

引用本文:杨青天,多飞,张晋川,等. 火灾下双钢管混凝土复合短柱的性能与承载力计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(1): 128-137.

YANG Qingtian, DUO Fei, ZHANG Jinchuan, et al. Performance and bearing capacity calculation method of concrete-filled double steel tubular composite stub columns under fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 128-137.

DOI:10.19815/j.jace.2022.03101

# 火灾下双钢管混凝土复合短柱的性能与承载力计算方法

杨青天<sup>1</sup>, 多飞<sup>1</sup>, 张晋川<sup>1</sup>, 侯立群<sup>2</sup>, 陈适才<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 土木工程系, 北京 100124; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

**摘要:**为研究双钢管混凝土复合短柱的耐火性能,建立了双钢管混凝土复合短柱精细化数值模型,在类似构件试验成果验证的基础上,开展其高温反应规律和耐火性能影响因素研究;全面分析了内管径厚比、外管径厚比、内外管直径比等参数的影响,以及不同截面组合形式(内圆外圆、内方外圆和内圆外方)双钢管混凝土短柱的耐火极限。基于热传导分析理论推导双钢管混凝土短柱截面的温度场分布公式,并根据有限元模拟结果对公式进行修正;最后基于温度等效原理进一步提出了火灾条件下双钢管混凝土短柱截面温度场的简化计算公式和承载力计算方法。结果表明:双钢管混凝土复合短柱具有较好的耐火性能,在直径不变时增大内钢管的厚度以及在厚度不变时增加内钢管的直径都有利于耐火极限的提高;在荷载作用和含钢率相同的条件下,不同截面组合形式的双钢管混凝土短柱耐火极限相差不大,但总体上双圆钢管混凝土短柱的耐火性能偏优;提出的温度场简化计算公式和基于等效温度的承载力计算方法与有限元结果相对误差都在15%以内。

**关键词:**双钢管混凝土复合短柱;温度场;耐火极限;简化计算公式;承载力

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)01-0128-10

## Performance and bearing capacity calculation method of concrete-filled double steel tubular composite stub columns under fire

YANG Qingtian<sup>1</sup>, DUO Fei<sup>1</sup>, ZHANG Jinchuan<sup>1</sup>, HOU Liqun<sup>2</sup>, CHEN Shicai<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

**Abstract:** In order to study the fire resistance of concrete-filled double steel tubular composite stub columns (CFDST), a refined numerical model of CFDST was established. Based on the verification of test results of similar components, the high-temperature response law and fire resistance influence factor of CFDST were analyzed. The effects of internal pipe diameter thickness ratio, external pipe diameter thickness ratio, internal and external pipe diameter ratio were comprehensively analyzed. The fire resistance limits of CFDST with different section combinations (inner circle and outer circle, inner square and outer circle, inner circle and outer square) were compared and analyzed. Based on the theory of heat conduction analysis, the

收稿日期: 2023-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678016, 52278471)

通信作者: 陈适才(1979-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: shicaichen@163.com。

temperature field distribution formula of CFDST section was deduced, and the formula was modified according to the results of finite element simulation. Finally, based on the principle of temperature equivalence, the simplified calculation formula and bearing capacity calculation method of section temperature field of CFDST under fire were further proposed. The results show that CFDST has good fire resistance. Increasing the thickness of the inner steel tube when the diameter is unchanged and increasing the diameter of the inner steel tube when the thickness is unchanged are conducive to the improvement of the fire resistance limit. Under the condition of the same load and steel content, the fire resistance limit of CFDST with different section combinations is almost the same, but on the whole, the fire resistance of double circular steel tube concrete stub column is better. The difference between the simplified calculation formula of temperature field, the bearing capacity calculation method and the finite element results is less than 15%.

**Key words:** concrete-filled double steel tubular composite stub column; temperature field; fire resistance limit; simplified calculation formula; bearing capacity

## 0 引言

双钢管混凝土柱是由内钢管、外钢管、夹层混凝土与核心混凝土组成的结构构件。双钢管混凝土构件与钢管混凝土构件的抗火性能差异很大,后者外钢管全部外置,火灾下快速升温,承载力迅速衰退,而前者内部钢管由于外层钢管和混凝土的保护,在火灾中升温缓慢且整体温度较低,因此双钢管混凝土构件的抗火性能明显强于钢管混凝土构件<sup>[1-3]</sup>,且比中空夹层钢管混凝土柱的承载力更高,双钢管混凝土柱在工程界的使用日益增多<sup>[4]</sup>。国内外学者对双钢管混凝土复合柱的研究多集中在常温下的力学性能试验研究与理论分析<sup>[5-10]</sup>,Ekmekyapar 等<sup>[5]</sup>通过轴压试验研究了双圆钢管混凝土复合短柱的轴压性能以及与普通混凝土短柱之间的差异;钱稼茹等<sup>[6]</sup>讨论了 3 种计算外方内圆双钢管高强混凝土柱轴压承载力的方法,结果表明圆钢管对核心混凝土产生约束效应,而方钢管不对混凝土产生约束效应。Ci 等<sup>[11]</sup>通过有限元模拟分析,探究了双圆钢管混凝土短柱的轴压力学性能,并提出了一种极限承载力的计算方法;另外对于火灾条件下双钢管混凝土柱耐火性能的试验研究也取得了一些成果,但多为双圆钢管混凝土细长柱与双方钢管混凝土细长柱的试验研究,如 Romero 等<sup>[1]</sup>通过对双圆钢管混凝土细长柱进行火灾试验研究,分析了混凝土强度与内外钢管厚度比对其耐火性能的影响;Espinosa 等<sup>[12]</sup>总结了 3 种提高钢管混凝土耐火极限的方法,并与试验结果进行对比,研究了截面形式与钢材强度对钢管混凝土细长柱耐火性能的影响。目前没有双钢管

混凝土短柱的耐火性能与破坏机理的研究与分析成果。

为研究双钢管混凝土短柱的耐火性能与破坏机理,本文采用精细化数值模拟方法对此类双钢管混凝土复合柱的耐火性能开展研究,通过有限元参数分析探究双钢管混凝土短柱截面温度场分布和耐火性能的参数影响,并建立相应的温度场分布和承载力计算方法。

## 1 有限元模型建立与验证

### 1.1 模型建立

温度场分析模型中,采用顺序耦合热力分析方法进行双钢管混凝土柱的有限元计算,采用 ISO-834 标准升温曲线作为温度场分析的火灾曲线,材料的热工参数参考文献<sup>[13]</sup>。火灾条件下,双钢管混凝土柱的外钢管表面节点与周边环境之间的热量传递形式主要为热对流与热辐射,夹层混凝土、内钢管与核心混凝土之间的传热形式主要为热传导,对流传热系数  $h$  取  $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ;构件表面的辐射率  $\epsilon_m$  取 0.7。在温度模型中,钢管与混凝土均采用实体单元,单元类型为 DC3D8,基于网格敏感性分析可得,模型网格最大为  $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。

热力分析时,钢材采用高温下双钢管混凝土柱中的钢材应力-应变关系<sup>[13-14]</sup>;混凝土采用 ABAQUS 提供的塑性损伤模型,轴压性能部分采用 Lu 等<sup>[13]</sup>修正的本构模型;考虑到收敛性问题与网格敏感性,轴拉部分采用应力-断裂能表征混凝土的受拉软化性能。高温下混凝土的开裂应力由式(1)得到,其断裂能通过式(2)计算。

$$\sigma_{cr}=0.26(1.25f_c')^{2/3}(1-T/1\,000) \quad (1)$$

式中: $\sigma_{cr}$ 为开裂应力; $f_c'$ 为常温下混凝土圆柱体抗压强度; $T$ 为温度。

$$G_{ft}=G_f/(0.288\,2+8\times10^{-4}T-1\times10^{-6}T^2) \quad (2)$$

式中: $G_{ft}$ 为断裂能; $G_f=\alpha(\frac{f_c'}{10})^{0.7}\times2.5\times10^{-3}$ , $\alpha=1.25d_{\max}+10$ , $d_{\max}$ 为混凝土粗骨料的最大直径。

根据对称性建立 1/2 对称模型,钢管-混凝土接触界面中,定义法向界面仅传递压力不传递拉力,切向界面通过库仑摩擦模型定义,其中摩擦因数取 0.3。在此力学模型中,钢管与混凝土均采用三维实体单元 8 节点线性单元 C3D8R,积分方式选取减缩积分,在保证计算精度的前提下提高计算效率,网格

表 1 试件参数  
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	$D_o(B_o)/\text{mm}$	$t_o/\text{mm}$	$D_i(B_i)/\text{mm}$	$t_i/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	$f_{yo}/\text{MPa}$	$f_{yi}/\text{MPa}$	$f_{co}/\text{MPa}$	$f_{ci}/\text{MPa}$	荷载/kN	时间/min
C1	406.0	8	165.1	3.0	800	401	399	63.4		4 100	62
C2	219.1	5	101.6	3.2	800	426	426	63.4		1 821	30
S1	350.0	8	150.0	5.0	800	514	564			4 420	79
S2	200.0	6	150.0	5.0	800	506	591	63.4		1 900	42

注: $D_o$ 、 $B_o$  分别为外钢管的直径和边长; $t_o$  为外钢管的厚度; $D_i$ 、 $B_i$  分别为内钢管的直径和边长; $t_i$  为内钢管的厚度; $L$  为试件长度; $f_{yo}$  为外钢管屈服强度; $f_{yi}$  为内钢管屈服强度; $f_{co}$  为夹层混凝土圆柱体抗压强度; $f_{ci}$  为核心混凝土圆柱体抗压强度。

图 1 为 4 个试件的截面温度-时间( $T-t$ )曲线。由图 1 可知:采用的热工参数总体上可较好地模拟构件的截面温度场,部分差别可能是由于钢管混凝土接触面的热阻是随温度变化的参数,而模拟时采用了文献[13]建议的热传导系数作为固定值。图 2 为火灾下数值模拟位移-时间( $\Delta t$ )曲线与试验结果的对比,结果表明:有限元计算得到的耐火极限  $t_{cal}$  与试验得到的耐火极限  $t_{test}$  吻合较好,其比值的平均值为 0.93,标准差为 0.084,说明所使用的有限元模型在材料参数、界面处理和边界条件选择方面具有合理性。

## 2 双钢管复合柱耐火性能分析

采用上述建模方法与材料模型建立双钢管混凝土柱有限元分析模型,研究不同参数条件下双钢管混凝土柱的温度场分布与耐火极限。由于双钢管混凝土柱的参数较多,如几何参数、物理参数、力学性能参数、荷载参数以及边界条件参数等,本文主要研究基本几何参数的影响,主要包括外钢管径厚比、内钢管径厚比、内钢管直径、截面组合形式。表 2 为 3 类截面组合形式的模型具体参数,其中“CC”表示内外钢管均为圆钢管,“CS”表示外钢管为圆钢管,内钢管为方钢管,“SC”表示外钢管为方钢管,内钢管

尺寸不大于 25 mm×25 mm。

### 1.2 模型验证

由于目前没有双钢管混凝土短柱的耐火性能试验研究成果,本文首先通过比较文献[15]中关于中空夹层钢管混凝土短柱的火灾试验数据对有限元模型进行验证。由于中空夹层钢管混凝土短柱是由双钢管和双钢管之间夹层混凝土组成的一种组合柱,其与一般双钢管混凝土柱的区别在于不存在核心混凝土,因此本文在采用中空夹层钢管混凝土短柱的模型进行验证之后再加上核心混凝土来模拟双钢管混凝土柱。试验试件的具体参数如表 1 所示,其中 C1-C2 表示内钢管与外钢管均为圆钢管,S1-S2 表示内钢管与外钢管均为方钢管。

为圆钢管。构件其他材料参数均为  $L=600$  mm, $f_{co}=30$  MPa, $f_{ci}=30$  MPa, $f_{yo}=355$  MPa, $f_{yi}=355$  MPa,所承受的轴向荷载大小为 2 200 kN。

### 2.1 双钢管复合柱的温度场分析

图 3 为双钢管混凝土柱考虑双圆截面及外圆内方截面时截面上的特征点(测点)。特征点 1 为外钢管内壁处混凝土的温度,特征点 2 为夹层混凝土中点的温度,特征点 3 为内管的温度,特征点 4 为中心点温度。图 4 为对应的温度-时间关系曲线,图 5 为 120 min 时截面的温度场分布。可知,相同截面形式下外钢管径厚比对温度的整体影响并不大,并且各特征点在不同类型截面时其温度发展规律一致。特征点 1 前期温度随着外钢管径厚比的增大而增大,因为构件外径相等时,外钢管厚度越小,特征点 1 经历外钢管表面向内热传导的时间越短,则其前期温度上升速度越快。由于钢材良好的导热性能及混凝土良好的储热性能,随着火灾时间的推移,温度上升速度的区别逐渐减小,后期的温度升高接近一致。特征点 2、3、4 均展现出同样温度发展规律,随着外钢管径厚比的增大,其温度逐渐降低,且特征点位置距外钢管越远,这种规律就越明显。原因是混凝土传热性能的惰性和钢材的良好导热性能,钢材所占面积越小,高温向内进行传递的效果越差,因此

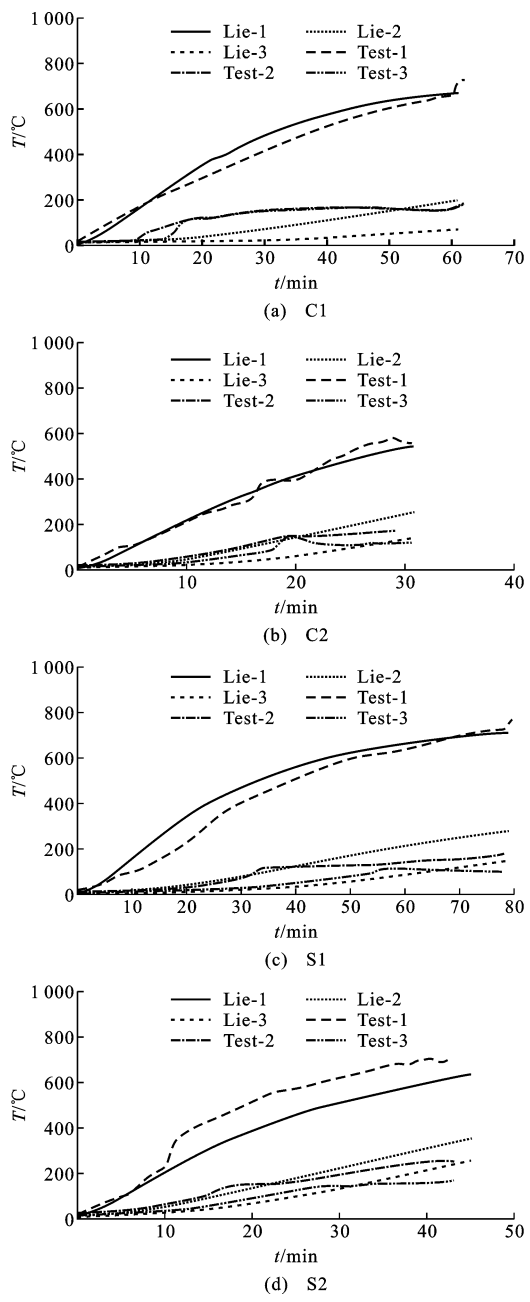


图 1 温度-时间曲线

Fig. 1 Temperature-time curve

同时刻的温度越低。相较于内外钢管均为圆钢管的双钢管混凝土柱与外圆内方的双钢管混凝土柱,外方内圆的双钢管混凝土柱不同测点的温度随外钢管径厚比的变化差异较小。

## 2.2 双钢管混凝土柱的耐火极限参数影响分析

耐火极限即构件在火灾条件下失去继续承载或抵抗变形的能力,本文轴压试件判定失效的条件如下:最大轴向压缩量达到 0.01 倍柱高或最大轴向压缩速率达到每分钟 0.003 倍柱高。本节进一步分析双钢管混凝土短柱的耐火极限受不同外钢管径厚比、内钢管径厚比、内钢管直径(边长)以及不同截面

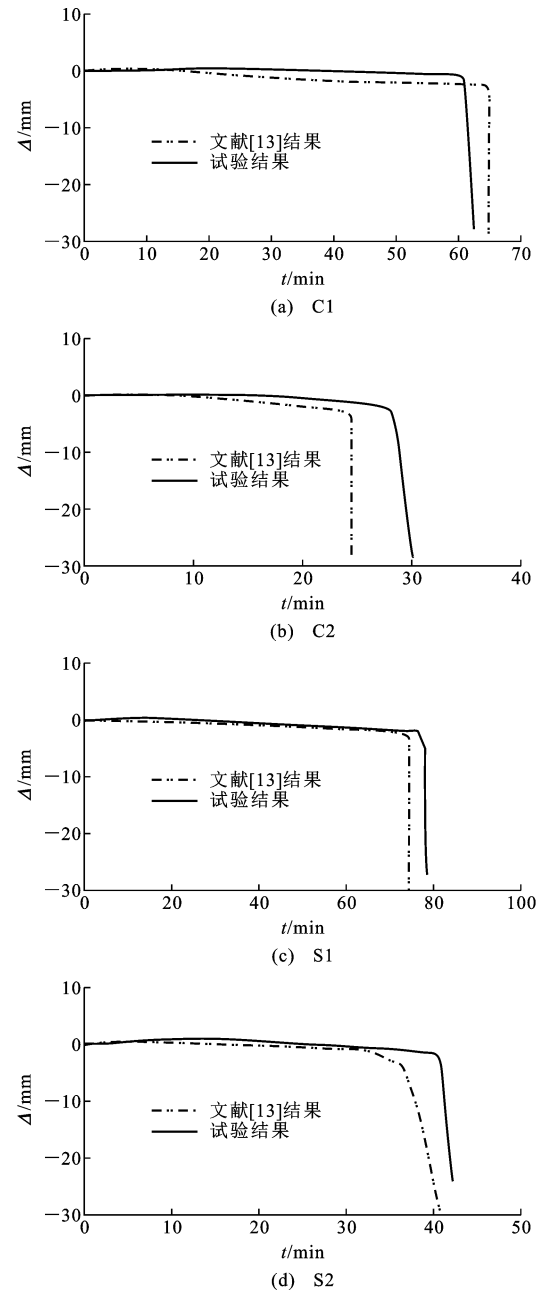


图 2 位移-时间曲线

Fig. 2 Displacement-time curve

组合形式的影响。

### 2.2.1 外钢管径厚比

外钢管径厚比对双钢管混凝土短柱的耐火极限影响如图 6 所示(图例中 100、50、37.5 为外钢管径厚比)。直径不变的情况下,双钢管混凝土短柱的耐火极限随外钢管径厚比的减小而提高,这是由于在荷载不变时,随着外钢管厚度增大,其对应的荷载比减小,而外钢管径厚比对温度场影响不明显,所以导致其耐火极限提高。另外在承担相同荷载条件下,对于不同截面组合形式,都呈现出耐火极限随外钢管径厚比减小而增大的规律。

表 2 模型参数

Table 2 Parameters of models

模型编号	外钢管			内钢管			$D_o/D_i$	$A_s/\text{mm}^2$	$A_c/\text{mm}^2$
	$D_o/\text{mm}$	$t_o/\text{mm}$	$D_o/t_o$	$D_i/\text{mm}$	$t_i/\text{mm}$	$D_i/t_i$			
CC1	300	3.00	100.0	100.0	5.0	20.00	3.0	4 300	66 400
CC2	300	6.00	50.0	100.0	5.0	20.00	3.0	7 040	63 660
CC3	300	8.00	37.5	100.0	5.0	20.00	3.0	8 840	61 860
CC4	300	3.00	100.0	100.0	6.0	16.70	3.0	4 580	66 120
CC5	300	3.00	100.0	100.0	8.0	12.50	3.0	5 120	65 580
CC6	300	3.00	100.0	120.0	6.0	20.00	2.5	5 530	96 270
CC7	300	3.00	100.0	150.0	7.5	20.00	2.0	6 470	119 200
CS1	300	3.00	100.0	100.0	3.9	25.60	3.0	4 300	66 400
CS2	300	6.00	50.0	100.0	3.9	25.60	3.0	7 040	63 660
CS3	300	8.00	37.5	100.0	3.9	25.60	3.0	8 840	61 860
CS4	300	3.00	100.0	100.0	4.7	21.30	3.0	4 580	66 120
CS5	300	3.00	100.0	100.0	6.2	16.10	3.0	5 120	65 580
CS6	300	3.00	100.0	120.0	4.7	25.60	2.5	5 530	96 270
CS7	300	3.00	100.0	150.0	5.8	25.60	3.0	6 470	119 200
SC1	266	2.66	100.0	88.6	5.7	15.50	3.0	4 300	66 400
SC2	266	5.30	50.2	88.6	5.7	15.50	3.0	7 040	63 660
SC3	266	7.10	37.5	88.6	5.7	15.50	3.0	8 840	61 860
SC4	266	2.66	100.0	88.6	7.0	12.70	3.0	4 580	66 120
SC5	266	2.66	100.0	88.6	9.4	9.43	3.0	5 120	65 580
SC6	266	2.66	100.0	106.4	6.9	15.40	2.5	5 530	96 270
SC7	266	2.66	100.0	133.0	8.6	15.50	2.0	6 470	119 200

注： $A_s$  为钢管面积； $A_c$  为混凝土面积。

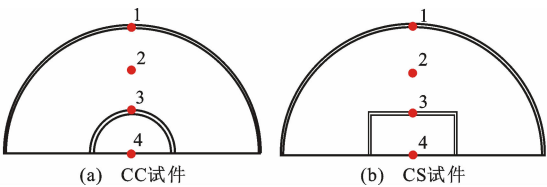


图 3 截面温度测点

Fig. 3 Temperature measuring point of cross section

从轴向位移-时间曲线可以看出,在各柱达到其耐火极限之前,所到达的最大位移有所差异:CC 柱的最大位移在 4 mm 左右,CS 柱的最大位移在 3 mm 左右,且在达到耐火极限前,CC 柱位移-时间曲线的斜率大于 CS 柱的竖向位移-时间曲线的斜率,表征了双圆钢管混凝土短柱在火灾下延性相对较好,CS 次之。由图 7 可知,当外钢管的径厚比从 100 减小到 37.5 时,其耐火极限延长 27 min 左右。

2.2.2 内钢管径厚比

内钢管径厚比对双钢管混凝土短柱耐火极限的影响如图 8 所示(图例中数值为内钢管径厚比)。直径不变的情况下,双钢管混凝土柱的耐火极限随内钢管径厚比的增大而减小。这主要是由于内钢管径

厚比的增大使截面的钢材面积减小,在荷载不变时,其对应的荷载比增大;同时由于内钢管径厚比对截面温度场的分布影响较小,因此其耐火极限的减小是由于钢材所占截面比减小使荷载比增大所导致。

另外在内钢管径厚比的变化中,各柱的竖向位移-时间曲线呈现出了相同的趋势。在各柱达到耐火极限前,CC 柱的最大位移为 4 mm 左右,CS 柱的最大位移为 3 mm 左右,且 CC 柱竖向位移-时间曲线的斜率大于 CS 柱竖向位移-时间曲线的斜率,同样也说明了双圆钢管混凝土短柱火灾下的延性优于外圆内方以及外方内圆双钢管混凝土短柱。如图 9 所示,当双圆钢管混凝土短柱与外圆内方双钢管混凝土短柱的内钢管径厚比从 20 减小至 12.5,其耐火极限延长 15 min 左右,而外方内圆双钢管混凝土短柱径厚比从 15.5 减小至 9.4 时,其耐火极限延长时间相对较短,为 10 min。

2.2.3 内钢管直径(边长)

当直接改变内钢管直径(边长)时(图 10、11),随着内钢管直径的增大,核心混凝土和钢管之间的热阻界面使得核心混凝土的温度场降低,同时由于

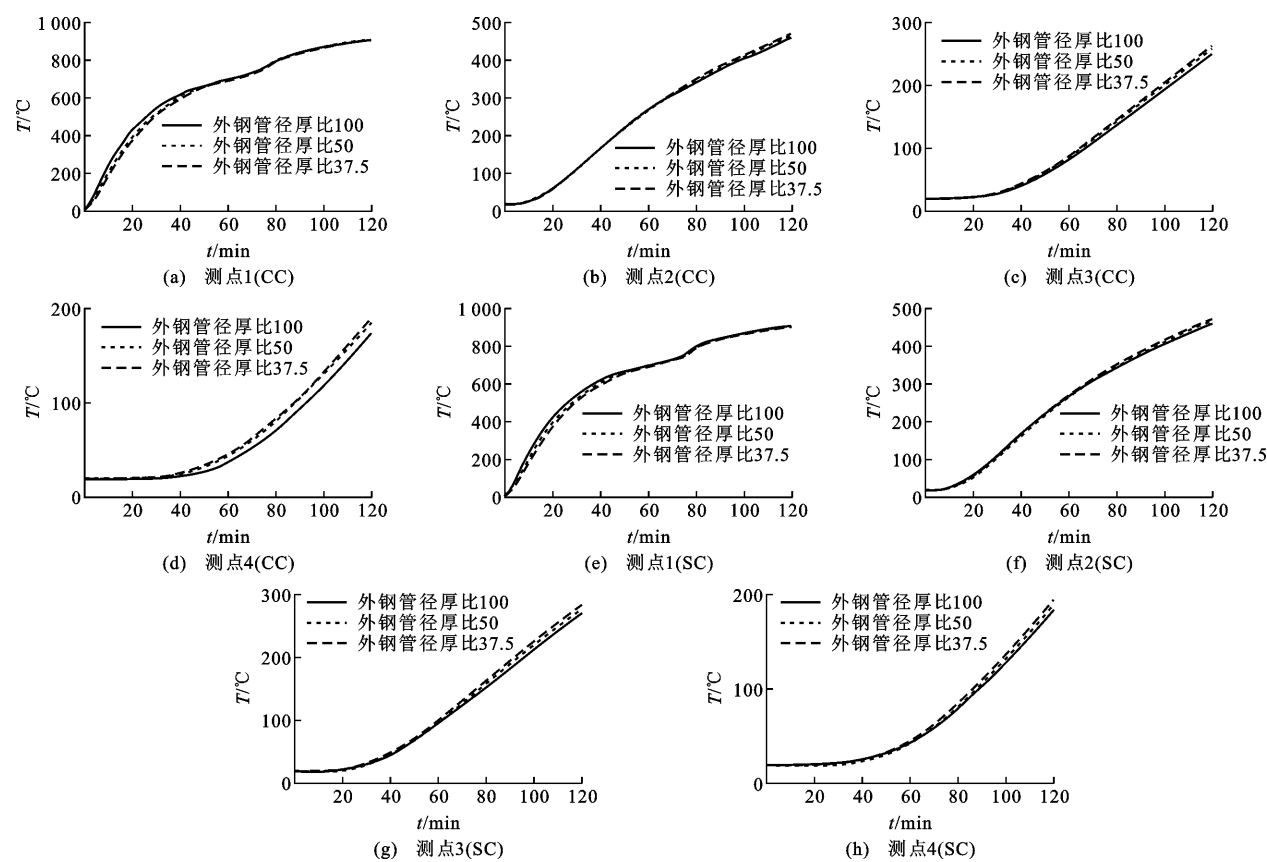


图 4 各测点温度-时间曲线  
Fig. 4 Temperature-time curve of measuring point

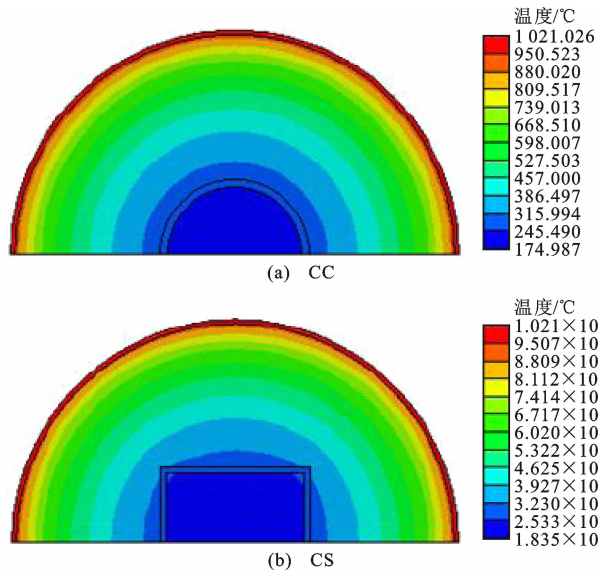


图 5 截面温度云图

Fig. 5 Temperature cloud diagram of cross section

核心约束混凝土的面积增加,因此其耐火极限得到显著提高。

另外在竖向位移-时间曲线中,3 种截面的构件达到耐火极限时,其所达到的最大位移存在差异。双圆钢管混凝土短柱的最大位移为 4.5 mm 左右,

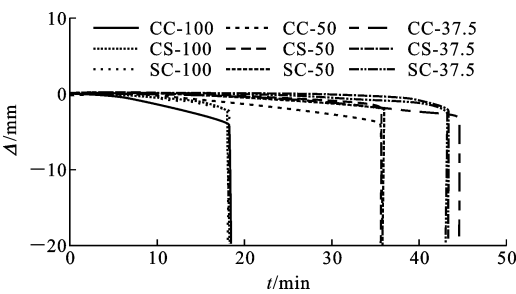


图 6 不同外钢管径厚比时的竖向位移-时间曲线  
Fig. 6 Vertical displacement-time curve with different diameter to thickness ratios of external steel pipe

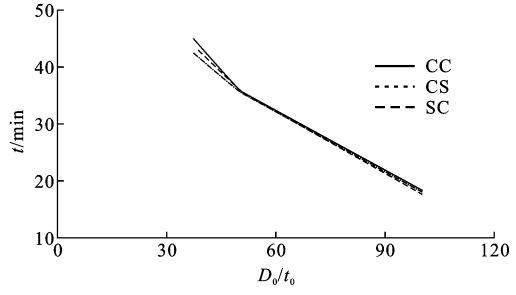


图 7 不同外钢管径厚比时的耐火极限对比  
Fig. 7 Comparison of fire resistance limit with different diameter to thickness ratios of external steel pipe

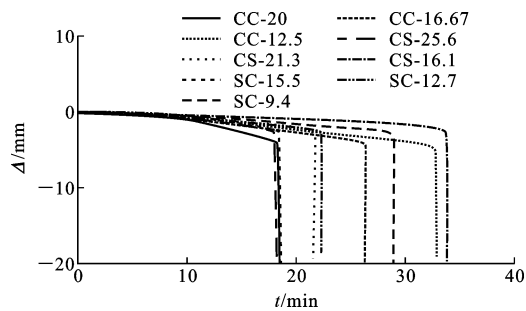


图 8 不同内钢管径厚比时的竖向位移-时间曲线

Fig. 8 Vertical displacement time curve with different diameter to thickness ratios of internal steel pipe

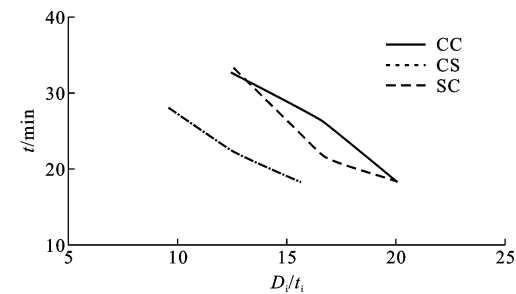


图 9 不同内钢管径厚比时的耐火极限对比

Fig. 9 Comparison of fire resistance limit with different diameter to thickness ratios of internal steel pipe

外圆内方双钢管混凝土短柱的最大位移为 2.7 mm 左右,外方内圆双钢管混凝土短柱的最大位移为 2.3 m, 逐渐减小,其各柱的竖向位移-时间曲线斜率也逐渐减小,表明在火灾条件下,双圆钢管混凝土柱的延性相对较优。

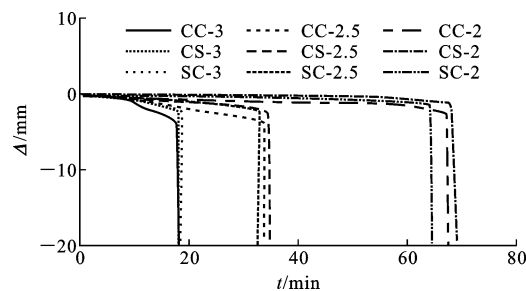


图 10 竖向位移-时间曲线

Fig. 10 Vertical displacement-time curve

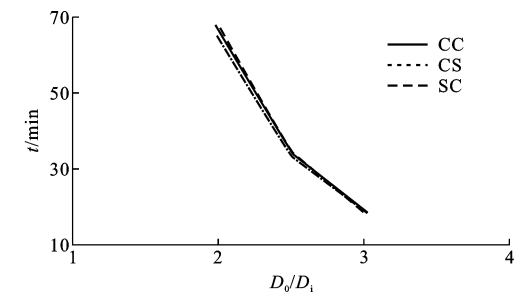


图 11 不同  $D_0/D_1$  时的耐火极限对比

Fig. 11 Comparison of fire resistance limit with different  $D_0/D_1$

2.2.4 截面组合形式

3 组参数分析中,每组数字编号对应的构件含钢率一致,可以进一步对比分析含钢率相同条件下不同截面组合形式双钢管混凝土柱的耐火性能,表 3 为各柱耐火极限统计结果。

由表3可知,在相同含钢率、相同荷载的条件

表 3 耐火极限统计结果

Table 3 Statistics results of fire resistance limit							
试件编号	$t_1/\text{min}$	$t_2/\text{min}$	$t_3/\text{min}$	含钢率	$t_1/t_2$	$t_2/t_3$	$t_1/t_3$
CC1(CS1,SC1)	18.28	18.10	18.48	0.06	1.01	0.98	0.99
CC2(CS2,SC2)	35.80	35.99	35.93	0.10	0.99	1.00	1.00
CC3(CS3,SC3)	44.80	43.74	43.04	0.12	1.02	1.02	1.04
CC4(CS4,SC4)	26.18	21.49	22.10	0.06	1.22	0.97	1.18
CC5(CS5,SC5)	32.70	33.69	28.78	0.07	0.97	1.17	1.14
CC6(CS6,SC6)	33.89	34.91	32.80	0.07	0.97	1.06	1.03
CC7(CS7,SC7)	67.65	68.91	64.66	0.09	0.98	1.07	1.05

注： $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  分别为 CC、CS、SC 试件的耐火极限。

下,不同截面组合形式双钢管混凝土柱的耐火极限相差不大,但总体上双圆钢管混凝土短柱的耐火性能偏优,其次为外圆内方双钢管混凝土短柱、外方内圆双钢管混凝土短柱。根据常温下双钢管混凝土的试验和数值计算结果<sup>[16-17]</sup>,外方钢管对夹层混凝土的约束存在明显的不均匀,而内方钢管的约束由于夹层和外层钢管的影响有所提高,所以外圆内圆双钢管混凝土柱的轴压性能比对应的外方内方双钢管

混凝土柱有明显提高。在火灾情况下,同样圆钢管的约束效果比方钢管好,但高温条件下由于其对应的弹性模型和强度将会降低,因此钢管的约束效果变化没常温条件下的明显。在延性方面,以 CC3、CS3 与 SC3 为例,双圆钢管混凝短柱在破坏前发生的位移较大,其延性相对较好,外圆内方与外方内圆双钢管混凝土短柱的延性差异不大。

### 3 双圆钢管混凝土柱的简化计算公式

#### 3.1 温度场简化计算公式

首先考虑夹层混凝土的温度分布,进行实心圆柱体的温度场计算,热传导微分方程为

$$\nabla^2 u = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中: $\nabla$ 为拉普拉斯算子; $u$ 为温度; $\alpha$ 为导温系数,

$\alpha = \frac{k}{\rho c}$ ,  $k$ 为导热系数, $\rho$ 为密度, $c$ 为比热容。

由于双圆钢管混凝土柱的温度场问题为圆柱面边界,故应采用柱坐标系,热传导方程变换为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

式中: $r$ 为径向坐标; $\varphi$ 为环向坐标; $z$ 为纵向坐标。

当考虑截面不均匀温度场时,式(4)可简化为

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} = \frac{1}{\alpha} \frac{du}{dt} \quad (5)$$

由于截面温度分布  $u$  是  $r$  与  $t$  的函数,采用拉普拉斯变换法进行求解得

$$\frac{d^2 \bar{u}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\bar{u}}{dr} = \frac{s}{\alpha} \bar{u}(r, s) + T_0 \quad (6)$$

假设常温下温度  $T_0$  为 0,则可求得解为

$$u(r, t) = \frac{2\alpha}{r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n \frac{J_0(r\rho_n)}{J_1(r_0\rho_n)} \int_0^t f(\tau) e^{-\alpha_n^2(r-\tau)} d\tau \quad (7)$$

式中: $J_0(r\rho_n)$ 和 $J_1(r_0\rho_n)$ 分别为零阶和一阶贝塞尔函数; $f(\tau) = J_0/J_1$ ;  $r\rho_n = s/\alpha$ ,  $s$ 为拉普拉斯变换系数, $\tau$ 为拉普斯变换卷积定理积分变量; $r_0$ 为截面半径。

如果给定钢管混凝土柱表面的升温曲线,即可求得截面温度场,本文采用文献[18]的钢管表面温度  $T_s$  的发展公式,即

$$T_s = 1\,080 - 450 \exp(-0.8t) - 630 \exp(-3t) + 20 \quad (8)$$

温度场结果为

$$u(r, t) = \alpha \left[ 9.264\,5 J_0(2.405 \frac{r}{r_0}) C_1 - 32.445\,8 J_0(5.520 \frac{r}{r_0}) C_2 + 63.758\,7 J_0(8.654 \frac{r}{r_0}) C_3 - 101.45 J_0(8.654 \frac{r}{r_0}) C_4 \right] \quad (9)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为温度分布系数。

根据有限元模拟的数据对比,进行修正得到根据截面半径尺寸  $r_0$  分类的简化计算公式,即

$$T(r, t) = \begin{cases} \frac{r}{r_0} u(r, t) + u_0 & r_0 \leq 150 \text{ mm} \\ (\frac{r}{r_0} + 0.1) u(r, t) + u_0 & r_0 > 150 \text{ mm 且 } \frac{r}{r_0} \leq 0.5 \\ 0.5 T + u_0 & r_0 > 150 \text{ mm 且 } \frac{r}{r_0} > 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u_0$ 为初始温度。

由于目前没有双圆钢管混凝土柱的试验结果,所以选择表 2 中试件 CC1,采用数值模拟结果与上述简化公式进行对比分析,结果见图 12。可以看出:120 min 时测点 2 的温度理论值和数值模拟值分别为 412 °C 和 461 °C,相对误差为 10.6%;测点 3 的温度理论值和数值模拟值分别为 502 °C 和 555 °C,相对误差为 9.6%。对比结果表明了简化计算公式具有合理性和有效性。

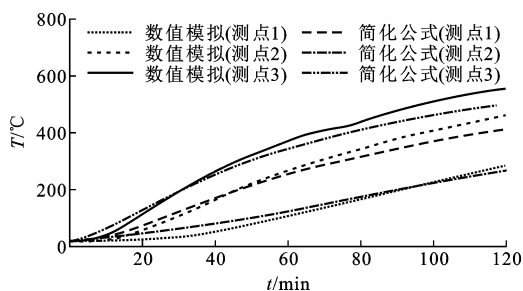


图 12 CC1 温度-时间曲线对比

Fig. 12 Comparison of temperature-time curve for CC1

#### 3.2 承载力简化计算公式

##### 3.2.1 等效温度

由于钢管的壁厚通常较小,且因钢材具有良好的导热性能,因此钢管内外表面的温度差异较小,可将钢管的表面温度视作钢管的截面平均温度,即  $\bar{T}_s = T_s$ ,外钢管的表面温度按式(8)进行计算,内钢管的表面温度则按照式(10)计算。因混凝土的截面温度随半径变化而改变,因此夹层混凝土的截面等效平均温度  $\bar{T}_{c, \text{sand}}$  可按照式(11)计算。

$$\bar{T}_{c, \text{sand}}(t) = \int_{r_i}^{r_0} T(r, t) dr / (r_0 - r_i) \quad (11)$$

式中: $r_i$ 为内钢管的半径。

核心混凝土等效平均温度  $\bar{T}_{c, \text{core}}$  可按照式(12)进行计算。

$$\bar{T}_{c, \text{core}}(t) = \int_0^{r_i} T(r, t) dr / r_i \quad (12)$$

##### 3.2.2 本构关系

高温下的钢材屈服强度采用 Lu 等<sup>[13]</sup>的计算公式,即



$$f_y(T)=f_y\exp[-(\frac{T-20}{601})^{2.5}] \tag{13}$$

式中： $f_y$  为钢材常温下的屈服强度。

高温下夹层混凝土抗压强度公式为

$$f_c(T)=f_c\exp[-(\frac{T-20}{622})^{2.5}] \tag{14}$$

式中： $f_c$  为混凝土的抗压强度。

3.2.3 承载力简化计算公式

高温下双钢管混凝土短柱的承载力计算公式可采用常温下承载力的形式进行修正,得到双钢管混凝土短柱的常温轴压组合承载力  $N$  为

$$N=A_{c,s}f_{c,s}+A_{so}f_{so}+A_{si}f_{si}+A_{c,co}f_{c,co} \tag{15}$$

式中： $A_{c,s}$  为夹层混凝土的截面面积； $f_{c,s}$  为夹层混凝土的抗压强度； $A_{so}$  为外钢管的截面面积； $f_{so}$  为外钢管的屈服强度； $A_{si}$  为内钢管的截面面积； $f_{si}$  为内钢管的屈服强度； $A_{c,co}$  为核心混凝土的截面面积； $f_{c,co}$  为核心混凝土的抗压强度。

高温下组合承载力采用与常温下相同的表达形式,仅将各材料强度替换成对应高温下的强度,如式(16)所示。

$$N(T)=A_{c,s}f_{c,s}(T)+A_{so}f_{so}(T)+$$

$$A_{si}f_{si}(T)+A_{c,co}f_{c,co}(T) \tag{16}$$

式中： $f_{c,s}(T)$  为夹层混凝土温度为  $T$  时的抗压强度； $f_{so}(T)$  为外钢管温度为  $T$  时的屈服强度； $f_{si}(T)$  为内钢管温度为  $T$  时的屈服强度； $f_{c,co}(T)$  为核心混凝土温度为  $T$  时的抗压强度。

由于式(16)忽略了钢管对混凝土的约束作用,而双钢管混凝土柱在火灾条件下承受的荷载随时间发展逐渐转移至内钢管及其内部区域,外钢管对夹层混凝土的约束能力减弱,因此本文在对式(16)进行修正时,将钢管的约束效应集中考虑在核心混凝土中,可得

$$N(T)'=A_{c,s}f_{c,s}'(T)+A_{so}f_{so}(T)+A_{si}f_{si}(T)+\xi A_{c,co}f_{c,co}'(T) \tag{17}$$

$$\xi=\frac{f_{so}(T)A_{so}+f_{si}(T)A_{si}}{A_c f_{ck}}$$

式中： $\xi$  为约束效应系数。

为了验证上述公式的合理性,以柱 CC1 为对象进行分析,将式(17)计算结果与有限元结果均列于表 4,可见公式计算结果与有限元分析结果比较相近,总体相对误差保持在 15% 以内。

表 4 承载力结果对比

Table 4 Comparison of bearing capacity results

$t/\text{min}$	0	10	20	30	40	50
承载力数值模拟结果/kN	4 483.66	3 615.14	3 175.50	2 880.14	2 657.70	2 472.76
承载力公式计算结果/kN	4 253.56	3 654.68	2 992.20	2 604.98	2 369.79	2 201.43
相对误差/%	5.4	1.9	6.1	10.6	12.1	12.3

4 结 语

(1)直径不变时,在荷载相同的条件下,外钢管径厚比增大,其耐火极限减小;保持相同的荷载,内钢管径厚比增大,其耐火极限减小;外荷载相同时,内钢管直径或边长增大,其耐火极限显著提高。

(2)对于 3 种组合形式的截面,当截面含钢率与所承受外荷载一致时,双圆钢管混凝土短柱的耐火性能与外圆内方双钢管混凝土短柱以及外方内圆双钢管混凝土短柱的耐火性能相差不大,但总体优于后者。

(3)双钢管混凝土柱的截面温度场存在解析解,基于热传导分析建立的截面温度场计算方法可以较好地分析双钢管混凝土柱的截面温度场。通过温度等效方法可建立相应的承载力简化计算方法,温度场和承载力计算结果与有限元结果相对误差都在 15% 以内。

参考文献:

References:

[ 1 ] ROMERO M L, ESPINOS A, PORTOLES J M, et al. Slender double-tube ultra-high strength concrete-filled tubular columns under ambient temperature and fire [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 536-545.

[ 2 ] WAN C Y, ZHA X X, DASSEKPO J B M. Analysis of axially loaded concrete filled circular hollow double steel tubular columns exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2017, 88: 1-12.

[ 3 ] CAMARGO A L, RODRIGUES J P C, FAKURY R H, et al. Fire resistance of axially and rotationally restrained concrete-filled double-skin and double-tube hollow steel columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(11): 04019128.

[ 4 ] XIONG M X, XIONG D X, RICHARD LIEW J Y. Behaviour of steel tubular members infilled with ultra high strength concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 168-183.

- [5] EKMEKYAPAR T, AL-ELIWI B J M. Concrete filled double circular steel tube (CFDCST) stub columns [J]. *Engineering Structures*, 2017, 135: 68-80.
- [6] 钱稼茹, 张 扬, 纪晓东, 等. 复合钢管高强混凝土短柱轴心受压性能试验与分析[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(12): 162-169.
- QIAN Jiaru, ZHANG Yang, JI Xiaodong, et al. Test and analysis of axial compressive behavior of short composite-sectioned high strength concrete filled steel tubular columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(12): 162-169.
- [7] XIONG M X, XIONG D X, RICHARD LIEW J Y. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high-and ultra-high-strength materials [J]. *Engineering Structures*, 2017, 136: 494-510.
- [8] RICHARD LIEW J Y, XIONG D X. Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2012, 15(9): 1487-1503.
- [9] AHMED M, LIANG Q Q, PATEL V I, et al. Numerical analysis of axially loaded circular high strength concrete-filled double steel tubular short columns [J]. *Thin-walled Structures*, 2019, 138: 105-116.
- [10] AHMED M, LIANG Q, PATEL V, et al. Behavior of eccentrically loaded double circular steel tubular short columns filled with concrete [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109790.
- [11] CI J C, JIA H, CHEN S C, et al. Performance analysis and bearing capacity calculation on circular concrete-filled double steel tubular stub columns under axial compression [J]. *Structures*, 2020, 25: 554-565.
- [12] ESPINOS A, ROMERO M L, LAM D. Fire performance of innovative steel-concrete composite columns using high strength steels [J]. *Thin-walled Structures*, 2016, 106: 113-128.
- [13] LU H, ZHAO X L, HAN L H. FE modelling and fire resistance design of concrete filled double skin tubular columns [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11): 1733-1748.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
- HAN Linhai. *Concrete filled steel tubular structures: theory and practice* [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [15] LU H, ZHAO X L, HAN L H. Testing of self-consolidating concrete-filled double skin tubular stub columns exposed to fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010, 66(8/9): 1069-1080.
- [16] CI J C, CHEN S C, JIA H, et al. Axial compression performance analysis and bearing capacity calculation on square concrete-filled double-tube short columns [J]. *Marine Structures*, 2020, 72: 102775.
- [17] CI J C, JIA H, AHMED M, et al. Experimental and numerical analysis of circular concrete-filled double steel tubular stub columns with inner square hollow section [J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111400.
- [18] 周绪红, 张瑞芝, 王卫永, 等. 火作用下钢管约束钢筋混凝土柱温度场分析 [J]. *钢结构*, 2017, 32(1): 105-110, 116.
- ZHOU Xuhong, ZHANG Ruizhi, WANG Weiyong, et al. Temperature distribution analysis of steel tube confined RC columns in fire [J]. *Steel Construction*, 2017, 32(1): 105-110, 116.