

钢筋套筒灌浆连接件抗火性能研究

谷凡,宋登凯,明杨,张媛媛

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要目的 研究高温条件下钢筋套筒灌浆连接件的连接性能,为采用钢筋套筒灌浆连接方式的装配式建筑在火灾后的性能评估提供理论依据。**方法** 基于顺序耦合法和国际标准升温曲线 ISO-834,采用 ABAQUS 软件对两种规格钢筋套筒灌浆连接构件的高温连接性能进行数值模拟。**结果** 在轴向极限拉伸荷载作用下,当受火时间小于 10 min 时,灌浆料处于三向受压状态并形成较为明显的斜向受压带;当受火时间达到 15 min 时,部分灌浆料的最大主应力转变为拉应力;当受火时间大于 30 min 时,位于套筒中部的灌浆料逐渐转变为三向受拉状态,灌浆料斜向受压带随之消失,构件极限拉伸荷载仅为常温下的 30% 左右。**结论** 随着受火时间的增加,钢筋套筒灌浆连接构件的极限拉伸荷载随之降低,且主要取决于灌浆料的应力状态。

关键词 钢筋套筒灌浆连接;高温性能;极限拉伸荷载;ABAQUS;顺序耦合

中图分类号 TU375 文献标志码 A

Research on Fire Resistance of Steel Sleeve Grouting Connector

GU Fan, SONG Dengkai, MING Yang, ZHANG Yuanyuan

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

Abstract: The mechanical properties of steel sleeve grouting connector under high temperature condition was studied to provide reference for the after-fire structural performance evaluation of prefabricated buildings with steel sleeve grouting connector. Based on sequential-coupling method and international standard heating curve ISO-834, the ABAQUS numerical models of steel sleeve grouting connection members of two specifications were established, and the mechanical properties of steel sleeve grouting connector with different fire duration time were numerically analyzed. Under the action of axial ultimate tensile load, when the fire-exposure time is less than 10 min, the grouting material is in triaxial compression and forms a relatively obvious oblique compression zone. When the fire-exposure time reaches 15 min, the maximum-principal-stress of some grouting materials changes into tensile stress. When the fire-exposure time is greater than 30 min, the grouting material in the middle part of sleeve gradually turns into triaxial tensile state, and the inclined

收稿日期:2018-09-27

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678375);辽宁省科技厅科学技术计划项目(2015020600);住房和城乡建设部科技计划项目(2017-K9-021)

作者简介:谷凡(1973—),男,副教授,博士,主要从事结构工程和工程力学方面研究。

compression zone of grouting material gradually disappears, and the ultimate tensile load of steel sleeve grouting connector is only about 30% of that under normal temperature. The numerical result indicates that the ultimate tensile load of steel sleeve grouting connector decreases with the increase of fire duration time, mainly depending on the stress state of grouting material.

Key words: Steel sleeve grouting connection; high temperature mechanical properties; ultimate tensile load; ABAQUS; sequential coupling method

装配式结构是在施工现场将预制钢筋混凝土构件连接在一起,并进行现场浇筑. 预制构件之间的钢筋连接部位尺寸较小,传统钢筋连接方式会给现场施工带来很大困难. 钢筋套筒灌浆连接件能够很好地解决装配式结构构件之间的钢筋连接问题,并且有效实现了“装配等同现浇”的设计要求. 钢筋套筒灌浆连接件具有性能可靠、适用性广、安装简便等优点,国内外学者已对其在静力荷载、动力荷载作用下的力学性能进行了广泛研究. R. PARK^[1]以采用钢筋套筒灌浆连接方式的预制构件为对象,通过试验研究了预制构件的抗震性能. J. H. LING等^[2]采用不同方法限制套筒内部灌浆料的滑移,并研究了连接件的可行性. A. S. ALI等^[3]探讨了钢筋套筒灌浆连接件在梁构件中的粘结性能. A. B. A. RAHMAN等^[4]以采用钢筋套筒灌浆连接件的预制剪力墙为研究对象,对轴向荷载作用下的预制剪力墙结构性能进行了试验研究. 国内外学者对常温下钢筋套筒灌浆连接件连接性能的研究已取得了很大进展^[5-11],但对高温下钢筋套筒灌浆连接件力学性能及破坏机理的研究相对较少. 建筑火灾是发生最为频繁的火灾类型^[12],随着装配式建筑在我国的迅速发展,钢筋套筒灌浆连接件的抗火性能也越来越引起人们的关注. 笔者基于顺序耦合法和国际标准升温曲线 ISO-834,采用 ABAQUS 软件对高温下钢筋套筒灌浆连接件的连接性能进行数值模拟,旨在为采用钢筋套筒灌浆连接方式的装配式建筑在火灾后的性能评估提供理论依据.

1 数值模型的建立

依据文献[13]中的相关试验数据,采用 ABAQUS 有限元软件建立连接 $\Phi 16$ 、 $\Phi 25$ 钢筋的钢筋套筒灌浆连接构件数值模型,标记为 D16、D25. 按照《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ355—2015)中的规定,钢筋套筒灌浆连接构件中的钢筋锚固长度须大于 8 倍钢筋直径,钢筋套筒灌浆连接构件示意图和数值模型的几何参数分别如图 1 和表 1 所示.

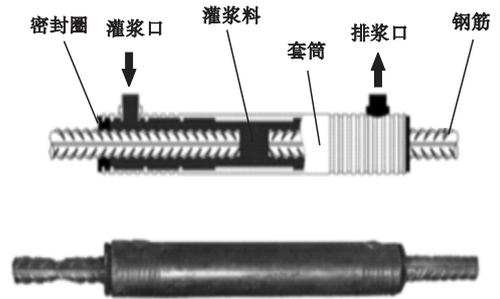


图 1 钢筋套筒灌浆连接示意图

Fig. 1 The schematic diagram of steel sleeve grouting connection

表 1 钢筋套筒灌浆连接构件数值模型参数

Table 1 Geometric parameters of numerical model of component

	mm				
钢筋直径	钢筋长度	套筒长度	钢筋锚固长度	套筒内径	套筒外径
16	200	280	140	30	38
25	300	440	220	42	55

钢筋套筒灌浆连接构件的几何形状和拉伸荷载在轴向方向上具有对称性,可沿轴向取 1/2 模型进行数值模拟. 根据其对称性,在半结构构件的套筒端部横截面上施加位移约

束条件:轴向方向(Y 轴)线位移为0,绕 X 轴和 Z 轴的转角位移为0.半结构构件为轴对

称模型,其母面及边界条件如图2所示.

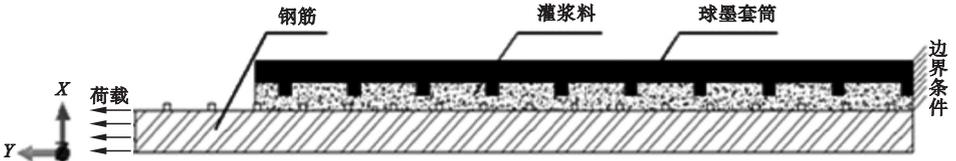


图2 钢筋套筒灌浆连接构件的1/2模型的母面

Fig. 2 The generatrix of 1/2 model of steel sleeve grouting connection component

在传热分析过程中,钢筋、灌浆料及套筒采用DCAX4单元,即四节点线性轴对称传热四边形单元;在高温连接性能分析过程中,灌浆料采用CAX4轴对称实体单元,即四节点无扭曲轴对称实体单元.由于数值模型的

形状比较规则,因此采用以四面体为主的自由网格划分技术,同时对灌浆料部分进行局部网格细化.钢筋套筒灌浆连接构件的网格划分如图3所示.

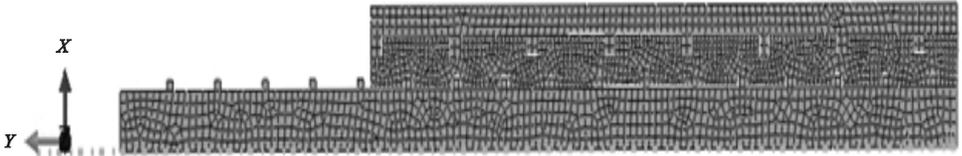


图3 钢筋套筒灌浆连接构件的网格划分

Fig. 3 Mesh generation of steel sleeve grouting connection component

2 钢筋套筒灌浆连接构件温度场分析

2.1 升温曲线

在结构抗火温度场分析过程中,通常采用两种升温曲线:国际标准升温曲线ISO-834、加拿大及美国推荐的建筑构件抗火试验曲线ASTM-E119.这两种升温曲线的升温效果大致相同,笔者采用国际标准升温曲线ISO-834作为数值模型受火面的升温曲线,其计算式^[14]为

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

式中: θ_0 为初始温度; θ 为时间 t 后的平均温度.

2.2 材料的热工参数

在钢筋套筒灌浆连接构件传热分析的建模过程中,钢筋、灌浆料、球墨铸铁套筒的热工参数根据文献[15-17]中的公式进行计算取值(见表2、表3和表4).

表2 钢筋的热工参数

Table 2 Thermal parameters of steel bars

温度/ °C	导热系数/ (W·(m·°C) ⁻¹)	线胀系数/ 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	比热容/ (J·(kg·°C) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
20	47.6	1.21	477	7 800
100	45.8	1.24	497	7 800
300	41.4	1.32	568	7 800
500	37.0	1.40	669	7 800
700	32.6	1.48	800	7 800

表3 套筒的热工参数

Table 3 Thermal parameters of sleeve

温度/ °C	导热系数/ (W·(m·°C) ⁻¹)	线胀系数/ 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	比热容/ (J·(kg·°C) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
20	29.9	1.40	495	7 300
100	29.8	1.40	511	7 300
300	29.2	1.40	565	7 300
500	28.8	1.40	665	7 300
700	27.8	1.40	924	7 300

表4 灌浆料的热工参数

Table 4 Thermal parameters of grouting material

温度/ ℃	导热系数/ (W·(m·℃) ⁻¹)	线胀系数/ 10 ⁻⁵ ℃ ⁻¹	比热容/ (J·(kg·℃) ⁻¹)	密度/ (kg·m ⁻³)
20	1.36	1.83	913	2 300
100	1.36	1.01	962	2 300
300	1.34	0.28	1 064	2 300
500	1.10	0.10	1 156	2 300
700	0.85	0.004	1 170	2 300

2.3 温度场分析

物体间的热传递主要有热传导、热对流和热辐射3种方式。热传导由材料的导热系数和比热容决定(见表2、表3和表4);热对流可通过定义受火面的对流换热系数来实

现,考虑到实际结构中套筒外部的混凝土保护层作用,笔者将构件的对流换热系数取值为25 W/(m²·℃);热辐射可通过定义受火面的综合辐射系数来实现,取值为0.5。图4为D16、D25构件在不同受火时刻的温度云图,提取钢筋套筒灌浆连接构件轴向中截面(图4半结构数值模型的下端面)的计算数据,可以得到在标准升温曲线作用下构件轴向中截面处钢筋、灌浆料和套筒的温度随时间的变化曲线(见图5)。由图4和图5可以看出:在标准升温曲线作用下,由于套筒导热系数远大于灌浆料导热系数,因此当受火时间小于30 min时,钢筋、灌浆料和套筒之间存在一定的温差;随着受火时间的增长,构件内部温差逐渐缩小。

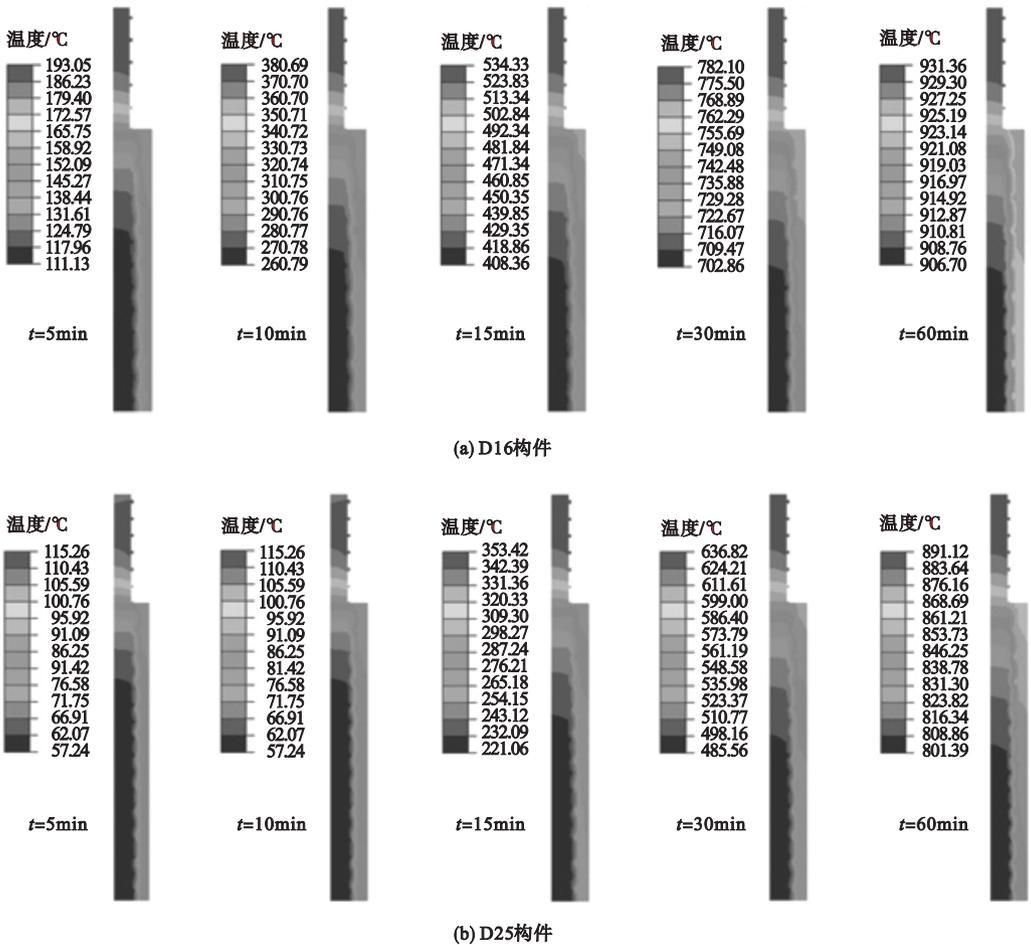


图4 构件在不同受火时刻的温度云图

Fig. 4 The temperature nephogram of component at different fire duration time

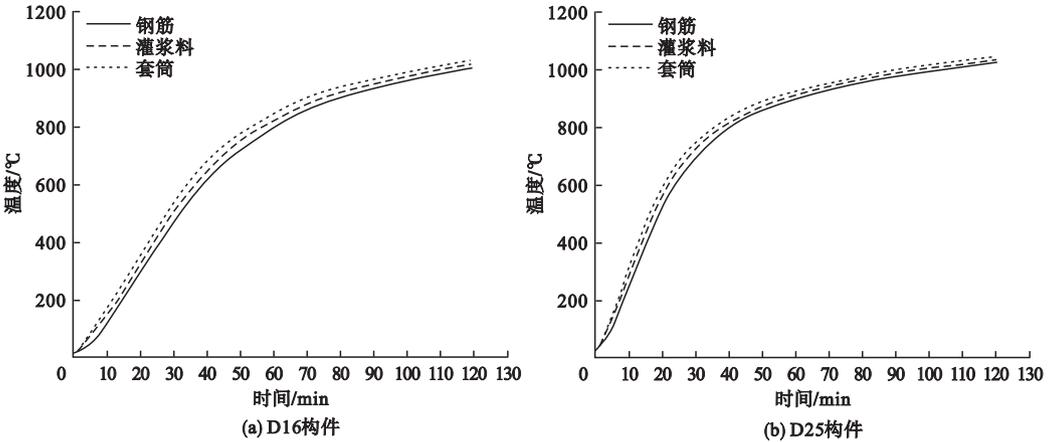


图5 构件轴向中截面处钢筋、灌浆料和套筒的升温曲线

Fig. 5 The temperature curve of component on middle section along axial direction

3 钢筋套筒灌浆连接构件高温连接性能分析

3.1 材料的高温力学性能

在钢筋套筒灌浆连接构件的数值模型中,HRB400钢筋的高温力学性能采用弹塑性模型^[17].

(1) 高温下的钢筋屈服强度

$$\frac{f_y^\theta}{f_y} = \frac{1}{1 + 24(\theta/1000)^{4.5}} \quad (2)$$

式中: f_y^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时钢筋的屈服强度; f_y 为常温时钢筋的屈服强度.

(2) 高温下的钢筋极限强度

$$\frac{f_u^\theta}{f_u} = \frac{1}{1 + 36(\theta/1000)^{6.2}} \quad (3)$$

式中: f_u^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时钢筋的极限强度; f_u 为常温时钢筋的极限强度.

(3) 高温下的钢筋弹性模量

$$E_s^\theta = \frac{E_s}{1.2[1 + 24(\theta/1000)^{4.5}]} \quad (4)$$

式中: E_s^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时钢筋的弹性模量; E_s 为常温时钢筋的弹性模量.

(4) 高温下钢筋的本构方程

$$\sigma_s^\theta = \begin{cases} E_s^\theta \varepsilon_s^\theta, & 0 \leq \varepsilon_s^\theta < \varepsilon_y^\theta; \\ f_y^\theta + (f_u^\theta - f_y^\theta) \eta, & \varepsilon_y^\theta \leq \varepsilon_s^\theta < \varepsilon_u^\theta; \\ f_u^\theta, & \varepsilon_u^\theta < \varepsilon_s^\theta. \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_s^θ 、 ε_s^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时钢筋的应力、应变; ε_y^θ 、

ε_u^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时钢筋的屈服应变、极限应变;

$$\eta = (1.5\xi - 0.5\xi^3)^{0.62}, \xi = \frac{(\varepsilon_s^\theta - \varepsilon_y^\theta)}{(\varepsilon_u^\theta - \varepsilon_y^\theta)}$$

在钢筋套筒灌浆连接构件的数值模型中,灌浆料的高温力学性能采用胡海涛^[18]提出的高强混凝土弹塑性模型.

(1) 高温下的灌浆料抗压强度

$$f_{c\theta} = \frac{f_c}{1 + 9.45(\theta - 20)^{2.66} \times 10^{-8}}, \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1000^\circ\text{C} \quad (6)$$

式中: $f_{c\theta}$ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时灌浆料的抗压强度; f_c 为常温时灌浆料的抗压强度.

(2) 高温下的灌浆料弹性模量

$$\frac{E_c^\theta}{E_c} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 80^\circ\text{C}; \\ 2.24 \times 10^{-6} \theta^2 - 3.321 \times 10^{-3} \theta + 4.251, & 80^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (7)$$

式中: E_c^θ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时灌浆料的弹性模量; E_c 为常温时灌浆料的弹性模量.

(3) 高温下的灌浆料本构方程

$$\sigma = \frac{f_{c\theta}}{\varepsilon_{c\theta}} \varepsilon e^{\frac{1-\varepsilon^2}{2}} \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_{c\theta}$ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时灌浆料的峰值应变; $f_{c\theta}$ 为 $\theta^\circ\text{C}$ 时灌浆料的抗压强度.

在钢筋套筒灌浆连接构件的数值模型中,球墨铸铁套筒的高温力学参数采用周文君等^[19]提出的弹性模型,球墨铸铁套筒的高温力学参数如表5所示.

表5 球墨铸铁套筒的高温力学参数

Table 5 Thermal parameters of ductile cast iron sleeve

温度/°C	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
20	169	0.3	370
100	165	0.3	370
300	158	0.3	298
500	139	0.3	164
700	134	0.3	110

3.2 钢筋套筒灌浆连接件高温连接性能

笔者采用顺序耦合法对钢筋套筒灌浆连接构件的高温连接性能进行分析,首先对构件进行温度场模拟,然后将温度场分析结果*. ODB 文件以预定义荷载的形式施加在构件模型中,进而进行高温下构件的连接性能

分析.在对构件高温连接性能进行分析时,作以下基本假设:钢筋只受轴向拉力;不考虑几何缺陷;钢筋套筒灌浆连接构件等效为轴对称模型.钢筋套筒灌浆连接构件的边界条件如图1所示,并对钢筋左端面采用位移加载方式,加载速度为0.1 mm/s. D16 构件加载时间为100 s,即当钢筋端部轴向位移达到10 mm 时,停止加载;D25 构件加载时间为150 s,即当钢筋端部轴向位移达到15 mm 时,停止加载.在国际标准升温曲线 ISO - 834 作用下,不同受火时间的钢筋套筒灌浆连接构件荷载 - 位移曲线如图6所示.

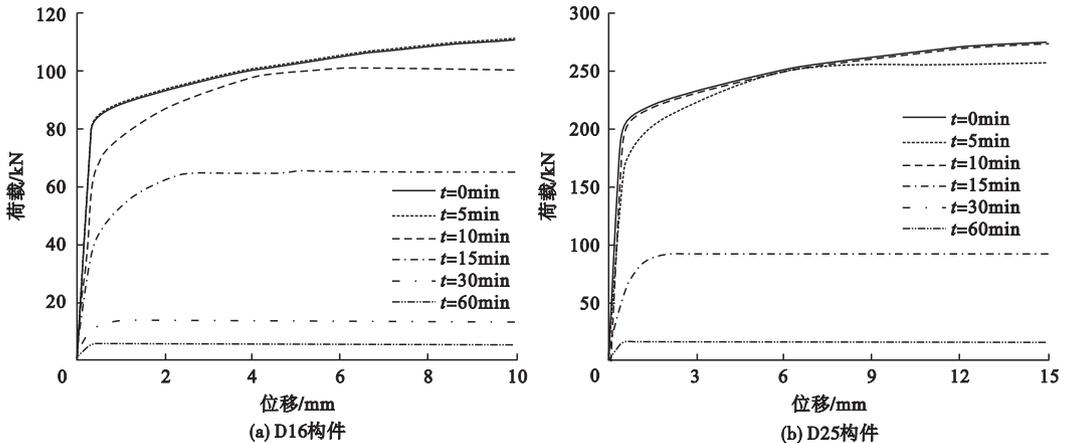


图6 构件的荷载 - 位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve of component

由图6可以看出:当受火时间小于10 min时,D16和D25构件极限拉伸荷载相对于常温 $t = 0$ min条件下都略有下降;当受火时间达到15 min时,D16构件极限拉伸荷载下降到常温下构件极限抗拉荷载的50%左右,D25构件极限拉伸荷载下降的不明显;当受火时间达到30 min时,构件极限拉伸荷载值极低,D16构件极限拉伸荷载仅为常温下构件极限拉伸荷载的20%左右,几乎失去抗拉能力,D25构件极限拉伸荷载仅为常温下构件极限拉伸荷载的30%左右.

以D16构件为例,提取不同受火时间后在极限拉伸荷载作用下的构件Mises应力云

图、灌浆料Mises应力和灌浆料最小主应力云图如图7所示.由图7可以看出:钢筋Mises应力沿轴向从承载端向非承载端逐渐降低,最大值出现在与灌浆料接触的第二个或第三个钢筋肋处;灌浆料Mises应力分布相对较为均匀,数值变化不大;套筒Mises应力沿轴向从套筒端部向套筒中部逐渐增加,最大值出现在套筒中部.当受火时间小于10 min时,灌浆料最小主应力为压应力,表明灌浆料处于三向受压状态,且在套筒肋和所对应的钢筋肋凹槽之间形成了较为明显的灌浆料斜向受压带;当受火时间达到15 min时,大部分灌浆料仍处于三向受压状态,但位

于套筒肋和所对应的钢筋肋凹槽之间的灌浆料,其最大主应力转变为拉应力,且在套筒肋和所对应的钢筋肋凹槽之间仍具有非常明显的灌浆料斜向受压带;当受火时间大于30 min时,沿轴向处于套筒中部的灌浆料最小主应力

开始逐渐转化为拉应力,灌浆料斜向受压带也随之逐渐消失.随着受火时间的增加,当轴向荷载达到极限拉伸荷载时,灌浆料的最小主应力绝对值随之降低,表明钢筋套筒灌浆连接构件的极限拉伸荷载随之降低.

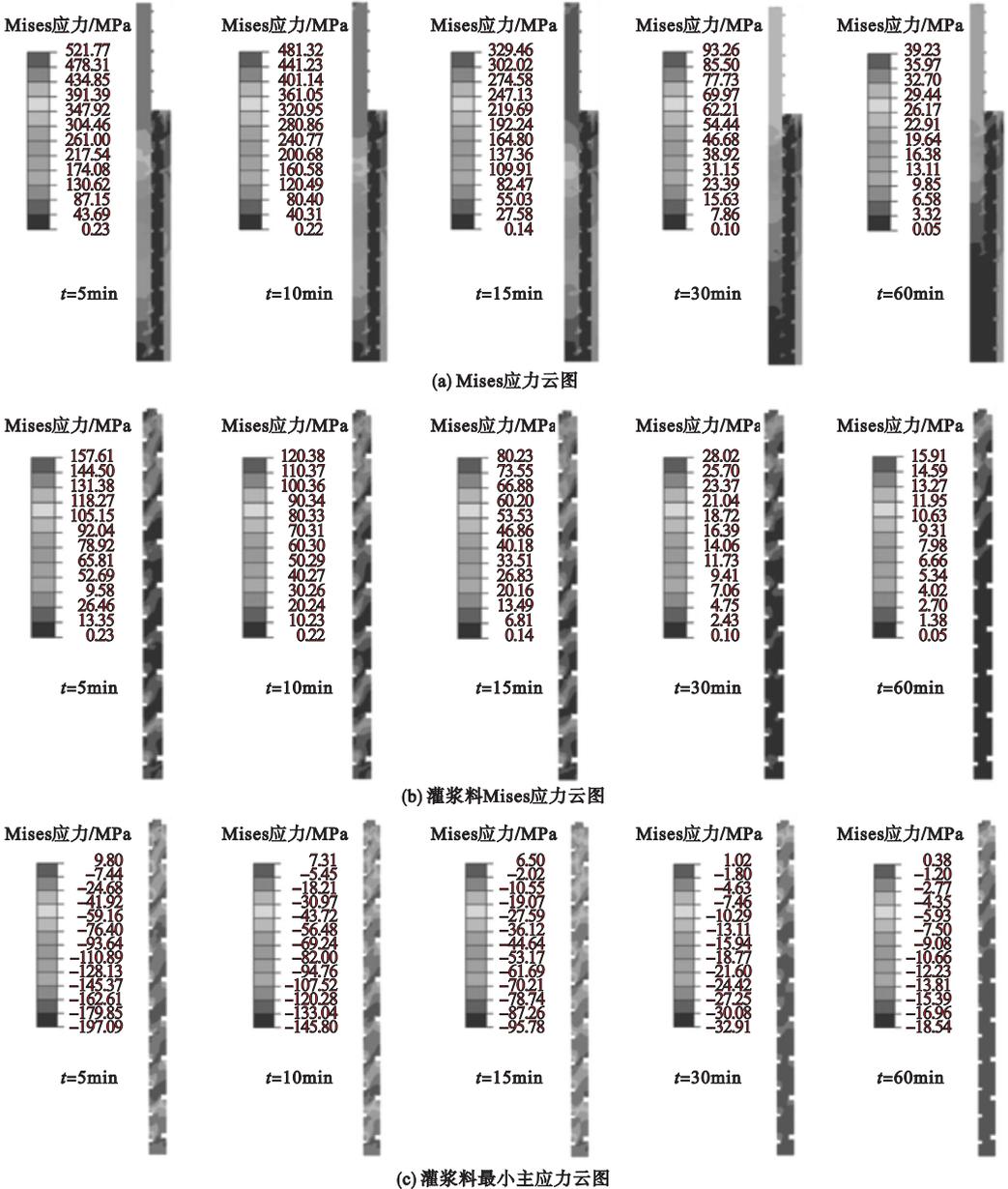


图7 不同受火时间下在极限拉伸荷载作用下的D16构件应力云图

Fig. 7 The stress nephogram of D16 component under the action of ultimate-tensile-load at different fire duration time

4 结论

(1)随着受火时间的增加,灌浆料从三向受压状态逐渐转变为受拉状态,灌浆料斜

向受压带也随之逐渐消失.

(2)随着受火时间的增加,钢筋套筒灌浆料连接构件的极限拉伸荷载随之降低,且主要取决于灌浆料的应力状态.

参考文献

- [1] PARK R. Seismic design and construction of precast concrete buildings in New Zealand[J]. PCI journal,2002,47(5):60-75.
- [2] LING J H, IZNI S I, GEORGE M. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load[J]. Construction and building materials, 2015(83):154-162.
- [3] ALI A S, AHMAD BAR, MOHD Z B J, 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.
- [4] RAHMAN A B A, YOON L H, IBRAHIM I S, et al. Performance of grouted splice sleeves with tapered bars under axial tension[J]. Applied mechanics and materials, 2015(159):1176-1180.
- [5] LAMPORT W B, JIRSA J O, YURA J A. Strength and behavior of grouted pile-to-sleeve connection[J]. Journal of structural engineering, 1991, 117(8):2477-2498.
- [6] AMIN E, TAKASHI Y, MAHER T. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction[J]. PCI journal, 1995, 40(1):82-93.
- [7] ZHAO X L, GRUNDY P, LEE Y T. Grout sleeve connections under large deformation cyclic loading[C]. Proceedings of fifth international society of offshore and polar engineering conference, 2002.
- [8] ELIYA H, GEORGE M. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. Engineer structures, 2015, 83:154-162.
- [9] LING J H, ZUHAIRI A H. Performance of CS-sleeve under direct tensile load: part I -failure modes[J]. Malaysian journal of civil engineering, 2008, 20(1):89-106.
- [10] 李锐, 郑毅敏, 赵勇. 配置 500MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5):255-263. (LI Rui, ZHENG Yimin, ZHAO Yong. Experimental study on seismic behavior of prefabricated concrete columns with 500MPa steel sleeve grouting[J]. Journal of building structures, 2016, 37(5):255-263.)
- [11] 郑永峰, 郭正兴, 曹江. 新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12):106-111. (ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, Cao Jiang. Restriction mechanism and constrained stress distribution of new grouting sleeve[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2015, 47(12):106-111.)
- [12] BEEBY A W. Safety of structures and a new approach to robustness[J]. The structural engineer, 1999, 74(4):16-21.
- [13] 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.)
- [14] 宋晓勇. 钢筋混凝土柱抗火性能分析与研究[D]. 长沙:湖南大学, 2006. (SONG Xiaoyong. The analysis and research on fire resistance performance of reinforced concrete columns[D]. Changsha: Hunan University, 2006.)
- [15] LIE T T, BAROS C. Method to calculate the fire resistance of circular reinforced concrete columns[J]. ACI material journal, 1991, 88(12):84-91.
- [16] 李引擎, 马道贞, 徐坚. 建筑结构防火设计计算和构造处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1991. (LI Yinqin, MA Daozhen, XU Jian. Fireproof design calculation and structural treatment of building structures[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1991.)
- [17] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2003. (GUO Zhenhai, SHI Xudong. High temperature performance and calculation of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [18] 胡海涛, 董毓利. 高温时高强混凝土强度和变形的试验研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6):44-47. (HU Haitao, DONG Yuli. Experimental study on strength and deformation of high strength concrete at high temperature[J]. China civil engineering journal, 2002, 35(6):44-47.)
- [19] 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 performance of sleeve grouting steelbar[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2016, 14(5):170-176.)

(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)