

灌浆套筒连接钢筋高温后抗拉性能试验

刘永军,王烁勋,谷凡,李超

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究灌浆套筒连接钢筋高温后的抗拉性能,为采用灌浆套筒连接钢筋的装配式钢筋混凝土结构火灾后性能评估提供依据. 方法 选定直径为 25 mm 的钢筋,用灌浆套筒连接,制作 5 个试件,分为三组. 第一组 1 个试件,不升温,用于抗拉性能对比. 第二组和第三组各有 2 个试件,在火灾试验炉中按 ISO 834 曲线升温 15 min 和 25 min,用热电偶采集受火试件内灌浆料的温度时间曲线,受火试件的温度降到室温后,在试验机上进行拉伸试验,测出 5 个试件的极限承载力. 结果 根据试验结果,初步确定影响试件破坏形式的灌浆料临界温度在 700 ℃ 附近,拟合出了在 ISO 834 升温曲线下灌浆料经历的最高温度与套筒连接试件极限承载力之间关系的经验公式. 结论 火灾产生的高温会降低灌浆料的力学性能,对高温后套筒连接钢筋试件的极限承载力有明显影响;拟合的经验公式对装配式钢筋混凝土结构火灾后性能定量评估具有重要的参考价值.

关键词 套筒连接钢筋;火灾;高温;抗拉性能;装配式钢筋混凝土结构

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Tensile Properties of Steel Rebars Spliced by Grout-filled Splice Sleeve after Exposure to Elevated Temperatures

LIU Yongjun, WANG Shuoxun, GU Fan, LI Chao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Tensile properties of steel rebars spliced by grout-filled splice sleeve after exposed to fires are studied via model tests to provide references for assess structural behavior of fire damaged precast reinforced concrete structures including grout-filled splice sleeves. Five test specimens, with 25mm diameter rebar, are processed in identical technology and divided into three groups. First group is control group and consist of just one specimen which is not heated. Second and third group consist of two specimens that are heated in furnace for 15 and 25 minutes respectively under ISO 834 standard fire curve, meanwhile, the temperature-time curves of grout between rebars and sleeves are measured via thermocouples preset in grout. Subsequently, a universal testing machine

收稿日期:2018-02-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51178082);辽宁省自然科学基金项目(2015020600)

作者简介:刘永军(1966—),男,教授,博士,主要从事建筑结构抗火性能方面研究.

is used to test the ultimate load bearing capacities of five specimens when the temperature of them was lowered to room temperature. The critical temperature for identifying failure models of grout-filled splice sleeve rebars ranged around 700 ℃. Based on measured ultimate load bearing capacities, the relational expression between reduction factors and maximum temperatures of grout is fitted. Test results demonstrate that ultimate load bearing capacities of steel rebars spliced by grout-filled sleeve are considerably reduced with elevated temperature of fires and the fitting formula suggested in this paper can be referenced in quantificationally assessing behavior of fire damaged precast reinforced concrete structures including grout-filled splice sleeves.

Key words: grout-filled splice sleeve rebars; fire hazard; elevated temperature; tensile properties; precast reinforced concrete buildings

装配式钢筋混凝土结构是由预制构件经过可靠的连接方式装配而成的钢筋混凝土结构. 采用装配式钢筋混凝土结构可以提高建筑质量、缩短建设工期、减少材料消耗、实现清洁生产^[1]. 装配式钢筋混凝土结构是现代建筑产业化的重要发展方向,已在美国、日本等发达国家广泛应用. 我国各级政府及企业也都十分重视装配式钢筋混凝土结构的发展,北京、上海、沈阳等地先后出台了鼓励政策. 在装配式钢筋混凝土结构中,预制构件之间的钢筋连接方式是关键技术之一,曾经出现了焊接、搭接、套筒挤压连接等方法,目前,通常采用“灌浆套筒连接”,亦即在特制金属套筒中插入钢筋并灌注水泥基灌浆料而实现钢筋连接的方法. 大量静力及动力试验研究证明,“灌浆套筒连接钢筋”具有很高的可靠性,在装配式钢筋混凝土结构中具有广阔的应用前景. 钢筋混凝土结构在火灾中严重损伤甚至连续倒塌的案例有很多^[2-3],相关的研究成果也日渐丰富,但是,针对装配式钢筋混凝土结构抗火性能的研究成果还很少. 近年来,灌浆套筒连接钢筋在高温下及高温后的力学性能研究逐渐得到重视. 王国庆^[4]进行了钢筋灌浆套筒连接高温下性能的试验;马江剑^[5]进行了半灌浆套筒连接试件高温后性能的试验研究;张琪^[6]对灌浆套筒中使用的水泥基灌浆料的高温后性能进行了研究;周文君^[3,7]对灌浆套筒连接钢筋在火灾高温下的性能进行了数值模拟. 笔者通过模

型试验,对灌浆套筒连接钢筋试件高温后的抗拉性能进行研究,以期采用灌浆套筒连接钢筋的装配式混凝土结构火灾后性能评估提供依据.

1 试件设计及制作

1.1 试件的尺寸

灌浆套筒连接钢筋试件如图 1 所示, HRB335 钢筋的直径 25 mm,全灌浆套筒型号为 CT25H,灌浆料的型号为 CGMJM - VI. 套筒长度 400 mm,外径 55 mm,壁厚 8 mm,试件总长为 1 200 mm. 共制作 5 个试件,划分为 3 组,用 3 段编码对试件进行编号,编号的意义为:组别 - 升温曲线 - 序号. 第一组有 1 个试件,不升温,编号为 G1 - ROOM T - 01;第二组有 2 个试件,在炉子中按 ISO 834 曲线加热 15 min,编号为 G2 - ISO 834 - 01、G2 - ISO 834 - 02;第三组有 2 个试件,在炉子中按 ISO 834 曲线加热 25 min,编号为 G3 - ISO 834 - 01、G3 - ISO 834 - 02.

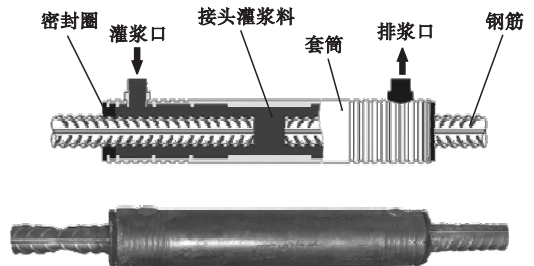


图 1 灌浆套筒连接钢筋试件

Fig. 1 Steel rebar spliced by grout-filled splice sleeve

1.2 试件的材料性能

试验选用 HRB335 钢筋, 钢筋直径 25 mm. 根据《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T228—2002), 进行拉伸试验(见图2), 测得其极限承载力为 227.0 kN, 峰值应力为 462 MPa.



图2 钢筋拉伸装置

Fig. 2 Reinforcement tensile device

套筒由北京某公司生产, 材质为球墨铸铁, 满足国家标准《球墨铸铁件》(GB/T 1348—2009)的规定, 主要材料性能参数指标如表1所示.

采用北京某公司生产的 CGMJM—VI 型高强灌浆料, 其干混料由水泥、集料、外加剂和矿物掺合料等原材料生产, 加水拌和均匀

后具有高流动性、不离析、微膨胀等良好工艺特性及硬化快、早强高强等性能特点^[8], 其微膨胀和高强的特性保证灌浆料能够通过与钢筋和套筒的作用传递纵向钢筋的拉力, 性能符合《钢筋机械连接技术规程》(JGJ107—2016)对灌浆料的要求. 灌浆料的材料性能指标如表2所示.

表1 球墨铸铁套筒的材料性能

Table 1 Material properties of ductile cast iron sleeve

抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	泊松比
≥600	370	1.69	0.3

表2 CGMJM—VI型高强灌浆料性能指标

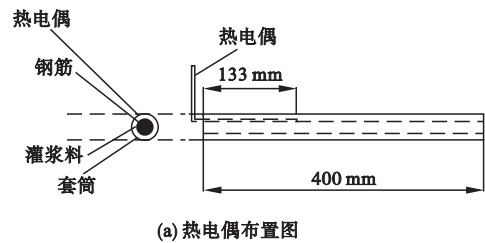
Table 2 Performance index of CGMJM—VI high strength grouting material

流动性/ mm		抗压强度/ MPa			
0	60 min	1 d	3 d	28 d	
≥300	≥260	≥35	≥60	≥85	

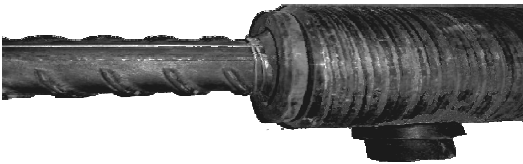
1.3 试件的制作

试件的主要制作过程:

(1) 将铠装热电偶布置于套筒中, 热电偶紧贴钢筋, 端部触点位于套筒三分点处, 用于记录高温试验过程中套筒内灌浆料的温度变化(见图3);



(a) 热电偶布置图



(b) 热电偶伸出

图3 热电偶在试件中布置

Fig. 3 Thermocouple arrangement in test piece

(2) 将钢筋和套筒固定在支架上, 确保钢筋与套筒轴线重合;

(3) 拌合用水为饮用水, 符合《混凝土拌和用水标准》(JGJ63)的规定;

(4) 按照产品提供的检测报告要求, 灌浆料和拌合水的质量比例为 100:12;

(5) 首先将全部拌合水加入容器中, 加入约 70% 的灌浆干粉料, 慢速搅拌均匀, 最

后将剩余 30% 干料全部加入,再快速搅拌至浆体均匀,搅拌均匀后,静置约 2 ~ 3 min 排除浆体中气体;

(6) 灌浆时,灌浆枪向注浆口灌注直至出浆口流出浆料,用橡胶塞封堵注浆口和出浆口,保证灌浆料符合要求和规范的流动性、不出现泌水现象、防止因其早强性导致灌浆料在灌注之前硬化^[9-10];

(7) 试件成品置于室内养护,室温保持在 15 ℃ 左右(见图 4)。

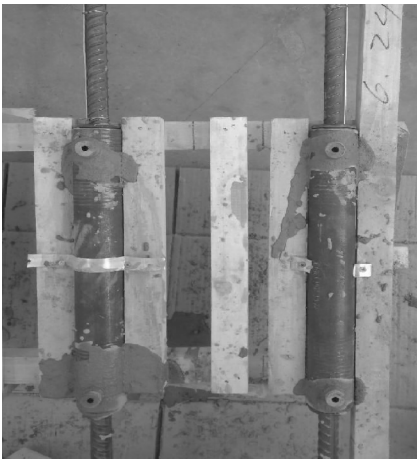


图 4 试件养护

Fig. 4 Specimen maintenance

2 试件在炉内升温过程及现象

高温试验用沈阳建筑大学“结构抗火实验台”进行,该实验台由炉体、加载装置、燃气系统、控制系统、数据采集系统等构成. 试件放置于炉内中央位置,按 ISO 834 标准升温曲线升温. ISO 834 标准升温曲线是国际标准化组织(ISO)建议的一条升温曲线,其方程为

$$\theta - \theta_0 = 345 \lg(8t + 1).$$

(1)

式中: t 为试验所经历的时间,min; θ 为 t 时刻的温度,℃; θ_0 为试验炉内初始温度,℃.

2.1 高温试验现象

第一组试件不加热,作为常温对比试件. 第二组的 2 个试件,加热时间为 15 min,炉内最高温度达到 780 ℃. 自炉内点火开始到

15 min 后关闭液化气阀门,钢筋和套筒逐渐烧红,套筒灌浆口、出浆口橡胶塞和套筒两端的密封圈均碳化,部分剥落(见图 5). 第三组试件加热 25 min,炉内最高温度达到 830 ℃. 第三组试件的现象与第二组的类似.

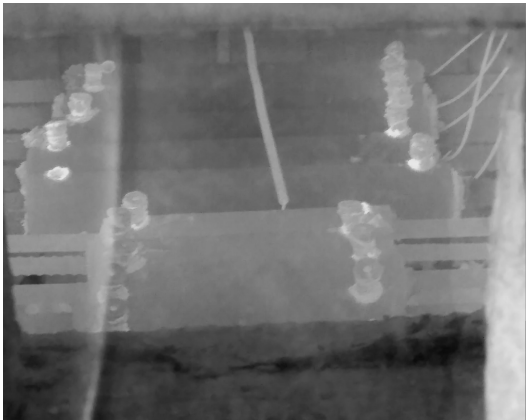
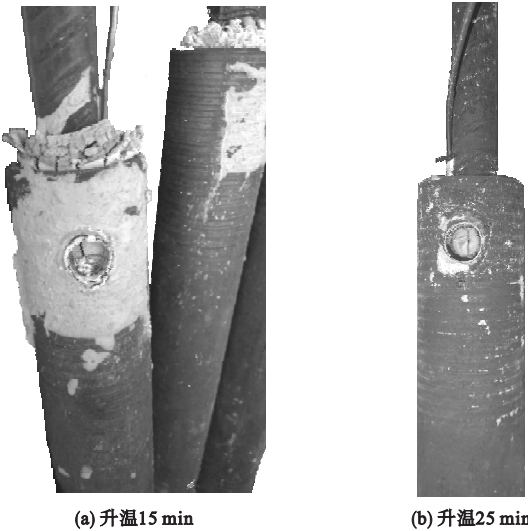


图 5 火灾试验进行中炉内现象

Fig. 5 The phenomena in furnace during fire test

试验结束时,关闭液化气阀门并通风,炉内温度下降至 100 ℃ 左右时,关闭通风装置,自然降至常温. 打开炉门后,试件表面特征如图 6 所示.



(a) 升温 15 min

(b) 升温 25 min

图 6 高温后的试件

Fig. 6 Specimens after exposed to high temperature

套筒端部的橡胶圈烧成白色蓬松状且易碎,清理后可以观察到套筒端部灌浆料保持完整的形状且没有裂痕,并且热电偶穿过的套筒端部灌浆料也保持完整,钢筋全灌浆套筒连接

构件本身还具有较好的完整性,钢筋在外力作用下不会松动,灌浆口和出浆口处可以看到内部灌浆料出现裂痕,表面为白色皲裂状。

2.2 试件内升温曲线

用热电偶记录炉内以及试件内灌浆料的

温度变化曲线(见图7)。第二组的两个试件 G2-ISO 834-01 和 G2-ISO 834-02 及炉内升温曲线如图7(a)所示;第三组的两个试件 G3-ISO 834-01 和 G3-ISO 834-02 及炉内升温曲线如图7(b)所示。

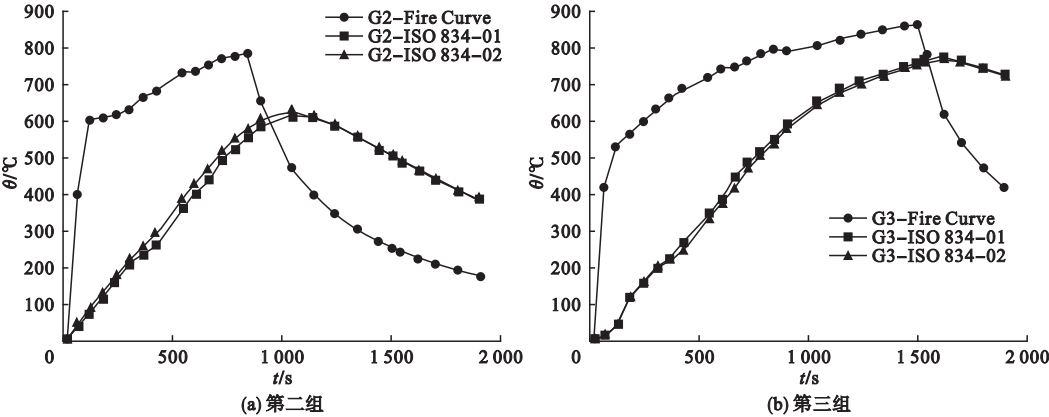


图7 试件内灌浆料升温曲线及炉内升温曲线

Fig. 7 Temperature-time curves of grout in specimens and fire curves in furnace

从图7可知,每组试件中的2个试件内灌浆料的升温曲线接近,说明炉内温度比较均匀。炉内喷火嘴停止工作后,炉内温度立即开始下降,试件内温度下降时间略有滞后。

3 降温后试件的抗拉性能试验及结果

3.1 拉伸试验设备

试验设备如图8所示。

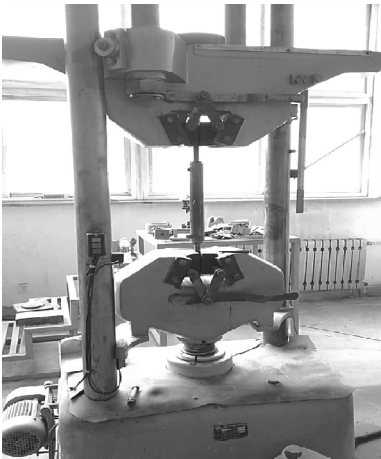


图8 液压万能试验机

Fig. 8 Hydraulic universal testing machine

拉伸试验装置采用沈阳建筑大学建筑材料实验室的1000 kN 液压万能试验机,加载机制严格按照《钢筋机械连接技术规程》(JGJ107—2010)中接头试件型式检验的加载制度中单向拉伸的加载制度,加载速率为1 kN/s。试验前截断多余的钢筋,拉伸试件的长度均为700 mm。

3.2 试验中主要现象及试件破坏形态

灌浆套筒连接钢筋试件两种破坏形式如图9所示。①钢筋出现颈缩后试件失去承载力钢筋拉断(见图9(a)),第一组的1个常温试件和第二组的2个高温后试件,都出现这种破坏形式;②灌浆料劈裂导致钢筋与灌浆料之间粘结能力下降无法承担荷载(见图9(b)),第三组的2个高温后试件,都出现这种破坏形式。

试件的试验结果如表3所示。可以看出,试件中灌浆料经历的最高温度会影响试件的极限承载力和破坏形式。4个高温试件中灌浆料坐高温度的平均值约为700℃,700℃是一个重要的温度节点,在700℃附近存在一个临界温度,决定试件的破坏形式。

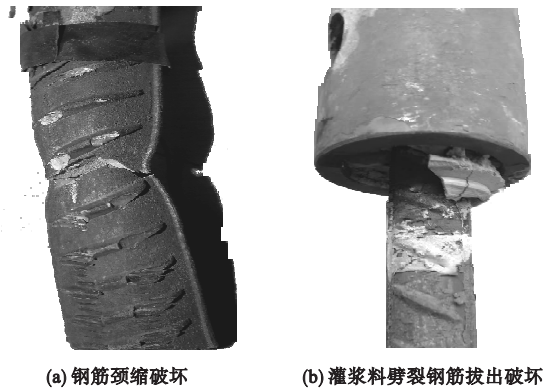


图9 灌浆套筒连接钢筋试件的破坏形式

Fig. 9 Failure modes of steel specimen with grout-filled splice sleeve

表3 试件拉伸试验结果

Table 3 The results of tensile tests

试件编号	灌浆料	极限承	极限承	破坏形式
	最高温 度/℃	载力/ kN	载力损 失率/%	
G1 - Room T - 01	常温	230.0	—	钢筋拉断
G2 - ISO 834 - 01	619	180.4	21.6	钢筋拉断
G2 - ISO 834 - 02	616	182.4	20.7	钢筋拉断
G3 - ISO 834 - 01	776	162.0	29.6	钢筋拔出
G3 - ISO 834 - 02	769	159.0	30.9	钢筋拔出

4 温度对试件极限承载力影响的拟合

4.1 拟合公式

热轧钢筋呈现出随着温度的升高,强度逐渐裂化的趋势,以升温至 600 ℃ 为界限,升温低于 600 ℃ 后冷却的热轧钢筋屈服强度和极限强度变化迟缓,超过 600 ℃ 后的性能均下降迅速^[11-13]。

在钢筋、灌浆料和套筒之间存在 3 种作用力,分别是化学吸附力、摩擦力和机械咬合力^[14]。化学吸附力作用小,主要是灌浆料与钢筋之间的机械咬合力起作用,灌浆料与钢筋之间的粘结能力随着温度的升高承载力逐渐下降。 $\theta \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,残余粘结力与常温的粘结力差距很小; $\theta > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,由于灌浆料经历高温后经受压力更容易产生裂痕,导致

粘结能力下降幅度大^[15]。

结合试验数据,可以拟合出高温后套筒连接试件的承载力 F_{θ} 与灌浆料经历的最高温度 θ 之间的关系式为

$$F_{\theta} = (1 - \alpha) F_u, \tag{2}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \theta \leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}, \\ \frac{(\theta - 71)^2}{2\,285\,500}, & \theta > 150\text{ }^{\circ}\text{C}. \end{cases} \tag{3}$$

式中: F_u 为常温下试件承载力; α 为极限承载力损失率。

4.2 拟合曲线

套筒连接钢筋试件的极限承载力受温度影响,根据试验结果,拟合出的极限承载力与温度之间关系曲线如图 10 所示。

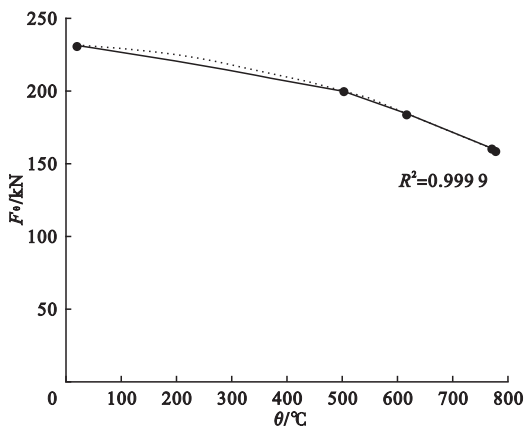


图10 试件极限承载力与温度之间关系曲线

Fig. 10 Relationship curves between ultimate load bearing capacities and temperatures

5 结 论

(1) 灌浆料经历的温度历程对灌浆套筒连接钢筋试件的抗拉极限承载力以及破坏方式有显著影响。700 ℃ 是一个重要温度节点,灌浆料经历最高温度低于 700 ℃ 的试件,均为钢筋拉断破坏;灌浆料经历最高温度高于 700 ℃ 的试件,均为灌浆料劈裂导致钢筋拔出破坏。

(2) 经验公式是在钢筋直径为 25 mm、炉内升温曲线为 ISO 834 标准升温曲线的特定情况下拟合出来的,可供装配式钢筋混凝

土结构火灾后性能评估提供参考。

参考文献

- [1] 韩瑞龙,施卫星,周洋. 灌浆套管连接技术及其应用[J]. 结构工程师,2011,27(3):149-153.
(HAN Ruilong, SHI Weixing, ZHOU Yang. The technology of steel sleeve grouting connection and application[J]. Structural engineers, 2011, 27(3):149-153.)
- [2] 李绍满,史毅,刘栋栋,等. 高温下套筒连接钢筋的力学性能试验研究[J]. 建材世界,2012,33(3):69-71.
(LI Shaoman, SHI Yi, LIU Dongdong, et al. Experimental research on mechanics performance of steel bars connected with sleeve under high temperature [J]. The world of building materials, 2012, 33(3):69-71.)
- [3] 周文君,刘永军,王雪. 套筒灌浆钢筋高温抗拉性能数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(5):170-176.
(ZHOU Wenjun, LIU Yongjun, WANG Xue. Numerical simulation of high temperature tensile properties of sleeve grouting steel bar[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2016, 14(5):170-176.)
- [4] 王国庆. 钢筋套筒灌浆连接高温性能试验研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2017.
(WANG Guoqing. Experiment study on connection behaviour of gout-filled pipe splices connector in high temperature [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017.)
- [5] 马江剑. 高温后半灌浆套筒连接试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.
(MA Jianjiang, The experimental research of semi-grouting sleeves splicing for rebars after exposed to high temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.)
- [6] 张琪. 温度变化对超早强灌浆料强度的影响及其加固应用[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2014.
(ZHANG Qi. The influence on strength caused by temperature change of super early high strength grouting material and strengthening application [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014.)
- [7] 周文君. 套筒连接装配式钢筋混凝土结构抗火性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2017.
(ZHOU Wenjun. Research on fire resistance of precast reinforced concrete structures with rebar spliced by grout-filled coupling sleeves [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017.)
- [8] 邵正明,周建启,仲朝明,等. CGM 高性能水泥基灌浆材料的性能研究[J]. 混凝土,2007,29(11):78.
(SHAO Zhengming, ZHOU Jianqi, ZHONG Chaoming, et al. Properties research on CGM high performance cement-based grout[J]. Concrete, 2007, 29(11):78.)
- [9] 汪秀石,杨智良,吴照学. 装配式结构用高强套筒灌浆料性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2015,35(2):65-68.
(WANG Xiushi, YANG Zhiliang, WU Zhaoxue. Experimental study on the performance of high strength sleeve grouting material for pre-fabricated concrete structure [J]. Concrete and cement products, 2015, 35(2):65-68.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用套筒灌浆料:JG/T408—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
(Housing and Construction Ministry of the People's Republic of China. Rebar connection with sleeve grouting material: JG/T 408—2013 [S]. Beijing: China Standard Press, 2013.)
- [11] 沈蓉,凤凌云,戎凯. 高温(火灾)后钢筋力学性能的评估[J]. 四川建筑科学研究,1991,17(2):5-9.
(SHEN Rong, FENG Lingyun, RONG Kai. Evaluation of mechanical properties of steel bars after high temperature (fire) [J]. Building science research of Sichuan, 1991, 17(2):5-9.)
- [12] 王孔藩,许清风,刘挺林. 高温下及高温冷却后钢筋力学性能的试验研究[J]. 施工技术,2005,34(8):3-5.
(WANG Kongfan, XU Qingfeng, LIU Tinglin. Research on bonding strength between concrete and steel bar after cooled down from high temperature [J]. Construction technology, 2005, 34(8):3-5.)
- [13] 吴波,梁悦欢. 高温后混凝土和钢筋强度的统计分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2008,52(36):13-20.
(WU Bo, LIANG Yuehuan. Statistical analysis of the strength of concrete and steel after high temperature [J]. Journal of south China university of technology (natural science edition), 2008, 52(36):13-20.)
- [14] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering structures, 2015, 83:154-162.
- [15] 冯世贤. 高温对钢筋与灌浆料粘结性能的影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
(FENG Shixian. Study on bond behavior between steel bar and cementitious grouting material after high temperature [D]. Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2015.)