



钢混凝土界面接触热阻试验研究

张宏涛, 徐冰, 白玉星, 双 妙

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘 要:火灾条件下钢管与混凝土界面热阻对结构温度场有很大影响。利用 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温接触热阻试验装置对钢-混凝土界面接触热阻进行了试验研究,根据各测点的温度时间历程曲线,利用多项式拟和方法外推得到钢、混凝土界面处温度值,通过热传导方程和接触热阻定义得到了界面接触热阻。试验结果表明,不同界面压力下钢管混凝土界面的接触热阻数值比较稳定,与文献结果相比有一定可靠性;无界面压力下钢管混凝土界面的接触热阻数值离散性大,随温度变化明显。

关键词:钢管混凝土;界面接触热阻;火灾;界面压力

中图分类号: TU352.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)02-0034-05

Experimental analysis of interface thermal contact resistance between steel and concrete

Zhang Hongtao, Xu Bing, Bai Yuxing, Shuang Miao

(College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, P. R. China)

Abstract: Under Fire conditions, the interface thermal resistance between steel and concrete has important influence on structure temperature field. The INSTRON 8874 material testing machine for high temperature thermal contact resistance testing device was used to conduct the thermal contact resistance experiments of steel and concrete interface. According to the time history curve of each measuring point's temperature, the interface temperature near steel and near concrete was obtained using the polynomial fitting and extrapolation method. The interface thermal contact resistance was calculated by heat conduction equation and definition of thermal contact resistance. The test results showed that under different interface pressure, the thermal contact resistance value was constant and comparatively consistent with the literature; Without interface pressure, the thermal contact resistance value was unstable and varied obviously with temperature.

Key words: concrete filled-steel tube; thermal contact resistance; under fire conditions; interface pressure

收稿日期: 2014-08-28

基金项目: 北京市自然科学基金-北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201310009010)

作者简介: 张宏涛(1978-),男,副教授,主要从事结构抗火研究,(E-mail)zhanght@ncut.edu.cn。

Received: 2014-08-28

Foundation item: Natural Science Foundation of Beijing and Key Project of Science and Technology Program of Beijing Municipal Commission of Education(No. KZ201310009010)

Author brief: Zhang Hongtao(1978-), associate professor, main research interest: fire resistance of structure, (E-mail) zhanght@ncut.edu.cn.

接触热阻是由于固体表面间接触不紧密造成的,当发生热量传递时,上述非紧密接触的界面将产生热阻。在航空航天和机械工程领域,对接触热阻进行了大量的理论、试验和数值研究^[1-7],这些研究一般对界面模型的精细程度和接触热阻值精度要求比较高。而对于土木工程材料,尤其是混凝土材料的特殊性,土木结构界面的接触热阻研究还比较少。

火灾(高温)条件下钢管与混凝土间界面热阻对结构温度场有很大影响,而温度场分析对进一步认识钢管混凝土结构的高温力学性能和耐火极限有重要作用。钢管混凝土接触热阻是由于钢管和混凝土交界面处接触不紧密造成的。接触热阻的存在减小了钢管传向核心混凝土的热流,导致钢管升温加快而混凝土升温减慢,从而使得钢管内壁与混凝土表面间存在明显的温度跃变。在计算中若不考虑界面接触热阻,则钢管内壁和混凝土表面温度相同,这将导致钢管温度计算值偏低,混凝土计算值偏高。为了得出准确的温度场分布,需考虑钢管与混凝土界面接触热阻。

齐哈兵^[8]用防护热板法和圆管法分别对钢管混凝土界面接触热阻进行了测定。Ghojel^[9]对未加载的圆钢管混凝土构件的接触热阻进行了试验研究和数值分析,试验结果发现在钢管混凝土不同方向测量得到的热阻差别很大,因此最终取值为各个方向的平均值。这说明接触热阻大小与界面接触的紧密程度和材料的物理参数等密切相关,研究界面接触热阻可取宏观平均值。同时,考虑到钢管混凝土柱承受荷载后其界面空隙有所增大,还提出了受荷后钢管混凝土中钢管与混凝土的接触热阻为未受荷时的 12 倍。中国还有多位学者^[10-14]提出了钢管混凝土界面接触热阻的经验公式和理论解,但运用起来比较复杂。同时研究也表明,接触热阻的存在对结构温度场分布影响比较大。

从以上钢管混凝土界面接触热阻研究结果看出,界面接触热阻取值研究由于不够充分,现在还没有统一的取值。本文应用基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温接触热阻试验装置对钢管混凝土界面热阻进行测定,利用该仪器已经进行了 C/C 复合材料与高温合金 GH600 之间高温接触热阻的试验研究^[15],对钢-混凝土界面接触热阻的研究目的是探讨能否为钢管混凝土温度场计算提供合理的热阻取值。

1 高温下钢混凝土接触热阻试验方法

1.1 试验原理

试验的基本原理是将圆柱型的钢、混凝土试件

在一定压力下轴向接触,如图 1 所示。钢试件的一部分位于加热炉中,对其进行加热,混凝土低温端强制冷却,位于炉子上部的试件侧向做绝热处理,使热流自下而上流动。通过测量试件沿轴向不同位置的温度,进而可计算求得钢、混凝土界面接触热阻。

试验测点布置如图 1 所示。测点按位置从上到下标识为“1, 2, 3, 0, 4, 5, 6”,各测点间的距离如表 1,其中界面位置标为 0。通过测温仪可测得不同时刻各测点的温度。由不同时刻钢、混凝土各测点温度进而可以用最小二乘法分别拟合外推得到不同时刻钢、混凝土界面的温度 T_s 、 T_c ,从而求得界面处温度跃变 ΔT 。

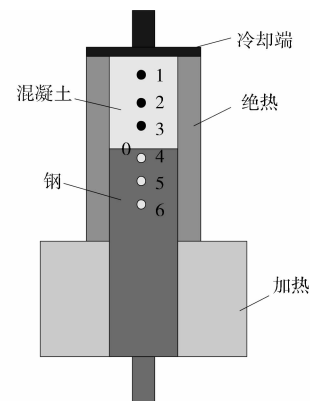


图 1 试验原理示意图

Fig. 1 The diagram of the experimental principle

表 1 各测点的位置

Table 1 The location of the test points

测点	间距/mm
1~2	10
2~3	10
3~0	10
0~4	4
4~5	8
5~6	8

$$\Delta T = T_s - T_c \quad (1)$$

为了求得接触热阻,根据接触热阻 R 的定义

$$R = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_s - T_c}{\frac{q_s + q_c}{2}} \quad (2)$$

界面处的热流密度 q 可取不同时刻界面处钢和混凝土的热流密度 q_s 、 q_c 平均值。热流密度的确定可以通过热传导逆分析^[9]得到或者热传导方程^[15]直接得到,本文利用第 2 种方法计算。根据热传导方程 $q = -k \frac{\partial T}{\partial x}$,近似取钢界面处和混凝土界面处热流密

度 q_s 和 q_c

$$q_s = -k_s \frac{T_0 - T_4}{\Delta x_{04}}, q_c = -k_c \frac{T_3 - T_0}{\Delta x_{30}} \quad (3)$$

根据 Lie 等^[17]的建议,混凝土的导热系数 k_c 采用式(4)进行计算,导热系数的单位为 $W/m \cdot K$ 。

$$k_c = \begin{cases} 1.355 & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 293^\circ\text{C} \\ -0.001241T + 1.7162 & T \geq 293^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

钢材的导热系数 k_s 为

$$k_s = \begin{cases} 48 - 0.022T & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \\ 28.2 & T \geq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 试验简介

试验采用清华大学力学实验室的基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温接触热阻试验装置,如图 2 所示。整个装置由加热装置、保温装置、测温装置、冷却装置、加载装置及试件等组成。



图 2 基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温接触热阻试验装置

Fig. 2 The high temperature thermal contact resistance testing device based on INSTRON 8874 testing machine

混凝土试件采用 C30 自密实混凝土,水泥是 42.5 硅酸盐水泥,粉煤灰是 II 级粉煤灰,粗骨料是豆石(5~20 连续级配),细骨料是河砂,外加剂是聚羧酸高性能减水剂。配比为水泥 210 kg/m^3 ,粉煤灰 360 kg/m^3 ,石子 870 kg/m^3 ,砂子 650 kg/m^3 ,水 200 kg/m^3 ,减水剂 2.5 kg/m^3 。首先浇筑 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$ 的混凝土试块,养护到 7 d 时,用水钻取芯,水钻钻头为 $\phi 32$ 。取出的混凝土芯直径 29 mm,高 150 mm。取出混凝土芯后,用混凝土切割机将其切断,并用角向磨光机将混凝土表面打磨平整,得到所需尺寸的混凝土试件。然后将试件置于钻床上,在试件侧向打孔,以便插入热电偶测温。打完孔之后,继续养护至 28 d。混凝土试件直径 29 mm,高 40 mm,侧向测温孔直径 3 mm,侧向的测温孔深入到试件中心处。钢试件采用 Q345 钢,试件直径为 30 mm,高 115 mm(不包括试件夹持部分),测温孔直径 3 mm,深入到试件中心处,试件如图 3 所示。



图 3 混凝土试件和钢试件

Fig. 3 Test specimen of concrete and steel

2 试验结果与分析

为了对比分析钢-混凝土在不同界面压力下接触热阻随温度的变化规律,分别利用压力加载装置测得了加载值为 0、0.5、1、3 和 6 kN(分别对应界面压力为 0、0.76、1.51、4.54、9.08 MPa)时的接触热阻试验结果。根据钢管混凝土实际工作状态,有界面压力表明钢管和混凝土界面没有分离而且紧密接触,无界面压力表明钢管和混凝土界面没有压力,但是没有分离。

根据试验原理,首先需要测得在不同界面压力时图 1 试件中各测点的温度时间历程曲线,见图 4,然后利用多项式拟和方法外推得到钢、混凝土界面处不同时刻的温度值。由于测点温度变化的高度非线性,为尽量保证界面外推温度的可靠性,测点温度的取值以温度时间历程曲线平稳变化开始,比如图 4 中测点 1,温度起始值为 35°C 。图 4 中 250 s 之前混凝土界面温度利用 1、2、3 点温度值拟和 2 次多项式得到,250 s 之后(比如 500 s 时)混凝土界面温度可以利用此时刻测点 1、2、3 的温度建立 3 次多项式和 500 s 之前混凝土界面温度值建立 5 次多项式利用规划求解得到 500 s 混凝土界面温度,然后根据界面处的温度值,利用式(3)得到界面处的热流密度,然后代入式(2)得到界面接触热阻。

为简洁,图 4~图 7 只列出了钢-混凝土界面压力为 0 MPa 时,各测点的温度时间历程。图中实线表示通过热电偶测得的各测点不同时刻的温度值,虚线表示由所测值拟合外推得到的钢、混凝土界面处不同时刻的温度值。由以上所得的温度,可求得各试件接触热阻随钢界面温度和不同界面压力下的数值,变化曲线如图 8 所示。图 8 中“0 MPa-1”表示界面压力为 0 MPa 时,第 1 个试件测得的接触热阻值,由于数据离散性较大,取 0 MPa 时 4 个试件接触热阻的平均值做出一条曲线,标示在图中为“0 MPa”。

从温度时间历程曲线可以得到,钢混凝土界面温差一直存在而且比较大。由于无界面压力情况下,界面间隙较有压力时大,计算所得的界面温差也较受压时大。无界面压力情况下,界面最大温差平均值为 139。由于温差受界面粗糙度影响较明显,所以,受压时

界面温差最大值有一定的离散性,界面压力为 0.76 MPa 时界面最大温差平均值为 80,1.51 MPa 时为 58,4.54 MPa 时为 68,9.08 MPa 时为 82。

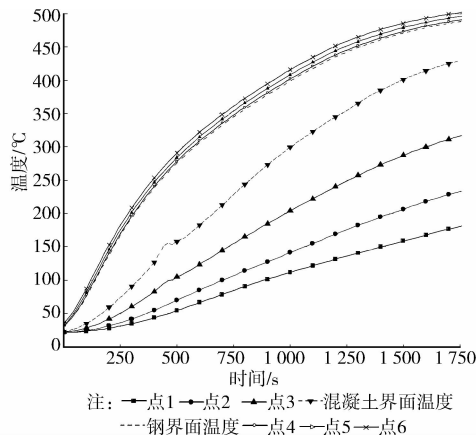


图 4 界面压力为 0 MPa 试件 1 温度时间历程
Fig. 4 The temperature-time history of specimen 1 of interface pressure 0 MPa

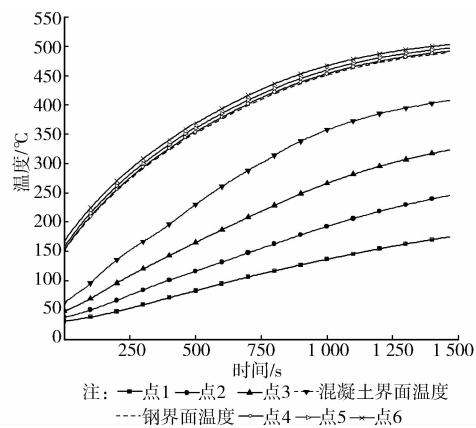


图 5 界面压力为 0 MPa 试件 2 温度时间历程
Fig. 5 The temperature-time history of specimen 2 of interface pressure 0 MPa

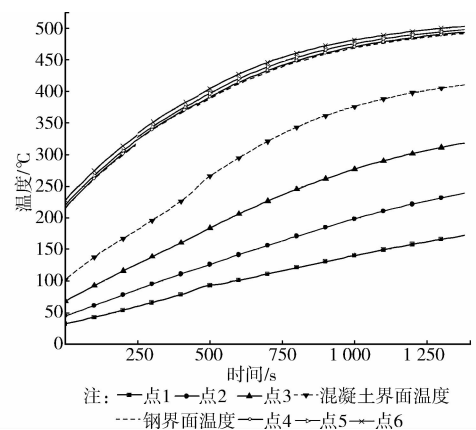


图 6 界面压力为 0 MPa 试件 3 温度时间历程
Fig. 6 The temperature-time history of specimen 3 of interface pressure 0 MPa

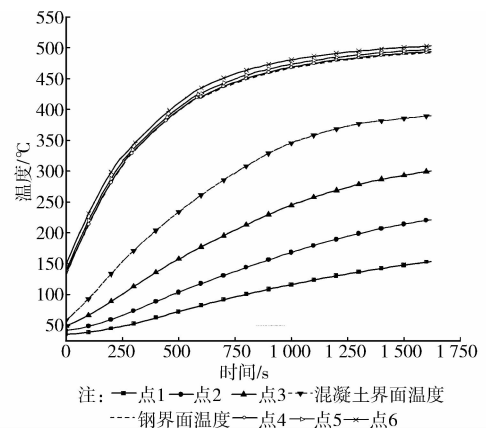


图 7 界面压力为 0 MPa 试件 4 温度时间历程
Fig. 7 The temperature-time history of specimen 4 of interface pressure 0 MPa

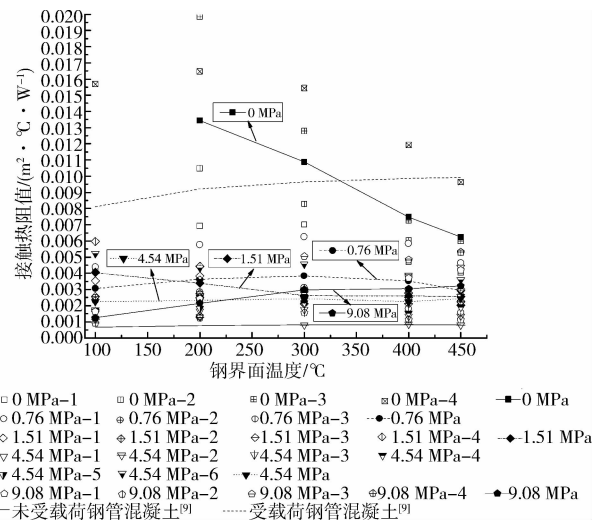


图 8 不同界面压力下接触热阻随钢界面温度的变化
Fig. 8 The contact thermal resistance with different interface pressure and steel interface temperature

从接触热阻结果看出,当无界面压力时,随着界面平均温度的升高,接触热阻逐渐减小。这与李冬欢等^[15]对金属和复合材料界面的接触热阻变化规律比较一致,原因可能是由于界面间辐射效应增强和空气热导率的升高,接触热阻开始降低。但当存在界面压力时,接触热阻值变化很小,即使界面压力从 0.76 MPa 到 9.08 MPa,热阻值随温度变化也不大,平均值保持在 0.001~0.004 m²·°C/W,而未受载荷时钢管混凝土界面接触热阻,Ghojel^[9]的结果是 0.000 5~0.000 8 m²·°C/W,齐哈兵^[8]的结果是 0.004 m²·°C/W。同时,把 Ghojel 根据试验推导的未受载荷和受载荷时钢管混凝土界面接触热阻的经验公式结果表示在图 8 中,本文的试验结果基本落在 Ghojel 的范围内,但是由于受载荷时 Ghojel 认为界面会有分离,所以他简单估计受载荷时界面接触热阻为未受载时的 12 倍。

从试验数据的离散性来看,没有界面压力时,结果离散性比较大,同一温度下不同试件接触热阻值变化范围最大为 $0.006\sim 0.02$,说明界面空隙和紧密程度对接触热阻影响很大。当有界面压力时,即使只有 0.76 MPa ,接触热阻值变化范围最大为 $0.002\sim 0.006$,离散性比较小,说明有界面压力下,钢管混凝土界面接触热阻值还是比较可靠的。

综合以上分析,接触热阻在界面不受压力时数值较大,并且随温度变化影响明显。界面受压力后,热阻减小,并且受温度影响较小。根据钢管混凝土的实际工作状态和便于工程应用,本文建议钢管与混凝土界面没有压力同时没有分离时的接触热阻值可近似取 $0.013(200\text{ }^{\circ}\text{C})\sim 0.006(450\text{ }^{\circ}\text{C})\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$,随温度线性变化,对于界面有分离的情况建议根据分离情况取文献[9-10]的 $0.003\sim 0.01\text{ m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$;钢管与混凝土界面有压力的接触热阻由于受温度影响较小,结合齐哈兵^[8]的结果 $0.004\text{ m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$,建议取试验结果平均值 $0.003\text{ m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

3 结论

基于 INSTRON 8874 型高温材料试验机的高温接触热阻试验装置对钢混凝土界面接触热阻进行测定,结果表明,试验结果与文献结果相比具有一定可靠性。钢与混凝土界面有压力的试验结果与文献结果比较接近,钢与混凝土界面没有压力时界面接触热阻值离散性较大,而且受温度影响比较大。试验结果可以为钢管混凝土温度场计算提供热阻取值。

参考文献:

- [1] 张平,宣益民,李强. 界面接触热阻的研究进展[J]. 化工学报,2012,63(2):335-349.
Zhang P, Xuan Y M, Li Q. The development of thermal contact resistance [J]. CIESC Journal, 2012, 63(2): 335-349. (in Chinese)
- [2] Wang A L, Zhao J F. Review of prediction for thermal contact resistance [J]. Science China Technological Science, 2010, 53: 1798-1808.
- [3] 毕冬梅,陈焕新,王钊,等. 温度及加载压力对低温下固-固接触热阻的影响[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(5):128-132
Bi D M, Chen H X, Wang Z, et al. Influence of temperature and pressure on solid to solid thermal contact resistance [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(5): 128-132.
- [4] 袁超,付星,罗小兵. 含有热界面材料的界面热阻模型[J]. 工程热物理学报,2013,34(4):746-750
Yuan C, Fu X, Luo X B. An interface resistance model of thermal interstitial materials [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(4): 746-750. (in Chinese)
- [5] Fiedler T, White N, Dahari M, et al. On the electrical and thermal contact resistance of metal foam [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 72: 565-571.
- [6] Goudarzi K, Ramezani S R, Zendehebudi G. Estimation of thermal contact resistance in fin-tube heat exchanger using inverse heat transfer methods [J]. European Journal of Computational Mechanics, 2013, 22(5/6): 237-253.
- [7] Zhang P, Xuan Y M, Li Q. A high-precision instrumentation of measuring thermal contact resistance using reversible heat flux [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 54: 204-211.
- [8] 齐哈兵. 高温(火灾)作用下钢管混凝土温度场研究[D]. 黑龙江 大庆:大庆石油学院,2003.
- [9] Ghajel J. Experimental and analytical technique for estimating interface thermal conductance in composite structural elements under simulated fire conditions [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28: 347-354.
- [10] 贺军利. 钢管混凝土柱耐火性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1998.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 2版. 北京:科学出版社,2007.
- [12] 韩金生,董毓利,丛术平,等. 火灾下钢管混凝土柱受热分析模型[J]. 特种结构,2009(4):29-34.
Han J S, Dong Y L, Cong S P, et al. The thermal model of concrete-filled steel tube column under fire [J]. Special Structures, 2009(4): 29-34. (in Chinese)
- [13] 张江彬,徐赵东,韩金生,等. 接触热阻及热湿耦合作用对火灾下钢管混凝土柱温度场影响的研究[J]. 工程力学,2010,27(9):133-138.
Zhang J B, Xu Z D, Han J S, et al. Study on the effect of thermal contact resistance and coupled heat and moisture on temperature field of CFST columns [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 133-138. (in Chinese)
- [14] 吕学涛,杨华,张素梅. 接触热阻对火灾下组合结构构件截面温度场的影响分析[J]. 自然灾害学报,2011,20(5):111-118.
Lyu X T, Yang H, Zhang S M. Effect of thermal contact resistance on cross-sectional temperature distributions of composite structural members during fire exposure [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(5): 111-118. (in Chinese)
- [15] 刘冬欢,郑小平,黄拳章,等. C/C复合材料与高温合金GH600之间高温接触热阻的试验研究[J]. 航空学报,2010,31(11):2189-2194.
Liu D H, Zheng X P, Huang Q Z, et al. Experimental investigation of high-temperature thermal contact resistance between C/C composite material and superalloy GH600 [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2189-2194. (in Chinese)
- [16] 刘冬欢,王飞,曾凡文,等. 高温接触热阻的有限元模拟方法[J]. 工程力学,2012,29(9):375-379.
Liu D H, Wang F, Zeng F W, et al. Finite element simulation method of high temperature thermal contact resistance [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 375-379. (in Chinese)
- [17] Lie T T, Kodur V. Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. Journal of structural Engineering, 1996, 122(1): 30-36.