

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210419001

不同火灾下建筑常用防火板材隔热性能试验研究*

范光明, 王玲玲, 王卫华

(华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 利用防火板材防护钢构件是钢结构防火的重要措施之一, 而防火板材的隔热性能决定了钢结构的耐火性能, 为了研究建筑领域常用防火板材隔热性能, 以及防火板材受火破坏形态和隔热性能随温度变化的规律, 设计制作了14个防火板隔热性能试件, 在三种火灾工况下对建筑领域常用防火板材进行隔热性能试验。研究表明: (1) 板材受火后的破坏形态和裂纹开展情况都与火灾升温历史有关; (2) 板材受热过程中分解的结合水蒸发吸热是缓解钢板升温的重要影响因素之一; (3) 用ISO 834标准升温下板材温度平台区域的 λ 取值结果来指导其他两种火灾情形下防火构造设计是安全的; (4) 利用板材表面空气温度和钢板温度测试结果获得了板材导热系数, 数值模拟计算与试验结果吻合良好, 验证了采用导热系数测量方法的可靠性; (5) 利用数值模拟与试验相结合的方法, 分析得到石膏板的温度-等效导热系数简化曲线的两个重要敏感参数: 热质传递影响温度区间等效导热系数结束变化的温度点(470 °C)和该温度区间的等效导热系数波谷极值大小。

关键词: 防火板材; 升温机制; 热质传递; 等效导热系数

中图分类号: TU545 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0391-12

Experimental Study on Insulating Properties of Fire-resistant Plates Commonly Used in Building under Different Fire Conditions

FAN Guangming, WANG Lingling, WANG Weihua

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Fire-resistant plate is one of the important measures for fire prevention of steel members. The insulation property of fire-resistant plates determines the fire resistance of steel structure. In order to study the insulation performance and the damage pattern of the commonly used fire-resistant plates in the construction field under different fire conditions, fourteen specimens were tested under three different heating conditions. The results show that: (1) the failure mode and crack development of the plates are related to the heating history; (2) The evaporation related heat absorption of bound water decomposition is one of the important factors in alleviating the temperature rise of steel plates during heating process; (3) It is safe to use the λ value in the plate temperature platform area under ISO-834 standard fire condition to guide the design of fireproof structure in the other two fire situations; (4) The thermal conductivity of plate obtained by using the measured results of air temperature on plate surface and steel temperature agrees well with that of simulation, suggesting that the presented

* 收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308237)、华侨大学中青年骨干教师科技创新资助计划(ZQN-PY414)资助

作者简介: 范光明(1992—), 男, 硕士研究生。主要从事结构抗火方面的研究。E-mail: 786176841@qq.com

通讯作者: 王玲玲(1981—), 女, 副教授, 博士, 硕导。主要从事结构抗火研究。E-mail: 14759@hqu.edu.cn

thermal conductivity measurement method is reliable; (5) Two important sensitive parameters of the simplified temperature-equivalent thermal conductivity curve of gypsum board are obtained by combining numerical simulation with experiment: the final temperature point of the temperature range in which the equivalent thermal conductivity is influenced by heat and mass transfer (470 °C), and the minimum value of the equivalent thermal conductivity in this temperature range.

Keywords: fire-resistant plates; heating regime; heat and mass transfer; effective thermal conductivity

引 言

建筑防火板材因轻质、易加工、装饰功能好、良好隔音与隔热性能等特性,常作为钢结构的防火保护材料,使钢构件的耐火极限达到规范要求^[1],广泛应用于建筑工程、隧道等钢结构的防火保护中。此外,防火板材在受热过程中发生热化学反应,分解释放出大量水份吸收热量,减缓钢结构基体在受热过程中的升温速率,延长钢结构的耐火时间,在提高钢结构的耐火性能中起到了关键作用^[2],且防火板材的隔热性能决定了钢结构耐火性能。因此,在进行钢结构耐火性能理论设计和防护构造形式设计时,明确防火材料性能参数及其在受热过程中的隔热性能变化规律和破坏形式具有重要意义。

近年来,国内外学者对防火板材高温下隔热性能进行了一系列研究,在高温下防火板材密度和比热容测量上,形成了统一的试验方法和试验仪器,但在导热系数测量方法上却存在差异。现今,国内外学者进行防火板材导热系数测量,主要采用两种测量原理:稳态法和瞬态法。在国外,J.R. Mehaffey等^[3]、L. Wullschlegler等^[4]、W.K.Ghazi等^[5]和D.Kontogeorgos等^[6]基于稳态法原理分别利用不同的试验设备测定了石膏板室温到800 °C的导热系数,S. Park等^[7]采用瞬态法原理设计一种试验设备,通过表达式迭代计算得到石膏板连续性的温度-导热系数曲线,这种方法避免了稳态方法在热反应区域热量不稳定而无法得到导热系数的问题,并具有明确的导热系数表达式。在国内,彭贝^[8]通过稳态法利用水流平板法导热仪(PBD)测量得到石膏板、硅酸钙板、玻镁板、ALC板在200~900 °C的导热系数,并通过散点拟合得到了四种防火板材导热系数随温度变化的拟合曲线。李献勇^[9]在热线法基础上开发一种瞬态导热系数测定方法,测定了石膏板、玻镁板、ALC板25~900 °C的导热系数,得到三种板材的

温度-导热系数关系曲线。在防火板材的传热数值模拟研究上,D. Kontogeorgos等^[10]对石膏板的热质传递机制进行研究,结果表明,数值模拟需要考虑热质传递对石膏板温度场分布产生的影响。C. N. Ang^[11-12]在考虑热质传递影响的石膏板热传递数值模拟上,利用附加比热容等效热质传递影响。结果表明,随着升温速率的增大,热质传递产生的附加比热增大。

目前,针对防火板材隔热性能的研究成果大多基于一种火灾曲线进行试验和数值模拟研究,缺乏对不同升温速率下防火板材隔热性能影响规律的试验研究。本文分别对不同防火板材在非标准火、标准火和烃类火下的隔热性能进行试验研究,分析不同火灾工况下防火板材导热系数的变化规律和差异,探究升温机制对防火板材导热系数的影响规律。

1 试验设计及试验方法

1.1 试验材料及试件设计

本文针对的防火板材为建筑领域常用的建筑防火板材,分别为:石膏板、硅酸钙板、玻镁板、CCA板四种板材类型,其常温下的密度值如表1所示。

试验设计制作了14个试件进行隔热性能试验。

表1 不同板材的常温下密度值

Table 1 Density of different plates at room temperature

板材类型	GyB1	GyB2	MOB	CSB	CCA
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	640	920	1 050	1 460	1 380
主要成分	二水硫酸钙		氯氧镁 水泥	托贝莫 来石	托贝莫 来石

注: ρ 表示常温下防火板材密度;GyB1代表龙牌耐火石膏板(BNBM Fire-resistant plasterboard);GyB2代表可耐福耐火石膏板(Knauf Fire-resistant plasterboard);MOB代表玻镁板(Magnesium Oxide Board);CSB代表硅酸钙板(Calcium Silicate Boards);CCA代表压蒸无石棉纤维素纤维水泥平板(Cellulose Fibre Cement Sheets, Autoclaved);五种防火板材厚度均为12 mm

14个试件根据测量原理的不同分为A组和B组。A组10个试件采用集总热容法原理^[1]进行试验,10个试件根据测量板材的种类分为5组,每组试件进行两次重复试验,试验升温工况包括3种不同升温制度;B组通过采用水流平板法原理利用水流平板法导热仪(PBD)进行测量,试样尺寸为直径180 mm,厚度12 mm,测量温度区间为200~900 °C,每间隔100 °C设置一个温度测量点。试件参数如表2所示。

表2 导热系数试件参数表

Table 2 Test parameters of thermal conductivity

组别	试件编号	升温工况	试验原理
A	GyB1- <i>i</i> - <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	NI/ISO/HC	集总热容法
	GyB2- <i>i</i> - <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	NI/ISO/HC	集总热容法
	MOB- <i>i</i> - <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	NI/ISO/HC	集总热容法
	CSB- <i>i</i> - <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	NI/ISO/HC	集总热容法
	CCA- <i>i</i> - <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	NI/ISO/HC	集总热容法
B	GyB1-PBD- <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	200~900 °C; 间隔100 °C	PBD法
	MOB-PBD- <i>j</i> (<i>j</i> =1,2)	200~900 °C; 间隔100 °C	PBD法

表2中试件编号按照板材类型-升温工况-*i*-*j*排列,其中*i*=NI/ISO/HC,NI表示非标准火灾曲线,ISO表示ISO 834标准火灾曲线^[13],HC表示烃类火灾曲线。非标准火灾曲线和烃类火灾曲线根据欧洲规范Eurocode 1^[14]对参数化温度-时间火灾曲线建议的升温曲线计算公式确定,非标准火灾曲线在2 h内最高温度为ISO 834标准火灾曲线最高温度的80%。三种升温工况的空气温升曲线如图1所示。

集总热容法的试验试件通过在Q235钢板各表面覆盖12 mm厚防火板材构成(图2(c)),钢板尺寸为(200×200×16) mm,钢板表面点焊Φ8固定螺栓用以固定防火板材(图2(d)),在钢板中部一半厚度处,埋设3个直径2 mm的铠装镍铬-镍硅热电偶用以测量钢板温度(图2(a)),试件两侧板材表面各布置3个热电偶用以测量板材表面的热空气温度(如图2(b))。试验升温过程中,当钢板温

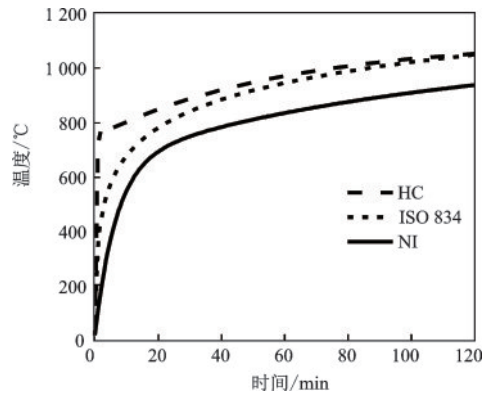


图1 不同升温工况下的空气温度-时间关系曲线

Fig.1 Temperature-time curves in different heating scenarios

度达到700 °C时试验结束。为了避免板材间空隙有热量传入,在板材有拼接的位置用防火棉堵塞,固定螺栓表面涂抹防火涂料,减少热量通过螺栓传递给钢板。

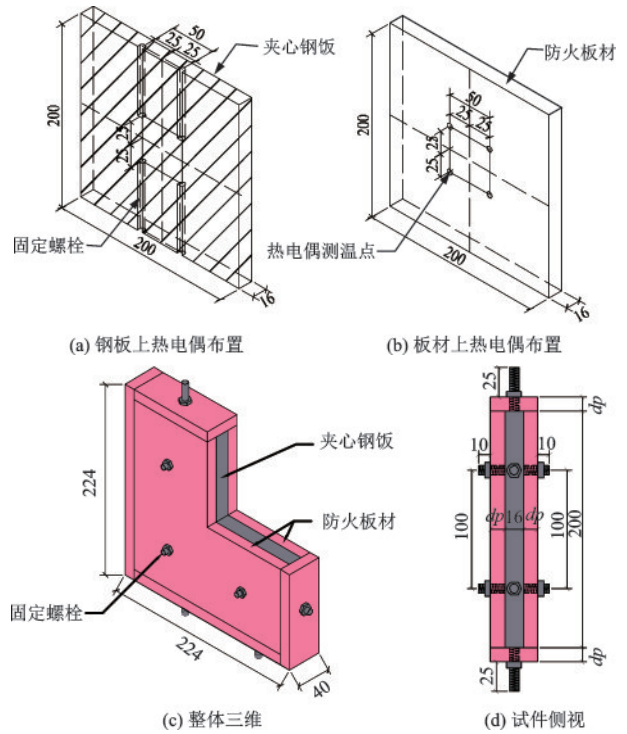


图2 集总热容法试件

Fig.2 Specimen dimensions of lumped capacity method

1.2 试验仪器

本文A组隔热性能试验在华侨大学火灾实验室的立式试验炉内进行(图3(a)、(b))。立式炉设计温度最高可达到1 200 °C,最大耐火时间设计为4 h,试验条件满足三种升温曲线要求的技术指标。试验炉壁四周,每面插入两根陶瓷热电偶测

量炉内空气温度,三面布置10个燃烧器。升温过程中炉内温度通过电脑程序控制,按照设定升温曲线进行升温,并监控炉内温度的变化。B组隔热性能试验在洛阳国家耐火材料质量监督检验中心的PBD高温导热仪上进行,试验仪器如图3(c)所示。



Fig.3 Furnace for thermal conductivity test of plates

2 试验结果与分析

2.1 试验现象分析

实测三种工况(NI、ISO、HC)的升温曲线,前5 min的升温速率分别为75.0、116.2、180.5 °C/min,试验结束时最高温度分别为877 °C(80 min)、969 °C(71 min)、1 084 °C(44 min)。

图4给出了两种典型试件在三种不同升温工况下受火后的板材表面现象。通过观察试验后的板材表面破坏现象,可以发现:升温历史(最高温度、升温速率、受火时间)对不同板材受火后的表面破坏现象有着不同的影响规律。

对于石膏板,火场最高温度越高,升温速率越大,受火后表面的破坏程度增大,表面裂纹更明显。在非标准火工况下,石膏板表面出现较多的细裂纹,且残留有护面纸燃烧后的灰烬,表面颜色略带

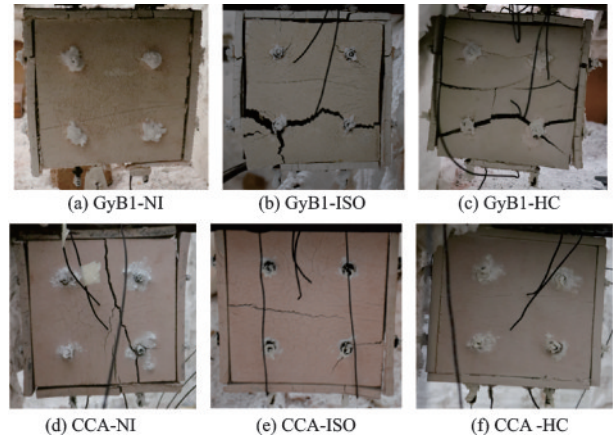


图4 不同火灾工况下防火板材受火后现象

Fig.4 Phenomenon of fireproof board under different fire conditions

红色(图4(a))。随着石膏板经历的火场最高温度的增大,石膏板的碳化程度增大,表面颜色变白,而且板材由于碳化后黏结力减少,表面出现贯穿裂纹,有部分石膏板受火后掉落,而且表面小裂纹更明显(图4(b))。在烃类火工况下,石膏板出现多条贯穿裂纹,板材明显断裂分成几块,而且可以明显看出板材收缩卷曲现象(图4(c))。

对于CCA板,从图4(d)~(f)可以看出升温历史对CCA板的影响规律与石膏板的影响规律相反,最高温度越高,升温速率越大,表面大裂纹越少,完整性越好。在非标准火下,CCA板表面出现一条较大的贯穿裂纹(图4(d)),表面存在鱼鳞状小裂纹;在标准火下,出现两条明显大裂纹,但没形成贯穿裂纹(图4(e)),且表面鱼鳞状小裂纹更明显;在烃类火下,表面颜色变白,碳化程度增大(图4(f)),表面细小裂纹增多、加密,但表面保持完整,没有出现明显大裂纹。

出现两者差异的主要原因是:石膏板受热过程中收缩率大(温度越高,收缩量越大),随经历火场最高温度的增大,板材因高温收缩量增大而形成大裂纹;与此相反,CCA板收缩率相比较小,受热收缩引起的收缩量不足以开展出大裂纹,此时随着受火时间的增长,应力集中区域随着温度的渗透,非受火面板材温度逐渐增高,板材受热收缩断裂,形成贯穿裂纹。同时,由于随着升温速率越大,板材两侧温差越大,板材内部温度分布越不均匀,沿板材厚度方向,受火面与非受火面的收缩量差异增大,非受火面对受火面的约束力增大,裂纹不能自由向内开展,出现板材受火面的表面收缩形成细而密的

小裂纹^[15]。

图5给出了在三种火灾工况下不同板材保护的钢板升温曲线变化情况,由图5可以看出:

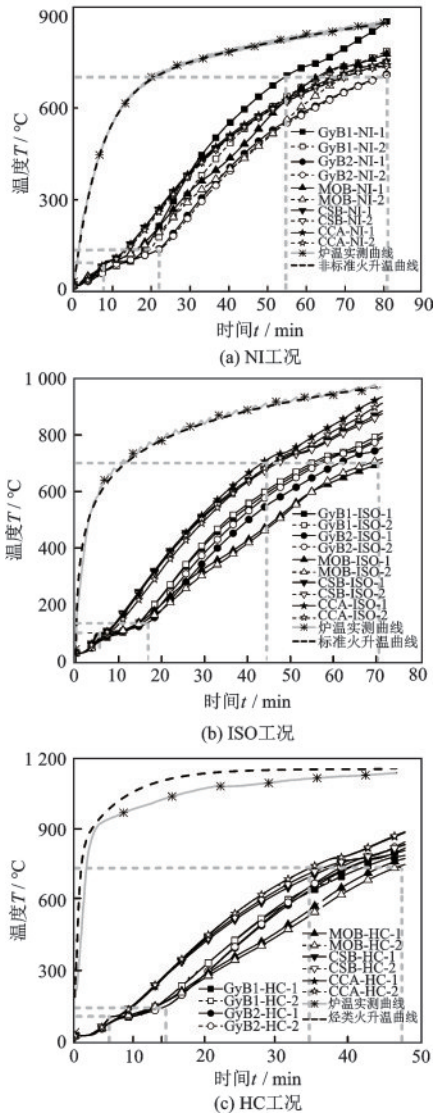


图5 不同升温工况下不同板材保护的钢板升温对比
Fig.5 Comparison of heating curve of steel plates with different plate protection under different fire conditions

(1)不同的防火板材保护的钢板在受热过程中均出现了温度平台,该温度平台出现的原因主要是由于防火板材在受热过程中发生热化学反应,分解释放出结合水,在水份浓度梯度和压力梯度作用下传递到钢板处^[10-12],使得钢板温度维持在100℃左右,直到板材分解释放的水份全部蒸发结束,钢板温度才继续大幅度增大。由此可见,防火板材受热过程中热化学反应释放的结合水对钢板温度的发展有很大的减缓作用。

(2)随着升温速率的增大,钢板升温过程中温度平台段维持时间缩短。在NI工况下温度平台大致在8~22 min,最长维持时间大约为14 min(图4(a)),试验结束(钢板温度为700℃试验结束)时间大致在55~81 min左右,温度平台减缓钢板温度增长时间占比为14.5%~27.2%;在ISO 834工况下温度平台大致在5~17 min,最长维持时间大约为12 min(图4(b)),试验结束时间大致在45~70 min左右,温度平台减缓钢板温度增长时间占比为11.1%~14.8%;在HC工况下温度平台大致在4~12 min,最长维持时间大约8 min(图4(c)),试验结束时间大致在32~45 min左右,温度平台减缓钢板温度增长时间占比为12.5%~26.7%。由此可见标准火下防火板材的温度平台维持时间最短,结合水对钢板温度的延缓作用时间最小。温度平台维持时间的缩短影响因素比较复杂,升温速率、火场最高温度、水份浓度梯度和压力梯度等因素都会影响温度平台维持时间。例如,在结合水相同的情况下,升温速率越大,相同时间板材温度越高,水份蒸发速率越快,温度平台维持的时间越短。

(3)温度平台结束后,在NI工况下,可耐福石膏板保护钢板温度低于其他板材保护的钢板温度;在ISO和HC工况下,玻镁板保护的钢板温度均低于其他板材保护的钢板温度。由于防火板材的隔热性能决定了钢板温度的发展,而其隔热性能的好坏主要通过导热系数来衡量,其衡量因素主要有固体物象、含湿率、气孔率等^[16]。在非标准火灾下,石膏板有较好的完整性,由于石膏板密度为四种板材中最小的,内部结构更疏松,脱水后板材结构内部孔隙率较其他板材大,使得隔热性能显著增强,能够起到良好的隔热作用;在标准火灾和烃类火灾下,石膏板发生较大的破坏,完整性差,隔热效果不佳,硅酸钙板和CCA由于主要成分属于晶体,自身导热系数较其他板材大,隔热性能较其他板材差,而玻镁板主要成分为非晶体,导热系数较晶体导热系数小,且表面由于有一层网状薄膜保护,完整性较好,温度主要通过板材传递给钢板,板材起到良好的隔热作用,所以钢板温度增长较慢。

2.2 常用防护板材等效导热系数的确定

为了量化升温机制对防火板材隔热性能的影响

响,本文防护板材等效导热系数采用式(1)计算^[1],
防火板材导热系数测量原理模型如图6所示。

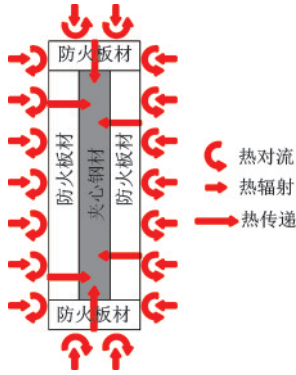


图6 集总热容法测量原理模型

Fig.6 Principle model diagram of λ_p measurement

$$\lambda_p = \frac{\Delta T_s \cdot c_s \cdot \rho_s \cdot d_i \cdot V}{F_i \cdot [T_g(t + \Delta t) - T_s(t)] \cdot \Delta t} \cdot (1 + \mu/2) \quad (1)$$

式中, λ_p 为板材等效导热系数, $W/(m \cdot K)$; $T_s(t)$ 为时刻钢板温度, $^{\circ}C$; $T_g(t + \Delta t)$ 为 $t + \Delta t$ 时刻空气温度, $^{\circ}C$; c_s 为钢材比热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ_s 为钢材密度, kg/m^3 ; V 为钢构件截面面积, m^3 ; F_i 为单位构件长度上板材的内表面积, m^2/m ; d_i 为板材厚度, m ; c_i 为板材比热容, $J/(kg \cdot K)$; ρ_i 为板材密度, kg/m^3 ; Q_i 为单位构件长度板材的热容, $J/(K \cdot m)$; $\mu = Q_i/Q_s$, $Q_i = F_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot d_i$; Q_s 为单位构件长度构件的比热容, $J/(K \cdot m)$; $\Delta t \leq 30$ s。取板材温度 T_p 为空气温度 T_g 和钢板温度 T_s 的平均值,即 $T_p = (T_s + T_g)/2$ 。

为简化计算过程,将 μ 进行分阶段等效处理,等效 μ 值如表3和图7所示。

表3 不同板材等效 μ 取值表

Table 3 Table of equivalent μ values for different plates

板材类型	GyB1	GyB2	MOB	CSB	CCA
温度/ $^{\circ}C$	50~180	50~180	50~380	50~470	50~350
μ	1.1	1.3	0.8	1.4	0.7
温度/ $^{\circ}C$	180~900	180~900	380~900	470~900	350~900
μ	0.2	0.4	0.3	0.5	0.4

根据防火板材受火侧表面空气温度和钢板温度的测量结果,通过计算公式(1)计算得到不同防火板材随温度变化的等效导热系数关系曲线,相同试件的计算结果取试件板材等效导热系数的算术平均值。图8给出了标准火下石膏板等效导热系数

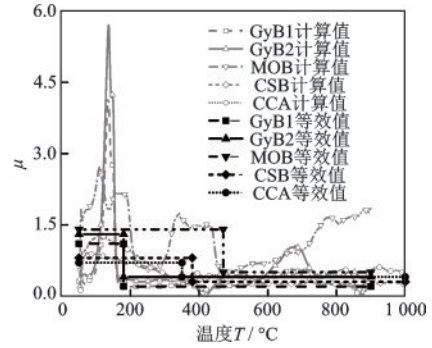


图7 不同板材等效 μ 值的等效曲线

Fig.7 Equivalent curves of equivalent μ values for different plates

与钢板温度关系。

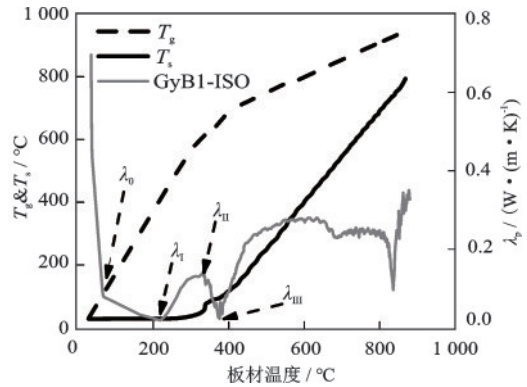


图8 标准火下石膏板等效导热系数与钢板温度关系

Fig.8 Relationship between λ_p of GyB1 and T_s under standard fire

从图8可以看出,等效导热系数在 λ_0 温度点前出现快速降低段。该段等效导热系数快速下降是由于空气温度快速上升,板材还来不及吸收热量,出现温度滞后引起的。温度滞后结束时板材温度大致为 $70^{\circ}C$,空气温度为 $100^{\circ}C$ 时,板材受火侧表面自由水开始受热蒸发^[12],即 λ_0 温度点为板材自由水开始蒸发的温度点; λ_0 温度点到 λ_1 温度点,随着板材温度升高,板材内部自由水开始蒸发吸收热量,并留下小量气孔,使得导热系数有所降低,直至板材内部自由水蒸发完全,等效导热系数出现第一个波谷,此时板材温度为 $200^{\circ}C$ 左右(温度传递到钢板时的起始点 λ_1)。该温度点热量开始通过板材传递给钢板,钢板温度开始上升,等效导热系数增大,随着火场温度的增长,板材等效导热系数增大达到波峰点(即结合水传递到钢板的起始温度点 λ_{II});随着板材内部温度升高,板材内部发生热化学反应分解出结合水,并通过热质传递传递到钢板

上,钢板温度出现平台(汽化水的温度为 100 ℃)。由于水份蒸发吸收大量热量,并且水蒸发后石膏板内部结构形成更大、更多的气孔,使得板材等效导热系数急剧减小到达第二个波谷点(即结合水蒸发结束温度点 λ_{m}),表现出较好的隔热性能。随着火场温度的升高,结合水蒸发结束,结合水引起的等效导热系数减小部分消失,等效导热系数开始增大,温度主要通过板材内部气孔以辐射和热对流方式传递到钢板处,使得钢板温度继续升高,达到一定值时,板材内部结构趋于稳定,等效导热系数维持小幅度变化。之后,随着温度的升高,石膏板内部气孔的热对流和辐射增强,等效导热系数再次增大。

图 9 给出了不同升温工况下不同防火板材的板材温度(T_p)-等效导热系数(λ_p)关系曲线,板材温度 T_p 取 t 时刻防火板材受火侧空气温度表和钢板温度的平均值。由图 9 可看出,相同防火板材在不同升温工况下等效导热系数的变化规律基本相同,并随着升温速率的增大(HC 火>ISO 火>NI 火),温度点 λ_{n} 、 λ_{m} 出现位置后移。且在 NI 工况下,温度传递到钢板处的初始温度(λ_i 对应温度)比较小,结合水蒸发导致等效导热系数减小的温度差(λ_n 与 λ_m 对应温度的温度差)较大,而在 ISO 工况和 HC 工况下,温度传递到钢板处的初始温度比较大,起始等效导热系数变化的温度差较大,结合水蒸发导致等效导热系数减小的温度差较小。

表 4 给出了不同板材在不同升温工况下的温度平台区域的 λ 变化表。从表 4 可以看出,随着升温工况由 NI 升温工况转变为 HC 升温工况,温度平台引起的等效导热系数变化量随着升温速率的变化出现差异,除玻镁板外,其他板材在 ISO 工况下等效导热系数变化量最小,结合水对等效导热系数的影响最小,所引起的钢板温度平台也最短,故用 ISO 工况下的温度平台区域的 λ 取值结果来指导其他两种火灾情形下防火构造设计是安全的。相对其他板材该区间的等效导热系数变化量,在 NI 工况下,MOB>CCA \approx CSB>GyB1>GyB2;在 ISO 工况下,MOB>CSB>CCA>GyB2>GyB1;在 HC 工况下,CSB>CCA>GyB2>MOB>GyB1。由此可见,升温速率对板材温度平台区间的隔热性能有较大影响。

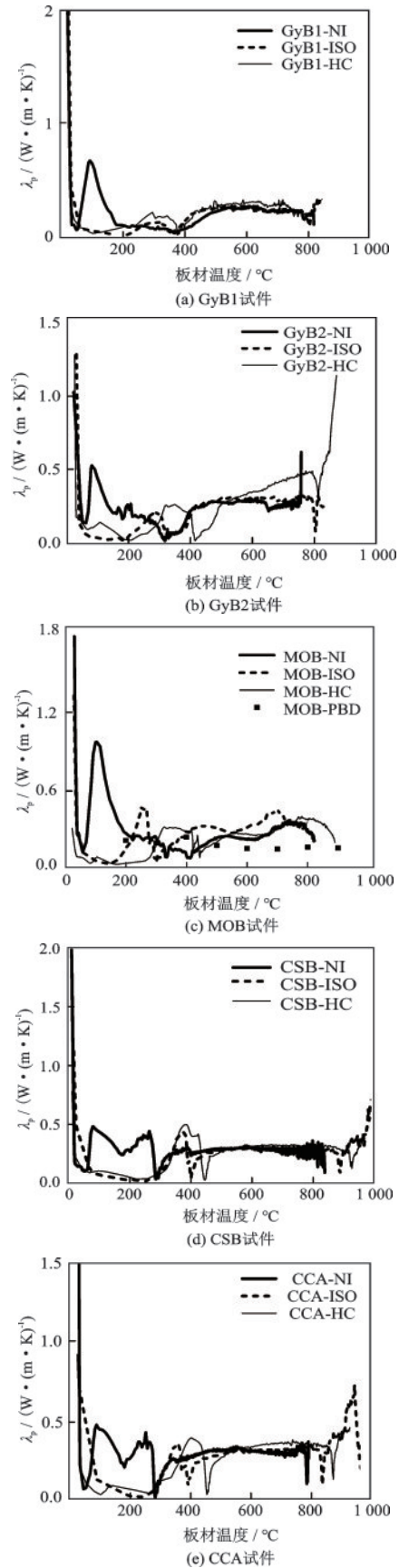


图 9 不同升温工况下各防火板材温度-导热系数变化
Fig.9 T_p - λ_p curve of different plates under different fire conditions

表4 不同板材在不同升温工况下温度平台的λ变化表

Table 4 Comparison of λ values of temperature plateau for different plates under different fire conditions

升温工况	GyB1	GyB2	MOB	CSB	CCA	
NI	λ _{II}	0.681	0.532	0.979	0.483	0.468
	λ _{III}	0.031	0.018	0.074	0.030	0.002
	λ变化量	0.650	0.514	0.905	0.453	0.466
ISO	λ _{II}	0.136	0.225	0.470	0.431	0.336
	λ _{III}	0.023	0.035	0.039	0.040	0.081
	λ变化量	0.113	0.190	0.431	0.391	0.255
HC	λ _{II}	0.185	0.266	0.300	0.499	0.385
	λ _{III}	0.031	0.021	0.079	0.021	0.021
	λ变化量	0.154	0.245	0.221	0.478	0.364

2.3 常用防火板材导热系数数值模拟验证

2.3.1 石膏板导热系数数值模拟验证

图10给出了国内外研究学者得到的石膏板导热系数变化研究成果对比图,由图10可以看出:在常温~300℃和700℃之后这两个温度区间,集总热容法等效导热系数计算结果小于其他学者导热系数测量值,在420~700℃区间等效导热系数计算结果大于其他学者导热系数测量值,而在300~470℃温度区间本文温度-等效导热系数关系曲线出现波谷,但其他学者研究成果在此区间并未出现类似规律,而此区间波谷的出现正是由于板材内部出现热质传递现象,使得钢板温度在此区间内出现温度平台引起的,因此板材等效导热系数需要考虑热质传递产生的水份迁移对等效导热系数的影响。

由于板材材料本身的差异,其导热系数往往离散性比较大,且不同测量方法的差异,测量结果亦存在一定差异,为分析本文试验方法得到防火板材

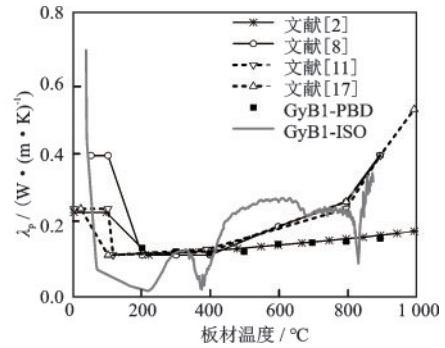


图10 不同学者石膏板温度-导热系数变化曲线

Fig.10 Comparison of T-λ_p curves by different scholars

等效导热系数的可靠性,本文利用ABAQUS软件建立集总热容法试件的传热模型。

(1)材料热工性能

石膏板的比热容和密度根据试验结果取值如图11所示,导热系数取本文计算结果,如表5所示。钢材的密度取定值为7850 kg/m³,其比热容和导热系数随温度变化参照欧洲规范Eurocode 4^[18]取值。

(2)模型假定

- ①忽略板材与板材间、板材与钢板间的间隙;
- ②假定试件各面板材的材性均一致。

(3)边界条件

传热方式主要包括热传导、热对流和热辐射,受火过程中,热空气与板材间的传热主要通过热对流和热辐射两种方式,板材内部、板材与钢板间均主要通过热传导方式进行热量传递^[1]。

升温前,初始温度取20℃;升温过程中,升温曲线按照ISO 834标准升温曲线,板材与热空气间通过热辐射和热对流进行热量传递,参考文献[9]将石膏板受火侧表面与外部环境间的综合辐射系数ε取0.8,受火侧石膏板表面与炉内环境的对流传热系数h_f取25 W/(m²·K), Stefan-Boltzmann常数取

表5 不同板材等效导热系数取值表

Table 5 Table of equivalent thermal conductivity values for different plates

T _p /°C	GyB1-λ _p	T _p /°C	GyB2-λ _p	T _p /°C	MOB-λ _p	T _p /°C	CSB-λ _p	T _p /°C	CCA-λ _p
40	0.4	40	0.3	35	0.35	35	0.5	35	0.7
70	0.07	60	0.06	60	0.1	80	0.09	80	0.12
220	0.02	190	0.025	165	0.03	250	0.01	200	0.01
300	0.13	290	0.22	260	0.48	360	0.43	280	0.05
340	0.13	340	0.03	300	0.03	385	0.04	360	0.35
375	0.025	370	0.08	420	0.32	420	0.29	390	0.1
470	0.27	430	0.3	620	0.32	850	0.29	440	0.25
850	0.27	850	0.32	900	0.7	900	0.42	860	0.35
1000	0.6	--	--	--	--	--	--	950	0.7

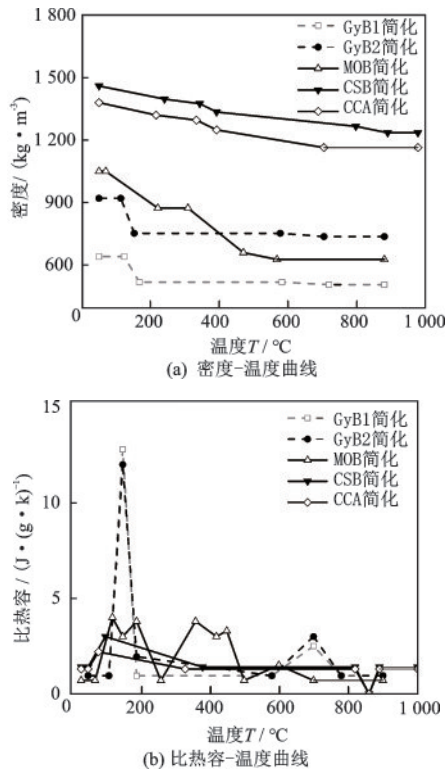


图11 各防火板材比热容及密度随温度变化曲线

Fig.11 Curves of specific heat capacity and density of fire-proof board with temperature

$5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。板材内部、板材与夹心钢板间通过热传导进行热量传递,采用四节点热分析单元DC2D4(四节点线性四边形传热单元)。

在ISO 834标准升温曲线工况下,通过有限元程序计算钢板温度,并将钢板温度的计算结果与试验结果进行对比。同时在板材密度和比热容相同条件下,利用不同学者提出的导热系数简化曲线,通过该数值模型分析计算得到各学者导热系数参数下钢板温度,并将钢板温度的计算结果与试验结果进行对比,对比结果如图12所示,图13给出外覆

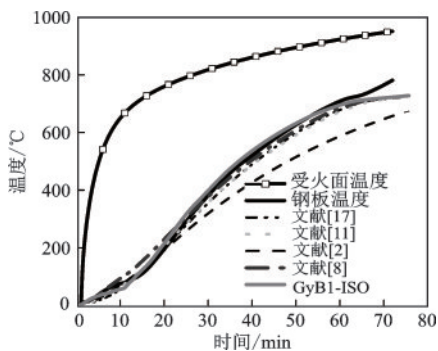


图12 不同学者 $T-\lambda_p$ 曲线下计算与试验结果对比

Fig.12 Comparison of calculation results and test results for $T-\lambda_p$ curve by different scholars

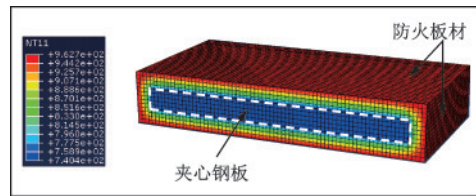


图13 试件有限元模拟温度场分布云图

Fig.13 Temperature contours for specimens

石膏板防火板材试件有限元模拟温度场分布云图。

从图12可看出本文等效导热系数参数下钢板升温的计算结果能更好地吻合试验结果。彭贝导热系数参数下钢板升温的计算结果前期温度偏高,后期结果偏低,其他学者的计算结果后期温度结果偏低,同时可以看出I. Rahmanian的导热系数参数下钢板升温计算结果后期远远偏离试验结果。

2.3.2 其他板材导热系数数值模拟验证

为了研究本文其他板材热工参数计算结果与实际情况的吻合程度,利用试件的数值模型进行钢板温度的计算分析(其他板材简化导热系数如表5所示,密度及比热容如图11所示),将其他防火板材覆面试件的钢板温度计算结果与对应板材试验结果进行对比,如图14所示。

由图14可知,可耐福耐火石膏板覆面的试件模型计算的钢板升温结果与试验结果吻合度较高,而玻镁板覆面的试件模型计算的钢板升温结果后期较试验结果偏高,硅酸钙板和CCA板覆面的试件模型计算得到的钢板升温结果相较于试验结果,计算结果偏低。

2.4 温度平台区域等效导热系数敏感性分析

本文石膏板等效导热系数研究表明石膏板等效导热系数在 $300 \sim 470^{\circ}\text{C}$ 区间存在温度平台区域,该温度段内石膏板受热发生脱水反应产生水份,并迁移到钢板表面,钢板温度出现平台段,使得等效导热系数曲线出现波谷段,而其他学者研究成果在此区间并未出现类似规律,为研究此温度段内等效导热系数的变化对钢板温度的影响程度,本文进行石膏板等效导热系数的敏感性分析。

利用前文的龙牌石膏板覆面试件计算模型,设计了四组等效导热系数敏感参数,分别为:第一组考虑初始含水率和自由水蒸发后的气孔率对等效导热系数的影响,即 $40 \sim 220^{\circ}\text{C}$ 温度区间等效导热系数下降区域,case1为本文计算结果的简化等效导热系数变化曲线,case2为忽略开始升温时空气温度

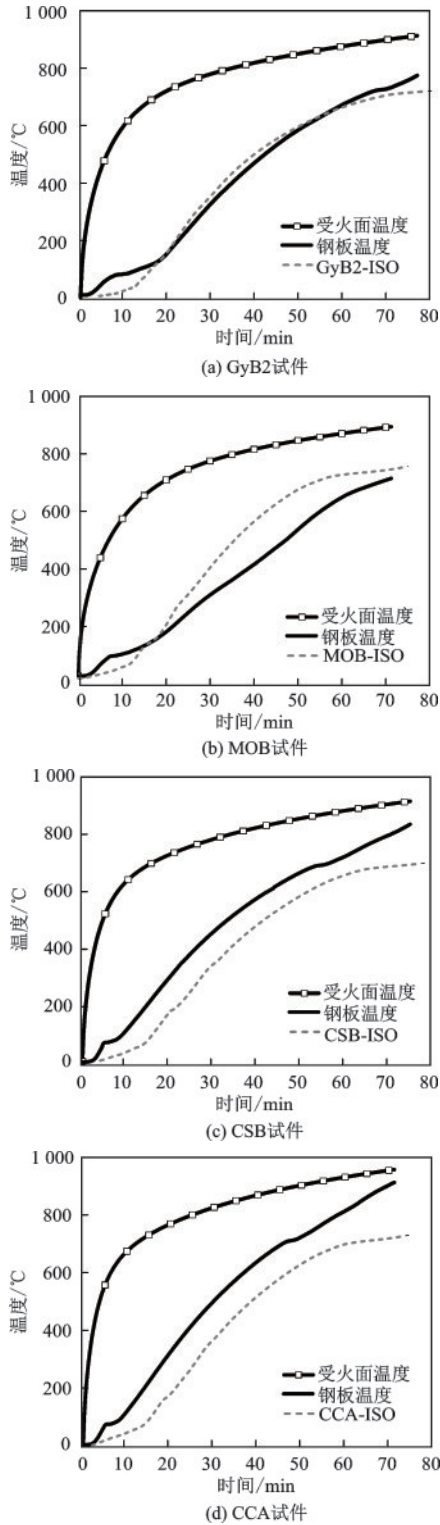


图14 不同板材覆面模型计算结果与试验结果对比
Fig.14 Comparison of calculation results and test results of different specimens

快速升温而板材升温滞后的影响,case3为忽略自由水蒸发及其蒸发后孔隙率增加对导热系数的影响,case4为忽略前期波谷影响,case5考虑已有石膏板导热系数变化规律研究成果,在40~220℃温度区

间设置相似变化规律,探究该变化规律是否适用本文等效导热系数简化变化趋势;第二组考虑300~470℃等效导热系数波谷起始温度点对等效导热系数的影响,依次设置起始变化温度点为200、250、300、340℃四种情况;第三组考虑300~470℃等效导热系数波谷结束温度点对等效导热系数的影响,依次设置结束温度点为470、500、600、700℃四种情况;第四组考虑300~470℃等效导热系数波谷的极值大小,分别设置波谷极值为0.025、0.8、0.13三种情况。具体设置如图15所示。

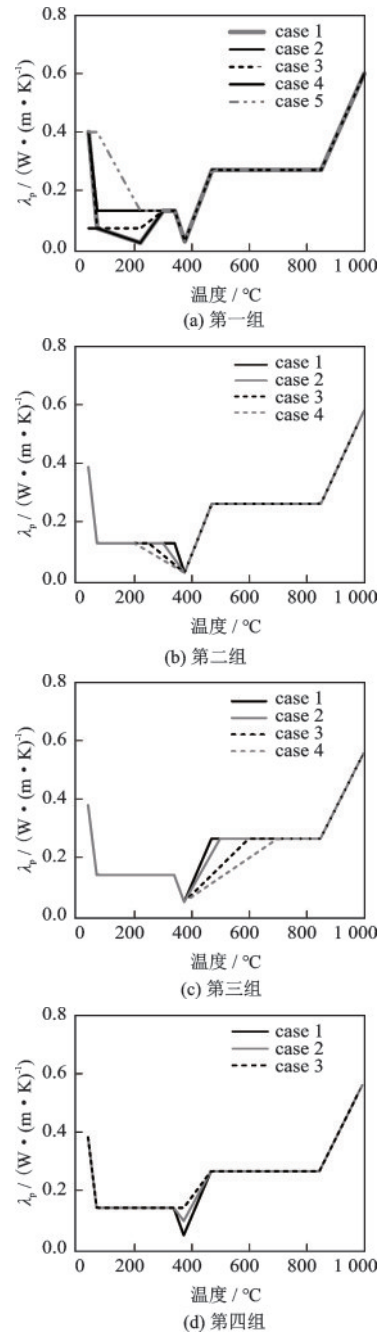


图15 四组等效导热系数敏感参数
Fig.15 Four sensitive parameters of λ_p

图 16 给出了四种等效导热系数敏感因子下数值模拟计算得到的钢板升温变化曲线,并与试验结果进行对比分析。

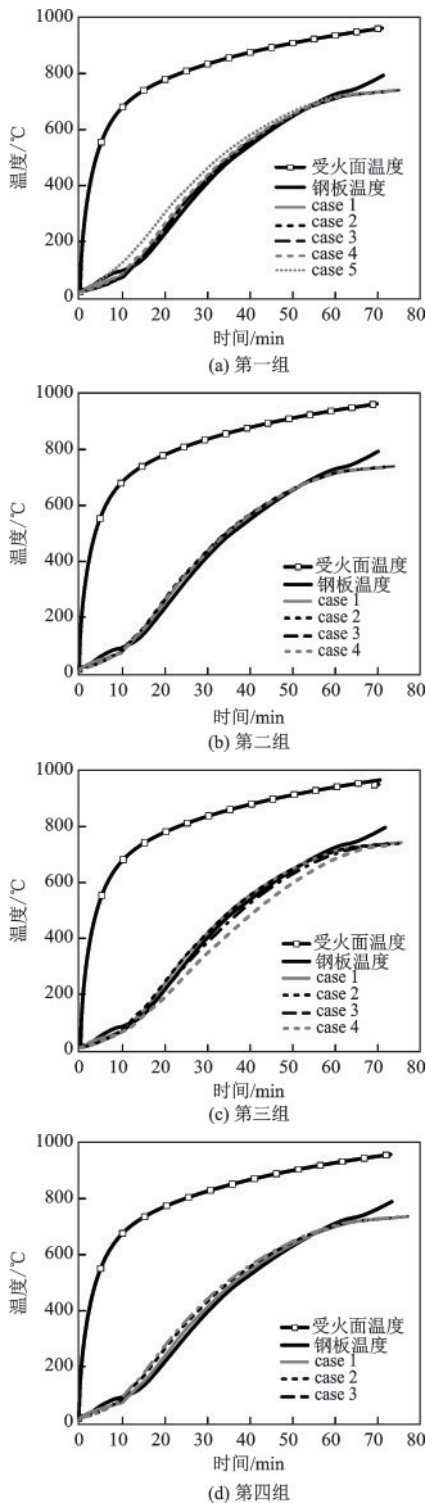


图 16 不同等效导热系数敏感参数下钢板数值模拟计算结果与试验结果对比

Fig.16 Comparison of numerical simulation results and experimental results of steel with different sensitive parameters of λ_p

由图 16(a)、(b)结果可以看出,①40~70 °C区间空气温度快速升温而板材升温滞后;②70~220 °C自由水的蒸发及其蒸发后孔隙率的增大;③70~300 °C前期波谷区域的变化;④300~470 °C温度区间等效导热系数起始变化温度点。这些因素对石膏板受热过程中温度场分布情况影响甚微,忽略等效导热系数在 70~300 °C温度区间波谷的变化和在 300~470 °C温度区间起始温度点的变化对等效导热系数没有明显的影响,但在 40~220 °C温度区间设置与现石膏板导热系数研究成果类似规律的变化趋势,对钢板升温数值模拟计算结果影响较大,按类似规律改变 40~220 °C温度区间的等效导热系数变化趋势,将使得钢板升温数值模拟的计算结果高于试验结果。

由图 16(c)、(d)的数据结果来看,300~470 °C温度区间等效导热系数结束变化温度点以及该温度区间内波谷极值大小,对板材受热过程中的温度场分布情况影响较大,尤其此温度区间内等效导热系数结束变化温度点的变化,对钢板升温数值模拟的计算结果有较大影响。随着结束温度点的增大,钢板升温数值模拟的计算结果曲线变化越缓,钢板温度最大值越小,尤其当结束温度点为 600、700 °C时,钢板升温数值模拟计算结果远低于试验结果。同时,300~470 °C温度区间内波谷极值大小也对板材受热过程中的温度场分布情况有一定的影响,随着极值的增大,钢板升温数值模拟计算结果曲线变化越陡峭,相比第三种敏感参数而言,第四种敏感参数对钢板温度的影响较小。

3 结 论

针对国产龙牌石膏板、进口可耐福石膏板、玻镁板、硅酸钙板、CCA板五种建筑防火板材,在三种不同火灾曲线下,利用集总热容法原理进行防火板材的隔热性能试验研究,根据测量结果得到五种板材的等效导热系数及其变化规律,并通过数值模拟与试验相结合的方法,对石膏板在温度平台区域的等效导热系数进行敏感参数分析,研究结果表明:

(1)在受热过程中,板材破坏形态与其经历的升温历史及材料类型有关,而且板材裂缝开展情况受板材受火过程中最高温度和受火时间双重影响。

(2)升温过程中板材发生热化学反应分解的结合水蒸发吸热是引起钢板温度出现温度平台的重要原因,也是延缓钢板升温的重要因素之一,且升温速

率对板材温度平台区间的隔热性能有较大影响。

(3)标准火下防火板材的温度平台维持时间最短,结合水对钢板温度的延缓作用时间最小,用标准火下的温度平台区域的 λ 取值结果来指导其他两种火灾情形下防火构造设计是安全的。

(4)通过试验测得板材表面空气温度和钢板温度,利用式(1)计算得到板材的等效导热系数,再将计算得到板材导热系数设置到数值模拟计算模型中,计算得到钢板温度,并对比钢板升温的数值模拟计算结果与试验结果,结果表明两者吻合良好,验证了式(1)计算板材导热系数的可靠性。

(5)利用数值模拟与试验相结合的方法分析得到石膏板的温度-等效导热系数简化曲线的两个重要敏感参数:热质传递影响温度区间等效导热系数结束变化的温度点(470℃温度点)和该温度区间的等效导热系数波谷极值大小。

参考文献:

[1] 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: 55-57.
Li G Q, Han L H, Lou G B, et al. Fire resistance design of steel and composite structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 55-57. (in Chinese)

[2] Rahmanian I, Wang Y C. A combined experimental and numerical method for extracting temperature-dependent thermal conductivity of gypsum boards[J]. Construction and Building Materials, 2011, 26(1):707-722.

[3] Mehaffey J R, Cuerrier P, Carisse G. A model for predicting heat transfer through gypsum-board/wood-stud walls exposed to fire[J]. Fire and Materials, 1994, 18(5):297-305.

[4] Wullschleger L, Ghazi Wakili K. Numerical parameter study of the thermal behaviour of a gypsum plaster board at fire temperatures [J]. Fire and Materials, 2008, 32(2):103-119.

[5] Ghazi W K, Hugi E. Four types of gypsum plaster boards and their thermophysical properties under fire condition[J]. Journal of Fire Sciences, 2009, 27(1):27-43.

[6] Kontogeorgos D, Mandilaras I, Founti M. Scrutinizing gypsum board thermal performance at dehydration temperatures[J]. Journal of Fire Sciences, 2011, 29(2):111-130.

[7] Park Seul-Hyun, Manzello S L, Bentz D P, et al. Determining thermal properties of gypsum board at elevated temperatures[J]. Fire and Materials, 2010, 34(5):

237-250.

[8] 彭贝. 低层冷成型钢结构体系抗侧及其墙体高温力学性能分析[D]. 南京:东南大学, 2014.
Peng B. Lateral resistance of low-rise cold-formed steel structure system and thermal-mechanic behaviors of the walls [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)

[9] 李献勇. 轻钢组合构件火灾及板材热物理试验和高温数值模拟研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
Li X Y. Fire resistance and thermal properties experiment of light steel composite member and numerical simulation at elevated temperature [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[10] Kontogeorgos D, Founti M. Numerical investigation of simultaneous heat and mass transfer mechanisms occurring in a gypsum board exposed to fire conditions[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(11):1461-1469.

[11] Ang C N, Wang Y C. Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2008, 23(2):675-686.

[12] Ang C N, Wang Y C. The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(7):505-515.

[13] 建筑构件耐火试验方法第1部分:通用要求:GB/T 9978.1—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

[14] Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-2: General Actions-Actions on structures exposed to fire: BS EN 1991-1-2:2002 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2002.

[15] Axenenko O, Thorpe G. The modelling of dehydration and stress analysis of gypsum plasterboards exposed fire [J]. Computational Material Science, 1996, 6(3):281-294.

[16] 徐平涛. 建筑轻质板材[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005:187-188.
Xu P T. Building light board[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005:187-188. (in Chinese)

[17] Sultan M A. A model for predicting heat transfer through noninsulated unloaded steel-stud gypsum board wall assemblies exposed to fire [J]. Fire Technology, 1996, 32(3):239-259.

[18] Eurocode 3: Design Of Steel Structures-Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design: BS EN 1993-1-2: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

(本文责编:池营营)