

## 钢筋轴线偏心半套筒灌浆连接高温后的 单向拉伸试验研究

张望喜<sup>1,2†</sup>, 王嘉<sup>2</sup>, 赵学涛<sup>2</sup>, 李静贤<sup>2</sup>, 卢立星<sup>2</sup>, 曹亚栋<sup>2</sup>

(1. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;

2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:**为研究火灾后带钢筋轴线偏心的半套筒灌浆连接(half grouted sleeve connection, HGSC)的单向受拉性能,对48个HGSC进行了单向静力拉伸试验,研究了钢筋轴线偏心和高温对不同钢筋直径的高温后HGSC力学性能的影响,并结合已有研究给出工程意见.结果表明:高温后带钢筋轴线偏心的HGSC主要发生钢筋拉断破坏与钢筋拔出破坏,且随着钢筋轴线偏心率的增大和温度的升高,试件更可能发生钢筋拉断到拔出破坏的转变;钢筋轴线偏心会在高温基础上进一步影响连接性能,钢筋偏心试件的荷载最大下降至无缺陷试件的94%,滑移量最大增加至173%;建议对HGSC和含该连接的装配式混凝土结构进行设计、施工、火灾后性能评估与修复时,考虑火灾温度和钢筋轴线偏心率的影响,要求不出现钢筋拔出破坏,且破坏时钢筋与灌浆料之间没有明显滑移;焊接能有效地解决连接螺纹端加工质量不佳的问题.

**关键词:**半套筒灌浆连接;钢筋轴线偏心;单向静力拉伸试验;高温;破坏形态;可靠性

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A

## Study on Uniaxial Tensile Test of Half Grouted Sleeve Connection with Axial Eccentric Rebar after High Temperature

ZHANG Wangxi<sup>1,2†</sup>, WANG Jia<sup>2</sup>, ZHAO Xuetao<sup>2</sup>, LI Jingxian<sup>2</sup>, LU Lixing<sup>2</sup>, CAO Yadong<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory on Diagnosis for Engineering Structures (Hunan University), Changsha 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to study the uniaxial tensile behavior of half grouted sleeve connection (HGSC) with axial eccentric rebar after fire, uniaxial static tensile tests were carried out on 48 HGSC specimens. The effects of rebar axis eccentricity and high temperature on the mechanical properties of post-fire HGSCs with different rebar diameters are studied, and the engineering opinions are given combined with the existing research. The results show that: post-fire HGSCs with rebar axis eccentricity mainly exhibit rebar fracture and rebar pullout failure. With the increase of the axial eccentricity ratio of rebar and the peak temperature, the transformation from rebar fracture to bonding failure is more likely to occur; Rebar axis eccentricity further affects the connection performance after high temperature. The force of HGSC with axial eccentric rebar decreases to 94% of that of the corresponding specimen without defect at most, and the slip increases to 173% at most; It is suggested that the influence of fire temperature and the axial eccen-

\* 收稿日期:2021-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078201), National Natural Science Foundation of China(52078201)

作者简介:张望喜(1971—),男,湖北黄冈人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: wxizhang2000@hnu.edu.cn

tricity ratio of rebar should be considered in the design, construction, post-fire performance evaluation and repair of HGSC and PC structure with this connection. It is required that there is no rebar pullout failure and obvious bond-slip between rebar and grout. Welding can effectively solve the problem of poor thread processing quality.

**Key words:** half grouted sleeve connection (HGSC); axial eccentric rebar; uniaxial static tensile test; high temperature; failure modes; reliability

装配式混凝土(PC)结构作为建筑工业化中的重要结构形式之一,国家对其研究和应用进行了大力推广,并陆续出台了相关政策.与此同时,灌浆套筒作为PC结构的钢筋连接方式也得到了大量使用.钢筋套筒灌浆连接(以下简称连接)的性能直接影响着PC结构的整体性与可靠性,因此众多学者对其开展了研究.大量室温下套筒灌浆连接的研究发现,其力学性能与连接钢筋自身特性(直径、强度、形状等)<sup>[1-3]</sup>、灌浆料自身特性(强度、养护龄期等)<sup>[2-5]</sup>、套筒内部构造<sup>[4-5]</sup>和钢筋锚固长度<sup>[3,6]</sup>等有关,在一定范围内增大钢筋锚固长度、灌浆料强度(或龄期)可有效地提高钢筋套筒灌浆连接的拉伸性能.为了提高连接性能和降低成本,部分学者还进行了新型套筒灌浆连接的研究<sup>[7-9]</sup>.

实际工程中,构件制作误差、施工操作不规范等原因可能导致灌浆套筒内的钢筋出现偏心<sup>[10]</sup>,就这部分学者进行了钢筋偏心对套筒灌浆连接力学性能的影响研究. Huang等<sup>[11]</sup>对室温下的半套筒灌浆连接进行单向拉伸,发现6 mm的钢筋轴线偏心对钢筋直径为18 mm的半套筒灌浆连接承载力和破坏模式的影响可忽略不计. Xu等<sup>[12]</sup>研究了钢筋轴线偏心对套筒灌浆连接早期黏结滑移性能的影响,结果表明局部黏结强度随着偏心距的增大而减小,但这种影响随着钢筋锚固长度的增加而减弱,对于锚固长度足够的试件,钢筋轴线偏心对试件破坏模式和抗拉强度的影响较小,但是会增大钢筋与灌浆料之间的滑移. 陈建伟等<sup>[13]</sup>通过试验和有限元模拟研究了钢筋垂直与斜向偏心对套筒灌浆连接性能的影响,指出两种钢筋偏心均会导致灌浆料的不对称分布,促使套筒内部灌浆料局部破坏严重形成薄弱区,进而影响试件性能,且钢筋直径越大,影响越明显.

火灾作为建筑常见灾害之一,会直接对PC结构产生影响,但现行规范《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)和《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)均未给出PC结构抗火的具体要求,近几年,

部分学者开展了高温对套筒灌浆连接的影响研究. Zhang等<sup>[14-18]</sup>研究了处理温度、冷却方式、混凝土保护层和施工缺陷对高温下及高温后钢筋套筒灌浆连接拉伸性能的影响,并分析了黏结滑移机理,结果显示:中低温时,连接发生钢筋拉断破坏,高温时,破坏模式转变为钢筋拔出破坏,相同条件下,浇水冷却对高温后连接性能的影响大于自然冷却,且混凝土保护层能在一定程度上降低高温的影响;同时还得出施工缺陷会降低钢筋与灌浆料之间的黏结性能. Wang等<sup>[19]</sup>通过对套筒灌浆连接试件进行恒载升温 and 恒温加载发现,恒载升温的试件力学性能优于恒温加载的试件,但是这种差距随着温度的升高而减小.

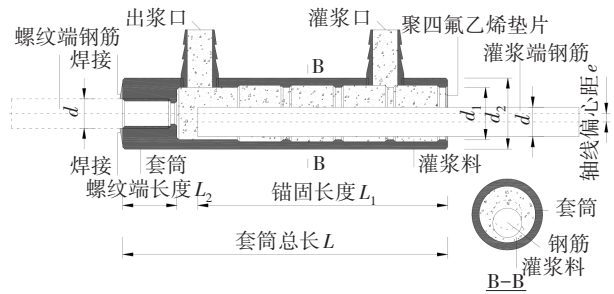
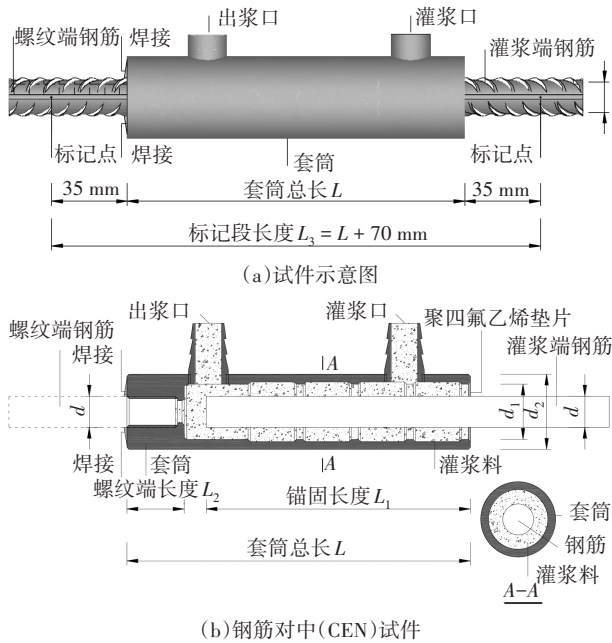
当前,学者们开展了较多的室温下带施工缺陷的套筒灌浆连接性能研究以及高温下和高温后无缺陷套筒灌浆连接性能研究,但对高温后含钢筋轴线偏心的套筒灌浆连接研究较少. 鉴于此,本文以半套筒灌浆连接(HGSC)为研究对象,研究钢筋直径、轴线偏心和处理温度对单向拉伸作用下HGSC力学性能和可靠性的影响,并结合已有研究给出工程建议. 本文研究成果可用于火灾后PC结构安全性评定,为其诊断和加固提供理论支持.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

我国规范《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)<sup>[10]</sup>规定套筒灌浆连接的钢筋直径不宜小于12 mm,同时结合高温试验装置的尺寸和课题组前期工作<sup>[17-18]</sup>,将HGSC的钢筋直径取为14 mm、18 mm、22 mm和25 mm. 施工过程中,灌浆套筒与连接钢筋对位时可能出现偏位的情况,将试件分为无缺陷对照组和钢筋轴线偏心组. 套筒灌浆连接主要位于构件内部,故火灾下其温度一般低于建筑物受火温度<sup>[20]</sup>,试验共设置了3个温度,分别为室温

(约 25 °C)、300 °C 和 600 °C. 试验共制作了 48 个 HGSC 试件, 如图 1 和表 1 所示. 钢筋轴线偏心表示钢筋轴线垂直于套筒横截面, 但与套筒轴线不重合, 偏心程度采用偏心率  $\eta=2e/(d_1-d)$  表示. 我国规范《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)<sup>[10]</sup> 规定“钢筋锚固的深度不宜小于插入钢筋公称直径的 8 倍”, 再综合考虑套筒尺寸和施工制作误差, 将连接 14 mm、18 mm、22 mm 和 25 mm 钢筋直径的 HGSC 试件锚固长度分别设定为 120 mm、150 mm、180 mm 和 210 mm.



(c) 钢筋偏心 (OFF) 试件

图 1 半套筒灌浆连接示意图 (单位: mm)

Fig.1 Sketches of HGSCs (unit: mm)

HGSC 制作时, 首先将螺纹端钢筋根据套筒螺纹参数进行滚丝处理, 施加规范规定的拧紧力矩将其拧入套筒螺纹端<sup>[21]</sup>, 再将灌浆端钢筋插入套筒对应位置, 从灌浆口泵入灌浆料直至出浆口流出. 使用聚四氟乙烯垫片来控制, 以准确确定灌浆端钢筋位置, 同时防止灌浆时灌浆料从两端流出, 进而最大程度上保证内部灌浆料的饱满, 防止其他潜在缺陷的产生.

试验初期制作的 HGSC 虽然满足理论螺纹长度, 但在单向拉伸作用下仍然出现了套筒滑丝破坏, 分析原因为螺纹端加工质量不佳, 导致试件较早发生破坏, 这将影响本文预测温度和钢筋轴线偏心的影响. 为解决这一问题, 文献[11]建议增长螺纹连接长度, 但针对成品套筒和制作完成的 HGSC 难以实现, 就此本文对螺纹端的钢筋均进行了焊接加固.

表 1 试件尺寸与信息

Tab.1 Dimensions and information of specimens

分组编号	温度 $t/^\circ\text{C}$	轴线偏心率 $h/\%$	钢筋		套筒				钢筋情况
			$d/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$d_1/\text{mm}$	$d_2/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	
GT14-CEN-T-1,2	25,300,600	0	14	120	25.0	34.0	155	25.0	图 1(b)
GT14-OFF-T-1,2	25,300,600	50	14	120	25.0	34.0	155	25.0	图 1(c)
GT18-CEN-T-1,2	25,300,600	0	18	150	30.5	40.0	193	25.0	图 1(b)
GT18-OFF-T-1,2	25,300,600	50	18	150	30.5	40.0	193	25.0	图 1(c)
GT22-CEN-T-1,2	25,300,600	0	22	180	35.0	45.0	230	38.5	图 1(b)
GT22-OFF-T-1,2	25,300,600	50	22	180	35.0	45.0	230	38.5	图 1(c)
GT25-CEN-T-1,2	25,300,600	0	25	210	38.5	50.0	256	41.5	图 1(b)
GT25-OFF-T-1,2	25,300,600	50	25	210	38.5	50.0	256	41.5	图 1(c)

注: 每组共 6 个试件, 分组编号以“GT14-CEN-T-1,2”为例进行说明, “GT”表示 HGSC 试件, 其后的数字“14”表示连接钢筋直径, “CEN”表示钢筋对中 (“OFF”表示偏心率为 50%); “T”表示对试件进行处理最高温度, 分别为 25 °C、300 °C、600 °C, 每种温度对应 2 个试件, 用试件序号“1”和“2”区别.  $d$  为钢筋直径;  $d_1$  为套筒内径;  $d_2$  为套筒外径.

## 1.2 材料力学性能

试验采用直径为 14 mm、18 mm、22 mm 和 25 mm 的 HRB400 强度等级钢筋, 与文献[18]中的材料为

同一批次, 并依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[22]</sup> 进行室温下钢筋的材料性能试验, 结果见表 2.

表2 钢筋力学性能  
Tab.2 Mechanical properties of rebars

钢筋直径/mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	最大力下的 伸长率/%
14	509.8	657.7	7.8
18	517.4	662.5	7.5
22	502.2	631.8	7.9
25	476.8	605.1	8.2

灌浆料采用专业公司生产的预制构件钢筋连接用灌浆材料,并在制作 HGSC 时,预留灌浆料试件(40 mm×40 mm×160 mm)并养护 28 d,其后按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)<sup>[23]</sup>进行材料性能试验,得到灌浆料的平均抗折强度为 12.55 MPa,平均抗压强度为 85.53 MPa.

灌浆套筒采用专业公司生产的 JM 半灌浆套筒,所用材料的抗拉强度为 610 MPa,符合我国规范《钢筋连接用灌浆套筒》(JG/T 398—2019)<sup>[24]</sup>的要求.

### 1.3 升-降温方案和装置

试验采用高温电加热炉和 KSY-6D-T 型温控箱来控制试件升温,如图 2 所示.结合试验条件与实际情况,试件由室温开始以 10 °C/min 的升温速率进行加热,待炉内温度到达指定温度后恒温 120 min,然后自然冷却至室温,温度控制曲线见图 3.

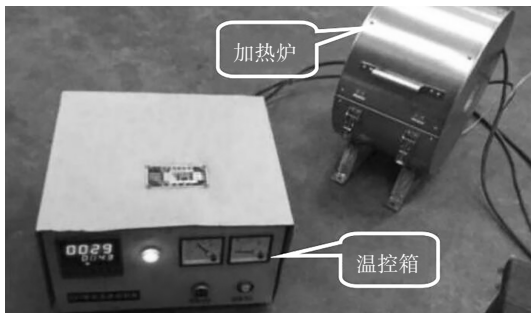


图 2 温控箱与加热炉

Fig.2 Temperature controller and heating furnace

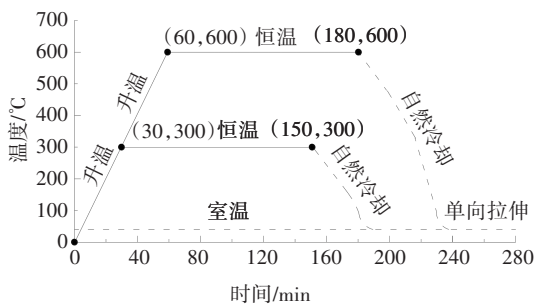


图 3 温度控制曲线

Fig.3 Temperature control curve

### 1.4 加载方案与装置

加载采用湖南大学 WAW-E600C 微机控制电液伺服万能试验机,将室温和高温后的 HGSC 以 5 mm/min 的位移速率进行单向拉伸,直至连接钢筋被拉断或拔出,试验加载装置见图 4.加载时灌浆端钢筋朝上,以便试件加载结束后观察套筒内灌浆料的破坏情况.

加载过程中的拉伸荷载直接由试验机获得,而图 1 标记段的位移通过 LVDT 动态应变仪来实时测量. LVDT 通过自行设计制作的高强度弹簧夹具固定在连接钢筋的标记点上,然后将 LVDT 探针接触夹具延伸出来的端板,通过测量两夹具端板之间的位移来计算标记段位移,具体如图 4 所示.

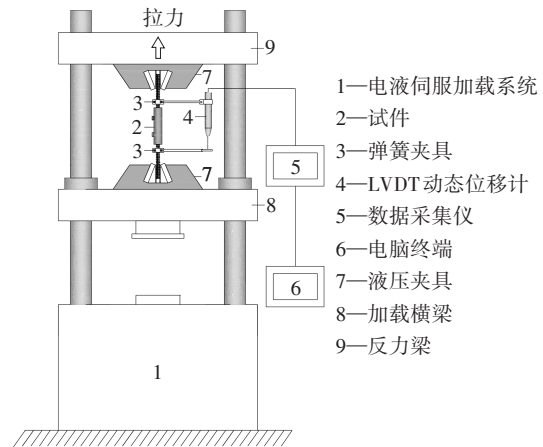


图 4 加载装置图解

Fig.4 Test setup

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验数据与试验现象

高温后 HGSC 的试验结果见表 3,试验中出现了钢筋拉断与钢筋拔出两种破坏模式,见图 5.标记段内测得的变形主要由套筒内钢筋滑移和标记段内套筒外钢筋变形组成,故在 HGSC 极限荷载状态下,套筒内钢筋滑移  $S_{u,i}$  可由标记段变形  $\Delta_u$  减去标记段内套筒外钢筋变形  $S_{u,sr}$  得到,  $S_{u,i}$  可由该荷载下钢筋的伸长率  $\delta$  计算得到. HGSC 为钢筋拉断破坏时,  $\delta$  为相同高温后的钢筋最大力伸长率, HGSC 为拔出破坏时,其极限荷载可能小于对应的钢筋极限荷载,此时可将连接的极限荷载对应到相同高温后钢筋的荷载-位移曲线上,得到对应的钢筋位移后求得  $\delta$ . 对照组钢筋的荷载-位移曲线参考文献[18].

由表 3 可得,试验未出现文献[11]和[25]中发生的套筒滑丝破坏,说明在 HGSC 螺纹端处进行焊

接可以有效地解决螺纹加工质量不佳的问题, 避免滑丝破坏的发生. 对于钢筋拉断破坏的试件, 钢筋断点随机分布在螺纹端与灌浆端钢筋上, 部分试件还出现了灌浆端钢筋的明显滑动. 室温下及 300 °C 高温后, HGSC 均发生钢筋拉断破坏, 600 °C 高温后, 钢筋直径为 14 mm 的 HGSC 不发生破坏模式改变, 但钢筋直径为 18 mm、22 mm 和 25 mm 的 HGSC 转变为钢筋拔出破坏, 可见中低温时, 连接发生钢筋拉断破坏, 但处理温度足够高时, 连接的破坏形式可能转变为钢筋拔出破坏, 且钢筋直径越大, 越可能发生破坏模式的转变. 施工缺陷对破坏模式的影响可以忽略不计.

试件破坏后观察灌浆料的破坏程度可以发现, 钢筋直径为 14 mm 的 HGSC 在室温和 300 °C 高温后, 端部灌浆料保持完整, 但 600 °C 高温后, 端部灌浆料出现了严重的破碎脱落, 并且灌浆端钢筋有明显滑动; 钢筋直径为 18 mm 的 HGSC 在室温和 300 °C 高温后, 试件破坏时端部灌浆料均出现了轻微的破碎脱落, 且在 300 °C 时, 缺陷组有一个试件的灌浆端钢筋有明显滑动; 钢筋直径为 22 mm 和 25 mm 的 HGSC 在发生钢筋拉断时, 端部灌浆料破坏程度均比钢筋直径为 18 mm 的 HGSC 明显, 且在 300 °C 时, 有缺陷试件均出现了灌浆端钢筋的明显滑动. 可见, 温度越高, 钢筋直径越大, 灌浆料破坏程度越严重, 且钢筋轴线偏心组的灌浆料破碎脱落程度越严重.

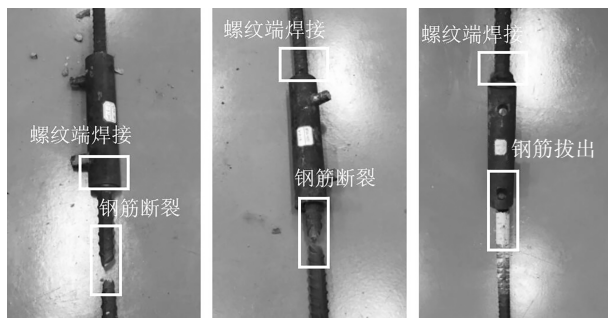
表 3 高温后半套筒灌浆连接的试验结果

Tab.3 Results of post-fire HGSCs

试件编号	$F_y /$ kN	$\Delta_y /$ mm	$F_u /$ kN	$\Delta_u /$ mm	$S_u /$ mm	破坏 模式
GT14-CEN-25-1	74.68	0.40	92.39	9.81	4.35	II
GT14-CEN-25-2	78.16	0.39	93.39	9.45	3.99	I
GT14-CEN-300-1	77.56	0.51	94.16	11.76	6.98	II
GT14-CEN-300-2	72.95	0.49	90.16	12.38	7.60	II
GT14-CEN-600-1	75.58	0.57	92.92	16.61	12.60	I*
GT14-CEN-600-2	76.08	0.59	91.58	15.08	11.07	I*
GT14-OFF-25-1	73.29	0.43	92.39	11.62	6.16	I
GT14-OFF-25-2	80.56	0.42	96.76	10.21	4.75	I
GT14-OFF-300-1	78.59	0.53	94.01	13.68	8.90	I
GT14-OFF-300-2	78.88	0.48	93.87	14.89	10.11	I
GT14-OFF-600-1	75.34	0.56	90.58	18.98	14.97	II*
GT14-OFF-600-2	76.06	0.61	91.53	18.36	14.35	II*
GT18-CEN-25-1	133.19	0.48	164.85	14.92	9.67	II

试件编号	续表					破坏 模式
	$F_y /$ kN	$\Delta_y /$ mm	$F_u /$ kN	$\Delta_u /$ mm	$S_u /$ mm	
GT18-CEN-25-2	127.43	0.52	159.44	17.51	12.26	I
GT18-CEN-300-1	125.10	0.51	156.48	19.70	13.59	II
GT18-CEN-300-2	126.25	0.59	156.50	19.68	13.57	II
GT18-CEN-600-1	115.24	0.52	151.23	10.29	4.79	III
GT18-CEN-600-2	112.03	0.49	153.16	10.98	5.48	III
GT18-OFF-25-1	139.38	0.52	160.94	16.51	11.26	II
GT18-OFF-25-2	133.98	0.45	156.76	17.73	12.48	II
GT18-OFF-300-1	128.14	0.53	161.34	20.31	14.20	I*
GT18-OFF-300-2	129.75	0.43	160.67	21.24	15.13	II
GT18-OFF-600-1	106.16	0.51	146.23	11.04	5.54	III
GT18-OFF-600-2	107.21	0.48	150.67	11.87	6.37	III
GT22-CEN-25-1	218.44	0.59	239.99	15.98	10.45	I
GT22-CEN-25-2	179.85	0.49	226.85	13.30	7.77	I
GT22-CEN-300-1	179.24	0.71	231.57	14.91	9.95	I
GT22-CEN-300-2	181.35	0.64	227.89	14.18	9.22	I
GT22-CEN-600-1	177.26	1.10	227.18	11.45	8.41	III
GT22-CEN-600-2	179.29	0.88	222.91	9.58	7.13	III
GT22-OFF-25-1	178.29	0.52	227.69	18.41	12.88	I
GT22-OFF-25-2	184.21	0.48	230.46	15.62	10.09	I
GT22-OFF-300-1	182.86	0.67	231.40	20.72	15.76	II*
GT22-OFF-300-2	180.89	0.78	229.15	21.10	16.14	I*
GT22-OFF-600-1	176.86	0.87	224.85	14.29	11.59	III
GT22-OFF-600-2	177.55	0.76	222.34	14.17	11.79	III
GT25-CEN-25-1	245.86	0.68	315.18	16.32	10.58	II
GT25-CEN-25-2	243.14	0.61	291.27	19.08	13.34	II
GT25-CEN-300-1	224.55	0.71	284.67	17.06	12.28	I
GT25-CEN-300-2	241.20	0.75	309.20	14.85	10.07	II
GT25-CEN-600-1	231.16	1.03	278.06	20.75	16.74	III
GT25-CEN-600-2	243.48	0.95	298.29	20.09	16.08	III
GT25-OFF-25-1	229.84	0.52	287.87	18.59	12.85	I
GT25-OFF-25-2	246.71	0.61	310.69	19.73	13.99	I
GT25-OFF-300-1	234.58	0.78	312.51	23.73	18.95	I*
GT25-OFF-300-2	239.76	0.73	305.16	24.52	19.74	I*
GT25-OFF-600-1	221.06	0.78	295.16	20.30	16.29	III
GT25-OFF-600-2	226.64	0.97	273.45	20.00	17.03	III

注:  $F_y$  ( $F_u$ ) 和  $\Delta_y$  ( $\Delta_u$ ) 分别表示高温后 HGSC 在屈服点 (极限点) 处的荷载和标记段内的变形, 其中屈服点和极限点为荷载-位移曲线的弹性直线段结束点和峰值点; 破坏模式中, “I” 表示灌浆端钢筋断裂, “II” 表示螺纹端钢筋断裂, “III” 表示钢筋拔出破坏, “\*” 表示钢筋拉断时钢筋与灌浆料之间有明显滑动.



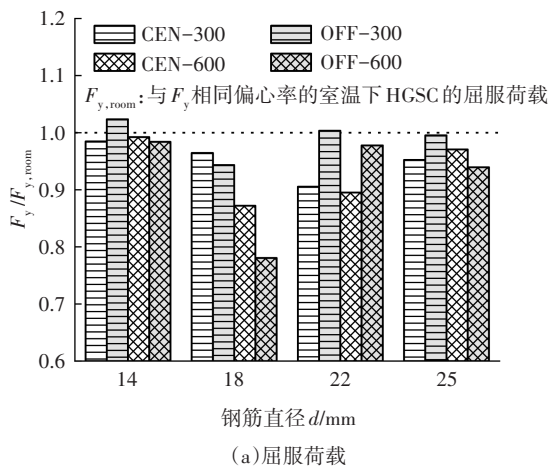
(a) 螺纹端钢筋断裂 (b) 灌浆端钢筋断裂 (c) 钢筋拔出破坏

图5 高温后半套筒灌浆连接破坏形态

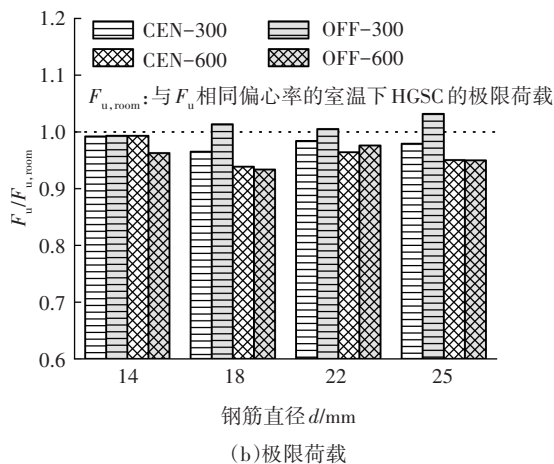
Fig.5 Failure modes of post-fire HGSCs

## 2.2 荷载分析

屈服荷载(极限荷载)的温度影响系数  $F_y/F_{y,room}$  ( $F_u/F_{u,room}$ )、偏心影响系数  $F_y/F_{y,cen}$  ( $F_u/F_{u,cen}$ )和受温度与偏心共同影响的系数  $F_y/F_{y,cen+room}$  ( $F_u/F_{u,cen+room}$ )分别见图 6(a) [图 6(b)]、图 7(a) [图 7(b)]和图 8(a) [图 8(b)].



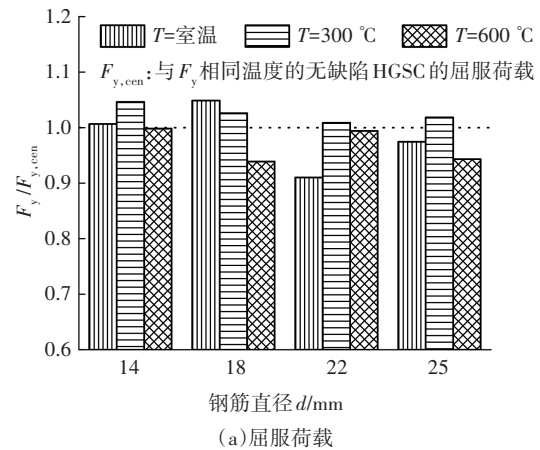
(a) 屈服荷载



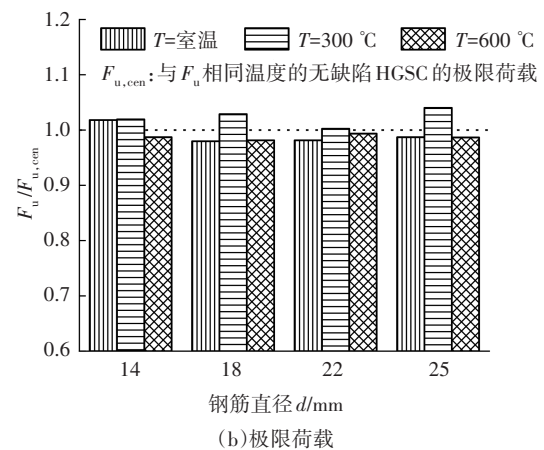
(b) 极限荷载

图6 荷载的温度影响系数

Fig.6 Ratio of force affected by temperature



(a) 屈服荷载



(b) 极限荷载

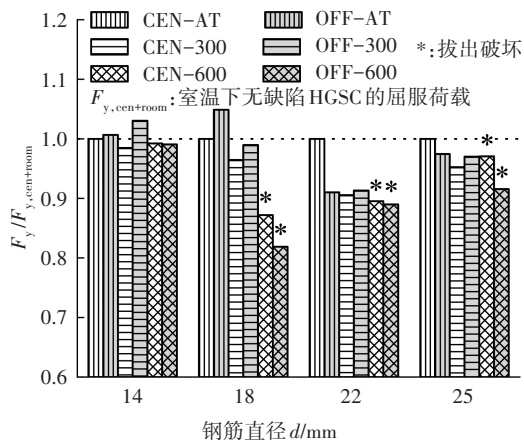
图7 荷载的偏心影响系数

Fig.7 Ratio of force affected by axial eccentricity

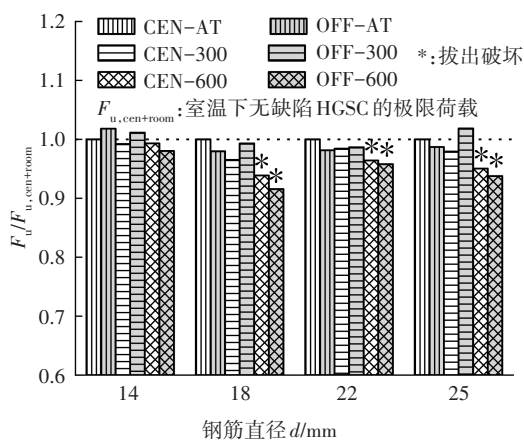
由图 6 可得,钢筋直径和轴线偏心率相同时,300 °C 高温后的  $F_y/F_{y,room}$  和  $F_u/F_{u,room}$  可能大于也可能小于 1,说明 300 °C 高温对连接的荷载没有影响,而 600 °C 高温后,连接的荷载均小于室温下对应的荷载,此时屈服荷载(极限荷载)最小为室温下对应荷载的 78%(93%)。由图 7 可得,钢筋直径和处理温度相同时,室温下和 300 °C 高温后的  $F_y/F_{y,cen}$  和  $F_u/F_{u,cen}$  可能大于也可能小于 1,说明此时钢筋轴线偏心对连接的荷载没有影响,而 600 °C 高温后,轴线偏心试件的屈服和极限荷载均小于无缺陷组试件对应的荷载,最小为无缺陷试件对应荷载的 94%(98%),小于 600 °C 高温的影响。

由图 8 可得,钢筋直径相同时,在高温和钢筋轴线偏心的共同作用下,室温下和 300 °C 高温后连接的荷载仍然不受影响。由于此时连接均发生钢筋拉断破坏,性能主要取决于连接钢筋的受力性能。600 °C 高温后,除钢筋直径为 14 mm 的 HGSC 外均发生钢筋拔出破坏,此时连接的性能主要受钢筋与灌浆料之间的黏结性能影响,该高温后连接的荷载低于室温下对应的荷载,且钢筋轴线偏心试件降低程度大于

无缺陷试件, 说明 600 °C 高温和钢筋轴线偏心均会削弱钢筋与灌浆料之间的黏结性能. HGSC 的屈服和极限荷载受温度和轴线偏心的影响均与钢筋直径无关.



(a) 屈服荷载



(b) 极限荷载

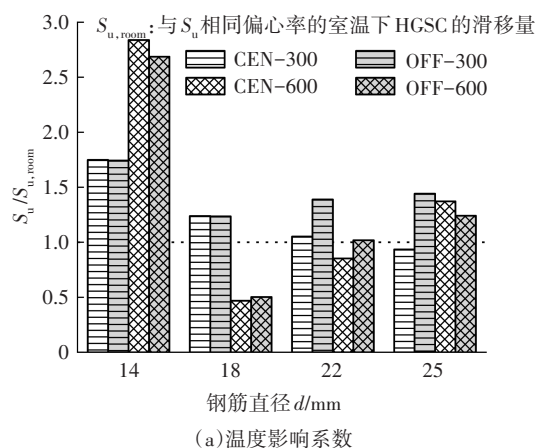
图 8 荷载受温度和偏心共同作用的影响系数  
Fig.8 Ratio of force affected by temperature and axial eccentricity

### 2.3 钢筋滑移量分析

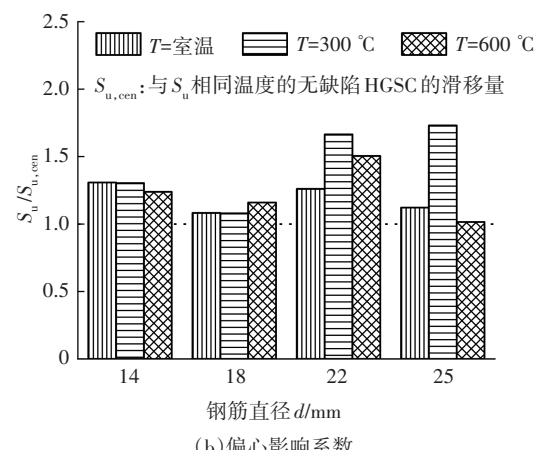
连接极限荷载下的钢筋滑移量的温度影响系数  $S_u/S_{u,room}$ 、偏心影响系数  $S_u/S_{u,cen}$  和受温度与偏心共同影响的系数  $S_u/S_{u,cen+room}$  分别见图 9(a)、(b)、(c).

由图 9(a) 可得, 当钢筋直径和轴线偏心率相同时, 300 °C 高温后, HGSC 在极限荷载下的钢筋滑移量基本大于室温下的滑移量, 600 °C 高温后, 钢筋直径为 14 mm 的 HGSC 在极限荷载下的钢筋滑移量变得更大, 最大为室温下对应滑移量的 284%, 说明高温会导致钢筋与灌浆料之间的黏结性能退化, 进而导致钢筋拉断破坏的连接在极限荷载下的钢筋滑移量随温度升高而增大. 600 °C 高温后, 钢筋直径为 18 mm、22 mm 和 25 mm 的 HGSC 在极限荷载下的钢

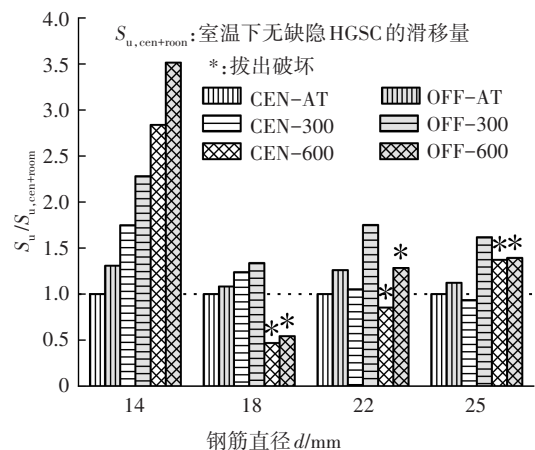
筋滑移量可能变得更小, 最小为室温下对应滑移量的 47%. 虽然此时钢筋与灌浆料之间的黏结性能进一步退化, 但连接发生拔出破坏, 极限荷载可能变得更小, 进而导致钢筋滑移量变得更小. 由图 9(b) 可得, 钢筋直径和处理温度相同时,  $S_u/S_{u,cen}$  均大于 1, 说明钢筋轴线偏心会增大钢筋滑移量, 钢筋轴线偏心试件在极限荷载下的钢筋滑移量最大为无缺陷试件对应滑移量的 173%.



(a) 温度影响系数



(b) 偏心影响系数



(c) 温度和偏心共同作用的影响系数

图 9 套筒灌浆连接极限荷载下的钢筋滑移量变化系数  
Fig.9 Ratio of bond-slip under ultimate force of HGSCs

由图9(c)可进一步得到,钢筋直径相同时,300℃高温后连接在极限荷载下的钢筋滑移量基本增大,且钢筋轴线偏心组试件的增大幅度大于无缺陷组试件,但这些影响与钢筋直径无关;600℃高温后连接在极限荷载下的钢筋滑移量变化与钢筋直径有关,对于钢筋直径为14 mm的HGSC,均发生钢筋拉断破坏,滑移量变得更大,且带钢筋轴线偏心的连接增加更多,对于其他钢筋直径的HGSC,均发生拔出破坏,滑移量可能变得更小。

## 2.4 等效弹性模量

HGSC的等效弹性模量 $E$ 可按式(1)计算<sup>[16]</sup>。

$$E = \frac{4F_y \cdot L_3}{\pi d^2 \cdot \Delta_y} \quad (1)$$

等效弹性模量的温度影响系数 $E/E_{room}$ 、偏心影响系数 $E/E_{cen}$ 和受温度与偏心共同影响的系数 $E/E_{cen+room}$ 分别见图10(a)、(b)、(c)。

由图10得,高温后HGSC的等效弹性模量与钢筋直径和钢筋轴线偏心无关,但随温度升高而降低,最大下降至室温下等效弹性模量的49%。

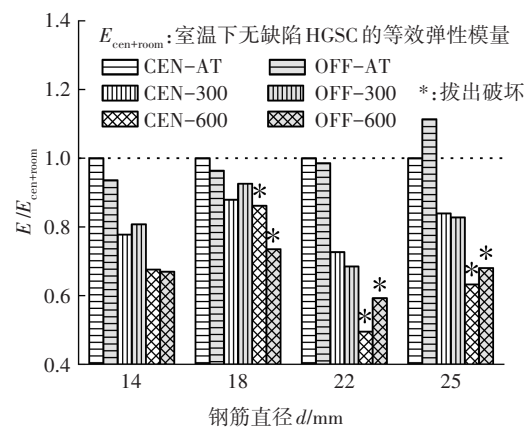
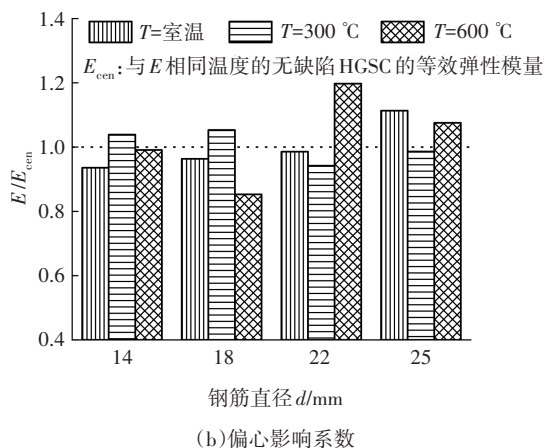
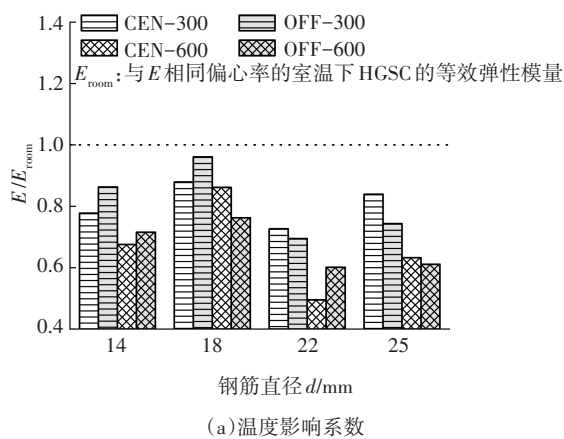


图10 等效弹性模量变化系数

Fig.10 Ratio of equivalent elastic modulus

## 3 与已有研究的比较与讨论

目前,除文献[18]中涉及的本课题组前期工作外,尚未发现高温后带钢筋轴线偏心的HGSC在单向拉伸作用下的公开试验结果。

### 3.1 可靠情况分析

我国规范《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)<sup>[10]</sup>认为灌浆套筒外部钢筋断裂可被工程接受,视为可靠,但钢筋拔出破坏难以被接受,视为不可靠.带明显钢筋滑移的钢筋拉断破坏虽然可靠,但其钢筋与灌浆料间存在明显滑移,故连接即将发生钢筋拔出破坏,变得不可靠.为了更好地了解各影响因素对高温后连接的影响,将发生此类破坏的连接视为处于临界状态.本文与文献[18]试件的可靠情况见表4。

随着温度升高,试件由可靠的无滑动钢筋拉断转变为临界状态的带明显钢筋滑动的钢筋拉断,最后甚至转变为不可靠的拔出破坏,说明高温会降低连接性能,削弱钢筋与灌浆料之间的黏结性能,且对黏结强度的影响大于对钢筋强度的影响.连接钢筋直径越大,温度对HGSC的影响越大。

连接钢筋直径为18 mm的HGSC,300℃高温后,缺陷试件较无缺陷试件更加不可靠.连接钢筋直径为22 mm和25 mm的HGSC,300℃高温后大部分无偏心试件处于可靠状态,但 $\eta$ 为50%的试件均处于临界状态, $\eta$ 为100%的试件在室温下就已处于临界状态.可见钢筋轴线偏心会导致HGSC内的钢筋更易发生滑动,促使拔出破坏的发生,并且随着钢筋轴线偏心率的增大,这种影响越来越大.分析其原因为



钢筋轴线偏心致使钢筋一侧的灌浆料厚度小于另一侧, 进而促使黏结强度无效区域的出现, 降低钢筋与灌浆料之间的黏接面积, 从而导致套筒连接性能降低<sup>[13,18]</sup>. 可见, HGSC 的可靠性受钢筋直径、处理温度和钢筋轴线偏心率的共同影响.

表 4 高温后半套筒灌浆连接的可靠情况  
Tab.4 Reliable situation of post-fire HGSCs

来源	试件编号	轴线偏心率 $\eta/\%$	温度 $t/^\circ\text{C}$		
			AT	300	600
本文研究	GT14-CEN	0	可靠	可靠	可靠
	GT14-OFF	50	可靠	可靠	可靠
	GT18-CEN	0	可靠	可靠	可靠
	GT18-OFF	50	可靠	可靠	不可靠
	GT22-CEN	0	可靠	可靠	可靠
	GT22-OFF	50	可靠	可靠	不可靠
	GT25-CEN	0	可靠	可靠	可靠
	GT25-OFF	50	可靠	可靠	不可靠
Zhang 等 <sup>[18]</sup>	GT14-CG	0	可靠	可靠	可靠
	GT14-OFF-4	73	可靠	可靠	可靠
	GT14-OFF-5.5	100	可靠	可靠	不可靠
	GT18-CG	0	可靠	可靠	可靠
	GT18-OFF-6.25	100	可靠	可靠	不可靠
	GT22-CG	0	可靠	可靠	可靠
	GT22-OFF-6.5	100	可靠	可靠	不可靠
	GT25-CG	0	可靠	可靠	可靠
GT25-OFF-6.25	100	可靠	可靠	不可靠	

注: □可靠状态 □临界状态 ■不可靠状态

### 3.2 性能评估

Ling 等<sup>[4]</sup>建议采用以下几个指标来评估套筒灌浆连接性能:

$$R_y = \frac{F_y}{F_{sy}}, R_s = \frac{F_u}{F_{su}}, R_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2)$$

式中:  $R_y$ 、 $R_s$  和  $R_d$  分别为屈服比、强度比和延性比;  $F_{sy}$  为连接钢筋屈服强度标准值对应的荷载. 指标要求为  $R_y \geq 1.0$ ,  $R_s \geq 1.25$  和  $R_d \geq 4$ <sup>[4,26]</sup>.

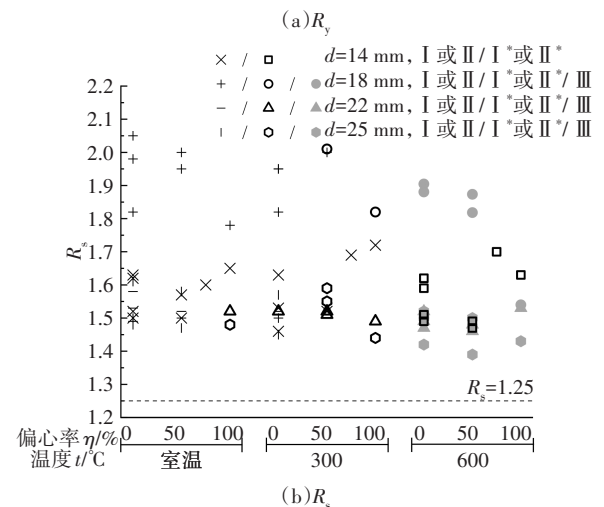
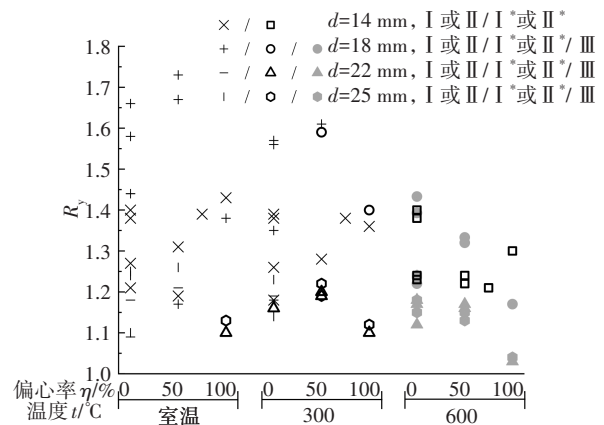
我国规范《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)<sup>[10]</sup>对于套筒灌浆连接还有更多的要求:

$$R_u = \frac{F_u}{F_{su}} \quad (3)$$

式中:  $R_u$  为强度比值;  $F_{su}$  为连接钢筋抗拉强度标准值

对应的荷载. 我国规范要求, 当连接发生套筒外钢筋断裂时  $R_u \geq 1.0$ , 拔出破坏时  $R_u \geq 1.15$ <sup>[10]</sup>.

本文和文献<sup>[18]</sup>的高温后 HGSC 的性能评估结果见图 11. 由图 11 可得, 几乎所有试件的  $R_y$ 、 $R_s$  和  $R_d$  均满足要求, 但大部分拔出破坏试件的  $R_u$  不符合我国规范要求. 可见我国规范<sup>[10]</sup>对 HGSC 提出了比 Ling 等<sup>[4]</sup>以及国外规范<sup>[26]</sup>更高的要求, 就此建议在工程及研究中对 HGSC 进行性能评估时, 也应适当参考我国规范<sup>[10]</sup>. 发生拔出破坏的试件难以满足要求, 大部分钢筋拉断但钢筋有明显滑动的试件的强度比值  $R_u$  小于或略大于 1.15. 由 3.1 节的分析得出, 高温和钢筋轴线偏心率会促使高温后 HGSC 发生破坏模式转变, 因此带明显钢筋滑动的试件一旦处理温度或钢筋轴线偏心率略微增大, 试件破坏模式可能转变为拔出破坏, 我国规范对  $R_u$  的要求将由大于 1.0 变为大于 1.15, 导致这部分试件变得不被接受. 故对 HGSC 及含该连接的 PC 结构进行设计施工或火灾后的性能评估与修复时, 应考虑火灾和钢筋轴线偏心的影响, 最终要求 HGSC 破坏时不发生钢筋拔出破坏, 且发生钢筋断裂破坏时, 钢筋与灌浆料之间也不出现明显滑移.



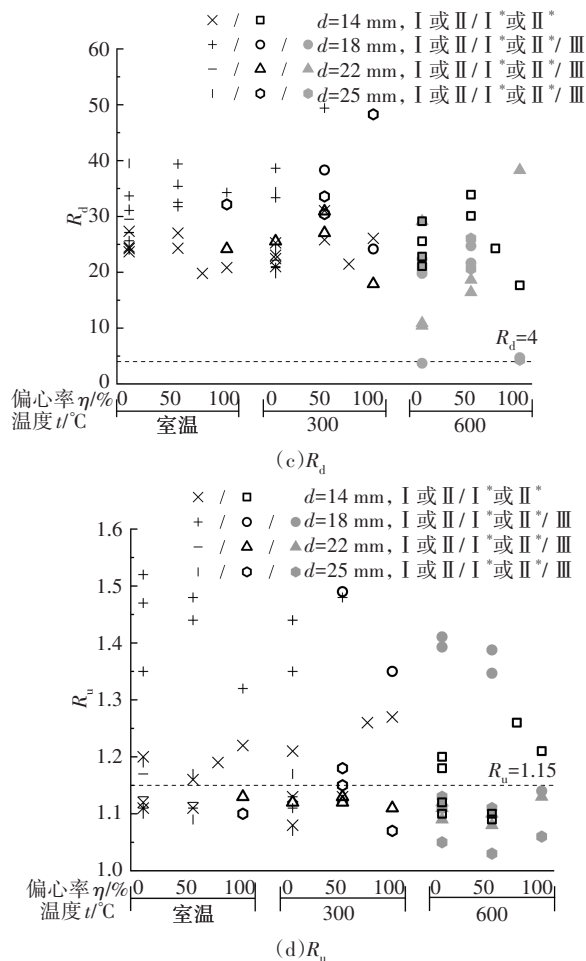


图 11 高温后半套筒灌浆连接的性能评估结果

Fig.11 Performance evaluation results of post-fire HGSCs

## 4 结论

1) 单向受拉的高温后带钢筋轴线偏心的 HGSC 主要发生钢筋拉断破坏与拔出破坏. 高温和钢筋轴线偏心会促使连接的破坏模式由钢筋拉断转变为钢筋拔出, 且这种影响随钢筋直径增大而增大.

2) 发生钢筋拔出破坏的 HGSC 难以满足我国规范《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355—2015)<sup>[10]</sup> 要求, 发生钢筋拉断破坏且钢筋与灌浆料间有明显滑移的 HGSC, 只要温度和钢筋轴线偏心率略微增大, 连接将变得不符合要求, 就此建议在工程中对 HGSC 及含该连接的 PC 结构进行设计施工、灾后性能评估与加固时, 考虑火灾温度与钢筋轴线偏心程度的影响.

3) 在 HGSC 螺纹端进行焊接可以有效解决螺纹端加工质量不佳的问题, 避免发生套筒滑丝破坏.

4) 室温和 300 °C 高温后, HGSC 的承载力不受温度和钢筋轴线偏心的影响; 600 °C 高温后, HGSC 的承

载力下降且带钢筋轴线偏心的试件下降稍多. 600 °C 高温后 HGSC 的屈服和极限荷载最大下降至室温下对应荷载的 78% 和 93%, 而缺陷组试件的屈服和极限荷载进一步最大下降至无缺陷组试件对应荷载的 94% 和 98%. HGSC 的荷载受高温和轴线偏心率的影响, 与钢筋直径无关.

5) 钢筋直径会影响高温后 HGSC 的破坏模式, 进而影响连接极限荷载下的钢筋滑移量, 对于钢筋拉断破坏的连接, 该滑移量随温度升高而增大, 对于拔出破坏的连接, 由于极限荷载的减小, 该滑移量可能在温度较高时随温度升高而减小, 如 600 °C 高温后, 当连接的钢筋直径为 14 mm 时, 连接极限荷载下的钢筋滑移量最大为室温下的 284%, 当连接其他直径的钢筋时, 该滑移量可能变得更小, 最小为室温下的 47%. 钢筋轴线偏心会增大高温后连接极限荷载下的钢筋滑移量, 最大增加至无缺陷试件的 173%.

6) 高温后 HGSC 的等效弹性模量与钢筋轴线偏心和钢筋直径无关, 但随处理温度的升高而降低, 600 °C 高温后的 HGSC 的等效弹性模量最大下降至室温下的 49%.

## 参考文献

- [1] 吴小宝, 林峰, 王涛. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(14): 77-82.  
WU X B, LIN F, WANG T. Experimental research on effects of grout age and types of steel bars on mechanical behavior of grout sleeve splicing for reinforcing bars[J]. Building Structure, 2013, 43(14): 77-82. (In Chinese)
- [2] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction[J]. PCI Journal, 1995, 40(1): 82-93.
- [3] 黄远, 张帆, 易伟建. 套筒约束灌浆料与钢筋黏结强度试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 69-75.  
HUANG Y, ZHANG F, YI W J. Experimental study on bond strength between sleeve confined grouting and steel bars[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 69-75. (In Chinese)
- [4] LING J H, ABD RAHMAN A B, IBRAHIM I S. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 530-539.
- [5] LING J H, ABD RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Tensile capacity of grouted splice sleeves[J]. Engineering Structures, 2016, 111: 285-296.
- [6] LING J H, ABD RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90-98.

- [7] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83:154-162.
- [8] ZHENG Y F, GUO Z X, XIE M. Behaviour of grout-filled splice under monotonic and cyclic loads[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1079/1080:322-326.
- [9] 郑永峰. GDPS灌浆套筒钢筋连接技术研究[D]. 南京:东南大学, 2016:14-16.  
ZHENG Y F. Research on rebar splicing system by GDPS grout-filled coupling sleeve[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 14-16. (In Chinese)
- [10] 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ 355—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015:32-38.  
Technical specification for grout sleeve splicing of rebars :JGJ 355—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015:32-38. (In Chinese)
- [11] HUANG Y, ZHU Z G, NAITO C J, *et al.* Tensile behavior of half grouted sleeve connections: experimental study and analytical modeling[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152:96-104.
- [12] XU T F, LI Q W, ZHAO R D, *et al.* On the early-age bond-slip behavior of an eccentric bar embedded in a grouted sleeve[J]. *Engineering Structures*, 2019, 190:160-170.
- [13] 陈建伟, 王占文, 鞠士龙, 等. 半灌浆套筒钢筋偏心连接受拉性能试验研究与数值模拟[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S2): 160-171.  
CHEN J W, WANG Z W, JU S L, *et al.* Experimental study and numerical simulation on tensile behavior of eccentric rebar connection for half-grouted sleeve splice[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S2):160-171. (In Chinese)
- [14] ZHANG W X, DENG X, ZHANG J Y, *et al.* Tensile behavior of half grouted sleeve connection at elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176:259-270.
- [15] ZHANG W X, LV W L, ZHANG J Y, *et al.* Post-fire tensile properties of half-grouted sleeve connection under different cooling paths[J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 109:102848.
- [16] ZHANG W X, HE C, ZHANG J Y, *et al.* Mechanical behavior of post-fire half-grouted sleeve connection covered by concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201:218-231.
- [17] 张望喜, 何超, 张瑾熠, 等. 钢筋半套筒灌浆连接高温后的力学性能试验研究和粘结滑移分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(11):33-42.  
ZHANG W X, HE C, ZHANG J Y, *et al.* Experimental study and bond slip analysis on mechanical properties of half grout sleeve splicing of rebars after high temperature[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(11):33-42. (In Chinese)
- [18] ZHANG W X, WANG J, ZHANG J Y, *et al.* Experimental study on post-fire performance of half grouted sleeve connection with construction defect[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244:118165.
- [19] WANG T, XU H M, YU M, *et al.* Experimental investigation on the failure modes of grouted sleeve connections under thermal and mechanical loads[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 109: 104246.
- [20] 朱佳宁, 郭栋栋, 马金凤, 等. 高温后半灌浆套筒抗拉性能试验研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(5):104-111.  
ZHU J N, GUO D D, MA J F, *et al.* Experimental study on tensile properties of semi-grouting sleeve after high temperature[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(5):104-111. (In Chinese)
- [21] 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016:11.  
Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars: JGJ 107—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016:11. (In Chinese)
- [22] 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021:9-19.  
Metallic materials Tensile testing Part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021:9-19. (In Chinese)
- [23] 水泥胶砂强度检验方法(ISO法): GB/T 17671—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021:9-10.  
Method of testing cements determination of strength: GB/T 17671—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021:9-10.
- [24] 钢筋连接用灌浆套筒: JG/T 398—2019[S]. 北京:中国标准出版社, 2019:5-9.  
The grouting sleeve for rebars splicing: JG/T 398—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019:5-9. (In Chinese)
- [25] 黄远, 朱正庚, 黄登, 等. 钢筋半套筒灌浆连接的静力拉伸试验研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(2): 26-32.  
HUANG Y, ZHU Z G, HUANG D, *et al.* Investigation into half grout sleeve splicing for rebars via static tensile test[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(2):26-32. (In Chinese)
- [26] Building code requirements for structural concrete and commentary :ACI 318—19 [S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019:291.