

# 火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分析

李帼昌,李 龙,李 晓

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 分析标准火灾下钢管煤矸石混凝土柱的温度场,为后续抗火性能的研究提供理论基础。方法 采用有限元分析软件建立钢管煤矸石混凝土柱热传递模型,在此基础上分析 ISO-834 标准升温曲线下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分布规律,研究升温时间、截面尺寸、含钢率、保护层厚度等参数对温度场的影响,并与普通钢管混凝土柱进行对比。结果 随升温时间增加以及截面尺寸、保护层厚度减小,钢管煤矸石混凝土柱截面温度明显升高;另外,钢管煤矸石混凝土柱的温度场分布与普通钢管混凝土柱类似,但截面温度更低。结论 与普通管混凝土柱相比,钢管煤矸石混凝土柱的抗火性能更好,并且建议其防火保护层厚度在 15 mm 左右。

**关键词** 煤矸石混凝土;钢管混凝土柱;温度场;标准火灾

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Temperature Field Analysis of Coal Gangue Concrete-filled Steel Tubular Column under Fire

LI Guochang, LI Long, LI Xiao

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

**Abstract:** The temperature field of coal gangue concrete filled steel tube (GCFST) columns under standard fire was analyzed, which provides a theoretical basis for the subsequent research on fire resistance. The finite element analysis software was used to establish the heat transfer model of the GCFST column. On this basis, the temperature field distribution of the GCFST column under the ISO-834 standard heating curve was analyzed. The influences of heating time, section size, steel content, protective layer thickness and other parameters on the temperature field were investigated and compared with the ordinary concrete filled steel tubular (CFST) column. With the increasing of heating time and the decreasing of section size and protective layer thickness, the section temperature of GCFST tubular column significantly increases. In addition, the temperature field distribution of GCFST column is similar to that of CFST column with a lower section temperature. Hence, compared with the CFST column, the fire resistance performance of the GCFST is better, and it is recommended that the thickness of the fire protection layer be about 15 mm.

收稿日期:2022-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51938009)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

**Key words:** coal gangue concrete; concrete-filled steel tubular column; temperature field; standard fire

钢管煤矸石混凝土柱与普通钢管混凝土柱相比具有重量更轻、钢管约束作用更强等优势<sup>[1-2]</sup>。但由于钢管外露,环境温度变化对其影响较大,高温下力学性能劣化十分明显,所以对其进行抗火性能研究十分必要。国内外众多学者对普通钢管混凝土柱的抗火性能进行了研究。韩林海等<sup>[3]</sup>建立了火灾和力作用下钢管混凝土柱的数值模型,并开展试验验证了模型的有效性,研究了火灾和力共同作用下钢管混凝土柱的工作机理,并给出设计方法。李国强等<sup>[4]</sup>提出了钢管混凝土柱的耐火极限实用计算方法。邱仓虎等<sup>[5]</sup>研究了火灾荷载比、偏心率等因素对钢管混凝土柱耐火性能的影响。P. C. R. Joao等<sup>[6]</sup>通过试验研究了截面形状、长细比、边界条件对钢管空心组合柱的抗火性能影响,发现圆形钢管组合柱的抗火性能最好。

然而,煤矸石混凝土与普通混凝土的热工参数差距较大<sup>[7]</sup>,煤矸石混凝土的热传导率仅为普通混凝土的60%左右,因此两者火灾下温度场分布有较大差异,进而引起抗火性能的不同。为研究火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分布规律,笔者使用ABAQUS软件,通过改变升温时间、截面尺寸、受火方式、含钢率、保护层厚度等参数建立有限元模型,对钢管煤矸石混凝土柱的温度场进行分析,为后续钢管煤矸石混凝土柱的抗火性能研究提供理论基础。

# 1 材料热工参数

## 1.1 钢材的热工参数

### 1.1.1 导热系数

随温度升高钢材导热系数减小,但当温度超过900℃时,导热系数基本不变<sup>[8]</sup>。笔者采用T. T. Lie<sup>[9]</sup>提出的钢材导热系数-温度变化式:

$$k_s = \begin{cases} -0.022T + 48, & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C}; \\ 28.2, & T > 900^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 为温度,℃。

### 1.1.2 比热容和密度

钢材的比热容和密度关系采用T. T. Lie<sup>[9]</sup>提出的密度与比热容相关的分段式:

$$\rho_s c_s = \begin{cases} (0.004T + 3.3) \times 10^6, & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C}; \\ (0.068T - 38.3) \times 10^6, & 650^\circ\text{C} \leq T \leq 725^\circ\text{C}; \\ (-0.086T + 73.35) \times 10^6, & 725^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}; \\ 4.55 \times 10^6, & T > 800^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_s$ 为比热, J/(kg·K);  $\rho_s$ 为密度, kg/m<sup>3</sup>。

### 1.1.3 热膨胀系数

采用T. T. Lie<sup>[10]</sup>提出的钢材热膨胀系数 $\alpha_s$ 和温度 $T$ 之间的分段关系式

$$\alpha_s = \begin{cases} (0.004T + 12) \times 10^{-6}, & T < 1\,000^\circ\text{C}; \\ 1.6 \times 10^{-5}, & T \geq 1\,000^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (3)$$

## 1.2 煤矸石混凝土的热工系数

煤矸石混凝土的导热系数、比热及密度均取自《民用建筑热工设计规范》(GB50176—2016)<sup>[11]</sup>。其中,导热系数为0.76 W/(m·K);比热为1 050 J/(kg·K);密度为1 500 kg/m<sup>3</sup>。

膨胀系数采用T. T. Lie<sup>[10]</sup>提出的不考虑混凝土骨料类型的热膨胀系数 $\alpha_c$ 和温度 $T$ 相关的模型:

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6}. \quad (4)$$

### 1.3 防火涂料的热工系数

防火涂料采用厚涂型钢结构防火涂料<sup>[12]</sup>,其主要热工参数:导热系数 $\lambda = 0.116$  W/(m·K),密度 $\rho = 400$  kg/m<sup>3</sup>,比热 $c = 1.047 \times 10^3$  J/(kg·K)。

2 非线性有限元分析

2.1 导热微分方程

火灾下,钢管和混凝土的热工参数多与温度相关,钢管混凝土柱的热传导问题为非线性瞬态问题,其微分方程为抛物线型偏微分方程。实际应用中钢管混凝土柱在长度方向远大于截面直径,因此可以认为温度沿长度方向均匀分布,将三维温度场问题转化为二维问题。导热方程简化为<sup>[13]</sup>

∂θ/∂t = λ/(ρc) \* (∂²θ/∂x² + ∂²θ/∂y²) (5)

式中:θ为截面瞬态温度,℃,是x、y和t的函数;t为导热时间,s;ρ为密度,kg/m³;x、y为截面坐标,m;c为热容,J/(kg·℃);λ为导热系数,W/(m·K)。

2.2 定解条件

(1) 初始条件

火灾发生前,构件的温度与环境温度相同,且温度均匀,因此初始条件可以表示为

T(x,y,t=0) = T₀ (6)

(2) 边界条件

对流边界条件:

-λ \* ∂θ\_b/∂n|\_Γ = h \* (θ\_b - θ\_f)|\_Γ (7)

热辐射边界条件:

-λ \* ∂θ\_b/∂n|\_Γ = εσ \* [(θ\_b + 273)⁴ - (θ\_f + 273)⁴] (8)

式中:Γ为物体边界;θ\_b为边界温度,℃;θ\_f为与物体相接触的热流介质温度,℃;h为换热系数,W/(m²·℃);n为边界外法线方向;ε为综合辐射系数;σ为斯忒藩-玻耳兹曼常数,取5.67 × 10⁻⁸ W/(m²·K⁴)。

升温曲线采用ISO-834标准升温曲线。受火面和非受火面与外界热交换的方式均为热对流和热辐射,按第三类边界条件考虑。对流换热系数和综合辐射系数取自欧洲规范<sup>[15]</sup>,对流换热系数h = 25 W/(m²·℃),综合热辐射系数ε = 0.5。

接触热阻对构件温度场影响较小,并且以往对接触热阻的研究没有统一论<sup>[14]</sup>,因此笔者未考虑接触热阻带来的影响。

为保证钢管和煤矸石混凝土间的不间断热传递,各部件之间采用tie接触,模型网格单元及接触关系如图1所示。

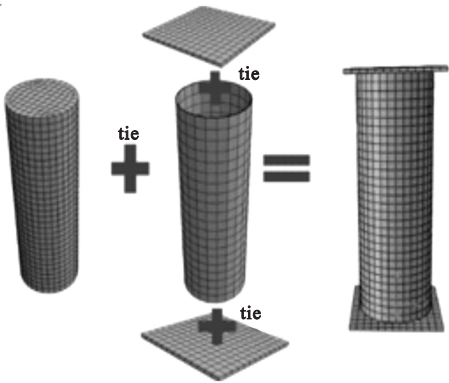


图1 网格单元划分和部件接触示意图  
Fig.1 Schematic diagram of mesh division and contact between components

2.3 模型验证

笔者选取文献[16]中的3个测点温度变化曲线进行有限元验证,升温曲线有限元与试验对比如图2所示。从图中可以看出,钢管计算温度与试验结果吻合度较高,混凝土计算结果与试验结果稍有差异,主要是因为升温至100℃左右时,由于水分的蒸发吸热造成升温滞后现象。

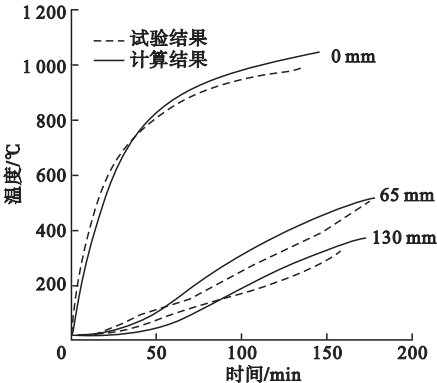


图2 升温曲线  
Fig.2 Temperature-time curves

试验与模拟结果比值的平均值为 0.933。可见整体上试验结果和有限元计算结果吻合良好,验证了文中建模方法对模拟钢管混凝土柱温度场的有效性。

3 典型构件分析

在验证了理论分析模型正确性的基础上,建立了火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱

的温度场计算模型,对标准火灾作用下钢管煤矸石混凝土柱的温度场进行计算。并考虑升温时间、混凝土种类、构件尺寸、保护层厚度及受火方式等参数建立了 14 个模型进行参数分析,具体参数见表 1。选用典型构件 S5C20-1、S5C20-3、S5C20-8 进行不同受火场景分析。

表 1 构件参数

Table 1 Details of components

构件名称	钢管壁厚/mm	混凝土半径/mm	保护层厚/mm	混凝土类型	受火方式
S5C20-1	5	200	—	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-2	5	200	—	普通混凝土	均匀
S10C20	10	200	—	煤矸石混凝土	均匀
S15C20	15	200	—	煤矸石混凝土	均匀
S20C20	20	200	—	煤矸石混凝土	均匀
S5C15	5	150	—	煤矸石混凝土	均匀
S5C25	5	250	—	煤矸石混凝土	均匀
S5C30	5	300	—	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-3	5	200	5	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-4	5	200	10	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-5	5	200	15	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-6	5	200	20	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-7	5	200	5	煤矸石混凝土	均匀
S5C20-8	5	200	—	煤矸石混凝土	单面

注:构件 S5C20 表示构件钢管壁厚 5 mm、核心混凝土直径 20 cm,其余类同。

图 3 为构件 S5C20-1 受火 180 min 时的温度分布曲线。

从图中可以看出,无防火保护层构件在四周均匀受火状态下,横截面等温线为一系列同心圆,环向温度一致,但沿半径方向温差较大,由钢管表面向混凝土核心递减,其中钢管内外表面温度基本一致,而混凝土部分温差较大,最外层与核心混凝土温差超过 900 ℃。

图 4 为构件 S5C20-3 受火 180 min 时的温度分布曲线。从图中可以看出,有防火保护层的构件温度场分布规律与无防火保护层构件类似,横截面等温线为一系列同心圆,环向温度一致,半径方向温差较大,但由于防火层吸收大量热量,整个构件截面温度比无防火保护层构件约低 30%,温度梯度更小。

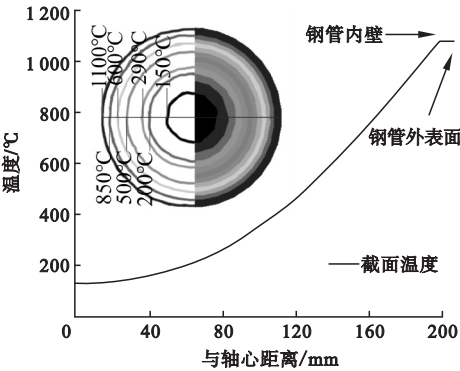


图 3 S5C20-1 横截面温度分布

Fig. 3 Cross-sectional temperature distribution of S5C20-1

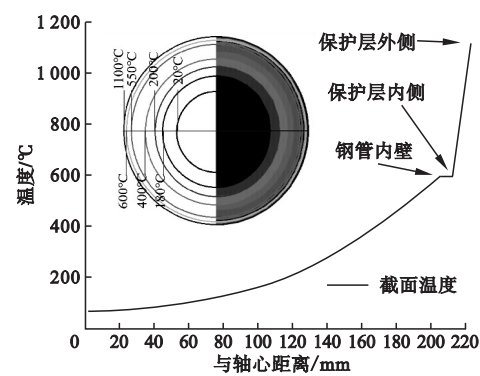


图4 S5C20-3 横截面温度分布

Fig.4 Cross-sectional temperature distribution of S5C20-3

均匀受火时截面温度场为圆环状,而单面受火状态下构件的截面温度场为单轴对称,其低温区域由截面几何中心向非受火面发生偏移。构件 S5C20-8 最低温度出现在截面中心右侧 4 cm 处(见图 5)。

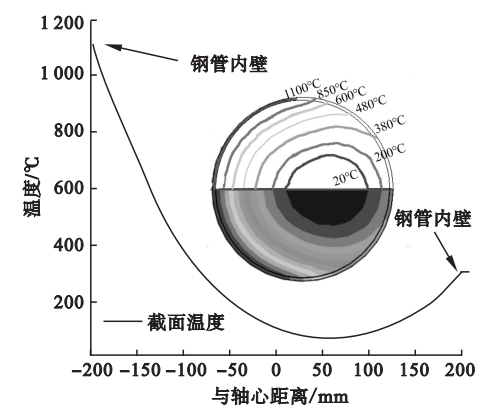


图5 S5C20-8 横截面温度分布

Fig.5 Cross-sectional temperature distribution of S5C20-8

4 参数分析

为进一步研究温度场的分布规律,在构件横截面选取图 6 所示特征点展开分析:混凝土外表面 S1、距轴心 1/4 半径处 S2、距轴心 1/2 半径处 S3 和轴心 S4。

4.1 升温时间

升温时间对钢管及核心混凝土各部位的温度场影响曲线如图 7 所示。由图可见,各位置温度随火灾时间增加均有不同程度增加。

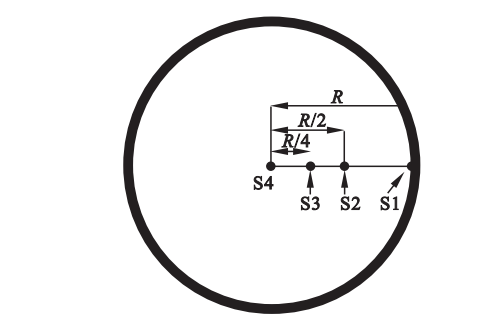


图6 特征点分布

Fig.6 Characteristic points distribution of section

其中钢管由于比热容小、导热系数大,所以其内外表面温差较小,约 50 °C 左右;而混凝土比热大、导热系数小造成温度梯度较大,外表面温度达到 1 000 °C,核心处仅有 163 °C,温差达到 837 °C,外表面温度超过核心处温度的 6 倍。随火灾时间增加,钢管前期升温较快并逐渐减缓;核心混凝土出现前期升温较慢后期升温加快的升温滞后现象。可见升温时间是影响温度场分布的重要因素。

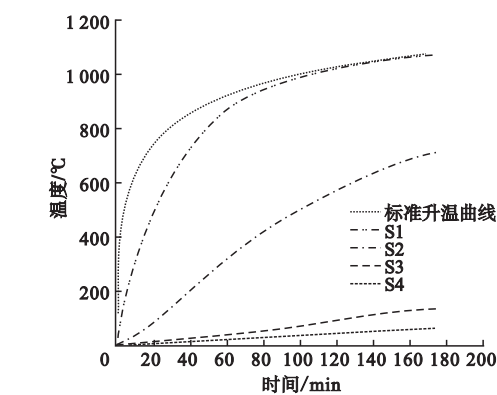


图7 温度随时间变化曲线

Fig.7 Influence of heating time on temperature-time curves

4.2 混凝土种类

标准火灾下钢管煤矸石混凝土柱与普通钢管混凝土柱的升温曲线如图 8 所示。由图可见,火灾中,两构件钢管温度基本一致,核心混凝土柱的温差较大,且随火灾时间增加温差迅速变大,其中混凝土核心处两构件温差最大。火灾 180 min 时钢管煤矸石混凝土柱中 S2、S3、S4 三点温度分别比普通钢管混凝土柱低 10%、51.9%、66.9%。可见钢管



煤矸石混凝土构件整体温度更低、升温更慢, 钢管煤矸石混凝土柱的耐火性能更好。

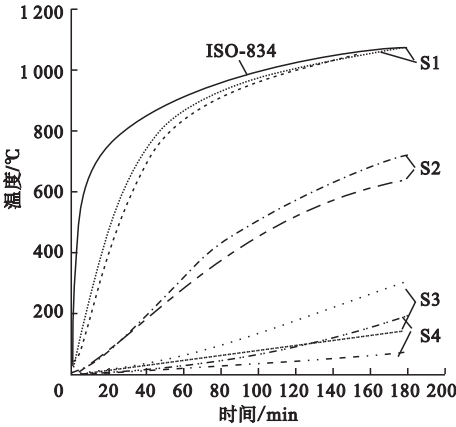


图8 温度变化曲线

Fig. 8 Influence of concrete type on temperature-time curves

4.3 含钢率的影响

含钢率对钢管煤矸石混凝土柱温度场分布影响规律如图9所示, 其中钢管厚度为5 mm、10 mm、15 mm、20 mm, 对应含钢率为5.1%、10.25%、15.6%、20%。从S1曲线可以看出, 钢管内壁最大温差仅有7℃左右, 这是由于钢管有较高的热传导率, 其温度主要与接触介质的温度有关, 即钢管温度主要取决于环境温度。含钢率的变化对核心混凝土的温度影响较小, 每5 mm壁厚带来的温度降低幅度不超过5.21%。可见含钢率的变化对构件的温度场分布影响很小。

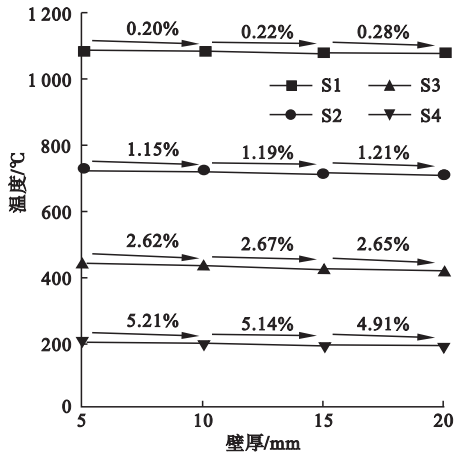


图9 温度随含钢率变化曲线

Fig. 9 Temperature-steel content curves

4.4 截面尺寸

不同截面尺寸下钢管煤矸石混凝土柱的温度场分布如图10所示, 其中核心混凝土截面半径取100~250 mm。由图可见, 随截面尺寸增大, 钢管温度变化很小, 截面半径增加50 mm, 钢管温度仅下降3~4℃, 最大降幅为0.35%, 而核心混凝土温度急剧下降, 半径每增加50 mm, 核心混凝土中心处温度分别降低282℃、128℃、46℃, 降低幅度超过50%。分析原因是因为煤矸石混凝土体积的增加, 构件导热更慢、吸热更多, 所以随截面尺寸增大核心混凝土的温度大幅降低。因此, 截面尺寸是通过影响构件温度场, 进而影响构件承载力的重要因素, 进行抗火性能研究时需重点分析。

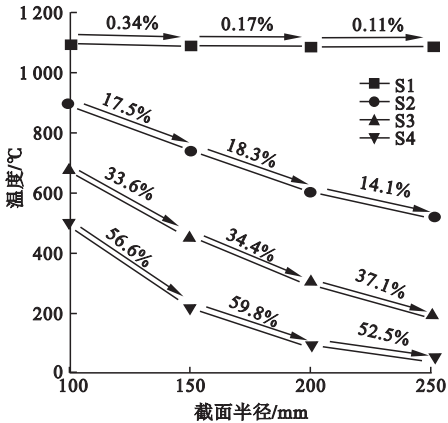


图10 温度随截面尺寸变化曲线

Fig. 10 Temperature-section size curves

4.5 防火保护层

不同厚度的厚涂型钢结构防火涂料保护下钢管煤矸石混凝土柱的温度变化曲线如图11所示。从图中可以看出, 截面温度随防火涂料厚度增加而降低, 降低幅度逐渐减小, 每增加5 mm、防火涂料产生的钢管内表面降温幅度分别为19.7%、22.7%、18.1%、14.2%, 截面中心处降温幅度分别为38.4%、27.7%、18.1%、13.0%。构件整体温度降幅较大, 因此防火保护层是影响构件温度场分布的重要因素。另外, 从图中可以看出, 当防火涂料厚度大于15 mm时, 温度

降低幅度减小,隔热效果提升幅度降低。

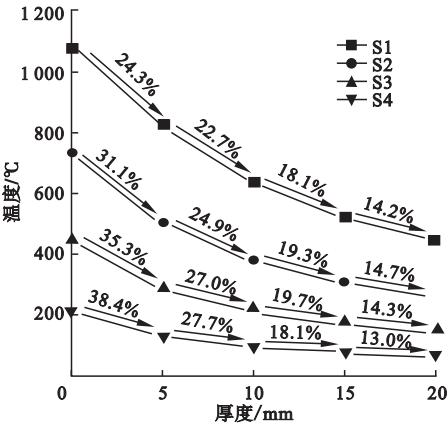


图 11 温度随防火层厚度变化曲线

Fig. 11 Temperature-fire-proof layer thickness curves

为了避免防火涂层带来的截面面积变大造成的影响,将涂有 5 mm 防火保护层与涂有 5 mm 砂浆的钢管煤矸石混凝土柱温度进行对比,结果如图 12 所示。从图中可以看出,对于 S2 点,升温 30 min 时温差为 26 ℃,有防火保护层构件温度减小了 30.6%; 120 min 时温差为 167 ℃,有防火保护层构件温度减小了 31.99%。可见防火涂料对构件温度场的影响远大于截面尺寸的影响,且影响程度随火灾时长增加不断增加。

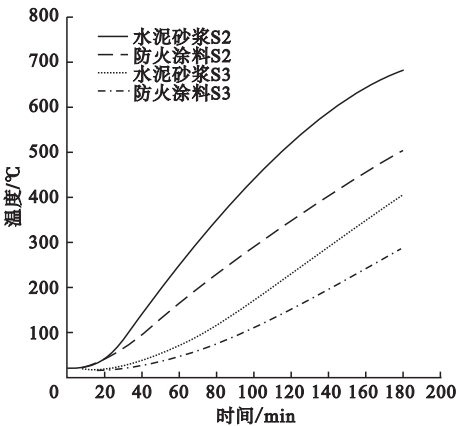


图 12 温度随时间变化曲线

Fig. 12 Temperature-time curves

4.6 受火方式

为了对比均匀受火与单面受火的差别,计算了相同条件下钢管煤矸石混凝土柱单面

受火的温度场。单面受火构件的温度场为单轴对称分布(见图 13),低温区域向背火面偏离,升温 180 min 时偏移到距离截面中心 4 cm 处。

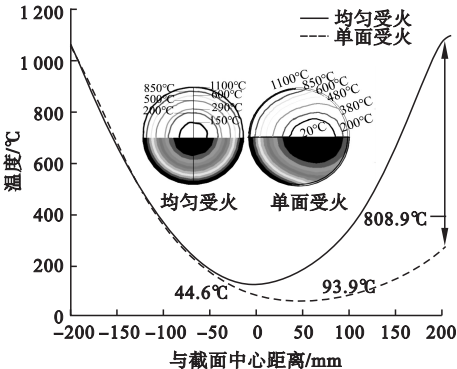


图 13 截面温度

Fig. 13 Cross section temperature

两种受火方式钢管最大温差发生在背火面中点处,温差达到 800 ℃。截面中心处温差有 44.6 ℃,升温 180 min 时单面受火构件温度低于 300 ℃的面积超过 40%,而四周均匀受火状态下构件低于 300 ℃的面积仅有不足 20%。

从温度场可见单面受火构件的整体温度小于均匀受火构件,单面受火状态下材料劣化程度远小于均匀受火。

5 结 论

(1)钢管煤矸石混凝土柱温度场分布规律与普通钢管混凝土柱类似,截面环向温度场均匀分布,半径方向存在温度梯度,但钢管煤矸石混凝土柱升温更慢,与普通钢管混凝土柱相比截面整体温度更低,火灾 180 min 时两者最大温差达 66.9%。

(2)升温时间、截面尺寸、防火保护层厚度和受火方式是影响钢管煤矸石混凝土柱温度场分布的重要因素。其中保护层厚度对温度场的影响大于截面尺寸,但防火保护层厚度大于 15 mm 时,隔热效果提升幅度减小,经济性变差。

(3)单面火灾作用下钢管煤矸石混凝土

柱截面温度场为单轴对称,低温区域向非受火面发生偏移,截面温度低于四面火灾作用。

# 参考文献

- [1] 李幅昌,王兆强,邵玉梅. 钢管煤矸石混凝土受弯构件的承载力分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(6):654-657.  
(LI Guochang, WANG Zhaoqiang, SHAO Yumei. Bearing capacity of gangue concrete filled steel tubular member under moment [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(6): 654-657.)
- [2] 李幅昌,赵柏冬. 钢管煤矸石混凝土受弯构件的受力全过程分析[J]. 钢结构,2003,18(1):19-21.  
(LI Guochang, ZHAO Baidong. Analysis of deflecting process of gangue concrete-filled steel tubular member under moment [J]. Steel structure, 2003, 18(1): 19-21.)
- [3] 韩林海,宋天谕,谭清华. 钢-混凝土组合结构抗火设计原理研究[J]. 工程力学,2011,28(增刊2):54-66.  
(HAN Linhai, SONG Tianyi, TAN Qinghua. Fire resistance design of steel-concrete composite structures [J]. Engineering mechanics, 2011, 28(S2): 54-66.)
- [4] 李国强,韩林海,楼国彪,等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.  
(LI Guoqiang, HAN Linhai, LOU Guobiao, et al. Fire resistance design of steel structure and steel concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006.)
- [5] 邱仓虎,王广勇,王力. 端部约束钢管混凝土柱耐火性能及抗火设计方法[J]. 北京工业大学学报,2016,42(7):1037-1044.  
(QIU Canghu, WANG Guangyong, WANG Li. Fire performance and fire resistance design method for end restrained concrete filled steel tube column [J]. Journal of Beijing university of technology, 2016, 42(7): 1037-1044.)
- [6] JOAO P C R, LAIM L. Fire response of restrained composite columns made with concrete filled hollow sections under different end-support conditions [J]. Engineering structures, 2017, 141: 83-86.
- [7] 皇民,赵玉如,蔺世豪,等. 全级配煤矸石混凝土导热性能试验与分析[J]. 科学技术与工程,2021,21(3):1144-1149.  
(HUANG Min, ZHAO Yuru, LIN Shihao, et al. Test and analysis of thermal conductivity of full-grade coal gangue concrete [J]. Science technology and engineering, 2021, 21(3): 1144-1149.)
- [8] 张玉琢,吕学涛,刘发起,等. 单面受火的方钢管约束钢筋再生混凝土柱耐火极限[J]. 建筑结构学报,2018,39(增刊1):175-182.  
(ZHANG Yuzhuo, Lü Xuetao, LIU Faqi, et al. Fire resistance of square steel tube confined reinforced recycled concrete column in one-surface fire [J]. Journal of building structures, 2018, 39(S1): 175-182.)
- [9] LIE T T. Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, ASCE, 1994, 120(5): 1489-1509.
- [10] LIE T T, IRWINR J. Fire resistance of rectangular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural engineering, 1995, 121(5): 797-805.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑热工设计规范:GB50176—2016 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil buildings: GB50176—2016 [S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2016.)
- [12] 宋谦益. 建筑钢结构防火设计规范及要点[J]. 建筑结构,2020,50(24):1-10.  
(SONG Qianyi. Codes and key point for fire safety of steel structures in buildings [J]. Building structure, 2020, 50(24): 1-10.)
- [13] 杨华,吕学涛,张素梅. 单面受火的矩形钢管混凝土柱截面温度场分析[J]. 天津大学学报,2010,43(5):392-399.  
(YANG Hua, Lü Xuetao, ZHANG Sumei. Temperature distribution of concrete-filled steel tubes with rectangular crosssections in exposure to one-side fire [J]. Journal of Tianjin university, 2010, 43(5): 392-399.)
- [14] 张宏涛,高明旭,于媛福. 高温下钢管自密实混凝土界面接触热阻试验研究[J]. 实验力学,2016,31(5):584-592.  
(ZHANG Hongtao, GAO Mingxu, YU Yuanfu. Experimental study of thermal contact resistance on the interface between steel tube and self-compacting concrete at high temperature [J]. Experimental mechanics, 2016, 31(5): 584-592.)
- [15] European Committee for Standardization (CEN). BS EN 1994-1-2, Eurocode 4 - design of composite steel and concrete structures (Part 1/2), general rules-structural fire design [S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [16] LIE T T, CHABOT M. Experimental studies on the fire resistance of hollow steel columns filled with plain concrete [R]. Ottawa: NPC-CNRC Internal Report, 1992.  
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)