文章编号:1005-0523(2022)06-0010-08

火灾作用下钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究

李永进[1], 任庆新[2], 翁兴贵[3]

(1. 福建江夏学院工程学院,福建 福州 350108; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;
3. 中建四局建设发展有限公司,福建 厦门 361010)

摘要:建立了钢管混凝土叠合柱有限元模型,分析了火灾作用下叠合柱的偏压力学性能,进而利用该模型,系统地分析了火灾作用下叠合柱的力学性能,并进行参数分析,讨论了截面尺寸、构件长细比和截面含钢管率等参数对承载力折减系数的影响。结果显示,在火灾作用下,叠合柱表现出较好的塑性和稳定性,构件呈明显的整体失稳破坏模态;柱的偏压力学响应可以大致分为3个阶段,柱中的各部分存在内力重分布的现象;随着受火作用进行,柱截面受拉区域逐渐发展扩大,钢管与混凝土之间的相互作用力也逐渐变大;截面尺寸和构件长细比对火灾下叠合柱承载力影响较大。

关键词:钢管混凝土叠合柱;火灾作用;偏压力学性能;参数分析

中图分类号:TU398;[U24] **文献标志码**:A

本文引用格式:李永进,任庆新,翁兴贵.火灾作用下钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):10-17.

Research on Mechanical Properties of Concrete Filled Steel Tube Reinforced Concrete Column Under Fire

Li Yongjin[1], Ren Qingxin[2], Weng Xinggui[3]

(1. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. Construction & Development CO., LTD. of China Construction Fourth Bureau Investment Branch, Xiamen 361010, China)

Abstract: To study the eccentric mechanical properties of concrete filled steel tube reinforced concrete column (CFSTRC) under fire, a finite element model is developed. The failure mode, deformation, internal force, strain and stress, interaction between steel and concrete under fire are analyzed, and the results with different parameters are discussed. The results show that under fire, the CFSTRC column shows good plasticity with overall instability failure mode, and the eccentric mechanical response of the column can be roughly divided into three stages. There is a phenomenon of internal force redistribution in each part of the column. With the tensile area of the column section gradually expanding, the interaction force between steel tube and concrete also increases gradually under fire. The section size and slenderness ratio of column have great influence on the bearing capacity of square steel tube-reinforced concrete column under fire.

Key words: CFSTRC; fire action; mechanical properties; parametric analysis

收稿日期:2022-06-22
基金项目:福建省自然科学基金项目(2018J01632);福建江夏学院科研创新团队项目(19KTXZ02)

Citation format：LI Y J，REN Q X，WENG X G. Research on mechanical properties of concrete filled steel tube reinforced concrete column under fire[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(6)：10–17.

随着钢管混凝土叠合柱的实际应用日益增多，研究者开展了大量的研究工作[1-12]。而近年来建筑结构火灾事故频发[13]，深入研究叠合柱在火灾作用下的偏压力学性能并指导分析其影响因素，具有重要的理论意义和工程应用价值[14-17]。对于火灾下结构的力学性能已开展了诸多研究，陈志华等[18]分析了火灾作用下 L 形方钢管混凝土组合异形柱的轴压性能，得到其荷载–变形曲线，发现加载初期柱表现出良好的线弹性，达到极限承载力之后，柱表现出较好的延性。张玉琢等[19]分析了方中空夹层钢管混凝土柱在三面受火条件下的温度场与受力机理，提出了相应的简化计算公式。李莹辉等[20]通过有限元软件采用顺序热力耦合的分析方法，得到了矩形钢管混凝土巨柱截面的温度场分布以及巨柱轴向变形随受火时间的变化。分析结果表明矩形钢管混凝土巨柱的抗火性能与轴压比息息相关，大轴压比的巨柱对其防火保护要注重。而目前对于钢管混凝土叠合柱力学性能研究还较为少见。

本文建立了 ISO–834 标准火灾升温作用下[13]叠合柱有限元模型，分析了火灾作用下叠合柱的偏压力学性能，进而利用该模型，系统地分析了火灾作用下叠合柱的力学性能，并进行参数分析，讨论了截面尺寸、构件长细比和截面含钢管率等参数对承载力折减系数的影响。

1　有限元模型建立及验证

1.1　模型建立

如图 1 所示，采用 ABAQUS 有限元软件[21]建立了相应的有限元模型，其中混凝土、钢管和加载端板均选用 C3D8R 实体单元，钢筋采用 T3D2 线性杆单元。钢材和混凝土的热工性能参数采用文献[13]给出有关模型。不考虑叠合柱中的钢筋和混凝土之间的滑移，接触界面上采用 *Embedded 约束来实现。钢管与混凝土之间则采用面面接触，法向接触系数 1.0，切向接触系数 0.6，构件两端铰支。设置两个分析步，首先在构件顶部加载线上施加偏心荷载

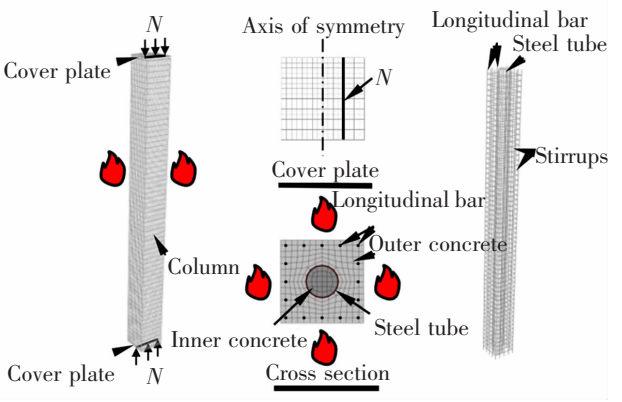


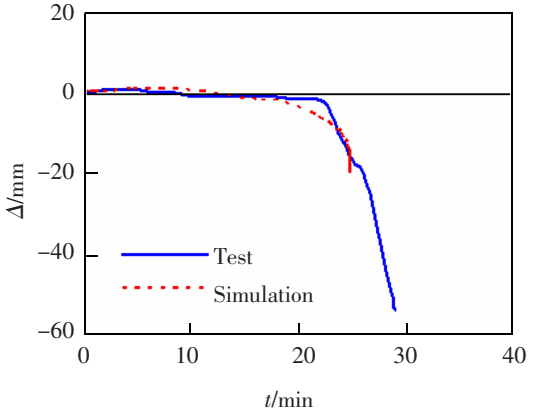
图 1　火灾作用下钢管混凝土叠合柱有限元模型

Fig.1　Finite element model of CFSTRC under fire

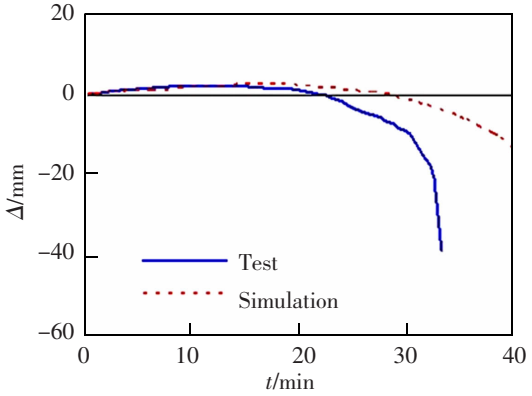
N，并保持荷载不变，然后调用温度场分析结果，直至构件破坏。

1.2　有限元模型的验证

将上述模型同文献[22]所报道的实验结果对比，C1–1，C2–1 均为文献[22]试件编号。图 2 所示即为火灾作用下钢管混凝土柱的侧向位移 Δ 随时间 t 变化关系曲线，可见有限元模拟结果和实验结果两组曲线总体吻合较好，且有限元模拟结果略偏保守，上述有限元模型具有较高的准确度。



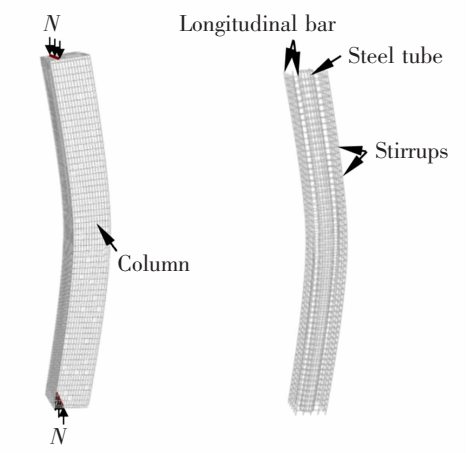
(a) C1–1[22]



(b) C2−1[22]

图2 火灾作用下钢管混凝土柱 Δ–t 关系曲线

Fig.2 Δ–t relation curve of CFST under fire



(a) Outer (b) Inner

图3 典型构件破坏模态

Fig.3 Typical failure mode

2 偏压力学性能分析

2.1 破坏模态

本文通过典型算例构件,进一步明确火灾作用下钢管混凝土叠合柱的偏压力学性能。从图3可知,在火灾作用下,由于内部钢管混凝土的存在,钢管混凝土叠合柱表现出较好的塑性和变形能力,构件呈明显的整体失稳破坏模态。由于外包混凝土和核心混凝土的存在,防止了内钢管在局部发生褶曲和外凸屈曲,没有出现局部屈曲现象。

2.2 变形情况

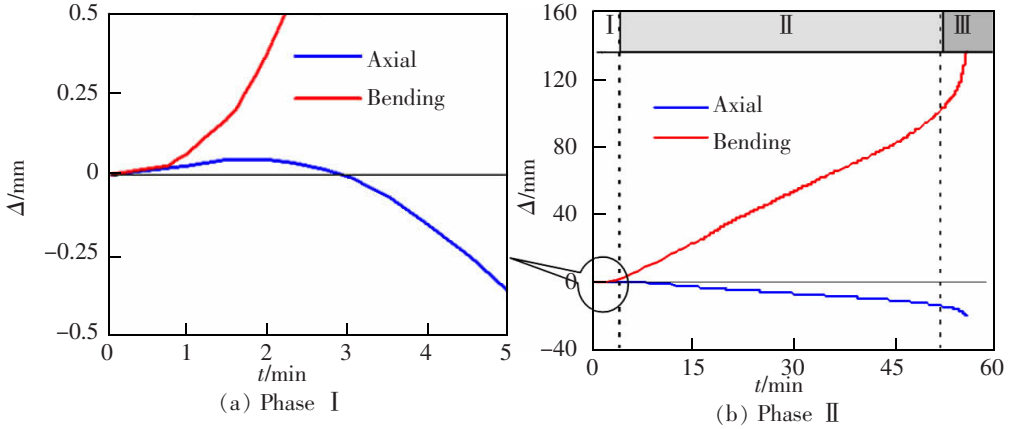
图4给出了火灾作用下的钢管混凝土叠合柱的轴向变形和跨中挠度随火灾持续时间变化的关系曲线。其中,对于轴向变形,负值表示构件压缩变形量。如图4所示,火灾下钢管混凝土叠合柱的变形基本分为3个阶段。第Ⅰ阶段,受火初期,变化趋势相对较为稳定。第Ⅱ阶段,随着受火时间上升,材料的劣化区域从外围不断向内发展。第Ⅲ阶段中,构件的大部分材料都无法承担荷载,变形急剧增加,最终构件失去承载力。

从图4中还可以看出,在火灾作用下,叠合柱轴向压缩变形要慢于跨中挠度,且远低于跨中挠度。当构件达到耐火极限时,构件的侧向位移已很大,验证了火灾作用下叠合柱的破坏模态为整体失稳。

图4(a)对曲线在受火的第Ⅰ阶段的部分进行了局部放大。在本算例中,由于所受荷载不大,在受火初期,构件因热膨胀而产生的轴向膨胀要大于因材料劣化而产生的轴向压缩量。

2.3 内力变化

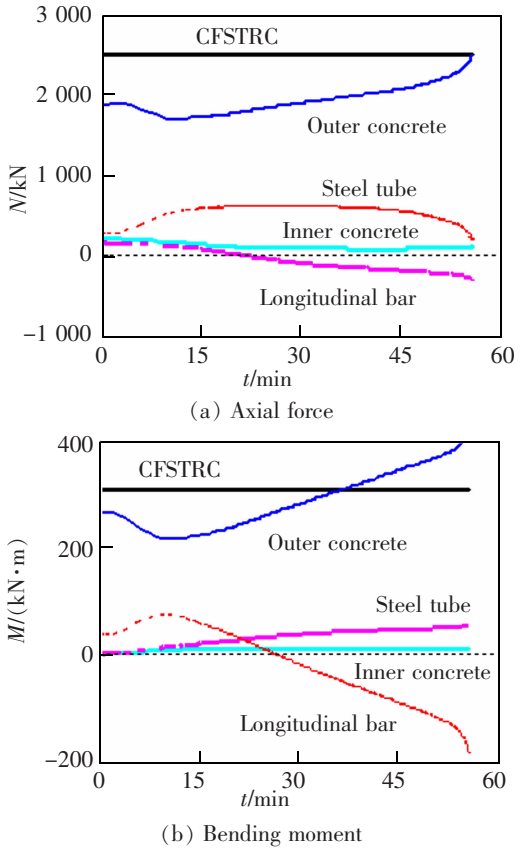
图5给出了火灾作用下叠合柱中各部分所承担的内力随受火时间变化的情况。如图5所示,在第Ⅰ阶段,外包混凝土承担了更多的内力。进入第Ⅱ阶段,外包混凝土发生卸载,纵筋承担了外包混凝土卸下的绝大部分荷载。接着在受火13 min时,



(a) Phase Ⅰ (b) Phase Ⅱ

图4 钢管混凝土叠合柱变形–受火时间关系曲线

Fig.4 Δ–t relation curve of CFSTRC under fire



(a) Axial force

(b) Bending moment

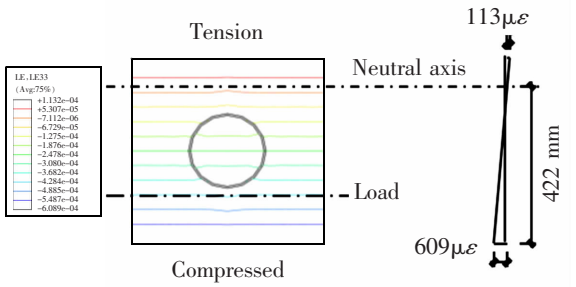
图 5　内力–受火时间关系曲线

Fig.5　Inner force–time relation curve

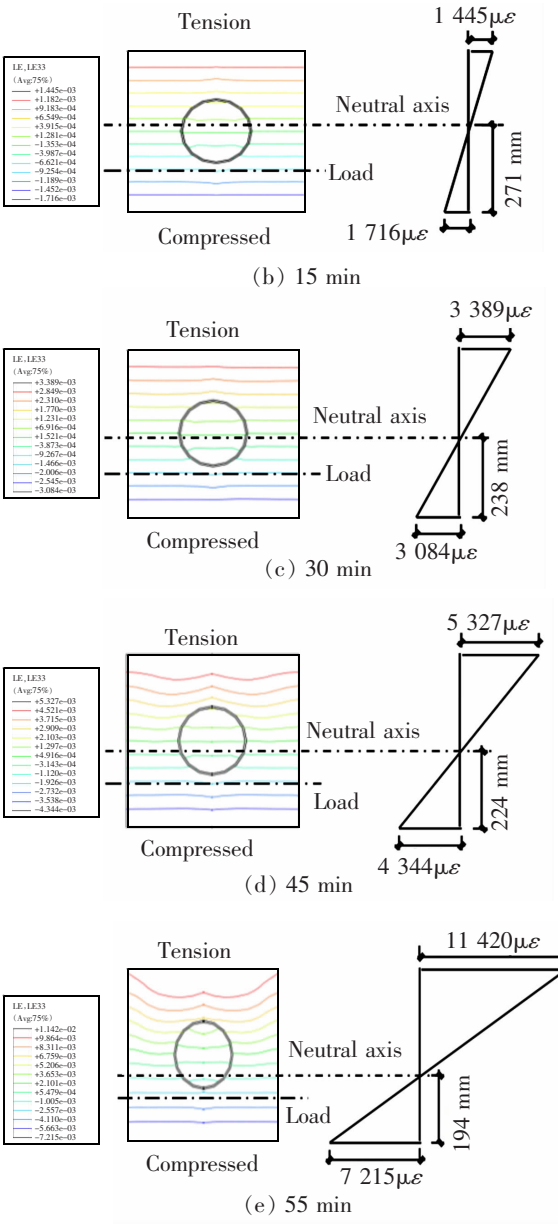
作用在纵筋上的轴力开始平稳下降,而弯矩下降的速率要远大于轴力。这是由于纵筋达到了劣化温度。进入第Ⅲ阶段,由于构件的变形持续增大,纵筋承担的荷载快速下滑。

2.4　应变变化与发展

图 6 给出了火灾作用下钢管混凝土叠合柱在不同时刻跨中截面的纵向应变分布情况,其中正值为拉应变,$\mu\varepsilon$ 为微应变,$1\mu\varepsilon=10^{-6}\ \varepsilon$,$\varepsilon$ 为应变。可见,在火灾作用下,构件跨中截面受压区和受拉区的纵向应变随着受火时间的增加而增大,宏观表现为侧向挠度不断增大。



(a) 0 min



(b) 15 min

(c) 30 min

(d) 45 min

(e) 55 min

图 6　跨中截面纵向应变分布

Fig.6　Longitudinal strain distribution of mid–span section

2.5　应力分布与发展

图 7 给出了火灾作用下叠合柱在不同时间段跨中截面的纵向应力分布情况,其中正值表示拉应力,f_c'为常温下混凝土的抗压强度。受火初期(图 7(b)),由于截面温度场分布不均匀,外围热膨胀作用比内部更突出,在受火初期材料性能损失并不大,外包钢筋混凝土的外围承担较大的荷载。

外围钢筋混凝土的温度随着受火时间增加进一步升高,承担的荷载持续弱化;外围钢筋混凝土卸下的荷载继而转移向截面内部,主要由内部各组

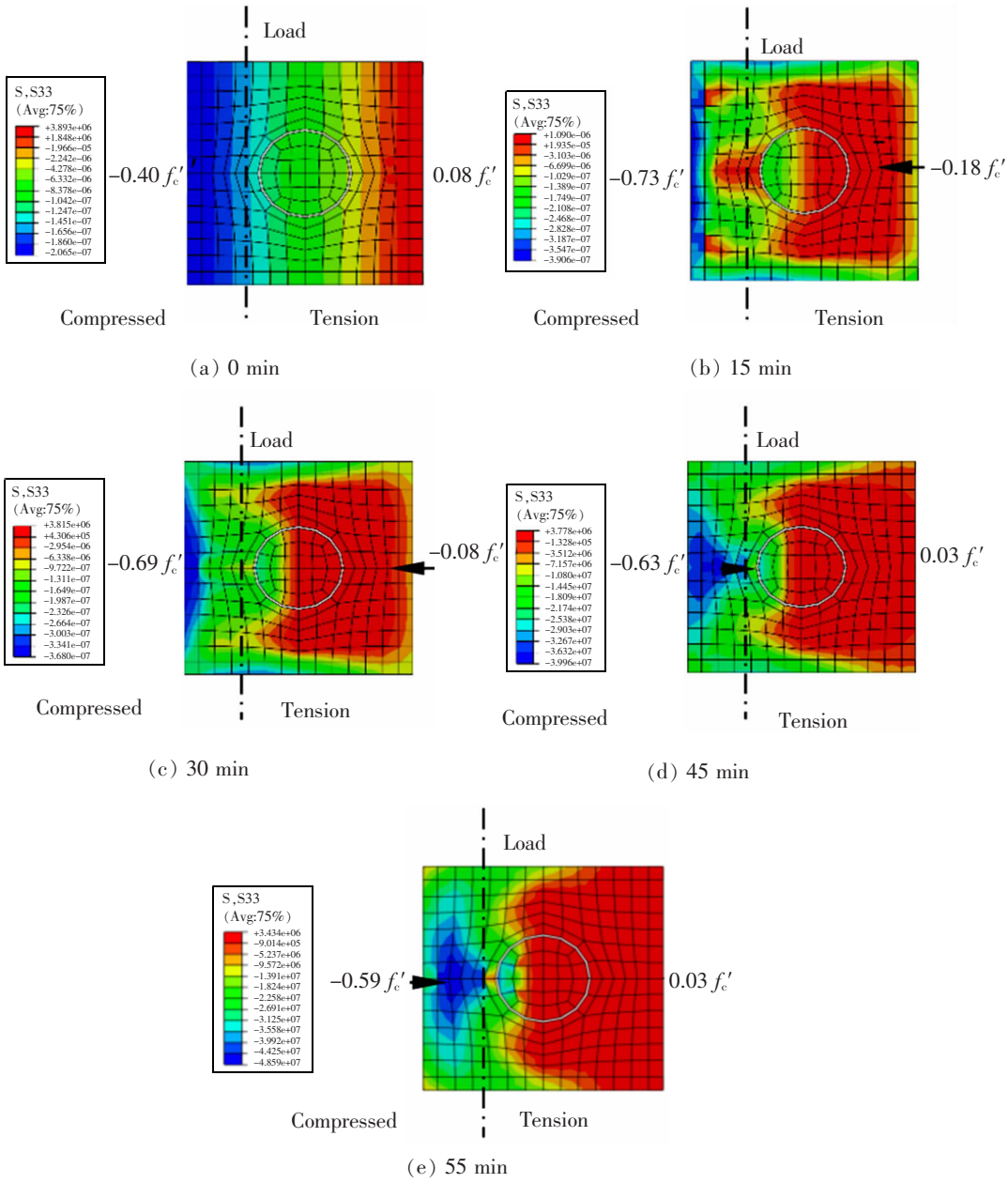


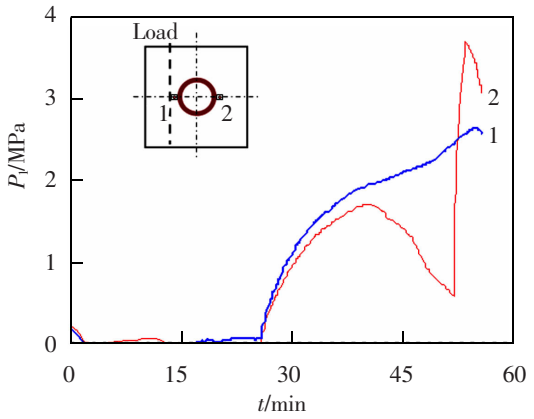
图 7 跨中截面混凝土纵向应力分布

Fig.7 Longitudinal stress distribution of concrete in mid-span

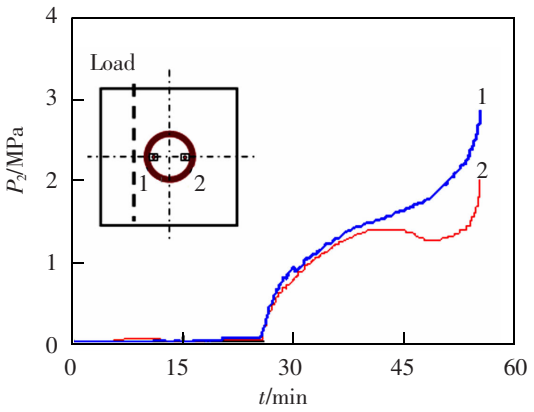
成部分承担,由于构件跨中挠度的增大,截面混凝土受拉区面积逐渐增大。当受火 45 min 时,受拉区区域不断变大。当构件达到耐火极限时截面大部分区域都处于受拉状态。

2.6 钢管与混凝土的相互作用

图 8 给出了在火灾作用下,叠合柱跨中截面钢管与外包混凝土之间、钢管与核心混凝土之间的相互作用力 P_1 和 P_2 随受火时间变化的关系曲线。从图 8(a)可见,在受火初期,外包钢筋混凝土和钢管之间发生接触,产生了 P_1,且受压侧和受拉侧的 P_1 大小接近;随着火灾作用持续进行,受压侧和受拉侧的 P_1 均逐渐减小,直至外包钢筋混凝土与钢管脱开。当受火时间持续增大,热量不断向构件内部传递,在受火 25 min 时,重新与钢管接触,发生相互作用,P_1 开始逐渐增大。此后,对于受压侧,外包钢筋混凝土和钢管之间的 P_1 不断增大;直至进入破坏阶段,P_1 开始略有下降。而对于受拉侧的外包钢筋混凝土和钢管之间的 P_1,在受火 40 min 时,随着构件



(a) P_1



(b) P_2

图 8　接触应力–受火时间关系曲线

Fig.8　Relational curve of contact stress and fire time

挠度增大而开始减小;而后又迅速增大,直至进入破坏阶段,P_1 又急剧下降。

从图 8(b)可见,在受火后相当一段时间内,核心混凝土的横向变形要小于钢管,且外部温度的持续上升还对钢管和混凝土产生作用, 钢管与核心混凝土之间有脱开的趋势,作用力 P_2 为 0。在受火 25 min 时,重新与钢管接触上,P_2 开始逐步上升,但受压侧的 P_2 较受拉侧的 P_2 增大更明显。

3　参数分析

定义火灾作用下柱构件的承载力折减系数 k_t 为

$$k_t=\frac{N_t}{N_0} \tag{1}$$

式中:N_0 为常温下柱构件的承载力,kN;N_t 为受火作用下柱构件的承载力,kN。

分析各参数对该系数的影响如图 9~图 11 所示。3 个图均显示出,随着受火时间的增加,系数 k_t 值不断减小,即钢管混凝土叠合柱承载力不断下降。

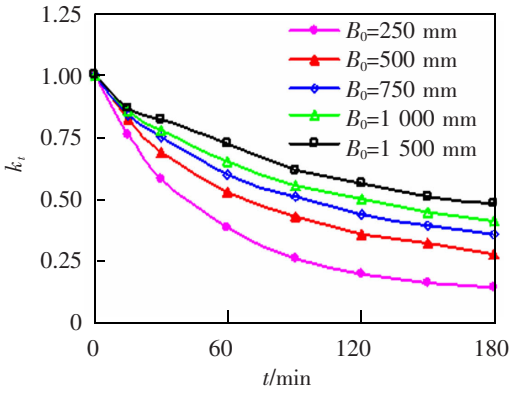


图 9　截面尺寸对 k_t 的影响

Fig.9　The influence of section size on k_t

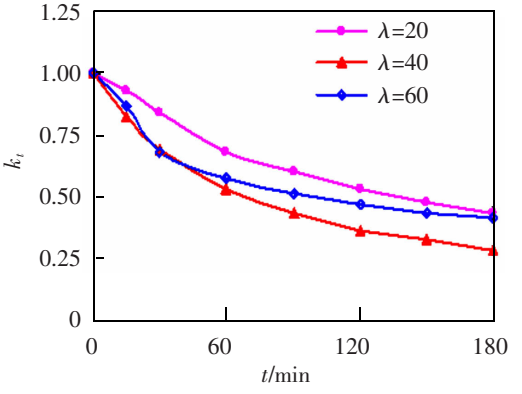


图 10　长细比λ对 k_t 的影响

Fig.10　The influence of slenderness ratio on k_t

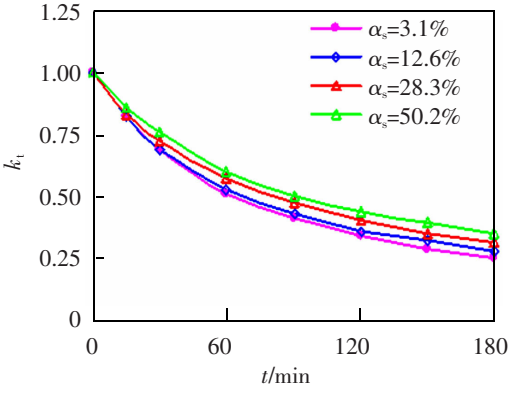


图 11　截面含钢管率α_s对 k_t 的影响

Fig.11　The influence of section steel ratio on k_t

图 9 所示为截面尺寸 B_0 对承载力折减系数 k_t 的影响。从图 9 中可见,构件截面尺寸对 k_t 有很大影响,截面尺寸与系数 k_t 成正比关系。这是因为截面尺寸愈大,构件吸热能力愈强,外界温度传到内部就越慢,耐火极限则越长,系数 k_t 就越大。

图 10 所示为长细比对系数 k_t 的影响。从中可见,长细比 λ 对 k_t 有很大影响,长细比越大,火灾下

构件承载力折减系数 k_t 就越小，耐火极限也越低。

图 11 为截面含钢管率 α_s 对系数 k_t 的影响，$\alpha_s=A_{ss}/A$，A_{sc} 为核心的钢管混凝土截面积，A 为构建截面积。可见，含钢管率越大，系数 k_t 就越大，但总体来看，截面含钢管率对系数 k_t 的影响不大。

4 抗火设计建议

由式(1)可知，叠合柱火灾下的承载力系数，k_t 是指按 ISO 834 标准火灾升温持续时间 t 时刻柱构件的抗压承载力与其常温下抗压承载力的比值，当升温时间为 t，荷载比 $n<k_t$ 时，表示这一时刻叠合柱所能提供的抗压承载力大于轴向压力设计值，叠合柱不会因外荷载超过其承载能力而破坏；当 $n>k_t$ 时，说明 t 时刻叠合柱所能提供的抗力已不足以抵抗外荷载作用，叠合柱将破坏。

参数分析结果表明：在 ISO 834 标准火灾作用下，影响叠合柱承载力的因素主要为受火时间、柱长细比和截面周长。

为便于工程设计，表 1 给出了按有限元计算的叠合柱火灾下的承载力系数 k_t，表内中间值可采用线性插值的方法确定。

表 1 钢管混凝土叠合柱火灾下的承载力系数 k_t

Tab.1 Bearing capacity coefficient k_t of CFSTRC under fire

λ	B_0/mm	Fired time					
		0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h	3.0 h
20	250	0.71	0.52	0.42	0.35	0.31	0.25
	500	0.84	0.68	0.60	0.53	0.47	0.43
	750	0.87	0.74	0.67	0.62	0.55	0.49
	1 000	0.89	0.79	0.72	0.69	0.63	0.56
	1 500	0.92	0.87	0.80	0.73	0.69	0.61
40	250	0.58	0.38	0.26	0.20	0.16	0.14
	500	0.69	0.53	0.43	0.36	0.32	0.28
	750	0.75	0.60	0.51	0.44	0.39	0.36
	1 000	0.78	0.65	0.55	0.50	0.45	0.41
	1 500	0.82	0.72	0.62	0.56	0.51	0.48
60	250	0.58	0.42	0.28	0.24	0.20	0.17
	500	0.68	0.57	0.51	0.46	0.43	0.41
	750	0.75	0.59	0.55	0.53	0.50	0.49
	1 000	0.80	0.71	0.62	0.60	0.57	0.53
	1 500	0.83	0.78	0.73	0.69	0.63	0.58

5 结论

1）在火灾作用下，由于内部钢管混凝土的存在，叠合柱表现出较好的塑性和稳定性，呈明显的整体失稳破坏模态。

2）火灾作用下叠合柱的偏压力学响应可以大致分为 3 个阶段，随着受火作用进行，柱截面受拉区域逐渐发展扩大，钢管与混凝土之间的相互作用力也逐渐变大。

3）通过分析可见，截面尺寸和构件长细比对火灾下钢管混凝土叠合柱的承载力影响较大，截面含钢管率对其影响则相对不明显。

参考文献：

[1] 李永进，廖飞宇. 钢管混凝土叠合柱偏压工作性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版)，2012，37(6)：1083-1088.
LI Y J，LIAO F Y. Behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to eccentric loads [J]. Journal of Guangxi University (Nataral Science Edition)，2012，37(6)：1083-1088.

[2] HAN L H，AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research，2014(93)：62-76.

[3] AN Y F，HAN L H. Roeder，flexural performance of concrete-encased concrete filled steel tubes[J]. Magazine of Concrete Research，2014，66(5)：249-267.

[4] 刘阳，郭子雄，贾磊鹏，等. 核心钢管混凝土叠合短柱轴压性能及设计方法研究[J]. 建筑结构学报，2015，36(12)：135-142.
LIU Y，GUO Z X，JIA L P，et al. Experimental study on axial compression performance and design method of core steel tube reinforced concrete short columns[J]. Journal of Building Structures，2015，36(12)：135-142.

[5] HAN L H，AN Y F，ROEDER C，et al. Performance of concrete-encased CFST box members under bending[J]. Journal of Constructional Steel Research，2015(106)：138-153.

[6] LI Y J，HAN L H，XU W，et al. Circular concrete-encased concrete-filled steel tube (CFST) stub columns subjected to axial compression[J]. Magazine of Concrete Research，2016，68(19)：995-1010.

[7] 黄登，黄远，陈桂榕，等. 钢管混凝土叠合柱的抗震延性研究[J]. 地震工程与工程振动，2016，1(6)：207-214.
HUANG D，HUANG Y，CHEN G R，et al. Study on seismic ductility of steel tube-reinforced concrete column[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics，2016，1(6)：

207–214.

[8] REN Q X，HAN L H，HOU C，et al. Concrete–encased CFST columns under combined compression and torsion: Experimental investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research，2017，138：729–741.

[9] 钱炜武，李威，韩林海，等. 往复荷载作用下钢管混凝土叠合柱–钢梁连接节点力学性能研究[J]. 土木工程学报，2017，50(7)：27–38.
QIAN W W，LI W，HAN L H，et al. Behaviour of concrete–encased concrete–filled steel tubular column to steel beam joints under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal，2017，50(7)：27–38.

[10] MA D Y，HAN L H，JI X D，et al. Behaviour of hexagonal concrete–encased CFST columns subjected to cyclic bending[J]. Journal of Constructional Steel Research，2018(144)：283–294.

[11] LI Y J，LI G，HOU C，et al. Long–term experimental behavior of concrete–encased CFST with preload on the inner CFST[J]. Journal of Constructional Steel Research，2019(155)：355–369.

[12] WANG W Q，WANG J F，GUO L，et al. Behavior and analytical investigation of assembled connection between steel beam and concrete encased CFST column[J]. Structures，2020，24：562–579.

[13] 韩林海，宋天诣，周侃. 钢–混凝土组合结构抗火设计原理[M]. 2 版. 北京：科学出版社，2017.
HAN L H，SONG T Y，ZHOU K. Fire safety design theory of steel concrete composite structures[M]. 2nd ed.Beijing：China Science Press，2017.

[14] 徐蕾，王明涛，王文达. 钢管混凝土叠合柱非均匀受火性能研究[J]. 自然灾害学报，2014，23(4)：263–269.
XU L，WANG M T，WANG W D. Research on the non–uniform fire performance of concrete filled steel tube reinforced concrete(CFSTRC) column[J]. Journal of Natural Disasters，2014，23(4)：263–269.

[15] 项凯，潘雁翀，赵璧，等. 受火冷却后钢管混凝土叠合短柱的轴压力学性能[J]. 西南交通大学学报. 2017，52(6)：1173–1181.
XIANG K，PAN Y C，ZHAO B，et al. Axially loaded of concrete–encased concrete filled steel tubular stub columns after fire[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2017，52(6)：1173–1181.

[16] 项凯，潘雁翀，宋天诣. 钢管混凝土叠合短柱高温后黏结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2019，40(S1)：149–155.
XIANG K，PAN Y C，SONG T Y. Experimental study on bond–slip behavior of concrete–encased concrete–filled steel tubular stub columns after high temperature[J]. Journal of Building Structures，2019，40(S1)：149–155.

[17] 陈博文，王高雄，包延红. 全过程火灾下矩形截面钢管混凝土叠合柱温度场数值研究[J]. 青海大学学报，2022，40(2)：71–77.
CHEN B W，WANG G X，BAO Y H. Numerical study on the temperature field of steel tube–reinforced concrete(ST–RC) columns with rectangular cross section under the whole process of fire[J]. Journal of Qinghai University，2022，40(2)：71–77.

[18] 陈志华，雷志勇，赵炳震，等. 足尺 L 形方钢管混凝土组合异形柱受火后轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构，2019，49(14)：29–35.
CHEN Z H，LEI Z Y，ZHAO B Z，et al. Experimental study of axial compression bearing capacity for full–size L special–shaped column composed of concrete–filled square steel tubes after fire[J]. Building Structure，2019，49(14)：29–35.

[19] 张玉琢，吕学涛，刘发起，等. 三面受火的方中空夹层钢管混凝土柱耐火极限分析[J]. 建筑结构学报，2019，40(S1)：156–162.
ZHANG Y Z，LV X T，LIU F Q，et al. Fire resistance analysis of concrete filled double skin steel tubular columns under three–sided fire[J]. Journal of Building Structures，2019，40(S1)：156–162.

[20] 李莹辉，崔家春. 矩形截面钢管混凝土巨柱抗火性能分析[J]. 建筑结构，2021，51(S1)：1611–1616.
LI Y H，CUI J C. Analysis of fire resistance performance of mega concrete–filled steel tube columns with rectangular section[J]. Building Structure，2021，51(S1)：1611–1616.

[21] 姚悦，吉伯海，高玉强，等. 钢板梁桥腹板间隙变形及力学特征[J]. 华东交通大学学报，2022，39(2)：35–44.
YAO Y，JI B H，GAO Y Q，et al. Deformation and stress characteristics of web gap in steel plate girder bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(2)：35–44.

[22] 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 L H. Concrete–filled steel tubular structures：Theory and practice[M]. 3rd ed. Beijing：China Science Press，2016.



第一作者：李永进(1980—)，男，教授，博士，硕士研究生导师，研究方向为钢–混凝土组合结构；2003 年本科毕业于福州大学，2005 年硕士毕业于福州大学，2009 年博士毕业于福州大学土木工程学院。E–mail：2019004@fjjxu.edu.cn。

(责任编辑：吴海燕　刘棉玲)