

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

张望喜^{1,2†}, 何超², 张瑾熠³, 邓曦², 王志强², 易伟建^{1,2}

(1.湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室,湖南长沙 410082;

2. 湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082;3.湖南科技大学 土木工程学院,湖南湘潭 411201)

摘要:为避免装配式混凝土结构中钢筋半套筒灌浆连接在火灾后发生失效而造成严重后果,制作了27个14 mm钢筋半套筒灌浆连接试件,并通过高温后的单向静力拉伸试验研究其高温后的力学性能.试验结果表明,钢筋半套筒灌浆连接试件高温后存在钢筋拉断、钢筋刮犁式拔出2种破坏模式,且浇水冷却使试件更容易出现后一种破坏模式;试件在拉伸过程中灌浆端连接钢筋与套筒之间会产生相对滑移,且随着外部温度的升高滑移量呈现非线性的增长趋势;基于600℃高温后的试验结果,依据已有黏结强度公式,给出了避免试件灌浆段钢筋在高温后发生刮犁式拔出破坏的建议;通过对试件弹性阶段的钢筋滑移量进行近似分析,得到了高温后自然冷却条件下钢筋滑移量与温度的二次函数关系曲线.

关键词:半套筒灌浆;单向静力拉伸试验;高温后;失效模式

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

Experimental Study and Bond Slip Analysis on Mechanical Properties of Half Grout Sleeve Splicing of Rebars after High Temperature

ZHANG Wangxi^{1,2†}, HE Chao², ZHANG Jinyi³, DENG Xi², WANG Zhiqiang², YI Weijian^{1,2}

(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;

3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to avoid failure of the half grout sleeve splice of rebars in prefabricated concrete structures after fire and serious consequences, 27 14 mm-half grout sleeve splicing specimens of rebars were manufactured to study their mechanical properties by unidirectional static tensile test after high temperature. The test results showed two failure modes of the specimens after high temperatures including fracture and pull-out of rebars, in which the latter one was more likely to occur when the specimens were cooled by water. During the tensile process, the relative slip can occur between the sleeve and the rebar connected at the grouting side, and the slip increased nonlinearly with the increase of the temperature. Based on the test results after 600℃ high temperature and the existing bond strength formulas, suggestions were given to avoid the pull-out failure of rebars after high temperature. According to approximate analysis of steel slip in elastic stage, the quadratic function curve between the slip and temperature un-

* 收稿日期:2018-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578228), National Natural Science Foundation of China(51578228); 国家重点研发计划专项资助项目(2016YFC0701400), National Key Research and Development Program of China(2016YFC0701400)

作者简介:张望喜(1971—),男,湖北黄冈人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: wxizhang2000@163.com

1.2 材料性能

试件灌浆料采用西卡(中国)有限公司生产的 SikaGrout PC 预制构件钢筋连接用灌浆材料. 该灌浆料为单组份、收缩补偿、高早强的预拌水泥基灌浆材料; 其主要组分包括水泥、精选骨料、外加剂等; 其配比为 3.5 L 水/25 kg 粉料.

根据《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2013)^[6], 制作 12 个 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体, 分别在高温试验炉以 10 °C/min 的速度加热至指定温度并恒温 30 min 后, 以自然冷却和浇水冷却的方式将试件冷却至常温, 参照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)^[7], 先使用抗折试验机将试件从中间折成 2 块, 则其破坏时的强度即为抗折强度. 随后分别将 2 块试块分别放入抗压试验机下以 (2400±200) N/s 的加荷速率加载至棱柱体破坏, 二者破坏时的强度分别记为抗压强度 1 和抗压强度 2, 如图 2 所示. 平均抗压强度则由相同温度下 6 块试件取平均值计算得到, 具体结果见表 1.

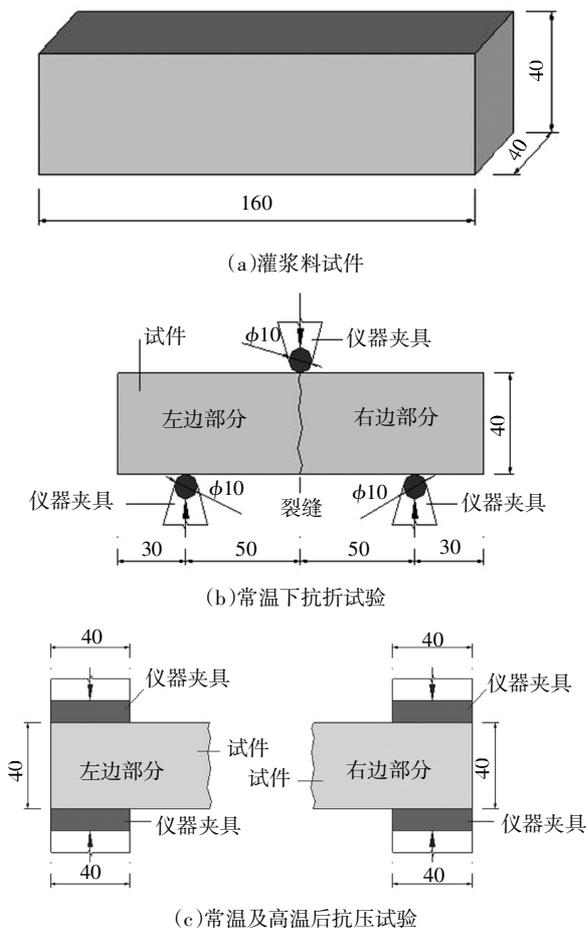


图 2 灌浆料强度测定示意图(单位:mm)

Fig.2 The schematic diagram of grout strength determination(unit:mm)

表 1 灌浆料强度值^[5]

Tab.1 Strength of grout

试件编号	加热温度/°C	抗折强度 /MPa	抗压强度 1 /MPa	抗压强度 2 /MPa	冷却方式	抗压强度 /MPa
SKA-1	常温	6.31	106.5	100.2		
SKA-2	常温	6.00	92.5	97.1	自然冷却	98.98
SKA-3	常温	6.61	97.2	100.4		
SKA-4	200	3.29	75.1	74.6		
SKA-5	200	3.59	80.4	88.8	自然冷却	78.18
SKA-6	200	3.19	64.1	86.1		
SKA-7	400	2.37	68.3	76.1		
SKA-8	400	2.45	70.6	78.4	自然冷却	72.87
SKA-9	400	2.66	73.9	69.9		
SKA-10	600	1.60	62.8	68.4		
SKA-11	600	1.20	73.3	70.0	自然冷却	66.2
SKA-12	600	1.41	64.8	57.9		
SKA-13	600	1.1	47.7	45.5		
SKA-14	600	1.03	53.3	40.5	浇水冷却 (0.5 h)	48.67
SKA-15	600	1.05	51.5	53.5		

由表 1 可知, 灌浆料抗折及抗压强度随温度升高而呈现出下降的趋势, 且在常温至 200 °C 这一区间下降量最大, 下降约 21.01%. 经过 600 °C 高温处理后, 与自然冷却的方式相比, 采用浇水冷却的灌浆料强度降低得更加明显, 且浇水冷却的强度仅为自然冷却强度的 73.52%.

1.3 试验装置及加载方案

试验中, 通过电加热高温试验炉(炉膛内径 160 mm, 长 230 mm, 功率 1.5 kW, 最高温度 1 000 °C)及配套的 KSY-6D-T 型温度控制仪来控制温度. 我国统计资料表明^[12], 火灾的延续时间低于 1 h 比例为 80.9%, 为切合实际, 温度加载方式为 10 °C/min, 至指定温度后恒温 30 min, 保持温度不变. 采用湖南大学 500 kN 万能材料试验机在试验全过程以 5 mm/min 进行位移控制加载, 直至连接钢筋被拉断或被拔出; 在此过程中, 利用 LVDT 位移计及小型动态应变仪采集标记段位移.

1.4 测量内容及方法

高温炉长 230 mm, 为全面探究半套筒灌浆连接在高温后的滑移, 本试验在不同温度下, 使用不同冷却方式对试件进行加载, 如表 2 所示. 对试件及对照组钢筋的标记段位移进行测量, 如图 3 所示.

表 2 试件加载和测量详表^[15]

Tab.2 Loading and measurement information of specimens

试件编号	加热温度/℃	冷却方式	测量标记段
GSA1-1,2,3	常温	无	L3
GSA1-4,5,6	200	自然冷却	L3
GSA1-7,8,9	400	自然冷却	L3
GSA2-10,11,12	600	自然冷却	L4
GSA2-13,14,15	600	浇水冷却	L4
SLA-1,2,3	常温	无	L3
SLA-4,5,6	200	自然冷却	L3
SLA-7,8,9	400	自然冷却	L3
SLA-10,11,12	600	自然冷却	L3
SLA-13,14,15	600	浇水冷却	L4

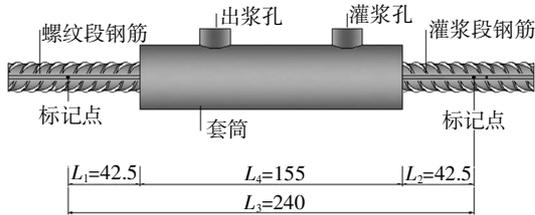


图 3 半灌浆套筒标记点位置(单位:mm)

Fig.3 Mark position of half grout sleeve splicing for rebars(unit:mm)

本试验通过自制高性能弹簧夹具卡住试件标记点,当位移发生变化时,使用 LVDT 位移计对夹具水平延伸的铁板位移进行测量,并将 LVDT 位移计与 DC-104R 动态应变仪相连来采集动态变化的位移.将两个 LVDT 采集的数据相减即可得到标记段某一时间的位移,并通过时间轴线将该位移变化与万能试验机采集的荷载一一对应.实验装置如图 4、图 5 所示.

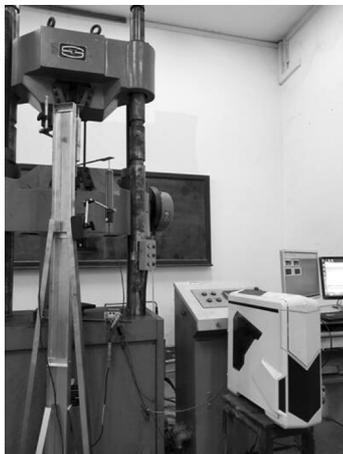


图 4 试验装置
Fig.4 Test set up

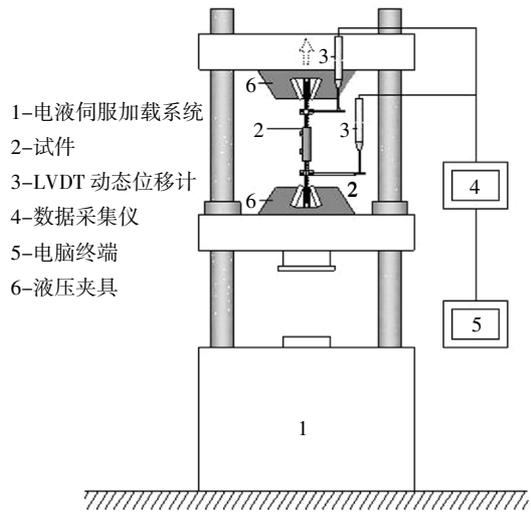


图 5 试验装置图解^[15]

Fig.5 Illustration of test device

2 试验结果分析

2.1 试验现象及数据

高温后的半套筒灌浆连接试件在实验中主要存在连接钢筋拉断及连接钢筋刮犁式拔出等两种破坏模式,如图 6、图 7 所示.其中 600℃高温后浇水冷却的试件 GS14A2-13,14,15 为钢筋拔出破坏,其余试件均为连接钢筋拉断的破坏模式.

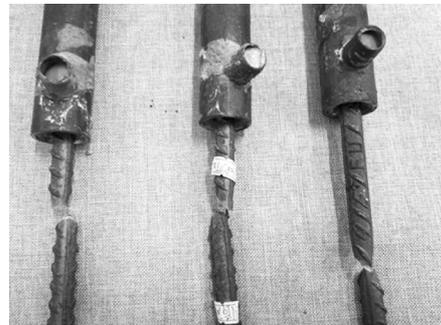


图 6 钢筋拉断破坏^[15]

Fig.6 Failure mode of rebar broken



图 7 灌浆端钢筋拔出破坏^[15]

Fig.7 Failure mode of rebar at the side of grout pulled out

本文将套筒、灌浆料以及钢筋看成一个整体,将此时标记段测得的位移对应的应变定义为试件的等效应变. 钢筋半套筒灌浆连接试件及对照组钢筋的屈服强度、极限强度以及对应的各阶段应变如表 3、表 4 所示.

表 3 钢筋半套筒灌浆连接试件试验结果

Tab.3 Test results of half grout sleeve splicing of rebars

试件编号	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性阶段等效应变	极限阶段等效应变
GS14A1-1	472.84	666.67	0.002 08	0.071 83
GS14A1-2	475.05	673.23	0.001 92	0.066 29
GS14A1-3	455.49	622.94	0.002 17	0.075 83
GS14A1-4	502.53	680.96	0.002 25	0.061 08
GS14A1-5	512.28	650.23	0.002 29	0.070 29
GS14A1-6	539.57	663.94	0.002 08	0.071 33
GS14A1-7	468.62	655.43	0.003 33	0.084 50
GS14A1-8	466.67	655.88	0.003 17	0.097 83
GS14A1-9	449.58	640.03	0.003 29	0.092 04
GS14A2-10	520.34	635.48	0.005 45	0.128 26
GS14A2-11	500.06	621.83	0.007 10	0.098 58
GS14A2-12	467.77	642.37	0.006 39	0.097 94
GS14A2-13	505.78	602.99	0.006 84	0.783 23
GS14A2-14	541.59	626.38	0.006 19	0.709 87
GS14A2-15	465.89	625.73	0.006 39	0.768 00

表 4 对照组钢筋试验结果

Tab.4 Test result of rebars in control group

试件编号	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性阶段等效应变	极限阶段等效应变
SL14A-1	467.25	654.78	0.001 96	0.104 63
SL14A-2	461.21	657.18	0.002 13	0.099 00
SL14A-3	459.52	600.45	0.001 96	0.086 54
SL14A-4	478.04	622.48	0.002 25	0.074 71
SL14A-5	467.45	632.55	0.002 25	0.069 50
SL14A-6	459.19	618.52	0.001 92	0.074 67
SL14A-7	459.71	634.50	0.003 25	0.076 33
SL14A-8	449.97	659.78	0.002 96	0.062 17
SL14A-9	491.36	622.35	0.003 17	0.067 92
SL14A-10	474.85	636.19	0.004 17	0.072 79
SL14A-11	459.19	644.12	0.004 13	0.093 63
SL14A-12	491.10	622.35	0.003 75	0.073 46
SL14A-13	462.38	632.68	0.004 19	0.068 77
SL14A-14	456.34	640.09	0.004 19	0.084 45
SL14A-15	496.23	629.50	0.003 81	0.067 23

对比表 3 及表 4 可知, 钢筋半套筒灌浆连接试件相对于对照组钢筋而言, 在常温至 600 °C 不同温度的加载过程中, 屈服应力以及极限应力无明显变化, 且弹性阶段应变增量同对照组钢筋大致相似.

取相同温度下试件极限应变的平均值绘制如图 8 所示的曲线可知: 当温度由常温变化至 200 °C 时, 对照组钢筋极限应变明显减小, 200 °C 变化至 600 °C 时, 极限应变基本无变化; 试件 200 °C 变化至 600 °C 时, 其呈现明显的增大的趋势.

不难看出, 试件极限应变 $\epsilon_0 = \epsilon_1 + \epsilon_2$, 其中 ϵ_1 为试件钢筋伸长量, ϵ_2 为试件钢筋与套筒间的滑移量. 对比钢筋极限应变与试件极限应变曲线可以推断得到: 随着温度的升高, ϵ_1 呈现出减小的趋势, 而 ϵ_0 明显增大, 因此 ϵ_2 会显著增大, 故随着温度的升高, 试件钢筋与套筒间的滑移量呈现出显著增大的趋势, 且在 200~400 °C 的温度区间内, 滑移量的增量最大.

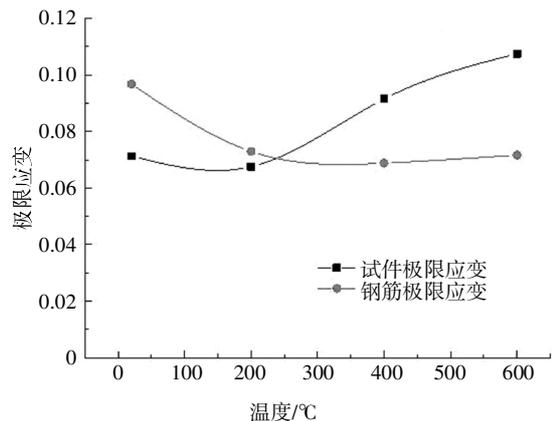


图 8 高温后试件及对照组钢筋极限应变与温度的关系
Fig.8 Relationship between ultimate strain and temperature of specimens and rebars after high temperature

2.2 试验结果分析

2.2.1 常温下钢筋半套筒灌浆连接试件受力分析

常温下钢筋半套筒灌浆连接试件及钢筋的应力-应变曲线如图 9、图 10 所示.

由图可知, 常温条件下, 试件应力-应变曲线与对照组钢筋基本相同, 试件的平均屈服应力为 467.79 MPa, 对照组钢筋的平均屈服荷载为 462.66 MPa, 二者较为接近. 强化屈服阶段试件 L3 标记段平均应变为 0.069 26, 较对照组钢筋组平均应变 0.094 71 要小, 可以推断是由于常温条件下灌浆套筒与钢筋间的黏结力对于钢筋的拉伸有阻碍作用,

导致套筒强化阶段位移小于对照组钢筋. 整体而言, 常温下套筒连接钢筋与钢筋的力学拉伸性能无明显区别.

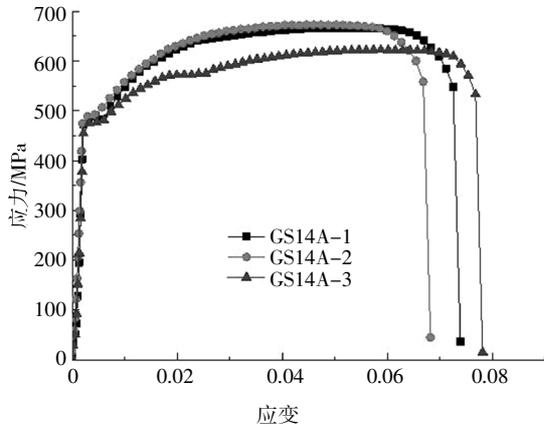


图 9 常温下试件应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curve of specimens at room temperature

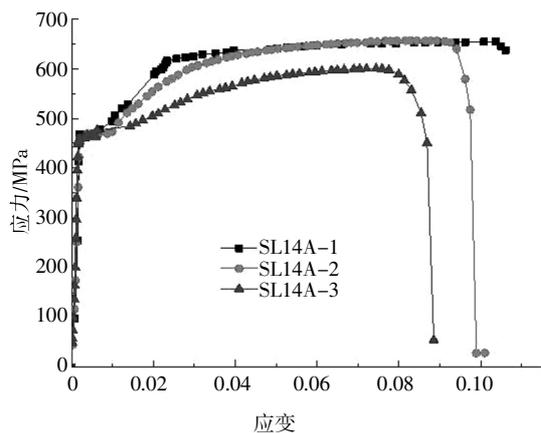


图 10 常温下对照组钢筋应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curve of rebars at room temperature

2.2.2 200 °C高温后钢筋半套筒灌浆连接试件受力分析

200 °C高温后套筒连接试件及钢筋应力-应变曲线如图 11、图 12 所示. 由图可知, 试件在 200 °C 条件下高温冷却后, 极限抗拉强度和常温条件下差异不大, 试件的平均屈服应力为 518.13 MPa, 对照组钢筋的平均屈服荷载为 468.23 MPa, 二者均较常温情况下接近. 强化屈服阶段试件 L3 标记段平均应变为 0.065 36, 较对照组钢筋组平均应变 0.070 82 要小, 说明在 200 °C高温后的条件下, 灌浆套筒黏结力对于套筒的拉伸依然存在阻碍作用, 且对比于常温下可知, 阻碍作用呈现出减小的趋势.

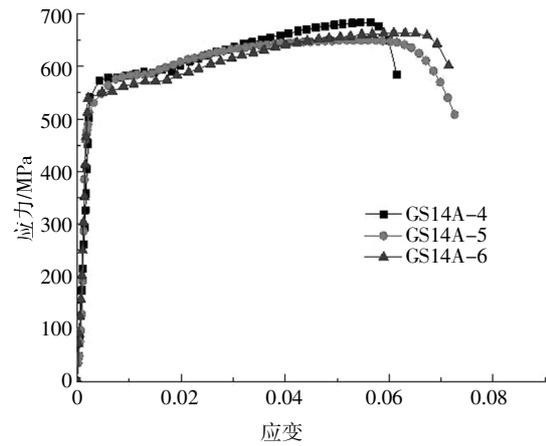


图 11 200 °C高温后试件应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curve of specimens after 200 °C

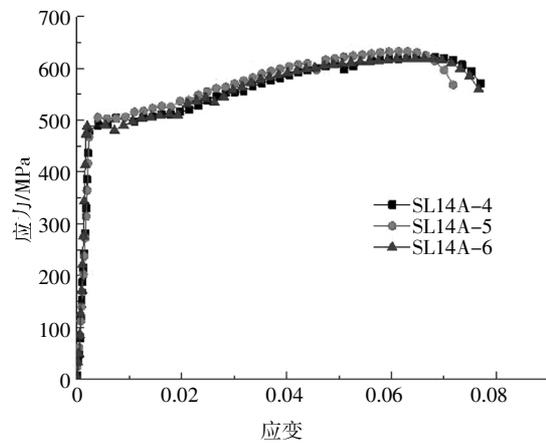


图 12 200 °C高温后对照组钢筋应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curve of rebars after 200 °C

2.2.3 400 °C高温后钢筋半套筒灌浆连接试件受力分析

400 °C高温后套筒连接试件及钢筋应力-应变曲线如图 13、图 14 所示.

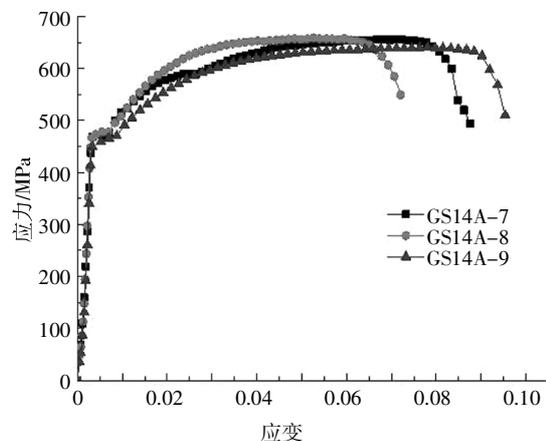


图 13 400 °C高温后试件应力-应变曲线

Fig.13 Stress-strain curve of specimens after 400 °C

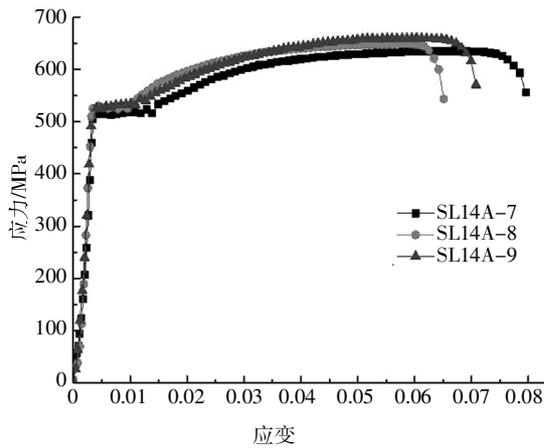


图 14 400 °C 高温后对照组钢筋应力-应变曲线

Fig.14 Stress-strain curve of rebar after 400 °C

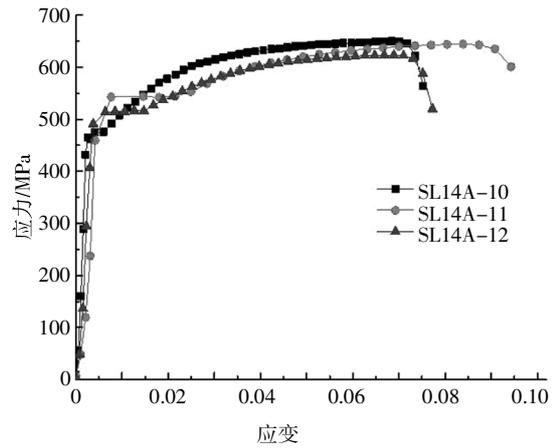


图 16 600 °C 高温后对照组钢筋应力-应变曲线

Fig.16 Stress-strain curve of rebar after 600 °C

由图 13、图 14 可知, 试件在 400 °C 高温后其屈服应力和极限应力与 200 °C 高温后及常温条件下相比差异不大. 试件的平均屈服应力为 461.62 MPa, 对照组钢筋的平均屈服荷载为 467.01 MPa, 二者较为接近. 强化屈服阶段试件 L3 标记段平均应变为 0.099 5, 较对照组钢筋组平均应变 0.065 7 大, 对比常温及 200 °C 高温后情况下可知, 在 400 °C 条件下钢筋位移与 200 °C 条件下大致相同, 试件 L3 段应变在 400 °C 条件下比 200 °C 条件下增加, 试件灌浆段钢筋和套筒在 400 °C 时产生了滑移, 导致套筒强化阶段位移大于对照组钢筋及试件 L3 段在 200 °C 下的应变.

2.2.4 600 °C 高温后钢筋半套筒灌浆连接试件受力分析

600 °C 高温后套筒连接试件及钢筋应力-应变曲线如图 15~图 18 所示.

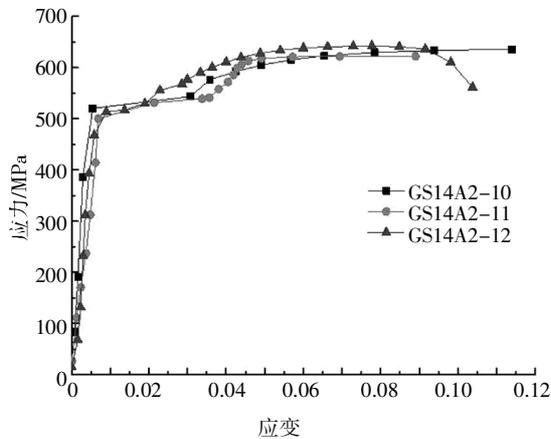


图 15 600 °C 高温后试件应力-应变曲线

Fig.15 Stress-strain curve of specimens after 600 °C

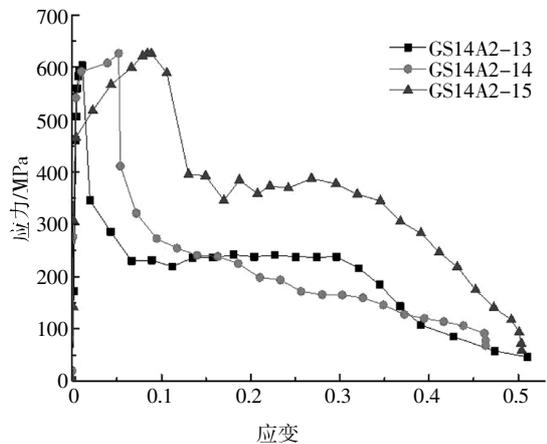


图 17 600 °C 高温水冷后套筒应力-应变曲线

Fig.17 Stress-strain curve of specimens after 600 °C by water-cooling

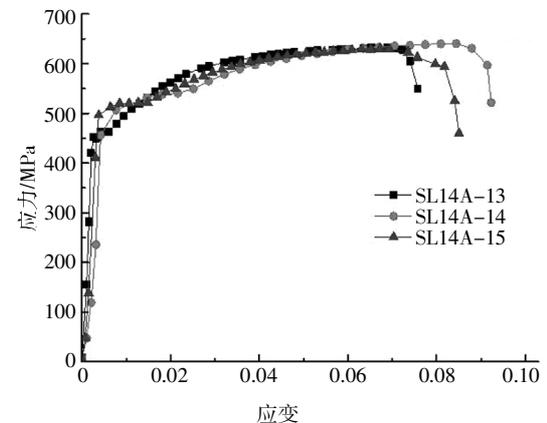


图 18 600 °C 高温水冷后对照组钢筋应力-应变曲线

Fig.18 Stress-strain curve of rebar after 600 °C by water-cooling

3 高温后钢筋半套筒灌浆连接试件黏结应力及滑移分析

3.1 高温后钢筋半套筒灌浆连接试件黏结应力分析

黏结应力即钢筋受力后在与灌浆料接触面上产生的剪应力.黏接力使钢筋中的正应力沿受力方向衰减.

3.1.1 黏结锚固性能的机理分析

根据徐有邻等^[8]的研究成果,钢筋与握裹混凝土之间,在对钢筋加载的初始阶段就会导致钢筋附近与混凝土的胶合力丧失,钢筋的横肋开始与混凝土脱离形成裂缝,在此阶段会导致钢筋与混凝土产生细微滑移.

随着荷载的增大,裂缝开始发展成为斜裂缝,并导致滑移量的增大.随后的加载会导致滑移增大,肋前混凝土的破坏并挤压成楔状堆积,楔状堆积则形成新挤压滑移面.随后肋前破坏随荷载的增大而发展,导致碎屑剥落,此时达到锚固力峰值.通过试验后观察发现,常温及高温试件破坏后,最外侧灌浆料均碎裂成小块.说明在试验过程中,所有试件在破坏过程中灌浆段均逼近锚固力峰值.

而随着混凝土破坏范围的扩大,延伸至整个锚固范围,荷载开始逐渐下降而滑移继续增加.最后所有锚固固均被破坏,同时形成新的摩擦面,此即为锚固应力的残余段.由图 18 可知,曲线 GS14A2-13、GS14A2-14 和 GS14A2-15 中下半段与锚固应力残余阶段现象一致,表现为黏结应力逐步丧失而滑移逐渐增大.

3.1.2 黏结应力的分析计算

钢筋半套筒灌浆连接发生钢筋刮犁式拔出破坏时的承载力取决于钢筋与灌浆料之间的平均黏结强度 τ_u . 根据 Einea 等^[1]的研究可知钢筋与灌浆料之间的平均黏结强度 τ_u 可以假设如下:

$$\tau_u = k\sqrt{f_c} \quad (1)$$

式中: k 为常数, f_c 为灌浆料的抗压强度.则根据表 1,通过式(1)可知 600 °C 高温后的钢筋半灌浆套筒连接的黏结应力如表 5 所示.

表 5 600 °C 高温后钢筋半套筒灌浆连接黏结应力
Tab.5 Bonding stress of half grout sleeve splicing of rebars after 600 °C

试验处理温度/°C	黏结应力/MPa
600	6.97k

已知 600 °C 高温后钢筋半套筒灌浆连接试件 GS14A2-13、GS14A2-14 和 GS14A2-15 的破坏方式为刮犁式拔出破坏,则套筒试验最大试验力即为黏结力.黏结力与黏结强度之间关系如下:

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi dL} \quad (2)$$

式中: P_u 为黏结力; d 为钢筋直径; L 为钢筋连接的锚固长度.将式(1)代入式(2),可得:

$$k = \frac{P_u}{\pi dL\sqrt{f_c}} \quad (3)$$

由此可得 600 °C 高温后 GS14A2-13、GS14A2-14 和 GS14A2-15 的 k 值如表 6 所示.

表 6 600 °C 高温后浇水冷却的试件的 k 值

Tab.6 Parameter k of specimens after 600 °C with water-cooling

试件编号	k 值
GS14A2-13	1.51
GS14A2-14	1.80
GS14A2-15	1.73

结合表 6,在钢筋半套筒灌浆连接设计中,为防止试件出现钢筋刮犁式拔出破坏,应该保证黏结强度 τ_u 大于钢筋的极限抗拉强度.结合式(3)可得:

$$\frac{P_u}{\pi dL\sqrt{f_c}} \leq k \quad (4)$$

根据表 6 的计算结果可知,当 k 的取值不大于表 6 中的最小值,即 $k \leq 1.51$ 时,在设计中应避免试件出现钢筋刮犁式拔出破坏.

3.2 高温后钢筋半套筒灌浆连接试件滑移近似分析

试件标记段测得的位移包括套筒外部钢筋的变形以及套筒内钢筋滑移量.根据表 4 中对照组钢筋弹性阶段的应力应变数据求得各温度下钢筋的弹性模量,根据对应的弹性模量值计算试件套筒外钢筋伸长量,从而得到各温度下试件在弹性阶段套筒内钢筋的近似滑移量如表 7 所示.

分析表 7 中的滑移量均值可以得到,常温下套筒内钢筋的弹性阶段近似滑移量较小,约为 0.32 mm;由常温变化至 200 °C 时自然冷却条件下,钢筋的近似滑移量基本保持不变;400 °C 时自然冷却条件下,钢筋近似滑移量相对常温时增加了约 62.5%;600 °C 时自然冷却条件与浇水冷却条件下的近似滑移量十分接近,说明了该温度条件下冷却方式对滑移量的影响并不明显,且相对于常温下的滑移量增

加了约 210.0%。

表 7 试件弹性阶段套筒内钢筋的近似滑移量

Tab.7 The specimens' approximate slip of rebars in sleeves during the elastic stage mm

试件编号	测量 标记段	标记段弹性 阶段位移	标记段套筒 外钢筋变形	套筒内钢筋 近似滑移量	滑移量 均值
GS14A1-1	L3	0.50	0.17	0.33	
GS14A1-2	L3	0.46	0.18	0.28	0.32
GS14A1-3	L3	0.52	0.17	0.35	
GS14A1-4	L3	0.54	0.19	0.35	
GS14A1-5	L3	0.55	0.20	0.35	0.33
GS14A1-6	L3	0.50	0.21	0.29	
GS14A1-7	L3	0.80	0.27	0.53	
GS14A1-8	L3	0.76	0.27	0.49	0.52
GS14A1-9	L3	0.79	0.26	0.53	
GS14A2-10	L4	0.84	0.00	0.84	
GS14A2-11	L4	1.10	0.00	1.10	0.98
GS14A2-12	L4	0.99	0.00	0.99	
GS14A2-13	L4	1.06	0.00	1.06	
GS14A2-14	L4	0.96	0.00	0.96	1.00
GS14A2-15	L4	0.99	0.00	0.99	

利用数据处理软件 origin 对表 7 中试验温度和钢筋滑移量两个物理量进行二次曲线拟合得到如图 19 所示的滑移量随温度变化的曲线,由此得到高温后自然冷却条件下钢筋半套筒灌浆连接试件套筒内钢筋的滑移量 X 随温度 t 变化关系如式(5)所示。

$$X=0.339\ 69-6.897\ 4\times 10^{-4}t+2.918\ 47\times 10^{-6}t^2 \quad (5)$$

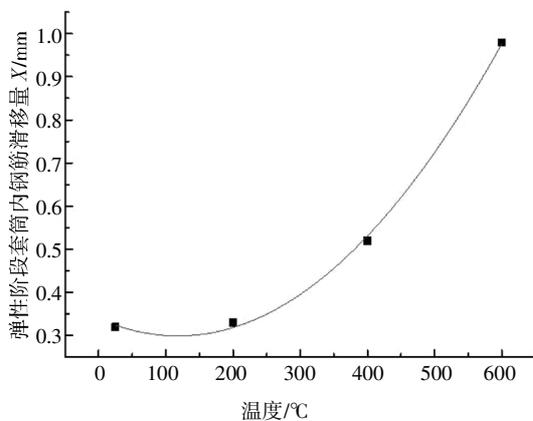


图 19 试件弹性阶段套筒内钢筋近似滑移量随温度的变化曲线

Fig.19 Curve of specimens' approximate slip of rebars in sleeves during the elastic stage with the change of temperature

4 结 论

1) 钢筋半套筒灌浆连接试件高温后存在钢筋拉断、钢筋刮犁式拔出两种破坏模式,且破坏模式主要受处理温度和高温后冷却方式的影响. 当 600 °C 高温后且冷却方式为浇水冷却时, 试件将发生钢筋刮犁式拔出破坏, 对于 600 °C 及以下的高温处理的试件, 采用自然冷却的方式将产生钢筋拉断的破坏模式.

2) 随着温度的升高, 套筒内灌浆料强度逐渐降低. 温度由常温升至 200 °C 时, 自然冷却至室温后灌浆料抗压强度降低幅度最大, 下降约 21.01%. 由 200 °C 升至 400 °C 以及 400 °C 升至 600 °C 时, 自然冷却的情况下强度下降不明显.

3) 高温后冷却方式的不同, 会影响钢筋半套筒灌浆连接试件的力学性能. 温度由 400 °C 升至 600 °C 时, 采用浇水冷却的方式导致的灌浆料强度降低与自然冷却的方式相比降低幅度更为明显, 二者强度分别下降了 33.21% 和 9.15%, 且浇水冷却的强度仅为自然冷却强度的 73.52%.

4) 高温后钢筋半套筒灌浆连接及对照组钢筋在不同温度下, 屈服强度和极限强度差异较小. 且当温度高于 200 °C 时, 随着温度的升高, 高温后钢筋和套筒产生的相对滑移愈发明显, 屈服位移和极限位移呈现出显著增大的趋势.

5) 本文对高温后钢筋半套筒灌浆连接的极限荷载及位移与温度的关系、高温后极限位移与温度的关系进行了公式推导. 根据已有黏结强度公式, 对于高温后抵抗钢筋刮犁式拔出的承载力, 建议 k 的取值不大于 1.51, 即可以选用抗压强度更高性能更稳定的灌浆料等措施, 以避免套筒在 600 °C 及以下高温处理后发生钢筋刮犁式拔出的破坏形式.

6) 本文针对钢筋半套筒连接试件套筒内的钢筋滑移量进行了近似分析, 并拟合得到了式(5)所示的高温后自然冷却条件下钢筋滑移量与温度的二次函数关系式, 为后期展开钢筋套筒灌浆连接受力性能的模拟分析提供参考依据.

参考文献

- [1] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction [J]. *Pei Journal*, 1995, 40(1): 82—93.
- [2] KIM Y. A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections [D]. Austin: Ferguson Structural Engineering Laboratory, University of Texas at Austin, 2000: 21—55.
- [3] ZHAO X L, GRUNDY P, LEE Y T. Grout sleeve connections under large deformation cyclic loading [C]//The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002: 53—59.
- [4] ZHAO X L, GHOJEL J, GRUNDY P. Behaviour of grouted sleeve connections at elevated temperatures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44(7): 751—758.
- [5] GOH H M. Parametric study of steel grouted splice sleeve with integrated double springs under axial tension [D]. Johore Johor Bahrn: Universiti Teknologi Malaysia, 2009: 1—68.
- [6] KIM H K. Bond strength of mortar-filled steel pipe splices reflecting confining effect [J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2012, 11(1): 125—132.
- [7] SAYADI A A, RAHMAN A B A, JUMAAT M Z B, *et al.* The relationship between interlocking mechanism and bond strength in elastic and inelastic segment of splice sleeve [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 55: 227—237.
- [8] SAYADI A A, RAHMAN A B A, SAYADI A, *et al.* Effective of elastic and inelastic zone on behavior of glass fiber reinforced polymer splice sleeve [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 80: 38—47.
- [9] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. *Engineering Structures*, 2015, 83: 154—162.
- [10] AMELI M J, BROWN D N, PARKS J E, *et al.* Seismic column-to-footing connections using grouted splice sleeves [J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(5): 1021—1030.
- [11] 郑永峰, 郭正兴. 循环荷载作用下新型钢筋套筒灌浆连接结构性能 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(11): 136—145. ZHENG Y F, GUO Z X. Structural performance of innovative grout sleeve splicing for rebars under cyclic loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(11): 136—145. (In Chinese)
- [12] YUAN H, ZHENGGENG Z, 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.
- [13] 余琼, 许雪静, 袁炜航, 等. 不同搭接长度下套筒约束浆锚搭接接头力学试验研究 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(9): 82—91. YU Q, XU X J, YUAN W H, *et al.* Experimental study of grouted sleeve lapping connectors varied in two factors under tensile load [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(9): 82—91. (In Chinese)
- [14] ZHANG W, DENG X, ZHANG J, *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, LÜ W L, ZHANG J Y, *et al.* Post-fire tensile proper of half-grouted sleeve connection under different cooling paths [J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 109: 102848.
- [16] JG/T 408—2013 钢筋连接用套筒灌浆料 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 8. JG/T 408—2013 Sleeve grout for steel connection [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 8. (In Chinese)
- [17] GB/T 17671—1999 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 10. GB/T 17671—1999 Test method for strength of cement mortar [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999: 10. (In Chinese)
- [18] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋砼粘结锚固性能的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 1994, 15(5): 26—36. XU Y L, SHEN W D, WANG H. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 1994, 15(5): 26—36. (In Chinese)