

内置 L-CFRST 十字形短柱耐火性能 有限元分析

陈海彬¹, 曹伟越¹, 刘伟浩¹, 刘海扬¹, 周中一²

(1. 华北理工大学建筑工程学院, 河北 唐山 063021; 2. 中国地震局工程力学研究所
地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 目的 研究内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱四处阴角受火下轴压耐火性能。方法 基于 ABAQUS 有限元软件建立 81 种不同工况的耐火极限模型, 分析火灾荷载比、钢管内混凝土强度、含钢率和钢管强度对耐火极限的影响变化规律, 通过正交试验分析得出不同因素对耐火极限的敏感程度, 最后提出试件耐火极限简化计算公式。结果 试件耐火极限随火灾荷载比增加呈负相关并且显著降低, 其他影响因素均呈正相关, 钢管强度对耐火极限影响程度最低; 耐火极限理论计算结果与有限元结果符合较好。结论 钢管的约束效应对于试件耐火极限有一定影响, 在工程设计时尽量保证约束效应系数大于 1.12; 选用火灾荷载比为 0.4、钢管内混凝土强度为 60 MPa、含钢率为 0.067 9、钢管强度为 390 MPa 的组合耐火性能最好。

关键词 格构式钢管混凝土; 异形柱; 火灾; 有限元分析; 耐火极限

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Fire Resistance Performance Finite Element Analysis of Cross-Shaped Short Columns with Built-in L-CFRST

CHEN Haibin¹, CAO Weiyue¹, LIU Weihao¹, LIU Haiyang¹, ZHOU Zhongyi²

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, China, 063021; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080)

Abstract: To study the axial compression fire resistance under fire in four shaded corners of cross-shaped short columns with built-in lattice circular concrete-filled steel tube, the fire resistance limit model under 81 different working conditions was established based on ABAQUS finite element

收稿日期: 2022-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509304)

作者简介: 陈海彬(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、防灾减灾工程等方面研究。

software. The changing law of fire resistance limit was analyzed on influencing factors, such as the load ratio, concrete strength within the steel tube, steel content and steel tube strength. Through orthogonal test the sensitivity of these different factors on fire resistance limit was analyzed, and finally a simplified formula for calculating the fire resistance limit of the specimen was proposed. The fire resistance limit of the specimen was negatively correlated with the increase of fire load ratio and significantly reduced, other influencing factors were positively correlated, and steel pipe strength had the lowest degree of influence on fire resistance limit; theoretical calculation results of the fire resistance limit and the finite element results were in good agreement. The restraining effect of the steel pipe has a certain influence on fire resistance limit of the specimen, and restraint effect factor is greater than 1.12 in the engineering design as far as possible; the load ratio of 0.4 is selected, the concrete strength of the steel pipe is 60 MPa, the steel content is 0.067 9, and steel pipe strength is 390 MPa combined with best fire resistance performance.

Key words: lattice concrete filled steel tube; shaped column; fire; finite element analysis; fire resistance limit

近年来,格构式钢管混凝土柱广泛应用于风电工程、大跨桥梁及高层建筑中^[1-3]。在发生火灾事故时,由于直接暴露于外部环境,钢管表面快速升温,材料强度快速退化,进而导致结构破坏。在钢管表面涂抹防火涂料能较好解决这一问题,但因其造价高和施工繁琐等问题限制了这一措施在实际工程中的广泛应用^[4-6]。钢管混凝土叠合柱应运而生,钢管外部混凝土具有热惰性和低热传导率,有效延缓了钢管混凝土快速升温,保证钢管混凝土有效发挥作用。学者们对钢管混凝土叠合柱已有的较深入的研究中,截面形式多集中在方形和圆形^[7-11],人们生活需求逐渐提高,对建筑功能的要求逐日增加,常规设计形式不能满足用户对室内美观度、房屋有效使用面积的需求。

综上所述,笔者提出了内置格构式圆钢管混凝土(L-CFRST)十字形短柱,较好地解决室内柱脚突出问题。钢管之间通过缀板连接,缀板与钢管外部钢筋骨架降低了粘结滑移,保证混凝土与钢材共同工作^[13]。鉴于此,笔者基于 ABAQUS 有限元软件,建立温度场和耐火极限有限元分析模型,考虑十字形柱每个阴角所在房间同时发生火灾,进行四处阴角受火温度场试验;研究火灾荷载比、截面含钢率、钢管强度和钢管内混凝土强度

等参数对耐火极限的影响,并根据正交试验分析确定最优耐火极限组合;结合参数分析和正交试验结果,考虑火灾荷载比、钢管内混凝土强度和含钢率等因素提出了内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱四处阴角受火下轴压耐火极限简化计算公式,可为相关工程应用提供理论支撑

1 有限元模型

ABAQUS 有限元软件提供两种热力耦合分析方法,一种为“顺序热力耦合”,另一种为“完全热力耦合”。前者进行耐火极限计算时试件内部温度场对力场影响较大;后者同时考虑试件温度场和力场的相互作用,计算时不易收敛,因此,采用前者进行内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱耐火性能分析。

建立如图 1 所示的内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱受火有限元分析模型。

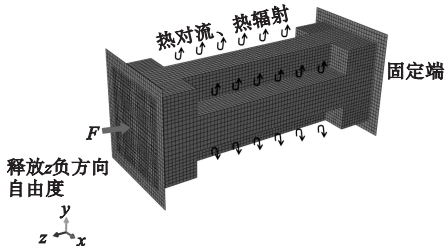


图 1 试件受火模型

Fig. 1 Fire model of the specimen

温度场计算模型中,混凝土采用 DC3D8 三维传热实体单元,钢管和端板采用 DS4 二维传热壳单元,钢筋采用 DC1D2 二维传热线单元。热分析类别设置为瞬态传热。考虑实际环境温度,设置预定义场初始温度为 10℃。考虑实际水分蒸发,有限元内调整在 100℃时混凝土的比热,采用修正后的钢材和混凝土参数模型^[14]。对流传热系数取 25 W/(m²·K),综合辐射系数取 0.5,非受火面按绝热面处理^[15]。假定完全传热,采用绑定约束(Tie)二者之间相互作用。钢筋与混凝土的传热视为嵌入(Embedded)混凝土中。

力场计算模型中,端板假设为刚性板,杨氏模量取 2.0×10^{15} MPa,模型网格划分与温度场计算模型保持一致,保证温度节点读入准确。通过网格敏感性分析,保证计算效率和精度,划分计算模型网格长为 20 mm。对于钢混组合构件高温下本构关系,T. T. Lie^[16]和韩林海^[17]提出的高温下混凝土和钢材的本构模型计算结果均取有较好的精确度,钢材本构关系选用文献[16]提出的高温下应力-应变模型,混凝土的本构关系选用文献[17]提出的高温下应力-应变模型。

混凝土采用 ABAQUS 提供的塑性损伤模型,热膨胀系数 $\alpha = (0.008T/6) \times 10^{-6}$ 。混凝土采用 C3D8R 八节点三维实体单元,钢管采用 S4R 四节点壳单元,钢筋采用

T3D2 二节点线单元。定义钢管内外表面与混凝土接触作用(surface to surface):法向为硬接触,假定完全传力;切向为库伦摩擦,摩擦系数取 0.25^[14],钢筋采用内置区域(Embed),设置为相互作用。柱下部设置为固定端,柱上部限制 x、y 方向平动和转动位移,向 z 轴负方向施加轴向荷载。

2 算例验证

2.1 火灾试验

内置格构式钢管混凝土十字形短柱四处阴角受火示意图和试件内部热电偶布置如图 2(a)、(b)所示。在试件中部截面埋置热电偶,字母 s 表示钢材测温点,字母 c 表示混凝土测温点。非受火面处理如图 2(c)所示。在柱身凸面均匀涂抹高温耐火胶泥,确保岩棉与柱身完全粘贴。岩棉粘贴厚度为 50 mm,导热系数为 0.041 W/(m·K),二者复合使整个非受火面具有很好的阻断隔热作用,可以达到模拟凸面非受火边界条件目的。

试件几何参数:试件受火高度 980 mm;截面宽度 460 mm,肢宽 180 mm,肢厚 140 mm;纵筋直径 10 mm,柱内均匀布置 4 根;钢管壁厚 5 mm,外径 102 mm;受火区箍筋直径 8 mm,间距 150 mm。两端设置加载头,防止轴压时混凝土局部破坏。试件截面尺寸及配筋如图 3 所示。

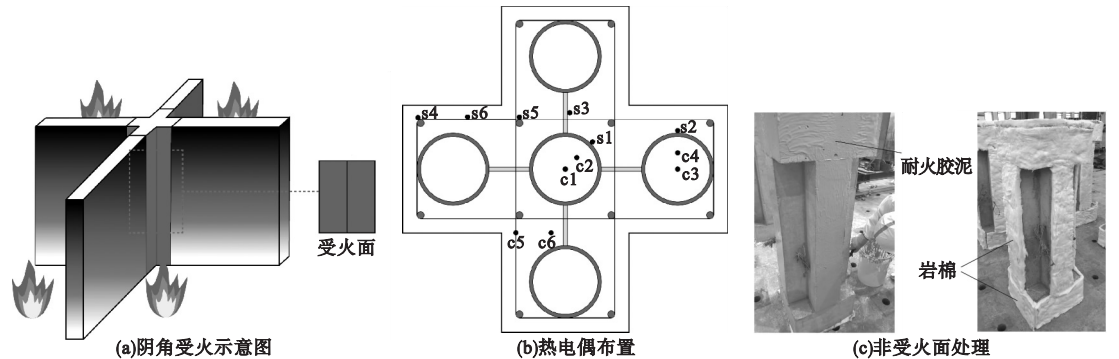


图 2 温度场试验

Fig. 2 Temperature field test

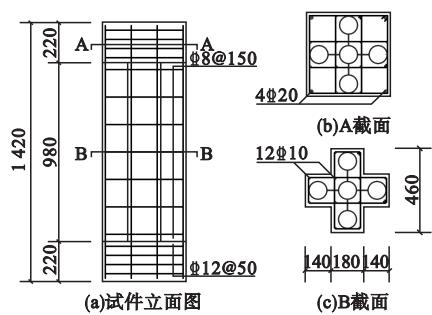


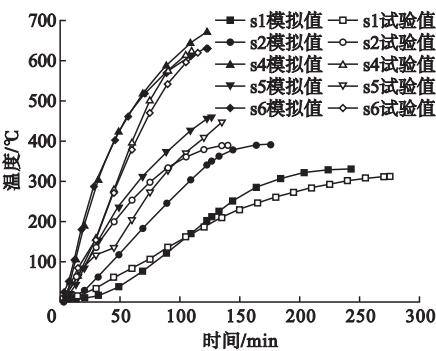
图3 试件截面尺寸及配筋图

Fig. 3 Section size and reinforcement of specimen

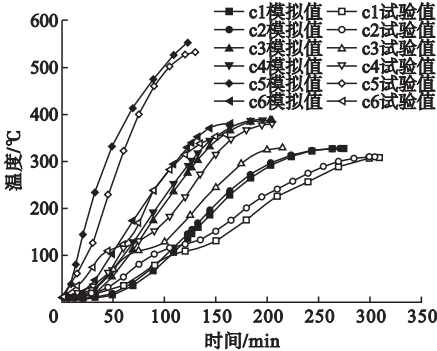
2.2 温度场验证与试验结果分析

图4为有限元模拟值与试验实测值曲线对比图,图5为升温120 min时试件中段内部混凝土温度梯度。由图可知:热工参数模型能较好反映时间内部温度变化趋势,温度

场模型可靠;温度场模拟值相较于试验值略高,混凝土在100℃时有明显的屈服平台,主要原因是混凝土内部自由水和结晶水的蒸发;在升温120 min后,钢管内混凝土c1测点温度约为120℃,而环境温度已达到1050℃,内外温差接近9倍。阴角处s4、s5测点距试件外表面深度相同,但最高温度差别较大,相差约47.7%,这是因为s4处于凸面处直接吸收外部热量,而s5处于凹面处热量能被相邻凸面吸收;可以看出越靠近十字形中心,温度变化速率越小,温度由表面向中心递减,钢管内混凝土由于钢管外混凝土阻热作用温度变化更小,保证内置格构式钢管混凝土能较好地抵抗竖向荷载,提高构件耐火性能。



(a) 钢筋测点温度曲线对比



(b) 混凝土测点温度曲线对比

图4 温度曲线对比图

Fig. 4 Temperature profile comparison chart

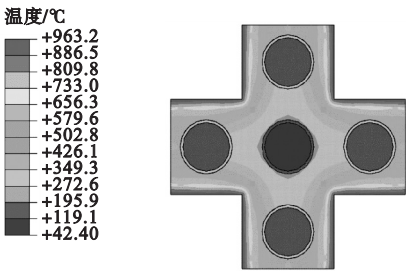


图5 柱中截面温度梯度图

Fig. 5 Temperature gradient diagram of the cross-section in the column

温度模拟曲线与试验实测温度曲线存在一定误差。主要原因是一方面由于钢管内、外混凝土养护与成型过程中收缩与钢管产生一定空隙,导致实际热量向内传导出现损失;另一方面有限元模型假定钢管与混凝土完全

传热,没有考虑接触热阻,最终实测曲线与模拟曲线出现一定误差,但整体吻合程度良好。

2.3 耐火极限模型验证

由于缺乏对内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱耐火极限试验研究,根据试件内部构造组成:钢管外混凝土-钢管-钢管内混凝土,可按构造归类视为普通钢管混凝土叠合异形柱(劲性钢管混凝土异形柱),同时进行普通钢管混凝土柱进行验证。选取文献[17]中21个试件,验证高温下本构关系、单元类型及建模方法的准确性。图6(a)、(b)给出部分验证试件位移-时间曲线,可以看出曲线较好地反应试验中构件变形趋势,图6(c)为验证试件耐火极限计算值与试验值比

值的散点图,计算值与试验值比值的平均值 $\mu=0.967$,均方差 $\sigma=0.190\ 97$,比值点基本落在 45° 斜线上,少部分点发生偏离。有限元计算结果与试验结果吻合较好。

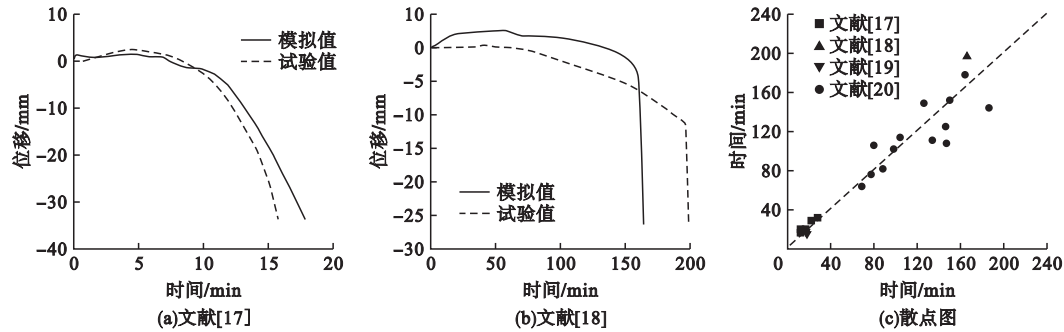


图 6 计算值与试验值对比验证

Fig. 6 Comparison between simulation results and test results

3 参数分析

为进一步探究试件耐火性能,用正交试验法共设计 81 种工况下的内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱耐火极限有限元模型,

即改变火灾荷载比 n 、试件含钢率 α 、钢管屈服强度 f_y 和钢管内混凝土立方体强度 f_{cu1} 中任何影响因素时所有试件总量。表 1 列出部分试件参数。

表 1 部分试件参数

Table 1 Partial specimen parameters

试件编号	$a \times b \times c/\text{mm}$	L/mm	n	t_s/mm	f_y/MPa	f_{cu1}/MPa	f_{cu2}/MPa	$\rho_s/\%$
X-5-5-235-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.5	5	235	60	30	0.71
X-5-6-235-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.6	5	235	60	30	0.71
X-4-4-235-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	4	235	60	30	0.71
X-6-4-235-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	6	235	60	30	0.71
X-5-4-345-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	5	345	60	30	0.71
X-5-4-390-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	5	390	60	30	0.71
X-5-4-235-40	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	5	235	40	30	0.71
X-5-4-235-50	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	5	235	50	30	0.71
X-5-4-235-60	$460 \times 180 \times 160$	1 420	0.4	5	235	60	30	0.71

注:以试件编号 X-5-4-235-60 为例,字母 X 代表十字形截面,数字 5、4、235、60 分别代表钢管壁厚、火灾荷载比、钢管强度、钢管内混凝土强度; a 、 b 、 c 分别为截面宽度、肢宽和肢厚; L 为试件总高度;火灾荷载比 $n(n=N_f/N_u)$ 为构件火灾下承受荷载 N_f 与常温下极限承载力 N_u 比值;含钢率 α 变化表现在钢管壁厚 t_s 上,即 4 mm、5 mm 和 6 mm; ρ_s 为截面纵筋配筋率; f_{cu2} 为钢管外混凝土立方体抗压强度。

3.1 火灾荷载比

图 7 为 3 种含钢率下火灾荷载比-耐火极限变化规律图,由图 7 可知:所有试件耐火极限均随火灾荷载比的增大而显著降低;火灾荷载比由 0.4 增至 0.6 过程中,以内部构造 $\alpha=0.046\ 2$, $f_y=390\ \text{MPa}$, $f_{cu1}=50\ \text{MPa}$ 的试件耐火极限降低最少,为 50.63%,以内部

构造为 $\alpha=0.046\ 2$, $f_y=235\ \text{MPa}$, $f_{cu1}=60\ \text{MPa}$ 的试件耐火极限降低最多,为 60.9%;即使在火灾荷载比 0.6 下,大部分试件均满足一级耐火等级的需求,表现出良好的耐火性能。火灾荷载比的增加使受火时试件承受更大的荷载,同时试件受高温的不利影响,使试件更快达到耐火极限。

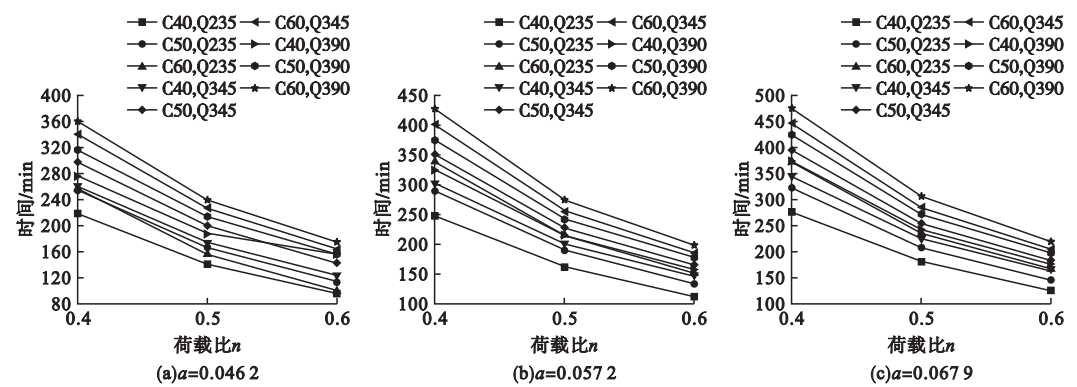


图7 火灾荷载比对耐火极限的影响

Fig. 7 Effects of load ratio on fire resistance limit

3.2 钢管内混凝土强度

图8给出3种火灾荷载比下钢管内混凝土强度-耐火极限变化规律,由图8可知:钢管内混凝土强度与耐火极限呈正相关,在相同火灾荷载比下,以试件 X-5-4-235-40 为例,钢管内混凝土强度由 40 MPa 提升至50 MPa 时,试件耐火极限增加 16.53%,由50 MPa 提升至 60 MPa 时,耐火极限提高 17.3%,混凝土强度的提高对构件耐火极限提升影响较明

显;当钢管强度为 235 MPa、含钢率为 0.462 时,混凝土强度由 40 MPa 提升至 60 MPa,均出现耐火极限先增高后降低的变化趋势,这是由于钢管约束效应系数 ξ 值减小,钢管对混凝土的约束作用减弱,而钢管内混凝土本构关系与 ξ 值的大小有关,已有研究表明 ξ 值越大,钢管对混凝土约束作用越强,混凝土应力-应变曲线呈单调递增趋势。实际工程应用中建议保持 ξ 值大于 1.12。

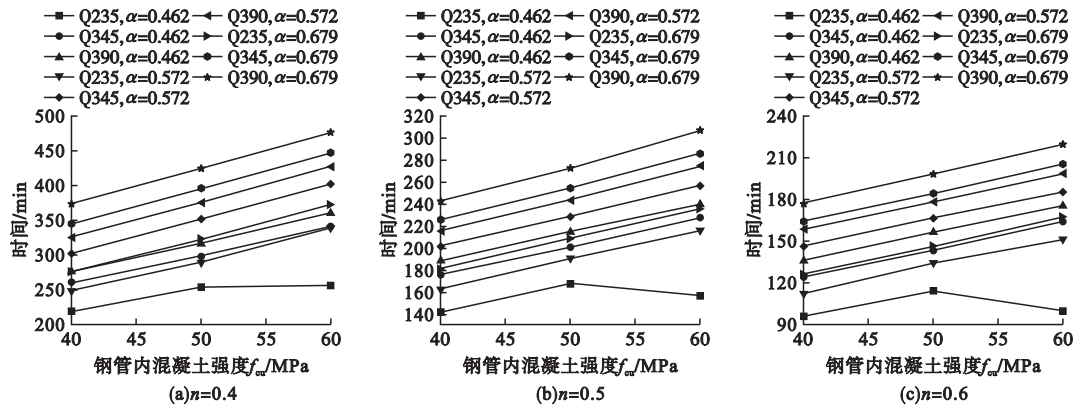


图8 钢管内混凝土强度对耐火极限的影响

Fig. 8 Effect of concrete in the steel tube on fire resistance limit

3.3 含钢率

图9为3种火灾荷载比下含钢率-耐火极限变化规律图。由图9可知:含钢率与耐火极限呈正相关,在相同荷载下,以试件 X-4-4-235-60 为例,试件含钢率从 0.046 2 增至 0.057 2 时,耐火极限增加 32.03%,含钢率从 0.057 2 增至 0.067 9 时,耐火极限增加 10.05%,含钢率提高后,钢管对钢管内混凝土

土约束效应增强,管内混凝土性能得到更好发挥;钢管内混凝土强度为 60 MPa、钢管强度为 235 时,可以看出,在各个火灾荷载比下含钢率由 0.046 2 提升至 0.067 9 时,耐火极限增长变化量快速提高,与钢管混凝土强度提升变化趋势类似,钢管约束效应系数增大,钢管约束效应明显,试件整体承载力提高,耐火极限提高。

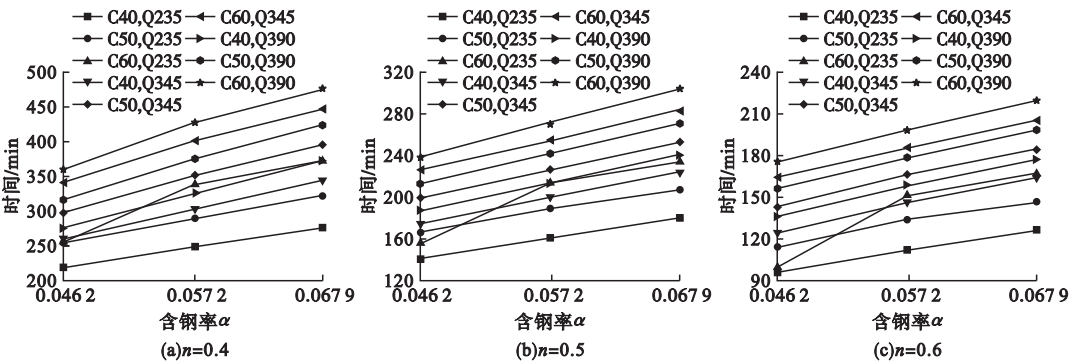


图9 含钢率对耐火极限的影响

Fig. 9 Effect of steel content on fire resistance

3.4 钢管强度

图 10 给出在 3 种火灾荷载比下钢管强度-耐火极限变化规律。由图 10 可知,钢管强度与耐火极限呈正相关,关系近似为线性增长。相同荷载下,以试件 X-5-4-235-60 为

例,钢管强度由 235 MPa 增至 345 MPa 时,耐火极限增加 18. 64% ,钢管强度由345 MPa 增至 390 MPa 时,耐火极限仅增加 6. 4% ,由此可见提升钢管强度对增加耐火极限效果并不明显。

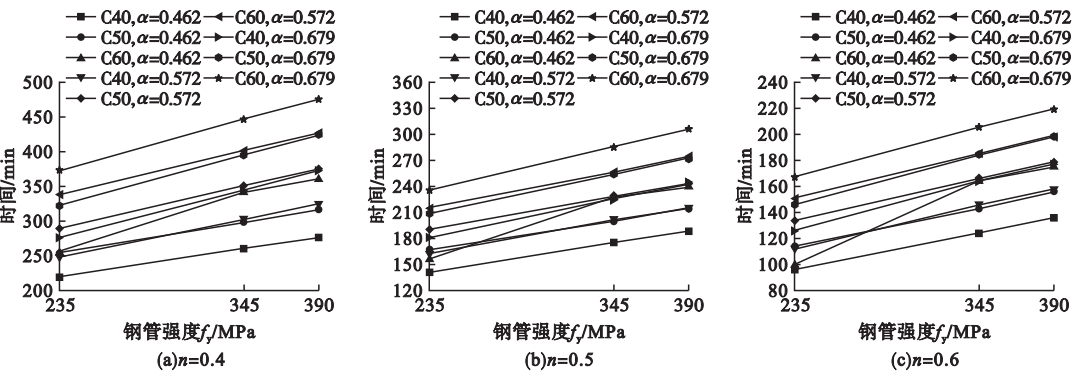


图10 钢管强度对耐火极限的影响

Fig. 10 Effect of steel pipe strength on fire resistance

4 抗火设计组合建议

利用正交表 $L_9(3^4)$ 分析 4 种因素对耐火极限的影响,正交试验表如表 2 所示,各因素水平平均值和极差如表 3 所示。

表 3 中, K_i 表示在因素火灾荷载比下的耐火极限之和; \bar{K}_i ($i=1,2,3$) 为 K_i 平均值; 极差 R 的大小反应四个因素的重要性。由预期参数分析和 R 值大小可知,影响程度从大到小依次为火灾荷载比、钢管内混凝土强度、含钢率、钢管强度。内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱耐火极限的最佳组合为

表 2 耐火极限正交分析

Table 2 Orthogonal analysis of fire resistance limit

试验 编号	n	α	f_y / MPa	f_{cu} / MPa	时间 / min
1	0.4	0.046 2	235	40	219
2	0.4	0.057 2	345	50	351
3	0.4	0.067 9	390	60	475
4	0.5	0.046 2	345	60	227
5	0.5	0.057 2	390	40	215
6	0.5	0.067 9	235	50	208
7	0.6	0.046 2	390	50	156
8	0.6	0.057 2	235	60	254
9	0.6	0.067 9	345	40	164

表 3 各因素水平、平均值和极差
Table 3 Average value and extremely poor levels of all factors

指标	<i>n</i>	α	f_y/MPa	f_{cu}/MPa
K_1	1 045	602	681	598
K_2	650	820	742	715
K_3	574	847	846	956
\bar{K}_1	348.3	200.7	227.0	199.3
\bar{K}_2	216.7	273.3	247.3	238.3
\bar{K}_3	191.3	282.3	282.0	318.7
极差 <i>R</i>	157.0	81.6	55.0	119.4

火灾荷载比为 0.4、含钢率为0.067 9、钢管强度为 390 MPa、钢管内混凝土强度为 60 MPa,这种组合耐火性能最好。结合上述分析,提升钢管强度不满足经济性和适用性原则。

5 耐火极限简化计算

国内外对于内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱阴角受火下的耐火极限计算公式较为匮乏,结合参数分析和正交分析结果,选取实际工程中适用性较广的 3 类因素,即火灾荷载比 0.4 ~ 0.6、钢管内混凝土强度40 ~ 60 MPa和含钢率 0.046 2 ~ 0.067 9。鉴于短柱不发生失稳破坏,暂不考虑长细比的影响,综合有限元数值模拟结果,采用幂函数的函数方程对内置格构式圆钢管混凝土十字形短柱耐火极限进行多元非线性回归。得出耐火极限计算简化计算公式:

$$t = 1.503 \times n^{-1.913} f_{cu}^{0.626} (100\alpha)^{0.699} \quad (1)$$

得到上述理论计算公式与数值模拟结果比值, $R^2 = 0.998$,能较好计算构件耐火极限。

6 结 论

(1)火灾荷载比和钢管内混凝土强度对耐火极限的影响最为明显,火灾荷载比增大会使试件耐火极限大幅下降,其他因素均呈正相关性,钢管强度的提升对于耐火极限影响不大。

(2)钢管外混凝土有效延缓了钢管和钢管内混凝土升温,有效提高试件耐火性能。

(3)各因素对耐火极限的敏感程度依次为火灾荷载比、钢管内混凝土强度、含钢率、钢管强度。当火灾荷载比为 0.4、含钢率为 0.067 9、钢管强度为 390 MPa、钢管内混凝土强度为 60 MPa 时,试件的耐火极限组合最优。

(4)基于火灾荷载比、钢管内混凝土强度和含钢率,提出了对于四处阴角受火下耐火极限简化计算公式,为实际工程中抗火设计做参考。

参考文献

[1] 杨有福,刘敏,别雪梦. 四肢格构式钢管混凝土轴压构件承载力研究[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(5):18-26.
(YANG Youfu, LIU Min, BIE Xuemeng. A research on the bearing capacity of four-legged CFST latticed members under axial compression [J]. Progress in steel building structures,2022,24(5):18-26.)

[2] 高春彦,赵洁,程亚超. 格构式钢管混凝土风电塔架新型附着式节点受力性能研究[J]. 应用力学学报,2020,37(6):2440-2445.
(GAO Chunyan, ZHAO Jie, CHENG Yachao. Mechanical behavior study on the attachment type concrete-filled steel tubular lattice wind tower [J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(6):2440-2445.)

[3] 史益. 格构式桥墩在山区公路桥梁加固中的应用[J]. 中国公路,2020(8):100-101.
(SHI Yi. Application of lattice pier in strengthening highway bridges in mountainous areas [J]. China highway,2020(8):100-101.)

[4] 尹亮,倪照鹏,叶继红,等. 厚型涂料保护的钢管混凝土巨型柱防火性能研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(增刊1):305-309.
(YIN Liang, NI Zhaopeng, YE Jihong, et al. Study on fire protection performance of CFST mega-columns protected by thick coated fire retardant coatn [J]. Journal of building structures,2015,36(S1):305-309.)

[5] 赵炳震,陈志华,郑培壮,等. ALC 板防护下的方钢管混凝土组合异形柱耐火试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(9):931-938.
(ZHAO Bingzhen, CHEN Zhihua, ZHENG Peizhuang, et al. Fire resistance experiment on SCFRT column insulated with ALC board [J]. Journal of Tianjin university(science and technology),2017,50(9):931-938.)

[6] 周威,毕颖,赵磊. 防火涂料局部脱落的钢管

混凝土柱温度场有限元分析[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(1): 41-47.

(ZHOU Wei, BI Ying, ZHAO Lei. Finite element analysis on the temperature distribution of CFST columns with local damage of fire protection [J]. Fire science and technology, 2022, 41(1): 41-47.)

- [7] 王振山, 雷震, 李浩炜, 等. 螺旋加劲薄壁方钢管混凝土叠合构件轴压性能及参数影响研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(1): 25-32.

(WANG Zhenshan, LEI Zhen, LI Haowei, et al. Research on nonlinear behavior of concrete filled thin-walled square steel tubular composite members with spiral stiffeners under axial compression [J]. Building science, 2022, 38(1): 25-32.)

- [8] 王振山, 李亚坤, 韦俊, 等. 螺旋肋薄壁钢管混凝土叠合柱滞回性能数值分析研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(6): 2298-2305.

(WANG Zhenshan, LI Yakun, WEI Jun, et al. Hysteretic behavior and numerical analysis of thin-walled concrete-encapsulated steel tubular composite column with spiral ribs [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(6): 2298-2305.)

- [9] 牛海成, 高锦龙, 吉珈琨, 等. 钢管高强再生混凝土叠合柱轴压性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(8): 3994-4004.

(NIU Haicheng, GAO Jinlong, JI Jiakun, et al. Axial compression behavior of high-strength recycled concrete filled steel tubular composite columns [J]. Acta materiae composita sinica, 2022, 39(8): 3994-4004.)

- [10] 赵晖, 张颖, 王蕊. 中空方形钢管混凝土叠合柱轴压力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 53-62.

(ZHAO Hui, ZHANG Ying, WANG Rui. Study on mechanical behavior of square hollow concrete-encased CFST columns with inner steel plate under axial compression [J]. Journal of building structures, 2022, 43(6): 53-62.)

- [11] 程志敏. 圆钢管高强混凝土叠合短柱轴压力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(2): 56-62.

(CHENG Zhimin. Study on the performance of circular high strength concrete-encased concrete-filled steel tube column under axial compression [J]. Sichuan building science, 2021, 47(2): 56-62.)

- [12] 任庆新, 魏秋宇, 王鹏, 等. 圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 410-417.

(REN Qingxin, WEI Qiuyu, WANG Peng, et al.

Research on circle hollow concrete-encased CFST slender column under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3): 410-417.)

- [13] 陈海彬, 周建超, 王棒棒. 高温后混凝土抗压强度试验研究[J]. 混凝土, 2021(10): 23-26.

(CHEN Haibin, ZHOU Jianchao, WANG Bangbang. Experimental study on compressive strength of concrete after high temperature [J]. Concrete, 2021(10): 23-26.)

- [14] 宋天诣. 火灾后钢-混凝土组合框架梁-柱节点的力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

(SONG Tianyi. Research on post-fire performance of steel-concrete composite beam-column joints [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)

- [15] 刘发起. 火灾下与火灾后圆钢管约束钢筋混凝土柱力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

(LIU Faqi. Fire and post-fire behaviours of circular steel tube confined reinforced concrete columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.)

- [16] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1994, 120(5): 1489-1509.

- [17] 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.)

- [18] 杨勇, 龚志超, 邓辉, 等. 钢管混凝土十字形截面柱耐火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(12): 88-96.

(YANG Yong, GONG Zhichao, DENG Hui, et al. Experimental study on fire resistance of cross-shaped concrete filled steel tubular column [J]. Journal of building structures, 2017, 38(12): 88-96.)

- [19] 崔志强, 韩林海, 宋天诣. 三肢钢管混凝土格构式柱耐火性能分析[J]. 工程力学, 2014, 31(增刊1): 207-212.

(CUI Zhiqiang, HAN Linhai, SONG Tianyi. Analysis on fire performance of concrete-filled steel tubular (CFST) trimple-limb laced columns [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(S1): 207-212.)

- [20] LIE T T, CHABOT M. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with plain concrete [R]. NRCCNRC internal report, 1992.

(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)