

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.034



开放科学(资源服务)标识码OSID:



镁晶板-钢筋混凝土叠合楼板耐火性能试验研究

王卫永^{a,b}, 李亚盟^a, 李江^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 镁晶板-钢筋混凝土叠合楼板的下层为预制新型耐火材料镁晶板, 上层为现浇钢筋混凝土板。为了研究镁晶板-钢筋混凝土叠合楼板在不同荷载比下的耐火性能及耐火等级, 对3块叠合楼板试件进行ISO-834标准升温下的受火试验, 得到叠合板不同位置的受火时间-温度曲线和受火时间-跨中位移曲线。试验表明, 叠合板具有良好的耐火性能, 耐火极限可达到1.5 h以上。利用有限元软件ABAQUS分析了试件的耐火性能, 通过与试验结果对比, 验证了模型的可靠性, 进而采用模型考察荷载比、镁晶板厚度、混凝土保护层厚度、钢筋和混凝土的强度对叠合楼板耐火极限的影响。分析表明, 荷载比和镁晶板厚度对叠合楼板耐火极限影响较大。基于参数分析结果, 给出不同荷载比和不同镁晶板厚度叠合板的耐火极限。

关键词: 镁晶板; 叠合楼板; 耐火试验, 有限元分析; 荷载比

中图分类号: TU398; TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)03-0044-11

Experimental study on fire resistance of magnesium crystal plate reinforced concrete composite floor

WANG Weiyong^{a,b}, LI Yameng^a, LI Jiang^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The lower layer of magnesium crystal plate reinforced concrete composite floor is a prefabricated new fire-resistant magnesium crystal plate, and the upper layer is cast-in-situ reinforced concrete plate. In order to study the fire resistance and fire resistance rating of magnesium crystal plate reinforced concrete composite slab under different loading ratios, three composite slab specimens were tested subjected to ISO-834 standard temperature rise, and the fire time-temperature curve and fire time mid span-deflection curve at different positions of the composite slab were obtained. The test results show that the composite slab has good fire resistance up to more than 1.5 hours. The fire resistance of the specimens was analyzed by using the finite element software ABAQUS, and the reliability of the established model was verified by comparing with test results. The effects of loading ratio, thickness of magnesium crystal plate, thickness of concrete protective layer, strength of reinforcement and concrete on the fire resistance limit were investigated via the established

收稿日期: 2022-01-15

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-jqX0021)

作者简介: 王卫永(1982-)男, 博士, 教授, 主要从事钢结构抗火研究, E-mail: wywang@cqu.edu.cn.

Received: 2022-01-15

Foundation item: Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2021jcyj-jqX0021)

Author brief: WANG Weiyong (1982-), PhD, professor, main research interest: structural fire resistance, E-mail: wywang@cqu.edu.cn.

model. The analysis shows that the load ratio and the thickness of magnesium crystal plate have great influence on the fire resistance of the composite slab. Based on parametric analysis, the fire resistance of composite slab is proposed for different loading ratios and thicknesses of magnesium crystal plate.

Keywords: magnesium crystal plate; combined slab; fire test; finite element analysis; load ratio

镁晶板-钢筋混凝土叠合楼板是将预制镁晶板作为永久模板,上部浇筑混凝土叠合层后,形成装配整体式叠合楼板。镁晶板既作为模板使用,同时又参与受力。在工厂按照预先的尺寸直接在镁晶板上浇筑混凝土,待养护完成后,混凝土和镁晶板作为整体进行使用,也可以在现场将镁晶板作为模板进行混凝土浇筑,两种方式都不进行拆模。该叠合楼板兼具装配式楼板和现浇楼板的特点,与装配式楼板相比,具有整体性能优越、楼板刚度大、抗震性能好等优点;与现浇楼板相比,具有施工简便、缩短工期、节省材料等优点^[1]。镁晶板作为新型防火材料,具有良好的防火性能,与传统建筑材料相结合,可以发挥其良好的隔热效果,延长楼板的耐火极限,符合一体化建筑构件的发展趋势^[2-3]。

对于组合楼板,已有很多学者做了研究^[4]。聂建国等^[5]使用不同强度的叠合层混凝土对不同叠合面的叠合板进行抗剪试验,结果表明,对于无抗剪钢筋的混凝土,叠合板仍有很好的抗剪强度,能够保证其整体工作性能。李耀庄等^[6]设计了倒T形叠合连续板并进行静载试验,研究其破坏形态,发现这种新的叠合板型式具有很好的延性,整体工作性能良好。汪磊^[7]分析了不同拼缝形式对叠合板承载力的影响,试验表明,合理的拼缝形式可有效提高叠合板的承载力。除此之外,叠合楼板耐火的也有很多。Xu等^[8]对双向约束预制混凝土组合板耐火性能进行了试验研究,结果表明,当板承受相同荷载时,由于边缘产生的支座负弯矩,两端约束的板可以显著提高板的耐火性能;当荷载比相同时,约束板和非约束板的耐火性能相同。高立堂^[9]对简支和连续支承条件的叠合楼板进行耐火试验,考虑了保护层厚度和预应力对耐火极限的影响,结果表明,保护层厚度对耐火极限影响较大,而预应力则不太明显。Fike等^[10]通过试验得出,影响组合楼板耐火性能的因素有火灾场景、荷载水平、板厚度和混凝土类型。周绪红等^[11]在ISO-834标准升温条件下进行了8个预制混凝土叠合楼板耐火性能试验,发现相同钢筋强度下的预应力试件耐火极限小于非预应力试件;在板底抹水泥砂浆粉能有效提高耐火极限。

现有的叠合楼板试验主要集中在常温下的静力试验研究,耐火试验主要研究不同钢筋强度、形式对耐火极限的影响,同时,预制板多采用传统的叠合楼板材料混凝土,而对预制层为镁晶板的叠合楼板研究甚少。基于镁晶叠合楼板良好的抗火性能及潜在的应用前景,笔者对3个镁晶板-混凝土叠合楼板试件进行受火试验,得到其耐火极限并判断耐火等级,通过有限元程序ABAQUS分析影响其高温承载力的因素。

1 试验概况

1.1 试件设计

共设计3个试件,每个试件由混凝土板、镁晶板和钢筋3部分组成。混凝土板使用C30强度等级,尺寸为2 300 mm×1 100 mm×100 mm。混凝土内布置双层焊接钢筋网,钢筋采用热轧光圆钢筋HPB300,直径为8 mm,焊接方式为点焊。钢筋网纵向布置6根钢筋,长度为2 270 mm,横向布置12根钢筋,长度为1 070 mm,钢筋间距为200 mm,混凝土保护层厚度为15 mm。底模板为具有隔热作用的镁晶板,尺寸为2 400 mm×1 200 mm×20 mm,成分主要有水泥、沙、植物纤维、耐碱玻纤网和少量氧化镁,镁晶底模板与混凝土的连接方式主要靠混凝土的粘结力。

1.2 试验装置

试验装置主要由可组装式电炉、加载框架组成,如图1所示。可组装式电炉由加热板和隔热板组成,可根据试验要求提供预定的升温条件并组装成相应空间形式,按照ISO-834标准升温曲线给出的时间-温度曲线来设定试验温度。试验使用2块加热板和6块隔热板,一块加热板的加热区域尺寸为1 000 mm×1 000 mm,一块隔热板的尺寸为1 000 mm×650 mm。两块加热板置于底部,在四周固定隔热板,围成一个电炉。4根立柱上的支铰支座提供两边简支的边界条件。加载框架固定在楼板中轴线正上方,预加载结束后,将荷载通过预先制作的装置悬挂于加载框架上,调整高度使荷载有11 cm的位移量,保证试验过程中楼板有充分的变形,同时防止试验过程中或试验结束后因炉温

不能及时散热且荷载不能卸载,构件持续受热和受荷载可能造成构件断裂,荷载块和试件跌入电炉,造成电炉损坏。

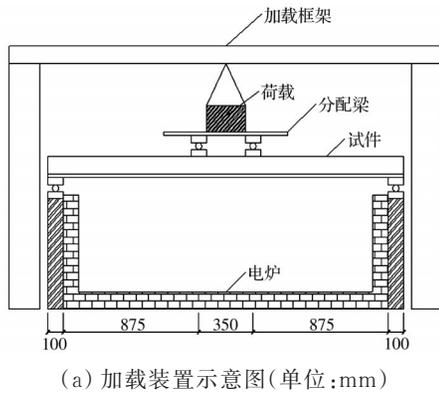


图1 试验装置
Fig. 1 Test setup

1.3 加载制度

试验采用恒载升温的方式,荷载大小根据工程实际情况和常温抗弯试验得到的抗弯承载力来确定。静力试验实测的极限荷载为 42 kN,按两点加载计算出弯矩为 16 kN·m,按两个荷载比 0.3 和 0.4 将 3 个试件分为两组,确定两组荷载比条件下的跨中弯矩分别为 4.8、6.3 kN·m。3 个试件的加热时间为两个 90 min,一个 180 min。升温过程中,利用电炉控制箱预先输入 ISO-834 标准升温曲线中时间与温度数据,利用热电偶测量电炉中的温度,电炉控制箱可以比较炉中温度与标准升温的差异,不断调整电炉的功率,使炉中温度始终保持在预定的温度左右。3 个试件编号分别为 S-0.3-90、S-0.4-90 和 S-0.4-180,以 S-0.3-90 为例,S 代表板,0.3 表示荷载比为 0.3,90 则代表受火时间为 90 min。

1.4 传感器布置

根据试验目的,需要测量楼板的跨中位移和楼板沿厚度方向的温度。为了测量跨中位移,在跨中

位置布置一个位移传感器 LVDT(量程 ±150 mm),编号 H1。测量温度的位置有试件受火面、试件背火面、距混凝土板上表面向下 5 cm 深处和炉温,即混凝土上表面向下 0、5、12、22 cm 处的温度。相应的热电偶编号分别为 T1、T2、T3 和 T4,试件横截面的温度分布通过钻孔固定的热电偶测量。温度测量采用 K 型热电偶,K 型热电偶的工作温度为 0~1 100 °C。传感器布置如图 2 所示。

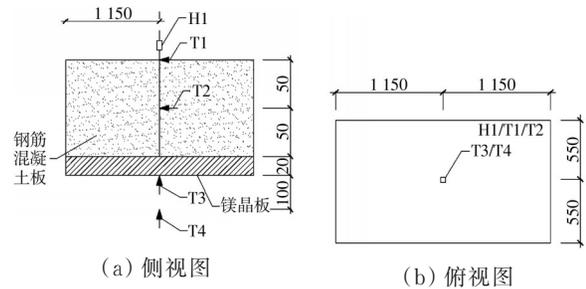


图2 传感器布置(单位:mm)
Fig. 2 Distribution of sensors (Unit:mm)

1.5 试验终止条件

根据《建筑构件耐火试验方法》(GB/T 9978.1—2008)^[12]和《建筑设计防火规范》(GB 50016—2014)^[13]中的规定,叠合楼板的耐火极限由承载能力和隔热性能综合确定,耐火等级为一级的楼板,耐火极限为 90 min。各项耐火极限的判定细则为:

1) 承载能力。弯曲变形量达到 $D=L/20$,即 105 mm。

2) 隔热性。背火面的平均温度温升,超出试验开始时背火面的初始平均温度 140 °C;背火面任一点位置的温升,超出试验开始时背火面的初始平均温度 180 °C。

当受火时间超过 90 min 后,考虑到实际火灾情况和试验安全,可进一步探究楼板在 180 min 内能否达到耐火极限。因此,试验终止条件为:试件 S-0.3-90、S-0.4-90 出现情况 1)、2) 或者楼板受火时间超过 90 min 时;试件 S-0.4-180 出现情况 1)、2) 或者楼板受火超过 180 min 时。

2 试验结果

2.1 试验现象

受火 11 min 时可以观察到试件 S-0.3-90 混凝土板与镁晶板连接处开始出现水蒸汽,随着受火时间的增加,水蒸汽开始从混凝土板与镁晶板连接位置逸出并有水珠沿电炉壁滴落,从试验开始到结

束,混凝土上表面都没有出现水蒸气和水渍。其他 2 个试件的试验现象与第一块类似,连接处开始出现水蒸汽的时间分别是 10、12 min,后续随着温度的上升,水蒸汽在连接处不断逸出,一直到试验结束。从试验开始到结束,受火为 90 min 的两个叠合楼板混凝土上表面都没有明显变化。从试验开始 12 min 到试验停止,试件 S-0.4-180 的镁晶板与混凝土板连接处始终有水蒸汽冒出,试验进行到 148 min 时,在背火面的裂缝中出现了少量蒸汽,混凝土上表面有多处水渍。试验结束后,待电炉冷却到室温,观察破坏现象。在试件 S-0.3-90 的钢筋混凝土板跨中长边侧面有一条 2 mm 宽的主裂缝,在镁晶板跨中长边侧面则有数条宽 0.2~1 mm 的裂缝和一条主裂缝,如图 3 所示。在试件 S-0.4-90 跨中位置同样有一条宽 2 mm 的主裂缝,在镁晶板跨中位置处有受拉破坏导致的裂缝,可以看到镁晶板内的纤维网裸露,镁晶板受火严重,变成粉末状,丧失强度,如图 4 所示。图 5 为试件 S-0.4-90 破坏现象,混凝土板裂缝同样出现在跨中长边侧面,在吊起试验时,因为重力,镁晶板跌落炉内。



(a) 镁晶板跨中裂缝



(b) 镁晶板跨中断裂

图 3 试件 S-0.3-90 试验现象

Fig. 3 Test phenomenon of specimen S-0.3-90

2.2 温度结果

图 6 为 ISO-834 标准升温、实测炉温及各个测点时间-温度曲线。从图中可以看出,各个电炉的



(a) 混凝土板跨中裂缝



(b) 镁晶板跨中裂缝

图 4 试件 S-0.4-90 试验现象

Fig. 4 Test phenomenon of specimen S-0.4-90



(a) 混凝土跨中裂缝



(b) 镁晶板破坏

图 5 试件 S-0.4-180 试验现象

Fig. 5 Test phenomenon of specimen S-0.4-180

温度都在 20 min 左右接近标准升温曲线对应的温度,前期未能达到预定升温条件的原因可能是:电炉空间大,空气充分受热需要一定时间;板与电炉有一定距离,虽然塞满保温棉,但仍然不能保证完

全阻止热量散失;板与铰支座接触的地方形状不规则,难以完全塞密实。试验停火时刻各测点同一厚度处的最高温度如表 1 所示。根据试验终止条件,各个试件的上表面最大温度超过室温 180 °C 或者平均温度超过室温 140 °C,则被认为丧失隔热性。可以看到,上表面的温度都没有超过规范允许限值,甚至在 5 cm 处温度也在规范规定的限值范围内。

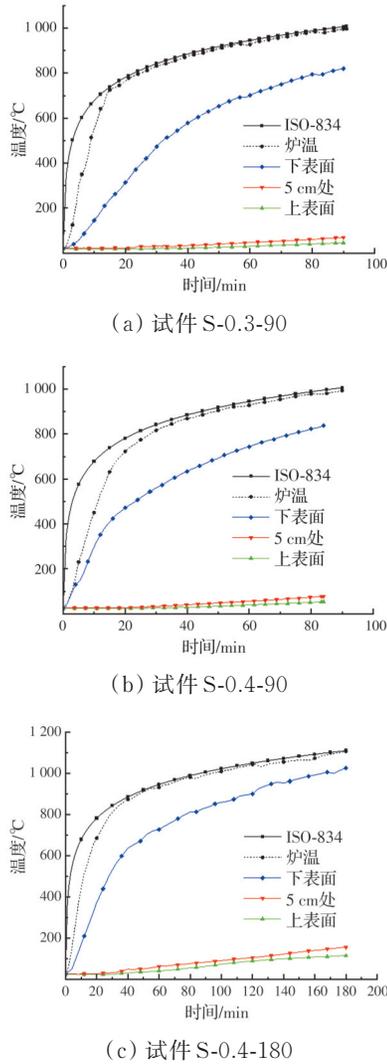


图 6 时间-温度曲线

Fig. 6 Time-temperature curve

表 1 各测点最高温度

试件编号	上表面温度 / °C	5 cm 处温度 / °C	下表面温度 / °C
S-0.3-90	50.3	70.0	823.8
S-0.9-90	53.3	77.7	836.4
S-0.9-180	114.5	155.3	1 025.9

图 7 为各试件截面温度随截面高度的变化曲线,可以看出,各试件的截面升温规律相似,随着受火时间的增加,在受火下表面到距混凝土上表面 5 cm 处的区域,温度变化较大,说明在这个厚度范围内热量传递较快;在 5 cm 至上表面厚度范围内温度变化较小,说明这个厚度热传递比较缓慢。随着受火时间的不断增加,温度曲线分布逐渐变得密集,说明温度的变化逐渐趋缓。由此可判断,混凝土的热传导系数随温度逐渐变化,随着温度的升高,变化率逐渐减小,热传导系数最终趋近于某一个常数。

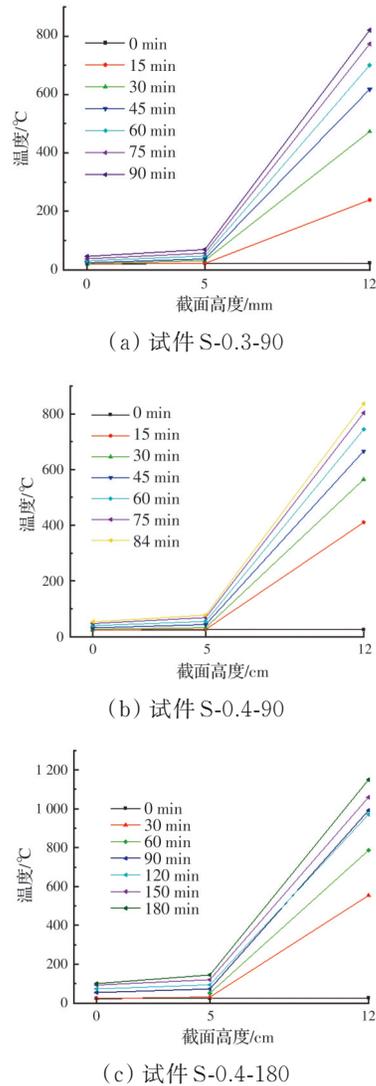


图 7 温度沿截面高度分布曲线

Fig. 7 Temperature distribution along section height

2.3 位移结果

试验共测得有效位移数据 3 组,试验终止时,试件 S-0.3-90、S-0.4-90 和 S-0.4-180 跨中位移分别为 9.001、10.456、29.412 mm。时间与位移的关系如

图8所示,从图中可以看出,3个试件的跨中位移基本上随时间呈线性变化,因为镁晶板良好的隔热性能,试验开始5 min内,叠合楼板力学性能变化不大,随着温度持续上升,构件的钢筋混凝土力学性能开始下降,时间-位移曲线近似为线性,说明此时叠合楼板仍有剩余承载力。

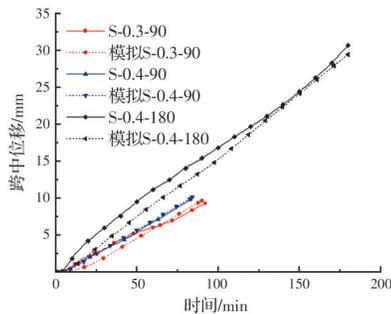


图8 时间-位移曲线

Fig. 8 Time-displacement curve

3 有限元分析

3.1 模型建立

使用ABAQUS有限元软件建立叠合楼板模型并模拟试验的整个过程。传热模型中混凝土和镁晶板使用类型为DC3D8的实体单元,钢筋使用类型为DC1D2的线单元。在热力耦合步骤中,混凝土和镁晶板使用C3D8R,钢筋使用T3D2。混凝土和钢筋的力学性能参数和热工参数分别参考了标准EN 1992-1-2^[14]和EN 1993-1-2^[15]。镁晶板的弹性模量和强度采用实测数据,弹性模量为333 MPa,抗拉强度约为4 MPa。镁晶板的膨胀系数、密度、导热系数由厂家测试给出,分别为 1.6×10^{-6} 、 $1\ 200\ \text{kg/m}^2$ 和 $1.6\ \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,比热容采用文献[16]中给出的值,数据如表2所示。在传热模型中,镁晶板和混凝土板及钢筋和混凝土之间采用绑定(Tie)的连接方式,以保证温度的传递,温度施加采用辐射和对流的方式,受火面和背火面的对流系数分别取 25 、 $9\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,辐射系数都取 0.7 ,初始环境温度为 $20\ ^\circ\text{C}$ 。热力耦合采用顺序耦合方法,保证热力耦合和传热模型中的网格划分是相同的,将传热分析得到的温度结果作为预定义场导入热力耦合模型中,使用Embedded将钢筋置于混凝土中。考虑到试验过程中镁晶板与混凝土脱落,拉力主要由钢筋承担,在升温过程中,镁晶板强度会随温度的增加而降低,所以仅在传热模型中考虑镁晶板的隔热作用,在热

力耦合过程中不考虑其对承载力的作用。将传热模型得到的温度场导入热力耦合模型中,施加边界条件和荷载条件。

表2 有限元模型中比热容与温度的关系

Table 2 Relationship between specific heat capacity and temperature of finite element model

温度/ $^\circ\text{C}$	比热容/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
20	700
110	4 000
350	4 800
480	1 500
900	1 500

图9为有限元模型示意图,叠合楼板的支承条件为两边简支,在楼板模型下表面与铰支座接触的两个区域的形心处建立参考点并将该区域与参考点进行耦合,参考点编号为RP1、RP2,分配梁与试件上表面接触的两个区域的形心采用同样的处理方法,参考点编号为RP3、RP4。将荷载作用在参考点RP3和RP4上,并将参考点RP1的边界条件设为 $U_1=U_2=U_3=UR_1=0$,即限制该区域在3个方向上的位移和绕纵向中轴线的转动,将参考点RP2的边界条件设为 $U_3=UR_1=0$,即限制该区域竖向位移和绕纵向中轴线的转动。

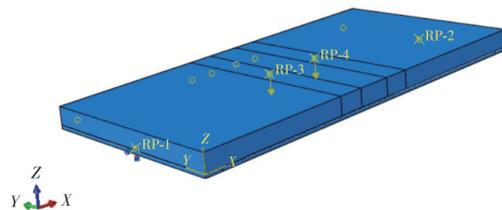


图9 叠合楼板模型示意图

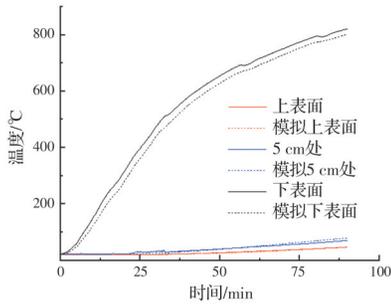
Fig. 9 Schematic diagram of composite floor model

3.2 模型验证

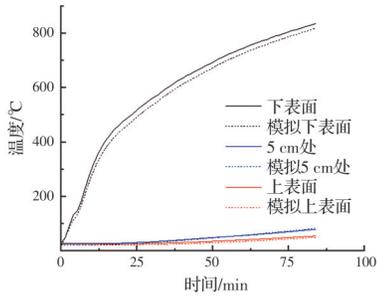
将3块板实测的环境温度输入到ABAQUS幅值中并作用在镁晶板模型底部,测点位置与试验相同,模拟与试验测得的时间-温度对比如图10所示,相同测点最大温差为 $22\ ^\circ\text{C}$,温度场的模拟结果与试验结果相近,可以利用该模型进行热力耦合计算。根据图8,对比3个试件位移的模拟与试验结果,并进行量化比较,结果如表3所示。总体而言,模拟与试验结果吻合较好,验证了有限元分析的准确性。

3.3 隔热性能比较

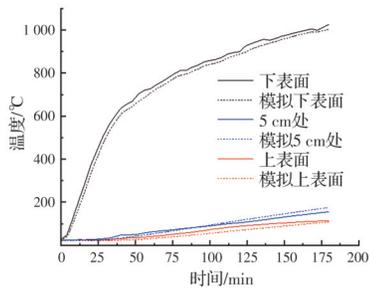
为了解镁晶板与混凝土隔热性能的差别,在有



(a) 试件 S-0.3-90



(b) 试件 S-0.4-90



(c) 试件 S-0.4-180

图 10 试验和模拟时间-温度曲线的对比

Fig. 10 Comparison of time-temperature curves between test and simulation

表 3 试验和模拟位移结果的比较

Table 3 Comparison of displacement results between test and simulation

试件编号	最大位移差/%	模拟位移平均变化率/(mm·min ⁻¹)	试验位移平均变化率/(mm·min ⁻¹)
S-0.3-90	4.10	0.10	0.10
S-0.4-90	3.50	0.11	0.12
S-0.4-180	4.10	0.17	0.16

限元程序中设计了两个试件,尺寸如表 4 所示,在 ISO-834 的升温条件下,相同测点的温度对比如图 11 所示。可以看出,增加镁晶板对叠合楼板相同截面高度处测点的温度有影响,以 90 min 时为例,相同测点处 5 cm 处和上表面温度如表 5 所示,试件 A1 比试件 A2 的温度分别高 85、182 °C,镁晶板的隔热

效果要好于混凝土。

表 4 试件尺寸

Table 4 Specimen size

试件编号	保护层厚度/mm	镁晶板厚度/mm	总厚度/mm
A1	25	0	110
A2	15	10	110

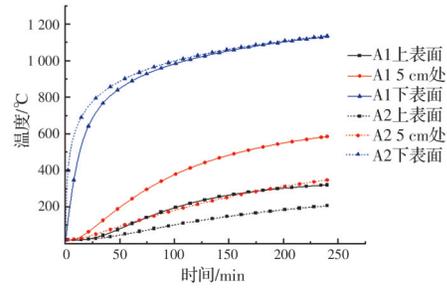


图 11 相同测点温度对比

Fig. 11 Temperature comparison of the same measuring point

表 5 90 min 时刻测点温度

Table 5 Temperature of measuring point at 90 min

试件编号	5 cm 处温度/°C	上表面温度/°C
A1	175	347
A2	90	165

4 参数分析

影响叠合楼板耐火性能的因素有 3 个方面:1) 隔热性能。包括镁晶板厚度和混凝土保护层厚度,因为温度会造成材料本身强度和刚度的退化;2) 荷载比。荷载越大,则产生的弯矩越大;3) 材料本身的强度。包括混凝土强度和钢筋强度。根据以上分析,设置 15 个构件,模拟模型中镁晶板、混凝土板的长×宽都为 2 300 mm×1 100 mm,钢筋采用 HPB300、HRB400 和 HRB500,混凝土采用 C30、C40 和 C50 强度等级。钢筋和混凝土的本构关系按照 EN 1992-1-2^[14]和 EN 1993-1-2^[15]的相关规定确定。各个试件的参数见表 6,确定耐火极限的方法与前述试验方法相同。

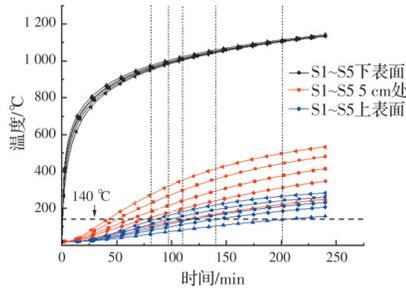
4.1 镁晶板厚度

选择试件 S1~S5 来探究镁晶板厚度对叠合楼板承载力的影响。首先进行传热分析,将 ISO-834 标准升温的温度作用在镁晶板下表面,传热后 3 个测点的温度结果如图 12 所示。可以看出,不同的镁晶板厚度对传热的影响很大,以 S2 和 S4 为例,120 min 后,上表面混凝土相差 37 °C,5 cm 处的温度相

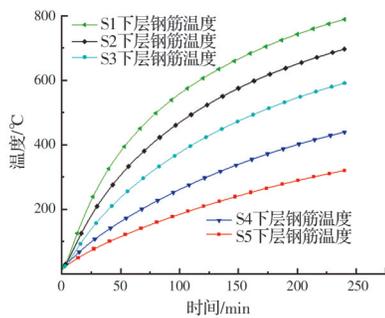
表6 试件参数

Table 6 Parameter of specimen

试件编号	镁晶板厚度/mm	混凝土保护层厚度/mm	荷载比R	钢筋屈服强度/MPa	混凝土强度等级
S1	3	15	0.7	300	C30
S2	5	15	0.7	300	C30
S3	8	15	0.7	300	C30
S4	10	15	0.7	300	C30
S5	20	15	0.7	300	C30
S6	5	25	0.7	300	C30
S7	5	15	0.3	300	C30
S8	5	15	0.4	300	C30
S9	5	15	0.5	300	C30
S10	5	15	0.6	300	C30
S11	5	15	0.8	300	C30
S12	5	15	0.7	400	C30
S13	5	15	0.7	500	C30
S14	5	15	0.7	300	C40
S15	5	15	0.7	300	C50



(a) 测点时间-温度曲线



(b) 下层钢筋时间-温度曲线

图12 不同镁晶板厚度测点温度

Fig. 12 Temperature of measuring points under different thickness of magnesium crystal plate

差 85 °C, 240 min 后 5 cm 处的温度相差 133 °C。5 个试件下层受拉钢筋的温差随时间增加而增大, 90 min 时, S2 下层钢筋温度比 S4 大 200 °C; 180 min 时, 两者相差 246 °C。5 个试件的跨中位移对比如图 13 所示, 耐火极限如表 7 所示。

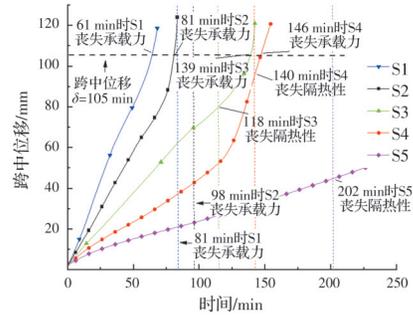


图13 不同镁晶板厚度的叠合楼板跨中位移对比

Fig. 13 Mid span displacement comparison of composite slabs with different thickness of magnesium crystal plate

表7 不同镁晶板厚度下耐火极限

Table 7 Fire resistance limit under different thickness of magnesium crystal plate

判断标准	耐火极限/min				
	厚 3 mm	厚 5 mm	厚 8 mm	厚 10 mm	厚 20 mm
承载能力	61	81	139	146	—
隔热性	85	98	118	140	202
耐火极限	61	81	118	140	202

注: “—”表示 240 min 内仍满足耐火极限要求。

4.2 保护层厚度

在《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[17]中, 保护层厚度定义为最外层钢筋外边缘至混凝土表面的距离, 在计算结构正截面承载力时不考虑混凝土的受拉作用, 可认为保护层的厚度对承载力没有影响, 但升高相同的温度, 更厚的保护层需要吸收更多的热量, 具有一定的隔热作用, 因此, 需要考虑保护层的厚度对传热效率的影响。对设置两种不同保护层厚度的叠合楼板 S2 和 S6 进行传热分析, 各测点的温度如图 14 所示, 可以看出, 不同保护层厚度下各测点温度的最大差值分别为 4、5 °C; 达到耐火极限时, 两个试件下层钢筋的应力分别为 274、288 MPa, 都进入退化阶段。从测点及下层钢筋的应力对比来看, 混凝土保护层厚度的改变不足以引起温度发生大的变化, 可认为保护层厚度对耐火承载力没有影响。

4.3 荷载比

荷载比是指火灾下结构或构件荷载效应的设计值与常温下其承载力设计值的比值^[18]。根据静力试验数据并参考模拟得到的极限弯矩, 承载力为 20 kN·m, 模拟选取试件 S2、S7、S8、S9、S10 和 S11, 考虑荷载比 R 为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8, 如 R=0.7 表示荷载取抗弯承载力的 0.7 倍。将传热结果导入热力耦合模型中, 经热力耦合分析后, 位移如

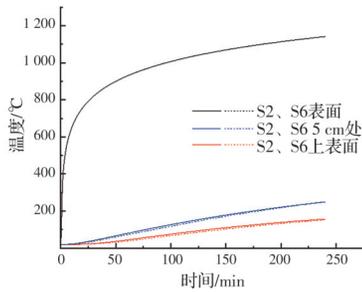


图 14 不同保护层厚度叠合楼板温度的对比

Fig. 14 Temperature comparison of composite floors with different thickness of reinforcement cover

图 15 所示,可见荷载比对耐火极限的影响很大,得到各个荷载水平下的耐火极限如表 8 所示。

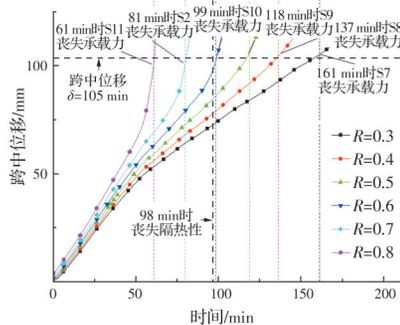


图 15 不同荷载比下叠合楼板跨中位移的对比

Fig. 15 Mid span displacement comparison of composite floors with different load ratios

表 8 不同荷载比下的耐火极限

Table 8 Fire resistance limit under different load ratios

判断标准	耐火极限/min					
	荷载比 0.3	荷载比 0.4	荷载比 0.5	荷载比 0.6	荷载比 0.7	荷载比 0.8
承载能力	161	137	118	99	81	61
隔热性	98	98	98	98	98	98
耐火极限	98	98	98	98	81	61

试件 S7、S8、S9 和 S10 破坏形态比较类似,以 S9 为例,将受火过程分为 3 个阶段。第 1 阶段:0~50 min。300 °C 以下钢筋强度不随温度折减,温度的升高只引起弹性模量的降低和材料的受热膨胀,从而导致跨中位移随时间呈线性增长;第 2 阶段:50~110 min。此时钢筋达到屈服并进入强化段,且受压区混凝土的温度并不高,退化不明显,位移增长速率稍微降低;第 3 阶段:110 min 以后。下层钢筋温度较高,因为热量的传递,受压区混凝土强度开始进入退化阶段,叠合板上表面温度、跨中位移都已经达到耐火极限的限值。对于 $R=0.6$ 、 $R=0.7$ 及

$R=0.8$ 的情况,因为承受的弯矩过大,温度一旦上升,下层钢筋快速屈服,进入强化段,随着温度的上升,刚度逐渐退化,跨中位移进入快速增加阶段并很快破坏,未达到一级耐火极限的要求。

4.4 钢筋强度

取试件 S2、S12 和 S13 进行分析。3 种不同强度的钢筋对耐火承载力的影响如图 16 所示,可以看到,3 个试件的时间-跨中位移曲线趋势比较接近,3 种钢筋的耐火极限分别为 81、80、80 min,可见钢筋的强度等级对耐火极限影响很小。在有限元模型材料属性中,3 种钢筋在 400 °C 时的屈服应力分别被设置为 274.2、365.7、457.2 MPa,在临界时刻,3 个试件的下层钢筋温度均为 417.8 °C,此时 3 个试件的应力分别为 264、354、442 MPa,都已达到了屈服强度并进入退化阶段。

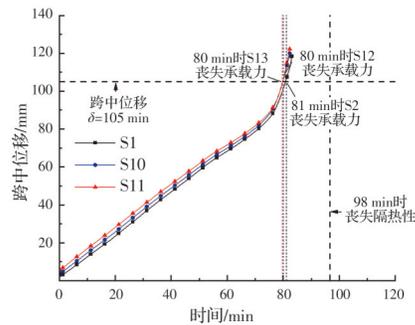


图 16 不同钢筋强度叠合楼板跨中位移的对比

Fig. 16 Mid span displacement comparison of composite floor slab with different reinforcement strength

4.5 混凝土强度

取 S2、S14 和 S15 进行分析。图 17 为不同混凝土强度等级下叠合楼板的时间-跨中位移曲线。由图可知,在其他条件相同的情况下,试件 S2、S14 和 S15 的跨中位移达到 105 mm 时的时间分别为 81、81、83 min,因此,3 块板的耐火极限分别为 81、81、

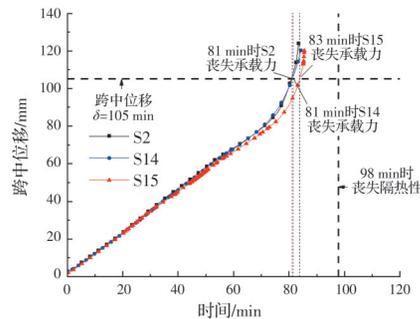


图 17 不同混凝土等级叠合楼板跨中位移的对比

Fig. 17 Mid span displacement comparison of composite floor slab with different grades of concrete

83 min。由此可知,不同混凝土强度的叠合楼板耐火极限基本相同,说明叠合楼板的耐火极限受混凝土强度的影响很小。

5 叠合楼板耐火极限

有限元分析结果表明,镁晶板的厚度和荷载比是影响叠合楼板耐火性能的主要因素,而保护层厚度、钢筋强度和混凝土强度对楼板高温承载力的影响较小。通过对不同镁晶板的厚度、荷载比进行有限元分析,得到各个影响因素与耐火极限的关系,见表9。

表9 镁晶板厚度和荷载比与耐火极限的关系

Table 9 Relationship between thickness and load ratio of magnesium crystal plate and fire resistance limit

镁晶板厚度/mm	耐火极限/min					
	荷载比 0.3	荷载比 0.4	荷载比 0.5	荷载比 0.6	荷载比 0.7	荷载比 0.8
3	86	86	86	72	61	48
5	98	98	98	98	81	61
8	118	118	118	118	118	74
10	139	139	139	139	139	98

从表9中可以发现,在荷载比在大于0.5、0.6、0.7和0.8时,镁晶板厚度为3、5、8、10 mm的叠合楼板的耐火极限随荷载比的增加而减小,而小于以上荷载比时,耐火极限则为定值。以镁晶板厚度为5、10 mm的试件为例,受火118、139 min后,跨中位移仍未达到限值,但因为长时间受火,上表面温度已经不满足隔热要求,此时限制其耐火极限的因素为温度,因此,耐火极限是相同的,为上表面达到140℃时的时间。

6 结论

对3块以新型隔热材料为预制板、上层浇筑混凝土的叠合楼板按照规范试验方法进行抗火试验,并进行有限元参数分析,得到以下结论:

1) 镁晶板的隔热效果良好,能很好地延缓热量在混凝土内部的传导。

2) 影响叠合楼板耐火极限的主要因素是镁晶板厚度和荷载比。厚度为3、5、8、10 mm的镁晶叠合楼板,在荷载比大于0.5、0.6、0.7和0.8时,耐火极限随荷载比的增加而减小,而小于以上荷载比时,耐火极限则为定值,荷载比对耐火极限没有影响,此时可通过增加镁晶板的厚度来提高耐火

极限。

3) 得到多参数对叠合楼板耐火极限的影响规律,可估算相同镁晶板的耐火极限或根据耐火时间选择不同强度的材料。

参考文献

- [1] 崔士起, 刘传卿, 刘文政, 等. 分离式接缝叠合板垂直接缝方向抗弯刚度的试验及计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 75-84.
CUI S Q, LIU C Q, LIU W Z, et al. Research on experiment and calculating methods of flexural stiffness in direction perpendicular to separating-type joints for concrete composite slab [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 75-84. (in Chinese)
- [2] 李志远, 蒋首超. 钢结构柱与墙体围护-防火一体化可行性初步探究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(1): 68-76.
LI Z Y, JIANG S C. Preliminary study on the feasibility of the integrated envelope-fire protection of steel structure column and wall [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(1): 68-76. (in Chinese)
- [3] 王新玲, 汤万里, 李可. 轻钢龙骨预制防火楼板受弯性能分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(5): 45-52.
WANG X L, TANG W L, LI K. An analysis on the bending performance of prefabricated fireproof slabs with light steel joists [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(5): 45-52. (in Chinese)
- [4] 王元清, 成钟寿, 石永久, 等. 闭口型组合楼板纵向剪切承载性能的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(6): 1-6.
WANG Y Q, SUNG J S, SHI Y J, et al. Experimental analysis on the longitudinal shear resistance of flat-type composite slab [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(6): 1-6. (in Chinese)
- [5] 聂建国, 陈必磊, 陈戈, 等. 钢筋混凝土叠合板的试验研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(12): 43-46, 33.
NIE J G, CHEN B L, CHEN G, et al. Experimental study on shear behavior of R. C. laminated slabs [J]. Industrial Construction, 2003, 33(12): 43-46, 33. (in Chinese)
- [6] 李耀庄, 蒋青青, 黄赛超, 等. 混凝土倒T形叠合连续板的试验研究[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(6): 695-698.
LI Y Z, JIANG Q Q, HUANG S C, et al. Experimental study on the RC invertible T slab-continuous composite slab [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2003, 34(6): 695-698. (in Chinese)
- [7] 汪磊. 钢筋混凝土叠合板的受力性能试验研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2013.
WANG L. Experimental study on mechanical behavior

- of reinforced concrete superposed slabs [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2013. (in Chinese)
- [8] XU Q F, CHEN L Z, LI X M, et al. Comparative experimental study of fire resistance of two-way restrained and unrestrained precast concrete composite slabs [J]. *Fire Safety Journal*, 2020, 118: 103225.
- [9] 高立堂. 无粘结预应力砼板火灾行为的试验研究及热弹塑性有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
GAO L T. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis of the behaviors of unbonded prestressed concrete slabs under fire [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003. (in Chinese)
- [10] FIKE R, KODUR V. Enhancing the fire resistance of composite floor assemblies through the use of steel fiber reinforced concrete [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33 (10): 2870-2878.
- [11] 周绪红, 邓利斌, 吴方伯, 等. 预制混凝土叠合楼板耐火性能试验研究及有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(12): 82-90.
ZHOU X H, DENG L B, WU F B, et al. Experimental research and FEA on fire resistance performance of precast concrete composite slabs [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(12): 82-90. (in Chinese)
- [12] 建筑构件耐火试验方法 第1部分: 通用要求 GB/T 9978.1—2008 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Fire-resistance tests-Elements of building construction-Part 1: General requirements: GB/T 9978.1—2008 [M]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)
- [13] 建筑设计防火规范: GB 50016—2014(2018版) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018. (in Chinese)
- [14] European Committee for Standardization. Design of concrete structures Part 1. 2: General rules-structural fire design: EN1992-1-2, Eurocode2 [S]. London: BSI, 2005.
- [15] European Committee for Standardization. Design of steel structures Part 1. 2: General rules-structural fire design: EN1993-1-2, Eurocode3 [S]. London: BSI, 2005.
- [16] 范光明. 高温下常用防火板材热工性能研究[D]. 福建泉州: 华侨大学, 2019.
FAN G M. Study on thermal performance of commonly used fire-resistant plates at high temperature [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2019. (in Chinese)
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [18] 李国强, 韩林海, 楼国彪. 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 G Q, HAN L H, LOU G B. Fire resistance design of steel structure and steel-concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)