concrete cylinders and BFRP-confined damaged concrete cylinders

Temperature/℃	No.	Ultimate stress/MPa		Strength increase rate/%	Ultimate strain/ 10^{-6}		Deformation increase rate/%
		Test values	Average values		Test values	Average values	
Room temperature	T20-L0-1	44.22			0.00236		
	T20-L0-2	47.57	45.13	—	0.00217	0.00247	—
	T20-L0-3	43.60			0.00287		
200	T200-L0-1	42.08			0.00274		
	T200-L0-2	41.67	41.81	0	0.00304	0.00268	0
	T200-L0-3	41.67			0.00225		
	T200-L2-1	59.32			0.01145		
	T200-L2-2	69.35	65.32	56	0.01122	0.01147	328
	T200-L2-3	67.28			0.01174		
	T200-L3-1	78.11			/		
	T200-L3-2	74.96	77.74	86	0.01481	0.01450	441
	T200-L3-3	80.16			0.01419		
	T200-L4-1	107.95			0.01723		
	T200-L4-2	100.73	100.75	141	0.01712	0.01745	551
	T200-L4-3	93.54			0.01790		
400	T400-L0-1	38.14			0.00386		
	T400-L0-2	36.91	35.57	0	0.00441	0.00427	0
	T400-L0-3	31.65			0.00453		
	T400-L2-1	61.43			0.01254		
	T400-L2-2	67.58	64.66	82	0.01292	0.01272	198
	T400-L2-3	64.96			0.01271		
	T400-L3-1	78.75			0.01523		
	T400-L3-2	77.19	78.01	119	0.01573	0.01556	264
	T400-L3-3	78.09			0.01571		
	T400-L4-1	106.94			0.02005		
	T400-L4-2	99.53	102.55	188	0.01995	0.02001	369
	T400-L4-3	101.17			0.02003		
600	T600-L0-1	16.94			0.00526		
	T600-L0-2	18.80	17.87	0	0.00528	0.00497	0
	T600-L0-3	17.87			0.00437		
	T600-L2-1	56.79			0.01667		
	T600-L2-2	59.37	59.72	234	0.01633	0.01650	232
	T600-L2-3	62.99			0.01866		
	T600-L3-1	71.23			0.01866		
	T600-L3-2	73.89	73.63	312	0.01989	0.01983	299
	T600-L3-3	75.77			0.02094		
	T600-L4-1	94.87			0.02477		
	T600-L4-2	91.66	94.87	431	0.02428	0.02453	394
	T600-L4-3	98.08			/		
800	T800-L0-1	17.51			0.00817		
	T800-L0-2	16.32	16.42	0	0.00743	0.00831	0
	T800-L0-3	15.43			0.00932		
	T800-L2-1	55.56			0.02016		
	T800-L2-2	58.19	57.48	250	0.01843	0.01962	136
	T800-L2-3	58.70			0.02027		
	T800-L3-1	71.62			0.02239		
	T800-L3-2	70.18	71.61	336	0.02163	0.02257	172
	T800-L3-3	73.04			0.02369		
	T800-L4-1	93.65			0.02854		
	T800-L4-2	95.10	93.23	468	0.02738	0.02783	235
	T800-L4-3	90.94			0.02743		

Notes: “/” —Unreliable data; Strength increase rate—Ultimate stress of confined concrete divided by peak stress of unconfined concrete; Deformation increase rate—Ultimate strain of confined concrete divided by peak strain of unconfined concrete.

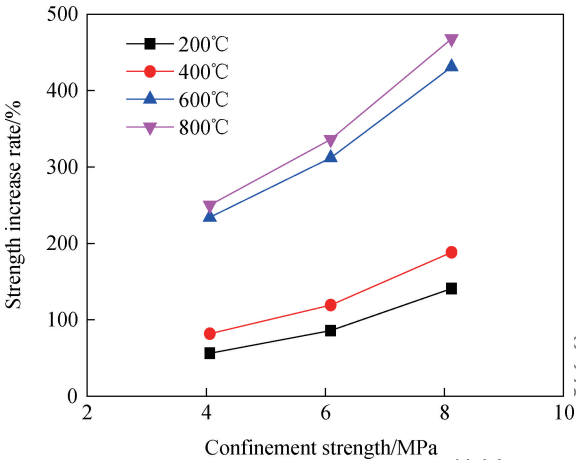


图8 BFRP约束损伤混凝土圆柱体试件约束强度-强度增长率关系

Fig. 8 Relationship between confinement strength and strength increase rate of BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

度提高程度越大，因此强度增长率均随约束量的增加而增加。

图9为约束损伤试件极限应力和历史温度的关系。约束损伤试件的极限应力总体上随历史温度的升高而下降，且各温度段下降幅度不同。当历史温度介于200~400℃或大于600℃且小于800℃时，极限应力随着温度的升高变化并不明显，当最高温度介于400~600℃时，由于高温损伤后混凝土轴压强度显著下降^[17, 24]，随着温度损伤程度的增加，极限应力下降较显著。

当历史温度由200℃上升到800℃时，约束强度为6.09 MPa(三层BFRP)和8.12 MPa(四层BFRP)的BFRP约束混凝土圆柱体试件的极限应力分别降低了7.89%和7.46%，对于约束强度为

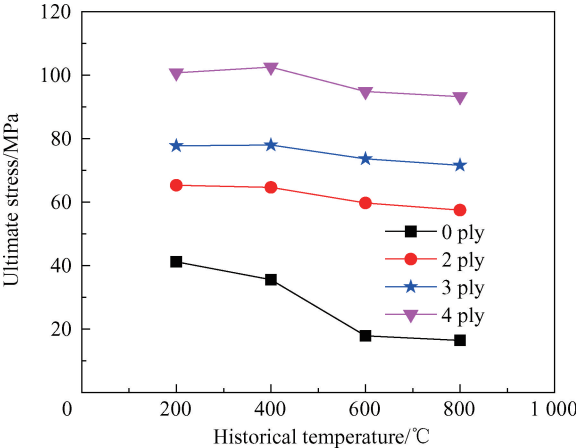


图9 BFRP约束损伤混凝土圆柱体试件极限应力-历史温度关系
Fig. 9 Relationship between ultimate stress and historical temperature of BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

4.06 MPa(二层BFRP)的约束试件，极限应力下降了12.00%。说明纤维布的约束强度越大，由温度损伤导致的极限应力的变化越小。

2.2.3 BFRP约束损伤混凝土圆柱体试件轴向变形

图10为约束高温损伤试件变形增长率与约束强度的关系。各历史温度工况下变形增长率均随约束强度的增加而增加。对于200℃温度损伤的约束试件，当约束强度由4.06 MPa增加到8.12 MPa时，其变形增长率增加了223%，而400℃、600℃和800℃温度损伤试件的变形增长率分别增加了171%、162%和99%。随着温度损伤程度的增加，变形增长率增加的幅度减少。当历史温度小于300℃时，损伤混凝土试件与未损伤试件的轴压变形基本相同^[4-6, 19]，变形增长率随约束量的增加而增加。当历史温度较高时，损伤混凝土自身轴压变形占约束后总轴压变形的比重增加，导致在约束强度相同的情况下，损伤程度高的试件变形增长率比损伤程度低的试件小。

图11为约束损伤试件极限应变和历史温度的关系。约束试件的极限应变总体上随历史温度的升高而上升，且不同温度段的上升幅度不同。当历史温度介于200~400℃时，各约束工况下试件的极限应变增加幅度较小。当历史温度大于400℃小于800℃时，各约束工况下试件的极限应变增加幅度更加显著，且随着温度损伤的增加约束试件极限应变呈近似线性增长。总体而言，随着混凝土温度损伤程度的提高，BFRP对损伤混凝土的约束效果更

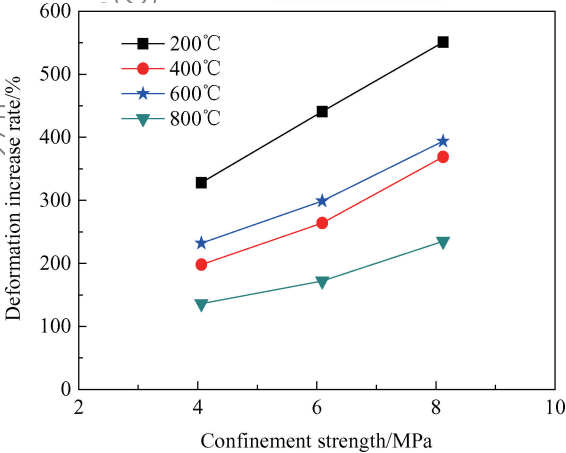


图10 BFRP约束损伤混凝土圆柱体试件约束强度-变形提高率的关系
Fig. 10 Relationship between confinement strength and deformation increase rate of BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

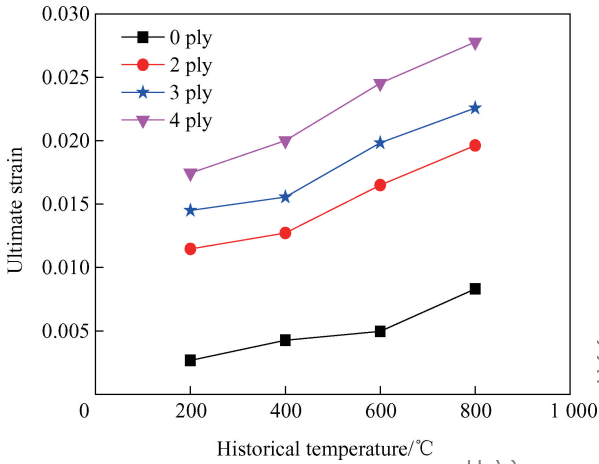


图 11 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应变-历史温度的关系

Fig. 11 Relationship between ultimate strain and historical temperature of BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

加显著。

3 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体极限应力和极限应变计算模型

3.1 极限应力计算模型

图 12 为典型的 BFRP 约束未损伤试件极限应力计算模型预测值与本文试验值的对比情况^[19-26]。可知, 采用现有典型的 FRP 约束未损伤混凝土极限应力计算模型预测 FRP 约束高温损伤混凝土极限应力时精度较低, 因而有必要提出适用于预测 FRP 约束高温损伤混凝土极限应力的计算模型。

FRP 约束未损伤混凝土受力机制和约束高温损伤混凝土受力机制相似^[24-25]。因而基于 FRP 约束未损伤混凝土极限应力计算模型提出的 FRP 约束高温损伤混凝土极限应力计算模型基本形式可用下式表达^[18-19, 26-28]:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + k \left[\frac{f_1}{f_{co}} \right] \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{2nE_{frp}\epsilon_{frp}t_{frp}k_{\epsilon}}{D} \quad (2)$$

式中: f_{co} 为未约束损伤混凝土残余轴压强度; f_{cc} 为约束后损伤混凝土轴压强度; f_1 为侧向约束强度; n 为 FRP 约束层数; E_{frp} 为 FRP 弹性模量; ϵ_{frp} 为 FRP 极限拉应变(由拉伸试验确定); t_{frp} 为单层 FRP 厚度; k_{ϵ} 为有效应变系数。

由上节的分析可知, BFRP 约束对不同温度损伤混凝土试件的强度提升效果不同, 即参数 k 与高

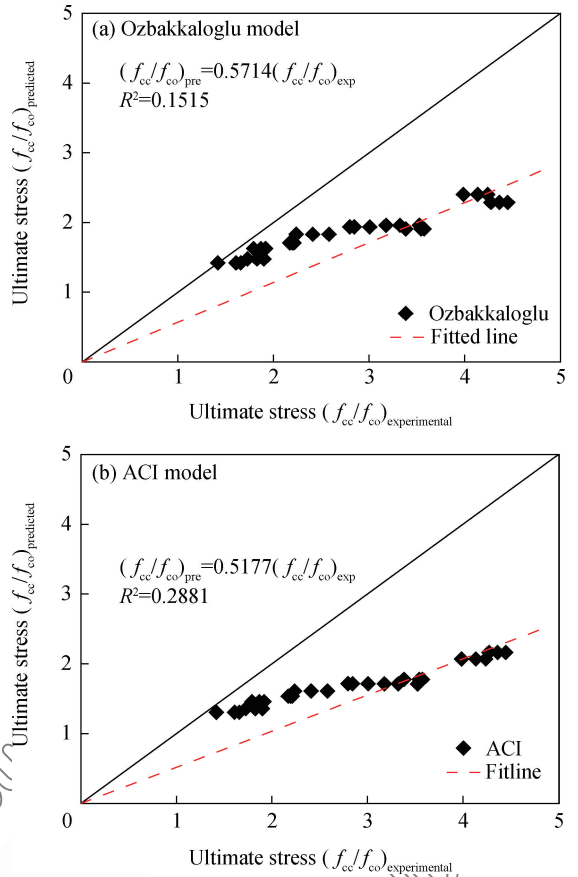


图 12 典型的 BFRP 约束未损伤混凝土圆柱体试件极限应力计算模型预测值与试验值对比

Fig. 12 Typical predicted results and test results of peak stress for BFRP-confined undamaged concrete cylinder specimens

温损伤程度有关。因而以 K_T 表示历史温度对 k 的影响, K_T 可通过试验数据回归得到 ($K_{T\sigma}$ 用于极限应力回归, $K_{T\epsilon}$ 用于极限应变回归), 如图 13 所示。

图 14 为 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应力参数 $K_{T\sigma}$ 的拟合曲线, 可知, K_T 随历史温度升高逐渐增大, 说明随着历史温度升高, BFRP 对混凝土轴压强度的提升效率增加。该参数随历史温度变化的规律可通过二次拟合得到。

图 14 公式简化表达式和 FRP 约束高温损伤混凝土极限应力计算公式如下:

$$K_{T\sigma} = 2.227 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + 5 \quad (3)$$

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + \left[2.227 \ln \left(\frac{T}{100} \right) + 5 \right] \left[\frac{f_1}{f_{co}} \right] \quad (4)$$

将文献[17, 24, 29]的试验值与本文计算模型的预测值进行了对比, 发现建议的计算模型模拟精

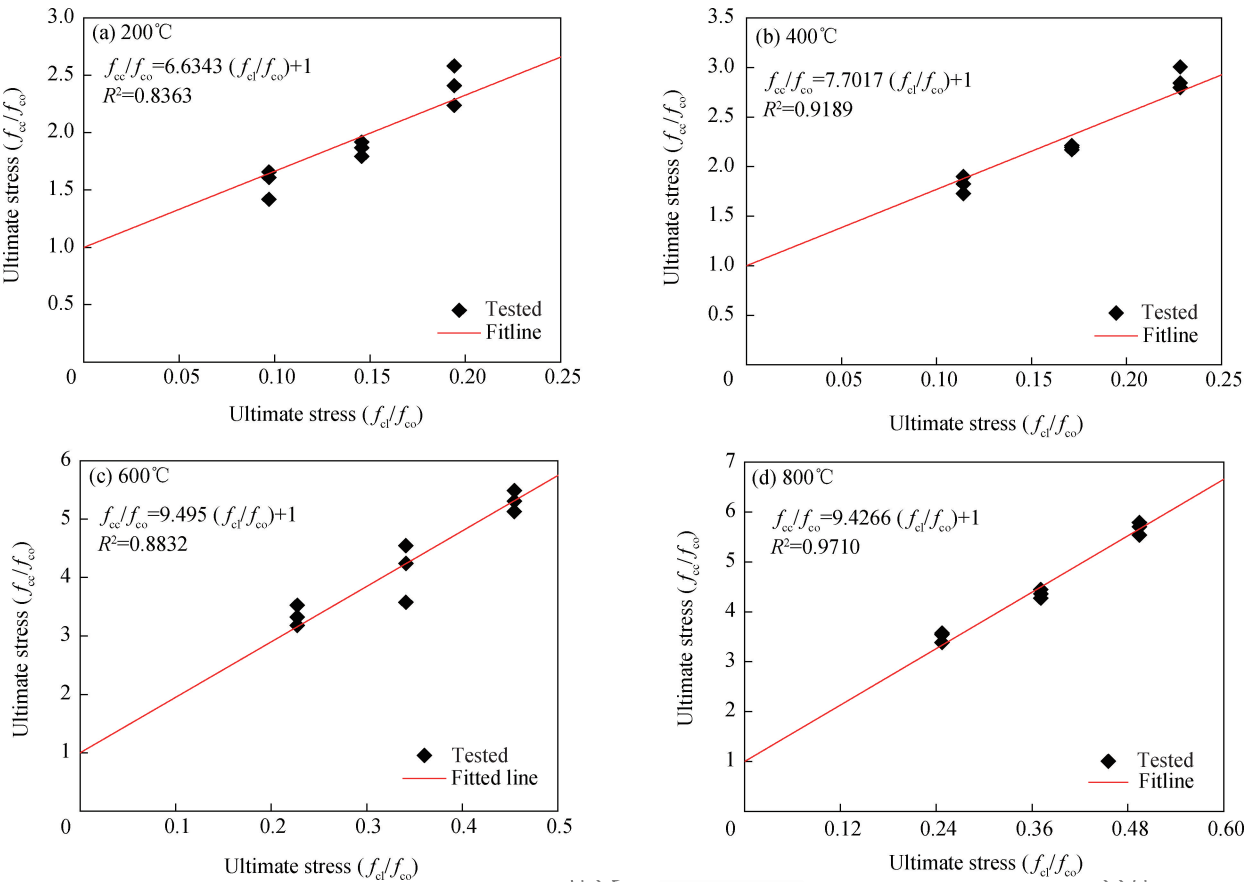


图 13 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应力试验值与模型预测值
Fig. 13 Tested and predicted results of peak stress for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

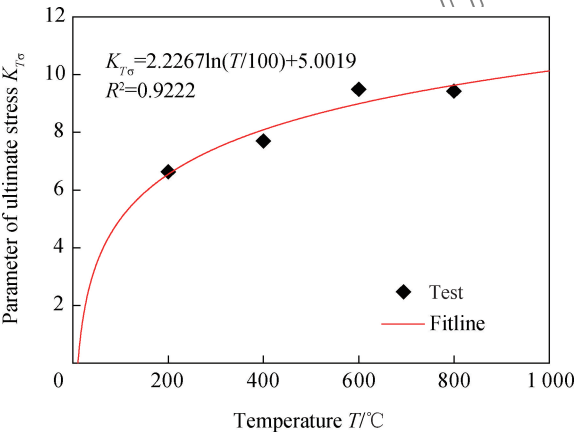


图 14 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应力参数 $K_{T\sigma}$ 的拟合曲线

Fig. 14 Fitted curve of peak stress parameter $K_{T\sigma}$ for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

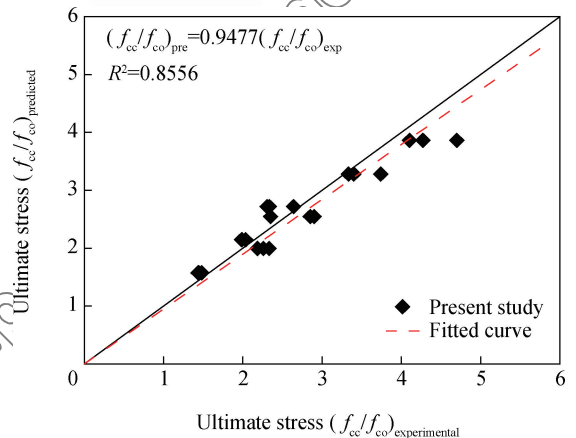


图 15 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应力预测值与已有试验值对比

Fig. 15 Comparison of peak stress from predicted model and previous tests for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

度较高，如图 15 所示。

值得注意的是，本文公式未考虑对常温下 FRP 约束未损伤混凝土柱强度和变形计算的适用性，其适用范围为温度 $T>100^{\circ}\text{C}$ ，下文中极限应变计算

式的适用范围亦仅针对 $T>100^{\circ}\text{C}$ 的情况。

3.2 极限应变计算模型

将试验值与典型的极限应变计算模型^[19, 26]的预测值进行了对比，对比结果如图 16 所示。可知，

典型的 BFRP 约束未损伤混凝土极限应变计算模型预测 BFRP 约束高温损伤混凝土极限应变时同样存在较大的偏差。

比较而言, BFRP 约束混凝土极限应变测量值的离散性比极限应力大。本文基于 ACI 规范^[19]中 BFRP 约束常温下未损伤混凝土极限应变计算公式, 考虑高温损伤对 BFRP 约束混凝土极限应变的

影响, 建立的 BFRP 约束高温损伤混凝土极限应变计算公式如下:

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1.5 + K_{T_e} \left(\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_{co}} \right)^{0.45} \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right)$$

(5)

其中, K_{T_e} 是与历史温度有关的参数, 由试验得到。

通过图 17 的回归结果发现, 参数 K_{T_e} 与极限应力影响参数 K_{T_σ} 不同, 其随着温度升高而降低, 说

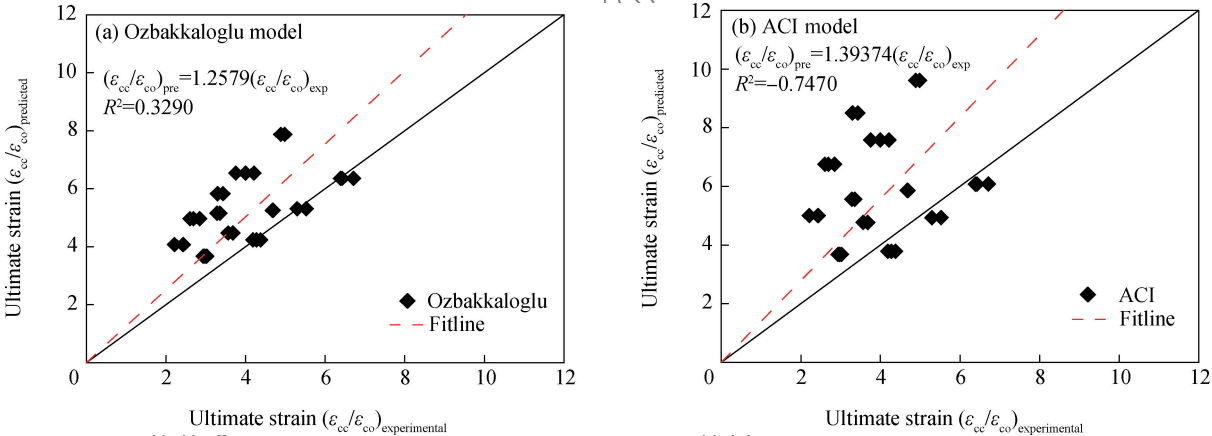


图 16 典型 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应变模型与试验值对比

Fig. 16 Comparison of typical predicted results and test results of ultimate strain for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

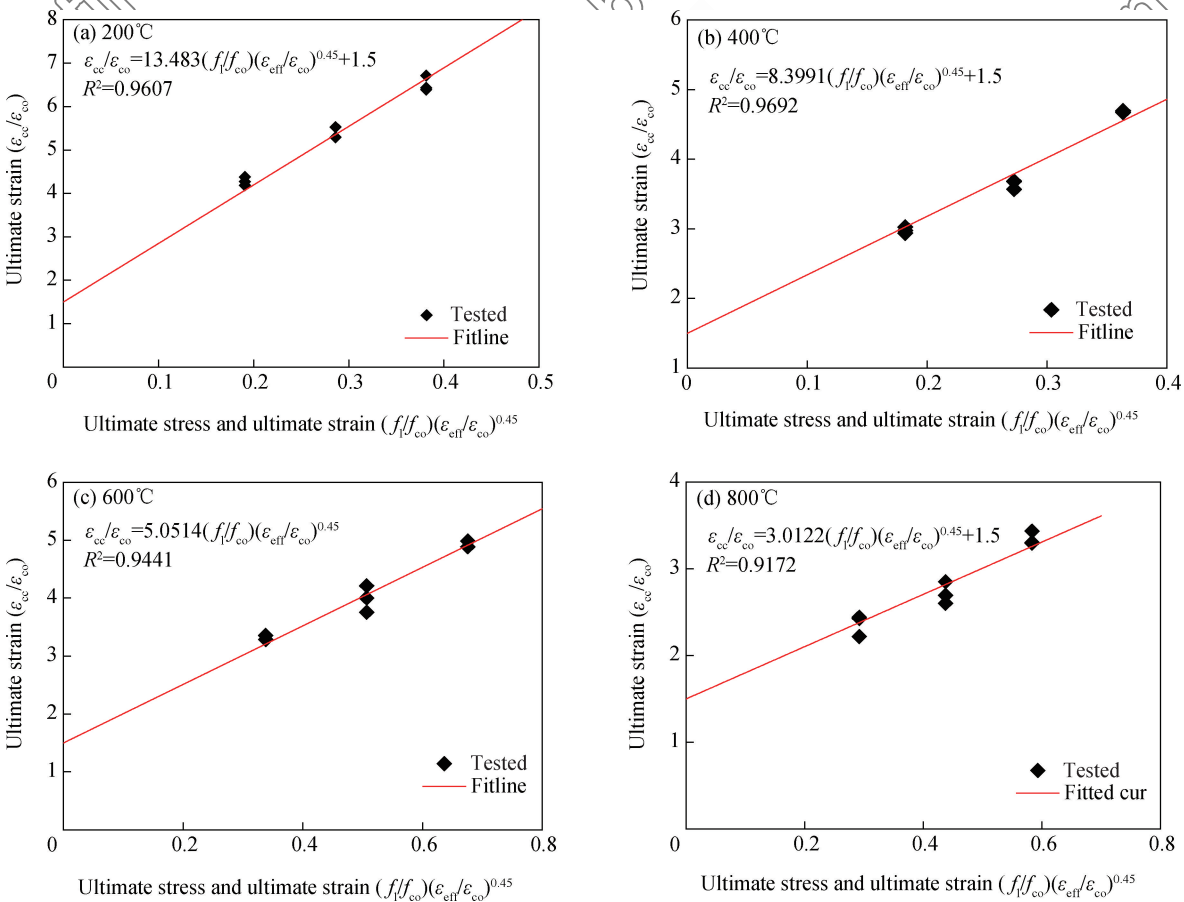


图 17 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应变预测值与试验值

Fig. 17 Tested and predicted results of ultimate strain for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

明 BFRP 约束对极限应变的提升效果随温度损伤程度的增加而降低。

在此基础上，拟合得到的 $K_{T\epsilon}$ 和极限应变计算式(如图 18 所示)如下：

$$K_{T\epsilon} = 30.685 \left(\frac{T}{100} \right)^{-1.049} \quad (6)$$

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1.5 + 30.685 \left(\frac{T}{100} \right)^{-1.049} \left(\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_{co}} \right)^{0.45} \left(\frac{f_1}{f_{co}} \right) \quad (7)$$

将模型预测结果与文献[17, 24, 29]的试验数据进行对比，对比结果如图 19 所示。

由图 15 和图 19 可知，本文提出的极限应力和极限应变计算模型预测值与文献[17, 24, 29]的试验值较接近，但极限应变计算模型的预测精度低于极限应力计算模型。

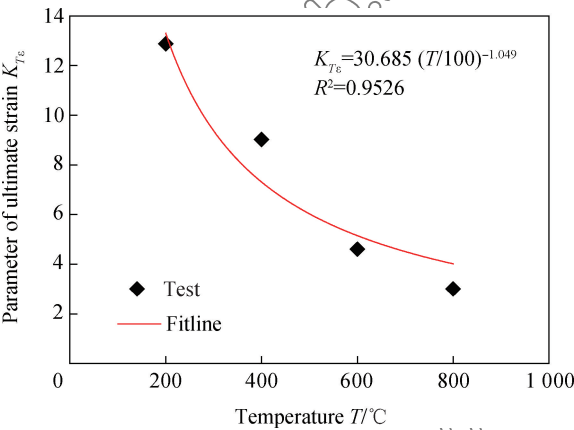


图 18 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应变参数 $K_{T\epsilon}$ 的拟合曲线

Fig. 18 Fitted curve of peak strain parameter $K_{T\epsilon}$ for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

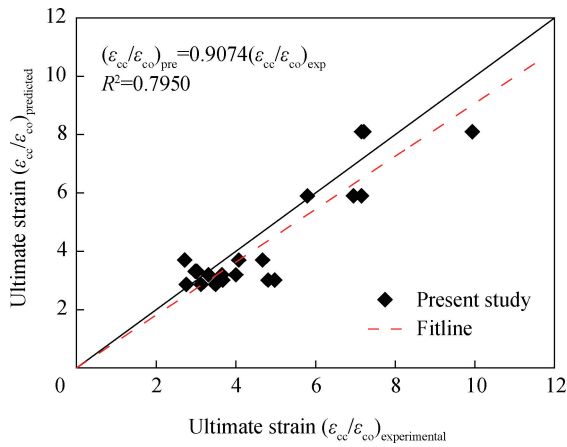


图 19 BFRP 约束损伤混凝土圆柱体试件极限应变预测值与已有试验值对比

Fig. 19 Ultimate strain of predicted model and previous tests for BFRP-confined damaged concrete cylinder specimens

4 结 论

(1) 玄武岩纤维布增强树脂基复合材料 (BFRP)侧向约束加固能显著改变高温损伤混凝土圆柱体的破坏形态，提高高温损伤混凝土圆柱体的轴压强度和延性。以 BFRP 约束的 200℃、400℃、600℃和 800℃高温损伤混凝土圆柱体为例，约束试件的轴压强度分别提高了 56%、82%、234%和 250%，轴向变形分别提高了 328%、198%、232%和 136%。

(2) BFRP 约束高温损伤混凝土柱极限应力总体上随损伤程度的提高而下降，而极限应变则随损伤程度的提高而上升。极限应力和极限应变在不同温度段下降或上升的幅度不同。当历史温度介于 200~400℃或大于 600℃小于 800℃时，极限应力随损伤程度的提高变化不明显，而当历史温度介于 400~600℃时，极限应力随损伤程度的提高下降较显著。历史温度介于 200~400℃时，约束试件极限应变随损伤程度的提高小幅增加，而当历史温度大于 400℃小于 800℃时，约束试件极限应变随温度损伤的增加呈近似线性增长。

(3) 现有典型的 FRP 约束常温下未损伤混凝土极限应力和极限应变计算模型对 FRP 约束高温损伤混凝土极限应力和极限应变的预测精度较低。基于本文试验数据，提出了适用于 FRP 约束高温损伤混凝土的极限应力计算模型和极限应变计算模型，提出的计算模型与已有试验数据吻合较好。

参考文献：

[1] 李国强, 吴波, 韩林海. 结构抗火研究进展与趋势[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(1): 1-13.
LI Guoqiang, WU Bo, HAN Linhai. Development of the research on fire-resistance of structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(1): 1-13 (in Chinese).
王广勇, 刘庆, 张东明, 等. 火灾后型钢混凝土柱抗震性能有限元计算模型[J]. 工程力学, 2016, 33(11): 183-192.
WANG Guangyong, LIU Qing, ZHANG Dongming, et al. A finite element model for post-fire seismic performance of steel reinforced concrete columns[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(11): 183-192 (in Chinese).
[3] 陈适才, 陆新征, 任爱珠, 等. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型[J]. 计算力学学报, 2009, 26(1): 72-79.
CHEN Shicai, LU Xinzhen, REN Aizhu, et al. Firer beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(1): 72-79 (in Chinese).
[4] 过镇海. 常温 and 高温下混凝土材料和构件的力学性能[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
GUO Zhenhai. Mechanical properties of concrete materials

- and members at normal and elevated temperatures[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 2005 (in Chinese).
- [5] KODUR V K R, RAUT N K, MAO X Y, et al. Simplified approach for evaluating residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(12): 2059-2075.
 - [6] 王铮. 混凝土高温后力学性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WANG Zheng. Experimental study on mechanical properties of concrete after high temperature[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010 (in Chinese).
 - [7] CHEN Y H, CHANG Y F, YAO G C, et al. Experimental research on post-fire behaviour of reinforced concrete columns[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(5): 741-748.
 - [8] 徐玉野, 林燕卿, 杨清文, 等. CFRP加固火灾后混凝土短柱抗震性能的试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 92-100.
XU Yuye, LIN Yanqing, YANG Qingwen, et al. Experimental study on seismic performance of concrete short columns after fire and strengthened with CFRP[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 92-100 (in Chinese).
 - [9] 夏敏, 余江滔, 陆洲导. 受火后混凝土框架基于纤维模型的软件开发与试验验证[J]. *工程力学*, 2016, 33(11): 163-173.
XIA Min, YU Jiangtao, LU Zhoudao. Software development and experimental verification on reinforced concrete frame after fire based on fiber element[J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(11): 163-173 (in Chinese).
 - [10] JIAN C L, TENG J G. Behavior and design of slender FRP-confined circular RC columns[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(4): 443-453.
 - [11] 欧阳利军. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土构件试验与理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
OUYANG Lijun. Experimental and theoretical study of basalt fiber and carbon fiber reinforced concrete members [D]. Shanghai: Tongji University, 2011 (in Chinese).
 - [12] 欧阳利军, 丁斌, 陆洲导, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固短柱抗震试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(2): 166-172.
OUYANG Lijun, DING Bin, LU Zhoudao, et al. Experimental study on seismic performance of short columns strengthened with BFRP and CFRP[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(2): 166-172 (in Chinese).
 - [13] JIAN C L, OZBAKKALOGLU T. Confinement model for FRP-confined high-strength concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 18(4): 2537-2547.
 - [14] TOUTANJI H, HAN M, GILBERT J, et al. Behavior of large-scale rectangular columns confined with FRP composites[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(1): 62-71.
 - [15] YAQUB M, BAILEY C G. Repair of fire damaged circular reinforced concrete columns with FRP composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(1): 359-370.
 - [16] YAQUB M, BAILEY C G. Cross sectional shape effects on the performance of post-heated reinforced concrete columns wrapped with FRP composites[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(3): 1103-1117.
 - [17] BISBY L A, CHEN J F, LI S Q, et al. Strengthening fire-damaged concrete by confinement with fiber-reinforced polymer wraps[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(12): 3381-3391.
 - [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB50608—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural. Development of the People's Republic of China. Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB50608—2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese).
 - [19] America Concrete Institute. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures: ACI 440.2R[S]. Farmington Hills: ACI Committee, 2008.
 - [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for strengthening concrete structures: GB50367—2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013 (in Chinese).
 - [21] The Concrete Society. Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials: TR55[S]. UK: Crowthorne, 2012.
 - [22] LAM L, TENG J G. Ultimate condition of fiber reinforced polymer-confined concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2004, 8(6): 539-548.
 - [23] JIAN C L, OZBAKKALOGLU T. Hoop strains in FRP-confined concrete columns: Experimental observations[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(9): 2839-2854.
 - [24] LENWARI A, RUNGAMORNRAJ, WOONPRASERT S. Axial compression behavior of fire-damaged concrete cylinders confined with CFRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(5): 04016027.
 - [25] AL-NIMRY H, HAIDAD R, AFRAM S, et al. Effectiveness of advanced composites in repairing heat-damaged RC columns[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(11): 1843-1860.
 - [26] OZBAKKALOGLU T, JIAN C L. Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 55(12): 607-634.
 - [27] OZBAKKALOGLU T, JIAN C L, Vincent T. FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49(2): 1068-1088.
 - [28] JIANG T, TENG J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete[J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11): 2968-2986.
 - [29] 郭永昌, 钟健, 谢建和, 等. 碳纤维增强复合材料约束高温损伤高强混凝土轴压力学性能的试验研究[J]. *工业建筑*, 2014, 44(10): 1-5.
GUO Yongchang, ZHONG Jiang, XIE Jianhe, et al. Experimental study of axial compressive behavior of CFRP-confined high-strength concrete damaged by high temperature [J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(10): 1-5 (in Chinese).