



# 火灾下隔震橡胶支座防火保护热传导研究

王岚<sup>1a,2</sup>, 王立雄<sup>1a</sup>, 詹旺宇<sup>1b</sup>, 刘红波<sup>1b</sup>

(1. 天津大学 a. 建筑学院 b. 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 应急管理部 天津消防研究所, 天津 300381)

**摘要:**为了研究火灾下隔震橡胶支座防火保护热传导极限,并对工程上的防火保护设计提供理论依据及试验数据参考,在一维非稳态热传导公式的基础上,推导出 ISO834 火灾标准升温下的隔震橡胶支座防火保护热传导规律,按照 GB 9978.1—2008 建筑构件耐火试验方法,对工程上常用的 LNR500 支座防火板保护、LNR1500 支座防火板保护及 LNR500 支座防火板、柔性防火材料组合保护 3 种防火保护试件进行在 ISO834 标准升温下的耐火试验,用 ABAQUS 软件对试验的建筑隔震支座进行了建模及有限元热分析。通过防火保护数值分析和耐火试验结果与公式结果对比,吻合较好,验证了理论公式的有效性。以理论推导和试验数据为基础,当支座表面温度达到临界温度 150℃ 时,不同导热率防火板的极限厚度表可以作为工程应用参考。

**关键词:**隔震橡胶支座;耐火性能;数值模拟;热物理场;热传导

中图分类号: TU352.12

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2019)03-0096-08

## Heat conduction of fire protection for isolated rubber bearings under fire

Wang Lan<sup>1a,2</sup>, Wang Lixiong<sup>1a</sup>, Zhan Wangyu<sup>1b</sup>, Liu Hongbo<sup>1b</sup>

(1. a. School of Architecture, b. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China;

2. Tianjin Fire Research Institute of MEM, Tianjin 300381, P. R. China)

**Abstract:** This paper studies the heat conduction limit of fire protection for isolated rubber, and provides theoretical evidence and experimental data for fire protection. Based on one-dimensional unsteady heat conduction, formula under ISO834 standard fire is derived. According to the GB 9978.1—2008 fire test, three kinds of components, LNR500, LNR1500 support board fire protection, LNR500 support board with flexible fireproof material fire protection, are tested. Modeling and finite element thermal analysis are carried out via ABAQUS. The numerical analysis and fire test results verified the proposed theory. Based on the derivation and experimented data, when the temperature of the support surface reaches the critical temperature of 150℃, the table of the limit thermal conductivity of fireproofing board with different thickness can be referred in engineering applications.

**Keywords:** insulated rubber bearings; fire resistance; numerical simulation; thermo-physical field; heat conduction

收稿日期: 2018-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(51438009)

作者简介: 王岚(1980-), 女, 博士, 主要从事建筑技术与结构抗火研究, E-mail: wanglan@tfri.com.cn.

Received: 2018-08-01

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51438009).

Author brief: Wang Lan(1980-), PhD, main research interests: architectural technology and structure fire resistance, E-mail: wanglan@tfri.com.cn.

在各种城市基础设施与公共建筑中,由于人口密集、财产集中,一旦发生火情,往往会出现群死群伤的恶性火灾事件,造成巨大的人员伤亡与巨额经济损失。隔震建筑作为一种新兴的建筑结构,近年来积极推广于中国新建的公共建筑之中,隔震技术发展较快的日本已经有使用该技术对已有建筑进行保护<sup>[1-3]</sup>。但目前,对隔震建筑的研究仅限于力学隔震性能方面<sup>[4-8]</sup>,对其在火灾情况下的响应研究还较为缺乏。由于隔震建筑中使用最广泛的隔震橡胶支座是由钢板和橡胶叠合而成,其中高温下钢材的力学性能研究一直都是钢结构研究的重点<sup>[9-10]</sup>,而橡胶作为有机材料,热稳定性差。据周雅萍<sup>[11]</sup>研究,天然橡胶温度达到约 130 °C~140 °C 时开始软化,达到 200 °C 左右开始分解,达到 250 °C 上剧烈分解。根据日本《隔震建筑防火设计指南》<sup>[12]</sup>,当隔震橡胶支座表面温度达到 150 °C 时,其力学特性开始改变。目前,中国隔震支座耐火性能及防火保护的研究相对较少,工程实际仅北京新机场采用经防火保护的隔震支座。增田直巳等<sup>[12]</sup>、吴波等<sup>[13-14]</sup>研究无防火保护的隔震橡胶支座耐火极限仅为 90 min。Mazza<sup>[15]</sup>设计了具有防火性能的高阻尼叠层橡胶支座(HDLRBs),并通过火灾后支座温度分布的模拟,对 HDLRBs 和 LRBs 的力学性能损失进行评估,证实了火灾后 HDLRBs 和 LRBs 在基体结构响应中,力学和几何性质出现明显降低。建筑隔震橡胶支座为承重柱的一部分且是关键节点,支座的耐火性能关系到承重构件以及结构整体的耐火性能,所以,无防火保护的支座不能保证结构关键构件的基本耐火性能。中国没有系统研究可用于工程实际的隔震橡胶支座防火保护方法。目前工程上的隔震橡胶支座防火保护设计缺少理论依据支撑。因此,笔者在一维非稳态热传导的基础上推导提出适合实际工程用的隔震橡胶支座防火保护热传导公式。采用 3 个工程常用的隔震橡胶支座防火保护模型耐火试验结果及数值模拟结果,验证理论公式有效。并在此基础上对防火保护的关键数据进行参数化分析,进一步验证公式并得出工程可用的极限防火保护数据。

## 1 防火保护热传导理论及计算公式

### 1.1 一维非稳态热传导

受防火保护的隔震支座受到高温时,火灾高温通过对流和热辐射的方式传递到结构表面,表面温度迅速上升,随后温度以热传导的方式向内部传递。所以,沿着隔震支座表面方向的热传导可以忽

略不计,温度通过热传导直接向内传递,内部形成不均匀的温度场分布,且随着升温时间的增加温度场会不断改变。因此,此问题简化为一维非稳态传热问题。由此建立一维非稳态热传导方程。

根据传热学<sup>[16]</sup>得知结构与外界热传递的关系,边界条件可分为以下 4 类:

1) 第 1 类边界条件,物体表面(I)的温度与受火时间的关系,可用公式表示为

$$T|_1 = f(t) \quad (1)$$

2) 第 2 类边界条件,物体表面(I)的热流变化规律,可用公式表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 = q(x, t) \quad (2)$$

3) 第 3 类边界条件,物体表面(I)与流体介质温度( $T_a$ )进行热交换(热交换系数为  $\alpha$ ),可用公式表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 = \alpha(T - T_a) \Big|_1 \quad (3)$$

4) 第 4 类边界条件,物体表面(I)与其他固体介质相互接触,其换热条件可用公式表示为

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 = -\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_1 \quad (4)$$

经防火保护的隔震支座在火灾发生时,结构表面会与周围环境进行热对流与热辐射进行换热。因此,确定火灾下受防火保护的隔震支座的温度场是第 3 类边界条件的问题。

### 1.2 火灾下一维非稳态热传导

假设受火物体是一无限大物体,初始温度为  $T_0$ ,在  $t=0$  时刻, $x=0$  的侧面突然受到 ISO834 标准升温  $T_1 = 345 \lg_{10}(8t+1) + T_0$  的热扰动。热扰动通过 1.1 中的热交换(热交换系数为  $\alpha$ )对物体表面进行加热。

假设物体导热系数  $\lambda$ ,比热容  $c$ ,密度  $\rho$  随温度的改变没有变化。且物体不放热。根据传热学<sup>[16]</sup>一维非稳态热传导公式有

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

令  $\partial$  为热扩散率,则有

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < \infty \quad (5)$$

根据条件,有

$$t = 0 \text{ 时}, T(x, 0) = T_0 \quad (6)$$

$$\alpha [T(x, t) - T_1] = \lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (7)$$

根据式(5)~式(7),温度场的解析解为

$$\frac{T(x, t) - T_1}{T_0 - T_1} = \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) -$$

$$\exp\left(\frac{\alpha x}{\lambda} + \frac{\alpha^2 at}{\lambda^2}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{\alpha\sqrt{at}}{\lambda}\right] \quad (8)$$

式中:  $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$  为误差函数,  $\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$  为余误差函数。令参数  $\eta = \frac{x}{2\sqrt{at}}$ , 则误差函数为  $\operatorname{erf} \eta$ 。

$$\text{误差函数 } \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt。$$

如果直接是物体表面的温度升为  $T_1$ , 那么就当直接当成热交换系数无限大来算, 即为

$$\frac{T(x, t) - T_1}{T_0 - T_1} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)$$

$$T(x, t) = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot (T_1 - T_0) + T_0 \quad (9)$$

由于误差函数求解麻烦, 可查阅误差函数求解

$$T(x, t) = \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{\alpha x}{\lambda} + \frac{\alpha^2 at}{\lambda^2}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{\alpha\sqrt{at}}{\lambda}\right] \right] \cdot T_M + T_0 \quad (11)$$

由于本式为方便计算, 将变化的 ISO834 标准升温假

$$T(x, t) = z \cdot \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{\alpha x}{\lambda} + \frac{\alpha^2 at}{\lambda^2}\right) \operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{\alpha\sqrt{at}}{\lambda}\right] \right] \cdot T_M + T_0 \quad (12)$$

通过与模拟结果对比, 500 °C 以上取  $z = 0.9$ 。500 °C 以下  $z = 0.8$ 。

### 1.3 防火保护热传导计算公式

在防火保护问题中由于防火材料导热系数、热扩散率都比较小, 导热系数基本不大于  $\lambda = \text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ , 热扩散率基本不大于  $a = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , 导致公式(12)中的  $\operatorname{erfc}\left[\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{\alpha\sqrt{at}}{\lambda}\right] \approx 0$ 。

所以, 分析防火材料在 ISO834 标准升温下的一维非稳态热传导公式可由式(12)简化为

$$T(x, t) = z \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot T_M + T_0 \quad (13)$$

单一防火保护材料的热传导可以用式(13)进行计算。但在工程中经常出现采用两种材料来组合防火的情况, 例如防火板外包柔性防火材料。这种采用两种导热系数相近的防火材料进行保护的时候可以将其类比成一种材料进行防火保护。

例如, 柔性防火材料厚  $x_1$ , 防火板厚  $x_2$ , 则可以将其类比成单一物体 X。

其导热系数

$$\lambda_X = \lambda_{\text{防火卷帘}} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + \lambda_{\text{防火板}} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2};$$

其密度

表进行计算。

由于  $T_1$  随时间变化, 故在求解方程时计算量过大。简化方程,  $T_{\text{ave}}$  取定值。

$$T_{\text{ave}} = \frac{\int_0^t T_1 dt}{t} =$$

$$\frac{\int_0^t [345 \lg(8t + 1) + T_0] dt}{t} = \frac{345(8t + 1) \ln(8t + 1)}{8t \ln 10} + T_0 \quad (10)$$

令  $T_M = T_{\text{ave}} - T_0$ , 则

$$T_M = \frac{345(8t + 1) \ln(8t + 1)}{8t \ln 10}。$$

故 ISO834 标准升温下通过热交换(热交换系数为  $\alpha$ )进行加热的物体内部温度为

设成一定值, 故在与模拟对比后加入一折减系数  $z$ 。即为

$$\rho_X = \rho_{\text{防火卷帘}} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + \rho_{\text{防火板}} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2};$$

其比热容

$$c_X = c_{\text{防火卷帘}} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + c_{\text{防火板}} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2}。$$

然后将 X 的热工参数带入式(13)。

## 2 隔震橡胶支座防火保护热传导公式验证

### 2.1 试验试件

采用 3 组试件验证火灾下隔震橡胶支座防火保护热传导公式。1 号试件为普通尺寸隔震橡胶支座, 采用防火包覆方案, 保护胶外硅酸盐纤维 40 mm, ALC 板厚 100 mm, ALC 板做成多条拼接式, 详见图 1。2 号试件为大尺寸隔震橡胶支座, 采用防火包覆方案, 保护胶外硅酸盐纤维 90 mm, ALC 板厚 150 mm, ALC 板做成多条拼接式, 详见图 2。3 号试件为普通尺寸隔震橡胶支座, 采用组合式防火包覆方案, 保护胶外硅酸盐纤维 40 mm, 上下两段式防火板 100 mm, 外侧为紧缩机构固定的 30 mm 厚柔性防火材料, 详见图 3。1 号和 2 号试件通过两种不同尺寸的隔震橡胶支座防火保护耐火试验来验证单一防火保护下计算公式, 1 号和 3 号通过不同防火保护试验来验证多种防火保护下计算公式。



$$\frac{345 \times (8 \times 180 + 1) \times \ln(8 \times 180 + 1)}{8 \times 180 \times \ln 10} =$$

1 090.5

将上述两式代入式(13)有

$$T(x, t) = z \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot T_M + T_0 =$$

$$0.8 \times 0.11 \times 1\,090.5 + 9 =$$

104.96 °C

2号模型与1号模型类似,算得180 min时防火板内侧温度为123.27 °C。

3号模型在100 mm厚的防火板外覆盖了30 mm厚柔性防火材料布。

防火板导热系数 $\lambda = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,比热容 $c =$

$1\,600 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,密度 $\rho = 690 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。算得 $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$

$$= \frac{0.2}{1\,600 \times 690} = 1.8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}。$$

柔性防火材料导热系数 $\lambda = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,比热容 $c = 900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,密度 $\rho = 116 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。算

$$\text{得 } a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{0.038}{900 \times 116} = 4.79 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}。$$

防火板厚0.1 m,柔性防火材料厚0.03 m。按照上节的假定将它们类化成单一材料X,则有

$$a_X = a_{\text{防火卷帘}} \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2} + a_{\text{防火板}} \cdot \frac{x_2}{x_1 + x_2} =$$

$$2.49 \times 10^{-7}$$

带入式(13)有

$$\frac{x}{2\sqrt{at}} = \frac{0.13}{2 \times \sqrt{10\,800 \times 2.49 \times 10^{-7}}} = 1.25$$

$$\text{查误差函数求解表得 } \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) = 0.077$$

$$T(x, t) = z \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot T_M + T_0 =$$

$$0.8 \times 0.077 \times 1\,090.5 + 30 =$$

97.17 °C

由表2可知对于所有的隔震橡胶支座模型,普通尺寸、大尺寸以及复合式防火保护的支座,所有模型的试验温度与理论温度都吻合较好。试验温度与理论温度的比值在1.068~0.934之间,验证了火灾下隔震橡胶支座防火保护热传导公式的适用性。

表2 试验结果与理论结果

Table 2 Test results and theoretical results

模型编号	理论温度 $K_1/^\circ\text{C}$	试验温度 $K_2/^\circ\text{C}$	$K_2/K_1$
1	104.96	98.22	1.068
2	123.27	115.10	0.934

3

97.17

99.48

1.023 8

### 3 公式数值模拟验证

#### 3.1 数值模拟方法

采用ABAQUS有限元软件对试验模型进行数值模拟,为火灾模型的精确性,隔震橡胶支座构件完全按照试验模型的实际形式及尺寸进行分析。模型采用ABAQUS内适用于热分析的线性八节点六面体单元(DC3D20)进行建立。混凝土与钢材的导热系数和比热采用欧洲规范EUROCODE2中的导热系数和比热值。NR橡胶的热工参数采用实验<sup>[11]</sup>的实测值。防火板的导热系数根据制造商提供的数据取为0.2,密度为:650 kg/m<sup>3</sup>,比热容为1 600 J/(kg·K)。柔性防火材料的热工参数采用《普通硅酸铝耐火纤维毡导热系数的研究》<sup>[17]</sup>中的实验数据。

#### 3.2 模拟试验对比及公式验证

模型1~模型3在持续180 min的ISO834标准升温曲线火灾升温后的温度云图如图7~图9所示。3个模型不同测点的温度-时间曲线如图10~图15所示,其中,1号模型和2号模型的1、4、7号测点位于硅酸铝纤维外侧;2、5、8号测点位于橡胶外侧。3号模型的1、8号测点位于硅酸铝纤维内外侧,其余测点位于支座内侧。图中,实心点为试验值,空心点为模拟值。实际防火板升温过程中由于防火板内存在水成分,水分气化会先吸收热量,导致图12中位于防火板内侧的1、4、7号测点的试验温度曲线会在升温前期出现平滑段。而软件模拟中模拟的防火板的材料是均匀的物质,模拟的温度曲线是理想的平滑上升,从而导致升温曲线存在差异。由图10~图15可知,数值模拟结果与试验结果吻合较好,差距最大的3号模型5号测点温差也不超过10%。将3个模型防火板内侧温度的数值模拟结果、试验结果及理论结果分别列于表3。所有模型180 min防火板内侧温度的试验结果、数值模拟结果与理论结果吻合较好,数值模拟结果与理论结果的比值在1.06~0.916之间,进一步验证了隔震支座防火保护热传导公式的有效性。

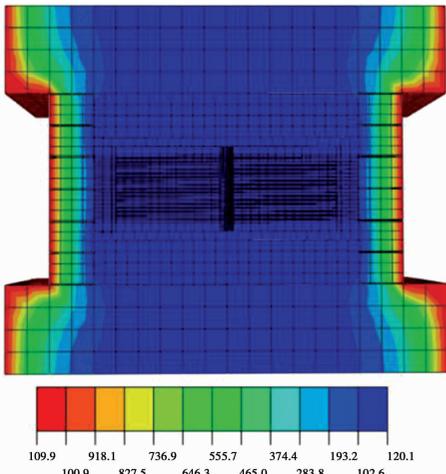


图 7 1号隔震橡胶支座 180 min 时温度云图

Fig. 7 Temperature figure of the rubber bearings #1 180 min

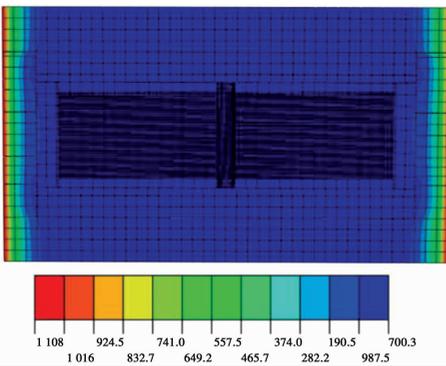


图 8 2号隔震橡胶支座 180 min 时温度云图

Fig. 8 Temperature figure of the rubber bearings #2 180 min

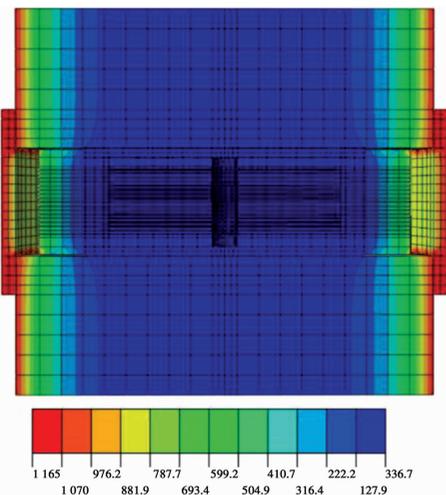


图 9 3号隔震橡胶支座 180 min 时温度云图

Fig. 9 Temperature figure of the rubber bearings #3 180 min

表 3 试验结果、数值结果与理论结果

Table 3 Test results ,numerical results and theoretical results

模型编号	理论温度 $K_1/^\circ\text{C}$	试验温度 $K_2/^\circ\text{C}$	模拟温度 $K_3/^\circ\text{C}$	$K_2/K_1$	$K_3/K_1$
1	104.96	98.22	99.00	1.068	1.060

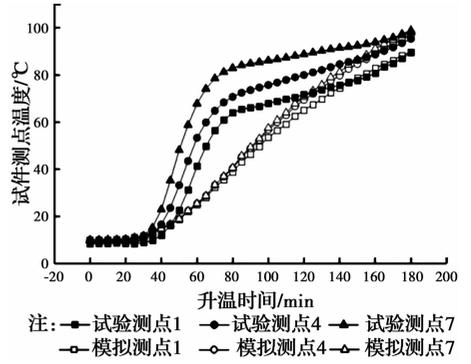


图 10 1号模型测点 1、4、7 试验、数值模拟值温度曲线比较  
Fig. 10 Temperature figure of the rubber bearings #2 180 min

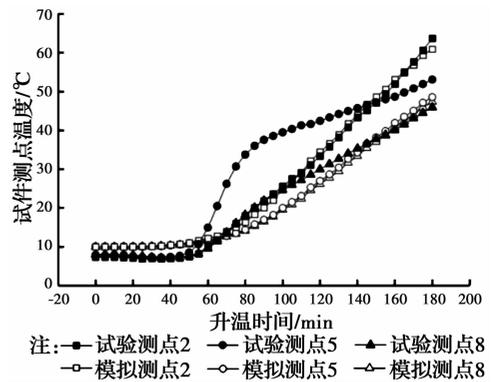


图 11 1号模型测点 2、5、8 试验、数值模拟值温度曲线比较  
Fig. 11 Comparison of measured and simulated temperature curves of measuring points 2,5 and 8 of model 1

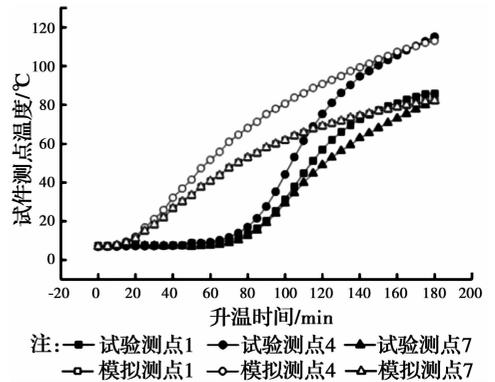
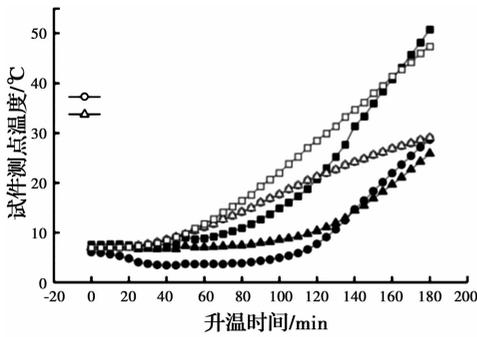


图 12 2号模型测点 1、4、7 试验、数值模拟值温度曲线比较  
Fig. 12 Comparison of measured and simulated temperature curves of measured points 1,4 and 7 of model 2

2	123.27	115.10	112.90	0.934	0.916
3	97.17	99.48	99.97	1.0238	0.995

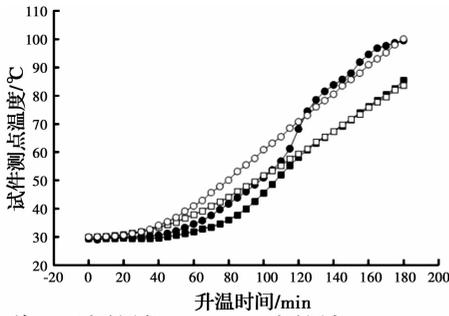
#### 4 公式在隔震橡胶支座防火板保护下的工程应用

通过试验、模拟验证了公式有效性的情况下,以火灾下隔震支座防火保护热传导公式为依据,结合试验及数值模拟结果,将不同导热率的防火板保护



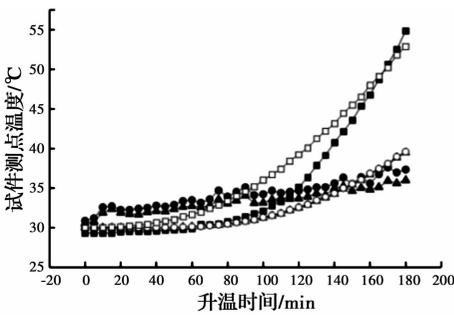
注: —●— 试验测点2 —●— 试验测点5 —●— 试验测点8  
 - - -○- - 模拟测点2 - - -○- - 模拟测点5 - - -○- - 模拟测点8

图 13 2号模型测点 2、5、8 试验、数值模拟值温度曲线比较  
 Fig. 13 Comparison of measured and simulated temperature curves of measured points 2, 5 and 8 of model 2



注: —●— 试验测点1 —●— 试验测点5  
 - - -○- - 模拟测点1 - - -○- - 模拟测点5

图 14 3号模型测点 1、5 试验、数值模拟值温度曲线比较  
 Fig. 14 Comparison of measured and simulated temperature curves of measured points 1 and 5 of model 3



注: —●— 试验测点3 —●— 试验测点4 —●— 试验测点5  
 - - -○- - 模拟测点3 - - -○- - 模拟测点4 - - -○- - 模拟测点5

图 15 3号模型测点 3、4、5 试验、数值模拟值温度曲线比较  
 Fig. 15 Comparison of measured and simulated temperature curves of measured points 3, 4 and 5 of model 3

下橡胶支座表面温度达到临界温度 150 °C<sup>[12]</sup>时极限厚度制成表方便工程实际应用。并同时根据《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)中对柱构件一、二、三级耐火等级的耐火极限时间,取 3、2.5、2 h 时的温度值进行表格绘制。详见表 4。

从表 4 可得导热率 0.24 的防火板受火 2 h 时橡胶表面温度不超过 150 °C 防火板厚度不能低于 49 mm, 2.5 h 时防火板厚度不能低于 56 mm, 受火

3 h 时厚度不能低于 62 mm。

表 4 不同防火板导热率对应其临界温度时防火板厚度  
 Table 4 Different heat conductivity of fire vane corresponding to its critical temperature vane thickness

防火板导热率	防火板厚度/mm		
	受火时间 2.0 h	受火时间 2.5 h	受火时间 3.0 h
0.10	14	17	20
0.12	20	23	27

续表 4

防火板导热率	防火板厚度/mm		
	受火时间 2.0 h	受火时间 2.5 h	受火时间 3.0 h
0.14	26	30	34
0.16	31	36	40
0.18	36	41	46
0.20	41	46	52
0.22	45	50	56
0.24	49	54	60
0.26	53	58	63
0.28	56	61	66
0.30	59	64	69
0.32	62	67	72
0.34	64	69	74
0.36	67	72	76
0.38	69	74	78
0.40	71	75	80
0.42	72	77	81
0.44	74	79	82
0.46	76	80	83
0.48	77	81	84
0.50	78	83	86

### 5 结论

在一维非稳态热传导的基础上推导出对于 ISO834 火灾标准升温下的热传导公式,并进一步得到火灾下隔震橡胶支座防火保护热传导公式。采用 3 个工程常用的隔震橡胶支座防火保护进行 ISO834 标准火灾升温下的耐火性能研究,将试验结果、数值模拟结果与理论分析结果进行对比,验证了公式及模型的有效性。以公式为依据得到不同导热率对应其隔震橡胶支座表面达到临界温度时防火板极限厚度,得到以下结论。

1)工程常用的 LNR500 和北京新机场使用的目前工程最大的 LNR1500 隔震橡胶支座经防火保护后在 ISO834 标准火灾升温下橡胶表面温度都远低于 150 °C,且防火保护装置无脱落,证明经保护的隔震橡胶支座耐火极限大于 3 h,达到 GB 50016—2014 建筑防火规范耐火等级一级的要求。

2) ABAQUS 有限元模型与试验数据吻合较好,表明数值计算的方法可用于进行隔震橡胶支座防火保护设计使用,进一步验证了公式的有效性。

3) 理论结果与试验结果、模拟结果吻合较好,证明该理论公式可作为工程上快速判定防火保护内温度的依据。

4) 基于公式及参数化分析结论,提出能在工程实际中使用的3种防火等级下不同防火板导热率对应其临界温度时防火板厚度。按照普通导热率0.25的防火板耐火极限2h时防火板厚度应大于51mm,2.5h时防火板厚度应大于56mm,耐火极限3h时厚度应大于62mm。

### 参考文献:

[1] TASAKA M, MORI N, YAMAMOTO H, et al. Applying seismic isolation to buildings in Japan: retrofitting and middle-story isolation [C]//18th Analysis and Computation Specialty Conference at Structures Congress, Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.

[2] MOKHA A S, AMIN N, CONSTANTINOUC M C, et al. Seismic isolation retrofit of large historic [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3): 298-308.

[3] KANI N, KATSUTA S. Seismic isolation retrofit for existing buildings in Japan [C]//ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and other Structures, December 9-11, 2009, San Francisco, California, USA, 2009.

[4] MAZZA F. Residual seismic load capacity of fire-damaged rubber bearings of RC base-isolated buildings[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 951-970.

[5] TUBALDI E, MITOULIS S A, AHMADI H. Comparison of different models for high damping rubber bearings in seismically isolated bridges [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 104: 329-345.

[6] MARKOU A A, MANOLIS G D. Mechanical models for shear behavior in high damping rubber bearings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 221-226.

[7] HEDAYATI DEZFULI F, LI S, ALAM M S, et al. Effect of constitutive models on the seismic response of an SMA-LRB isolated highway bridge [J]. Engineering Structures, 2017, 148: 113-125.

[8] 周通, 李爱群. 铅芯橡胶支座单元模型的开发及验证 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1154-1160.

ZHOU T, LI A Q. Development and verification of

element model for lead-rubber bearings[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2017, 47(6): 1154-1160. (in Chinese)

- [9] 胡鹰, 赵鹏飞, 杨波, 等. 自然灾害中钢结构构件温度场模拟 [J]. 土木建筑与环境工程, 2015(Sup1): 78-83. HU Y, ZHAO P F, YANG B, et al. Temperature field simulation of steel components under natural fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2015(Sup1): 78-83. (in Chinese)
- [10] 董香艳, 张宏涛, 侯艳粉. 火灾下钢管混凝土柱钢梁节点的力学性能研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup1): 35-38. DONG X Y, ZHANG H T, HOU Y F. Concrete filled steel tube under the fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(Sup1): 35-38. (in Chinese)
- [11] 周雅萍. 建筑隔震橡胶支座耐火性能试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. ZHOU Y P. Research on fire resistance of building seismic rubber bearings [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [12] 增田直巳, 井出羲人, 仓本真介, 等. 隔震建筑防火设计指南 [M]. 东京: 日本免震构造学会, 2012. NAOMI M, MASATO I, SHOSUKE K et al Design guide of isolation structure [M]. Tokyo: The Japan Society of Seismic Isolation, 2012. (in Japanese)
- [13] WU B, HAN L W, ZHOU F L, et al. Experimental study on fire resistance of building seismic rubber bearings [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12): 1593-1602.
- [14] 吴波, 韩力维, 周福霖, 等. 建筑隔震橡胶支座的耐火性能试验[J]. 土木工程学报, 2011, 44(12): 50-57. WU B, HAN L W, ZHOU F L, et al. Experimental study of fire resistance of seismic rubber bearings [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(12): 50-57. (in Chinese)
- [15] MAZZA F. Torsional response of fire-damaged base-isolated buildings with elastomeric bearings subjected to near-fault earthquakes [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(9): 3673-3694.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 133-137. YANG S M, TAO W Q. Heat transfer [M]. Beijing: higher education press, 2006: 133-137. (in Chinese)
- [17] 张晓丽, 陈洁珍, 崔之开. 普通硅酸铝耐火纤维毡导热系数的研究 [J]. 钢铁, 1994, 29(9): 62-66. ZHANG X L, CHEN J Z, CUI Z K, Thermal conductivity of ordinary aluminosilicate refractory fiber felts [J]. Iron and Steel, 1994, 29(9): 62-66 (in Chinese)