

文章编号:1673-2049(2015)03-0089-07

火灾下腹板开孔轻钢龙骨墙体温场 数值模拟分析

李明¹, 王玉银², 孙建运¹, 孙鹏程¹

(1. 中国建筑工程总公司, 北京 101300; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:采用有限元分析软件 ABAQUS 建立了腹板开孔轻钢龙骨围护墙体温场分析模型, 阐述了模型中的若干关键问题, 如受火面与背火面边界条件, 石膏板、岩棉和钢材的热工性能参数及材料间的接触条件等, 并将模拟结果与相关试验结果进行对比。在此基础上, 分析了相关参数对腹板开孔轻钢龙骨墙体背火面的最高温度和平均温度的影响规律。结果表明:该模型可有效模拟该类墙体在火灾下的温度分布;龙骨截面高度与石膏板层数及布置方式均可在较大程度上影响墙体背火面的最高温度与平均温度;腹板开孔排数只对背火面最高温度影响较大, 对平均温度则影响不大。

关键词:腹板开孔轻钢龙骨墙体;温度场;数值模拟;火灾;耐火极限

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

Numerical Simulation Analysis of Thermal Distribution of Slotted Light-gauge Steel Stud Walls Exposed to Fire

LI Ming¹, WANG Yu-yin², SUN Jian-yun¹, SUN Peng-cheng¹

(1. China State Construction Engineering Corporation Limited, Beijing 101300, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: A heat transferring analysis model of thermal distribution of slotted light-gauge steel stud was developed using finite element analysis software ABAQUS to investigate some key issues of the wall exposed to fire, such as the boundary conditions of the exposed side and unexposed side, thermal properties of gypsum board, rock wool and steel, as well as the interactive property parameters between different materials. Comparisons between the simulation results and the related experimental data were done. Based on this, the parametric study was then conducted to investigate their influence on the maximum temperature and average temperature of the walls on the unexposed side. The results show that the finite element model can effectively simulate the temperature distribution of the wall elements exposed to fire. Sectional heights of the studs, the layer of gypsum boards and their arrangement have considerable influence on the maximum temperature and the average temperature of the walls on the unexposed side. Whilst the row number of slots on web only considerably affect the maximum temperature of the walls on the unexposed side but barely affect their average values.

Key words: slotted light-gauge steel stud wall; thermal distribution; numerical simulation; fire; fire resistance

收稿日期:2014-11-20

基金项目:哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2012RFLXG025)

作者简介:李明(1990-),女,河南开封人,工学硕士,E-mail:liming_tc@cscec.com。

0 引言

轻钢龙骨墙体具有自重轻、抗震性能好、保温隔热、节能环保等优点。在传统轻钢龙骨墙体的龙骨腹板上开设狭长交错孔洞形成腹板开孔轻钢龙骨墙体,可有效削弱墙体内部龙骨的热桥效应,从而提高墙体的整体保温性能^[1],同时其抗弯性能与隔声性能亦能满足设计要求^[2-6]。在火灾下,龙骨腹板上的孔洞亦可延长龙骨腹板上热量的传递路径,延长墙体的耐火时间,进而提高墙体的抗火能力。同时,由于岩棉属于无机材料,并且自身保温性能较为优越,在轻钢龙骨墙体内部填充岩棉,既能有效提高墙体的耐火能力,又能有效保护墙体在火灾作用下的完整性。

目前,各国对于轻钢龙骨墙体抗火性能的研究相对较少,相关研究者如 Feng 等^[7-8]、Shahbazian 等^[9]、Chen 等^[10]、计琳等^[11]、陈驹等^[12]、马奇杰等^[13]、Gunalan 等^[14]主要研究传统轻钢龙骨墙体的抗火性能,且墙体为承重构件,针对非承重的腹板开孔轻钢龙骨墙体的抗火性能则尚无研究报道。

本文以非承重的腹板开孔轻钢龙骨墙体为研究对象,利用有限元分析软件 ABAQUS 建立了腹板开孔轻钢龙骨围护墙体的温度场分析模型,阐述了模型中的若干关键问题,如受火面与背火面边界条件,石膏板、岩棉以及钢材的热工性能参数,材料间的接触条件等,最后利用相关试验验证了模型的正确性。在此基础上,针对可能影响墙体背火面最高温度和平均温度的关键参数,如轻钢龙骨腹板开孔排数、腹板截面高度以及石膏板层数与布置方式进行了影响分析。

1 有限元分析模型

1.1 标准计算单元

对于没有门、窗洞口的轻钢龙骨墙体,其竖向龙骨根据龙骨间距规则布置,可选用如图 1 所示(h 为腹板高度)的轻钢龙骨标准截面代替整片轻钢龙骨墙体截面,以达到降低建模难度与减少运算时间的目的。计算单元的截面宽度取非承重轻钢龙骨墙体的常用龙骨间距 600 mm^[1];岩棉取为与龙骨腹板高度等厚;石膏板厚度则根据常用规格取为 12 mm;根据课题组前期研究成果^[15],龙骨腹板开孔示意如图 1(c)所示。

由于龙骨腹板开设了若干与墙高方向平行的狭长孔洞,墙体除了沿墙厚方向存在温度梯度以外,沿墙高方向的温度分布亦非均匀。因此,还需考虑热

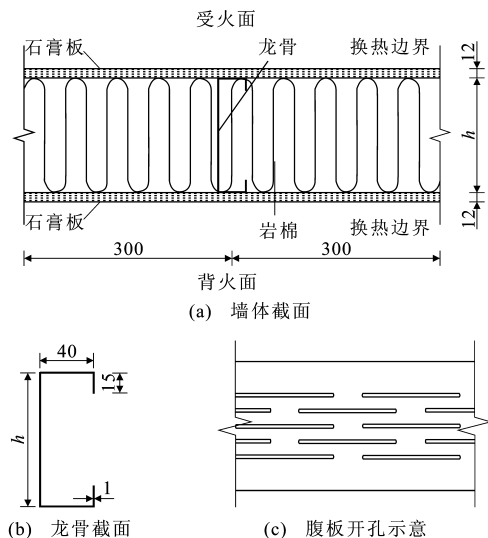


图 1 轻钢龙骨标准单元(单位:mm)

Fig. 1 Light-gauge Steel Stud Benchmark Unit (Unit:mm)

量沿墙高方向的传递。由于热量在墙体高度方向的传递具有一定的规律性,为提高计算效率,在墙体高度上仅选取 300 mm 的墙体单元代替整个墙体,此高度可包括 3 个孔长区间,经验证具有足够的计算精度。

1.2 热量传递过程

火灾作用下,热量以对流、辐射与热传导 3 种方式从墙体受火面传递至背火面。其中,对于墙体内部的热传导过程,可用非稳态传热的热传导微分方程表示,即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: T 为温度; t 为时间; λ 为导热系数; c 为比热容; ρ 为密度; x, y, z 均为墙体各部位坐标值。

为求解式(1),假设墙体受火前处于环境温度条件下,其温度分布均匀且与环境温度相等,则

$$T(x, y, z, t=0) = T_0 \quad (2)$$

式中: T_0 为环境温度,通常取为 20 °C。

采用第 3 类边界条件,即可知与墙体接触的空气温度与换热系数,定义模型墙体传热边界。模型中,墙体受火面空气温度依据 ISO-834 标准升温曲线确定,对流系数与辐射系数则根据欧洲规范 EC1 (EN 1991-1-2:2002) 与 EC3 (EN 1993-1-2:2005) 推荐分别取 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 和 0.7;定义模型背火面边界取室温 20 °C,对流系数与辐射系数根据欧洲规范推荐分别取 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 和 0.8。

1.3 材料的热工参数

选取合适的高温下石膏板、岩棉与钢材的热工参数模型是进行墙体抗火模拟分析的关键问题之

一。石膏板的热工参数除受温度影响以外,还与所含水分有关,为此分别选取了 Feng 等^[7]和 Wang^[16]提出的高温下石膏板的比热容 c_g 与导热系数 λ_g 的计算模型,取值分别见表 1 和表 2。因温度对岩棉比热容的影响不大,岩棉比热容采用定值 $0.84 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$,导热系数 λ_w 则采用 Wang^[16] 提出的高温下岩棉导热系数模型,见表 3。表 1~3 中,当温度在其特征温度之间时,各热工参数取值按线性插值方法计算。

表 1 石膏板比热容

Tab. 1 Specific Heats of Gypsum Board

$T/^\circ\text{C}$	10	95	125	155	900
$c_g/[\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	0.925	0.942	24.572	0.953	1.098

表 2 石膏板导热系数

Tab. 2 Thermal Conductivity Coefficients of Gypsum Board

$T/^\circ\text{C}$	10	100	150	1 200
$\lambda_g/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	0.260 0	0.260 0	0.150 0	0.319 5

表 3 岩棉导热系数

Tab. 3 Thermal Conductivity Coefficients of Rock Wool

$T/^\circ\text{C}$	10	50	150	200	250	300	350
$\lambda_w/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	0.034	0.037	0.054	0.066	0.080	0.097	0.108
$T/^\circ\text{C}$	400	450	550	600	650	700	1 000
$\lambda_w/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	0.113	0.150	0.320	0.520	0.820	1.000	1.200

钢材比热容与导热系数则依据欧洲规范 EC3 (EN 1993-1-2:2005) 的建议公式确定,该模型考虑了结构钢在 735°C 左右比热容出现的峰值现象,具体表达式如式(3),(4)所示

$$C_s = \begin{cases} 425 + 0.773T - 0.00169T^2 + 2.22 \times 10^{-6}T^3 & 20^\circ\text{C} \leq T < 600^\circ\text{C} \\ 666 + \frac{13\,002}{738 - T} & 600^\circ\text{C} \leq T < 735^\circ\text{C} \\ 545 + \frac{17\,820}{T - 731} & 735^\circ\text{C} \leq T < 900^\circ\text{C} \\ 650 & 900^\circ\text{C} \leq T \leq 1\,200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_s = \begin{cases} -0.0333T + 54 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & T > 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_s 为钢材比热容; λ_s 为钢材导热系数。

1.4 单元选取与接触模拟

岩棉与石膏板采用八节点三维实体传热单元 DC3D8,钢龙骨采用四节点壳体传热单元 DS4,如图 2 所示。由于实际墙体中石膏板、龙骨与岩棉相互接触较为紧密,故在模型中石膏板、龙骨与岩棉两两相交部分定义为绑定连接。由于龙骨腹板开设了细长孔洞,且为减少应力集中,孔洞两端有圆弧状过渡

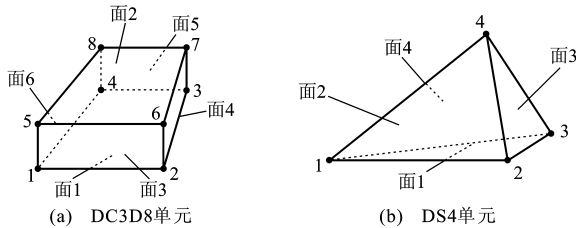


图 2 模型选用的单元

Fig. 2 Elements Employed in Finite Element Model

[图 1(c)],使得模型的网格划分极不规则。由于孔洞圆弧对墙体整体的抗火性能影响不大,为简化分析,在单元划分时在龙骨腹板沿孔洞两侧进行通长分割,即忽略了孔洞圆弧影响,形成相对规则的矩形区域。

2 模型验证

收集了 Feng 等^[7]研究者于 2003 年开展的 ISO-834 标准火灾作用下轻钢龙骨围护墙体温度场的实测数据,用以验证本文所建立的有限元模型的正确性与有效性。试件截面宽度均为 600 mm ,试件 a 龙骨截面高度为 100 mm ,卷边尺寸为 15 mm ,龙骨两侧各附单层石膏板;试件 b 龙骨截面高度为 104 mm ,无卷边,龙骨两侧各附 2 层石膏板,石膏板厚度为 12.5 mm 。图 3 为 2 个试件墙体截面形式与测点布置。

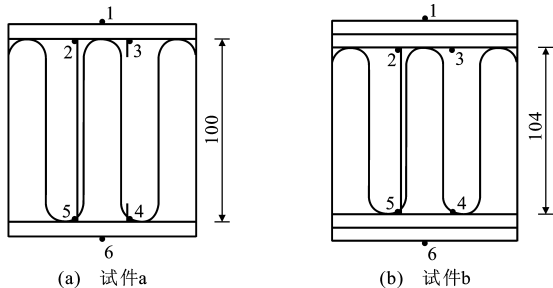


图 3 墙体截面形式与测点布置(单位:mm)

Fig. 3 Cross-section Form and Gauging Point Layout of Walls (Unit:mm)

依据 Feng 等试验中的试件几何尺寸进行轻钢龙骨墙体的几何建模;边界条件及受火面与背火面的换热条件按文献[7]中 2.2 部分确定;高温下石膏板、岩棉与钢材的热工参数模型按文献[7]中 2.3 部分选取。计算获得的全部测点在 ISO-834 标准火灾作用下的温度-时间关系曲线分别如图 4 和图 5 所示。考虑到火灾试验的复杂性和数据的离散性,本文模型的计算结果与 Feng 等的试验数据整体吻合较好,与文献[7]提供的数值模拟结果亦较为接近,说明所建立的有限元分析模型可用于腹板开孔轻钢

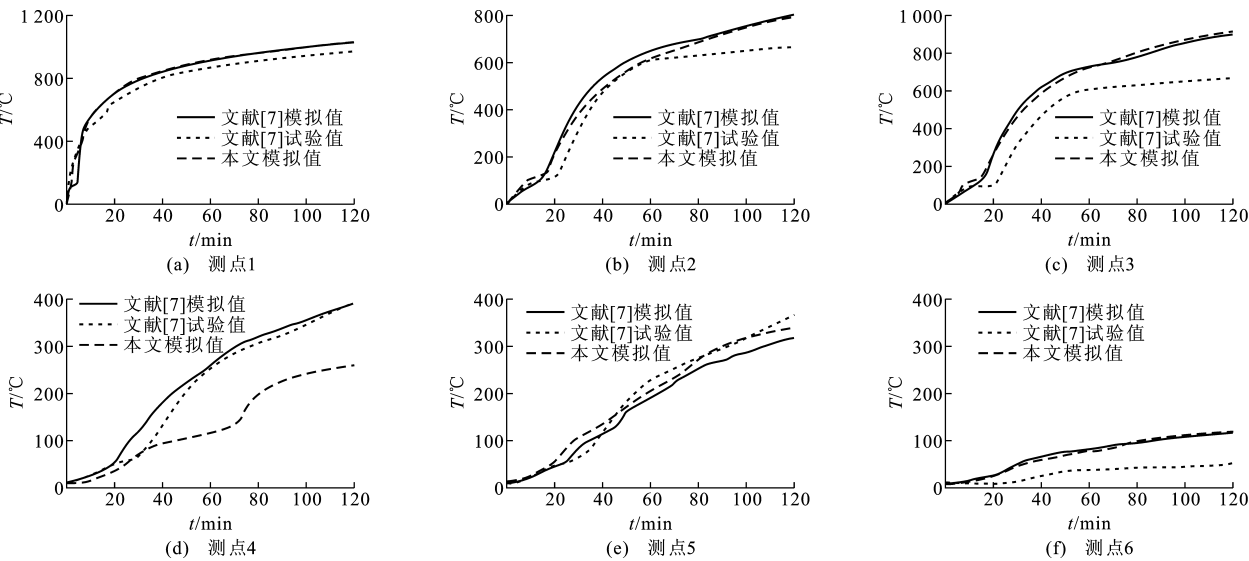


图 4 本文模拟结果与文献[7]中试件 a 的试验及模拟结果对比

Fig. 4 Comparisons Between Simulation Results in the Paper with Test and Simulation Results for Specimen a in Reference [7]

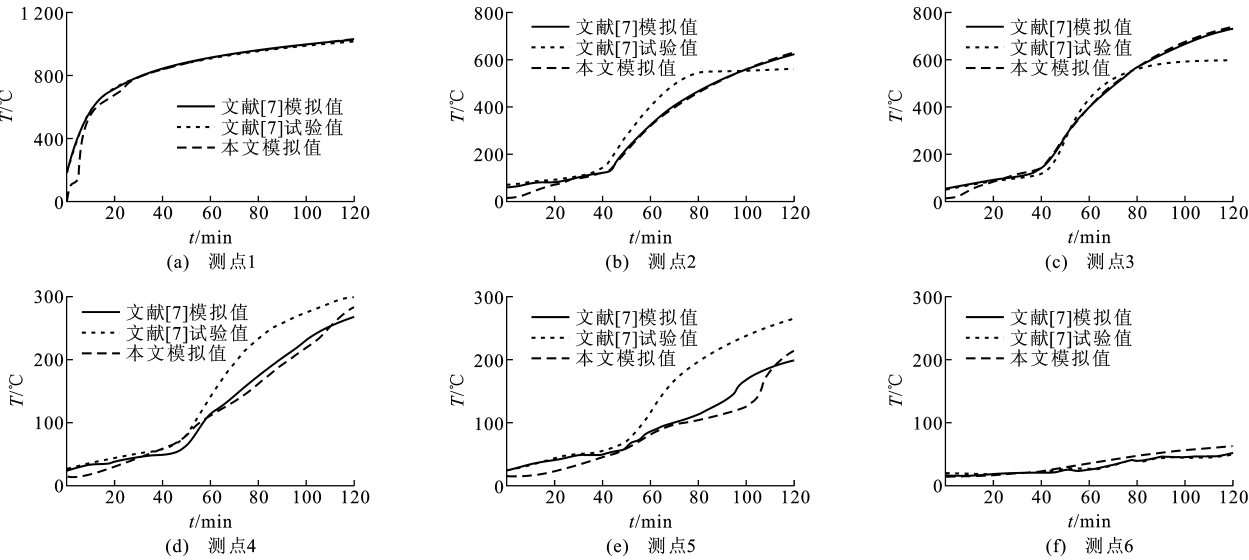


图 5 本文模拟结果与文献[7]中试件 b 的试验及模拟结果对比

Fig. 5 Comparisons Between Simulation Results in the Paper with Test and Simulation Results for Specimen b in Reference [7]

龙骨墙体在火灾下的温度场分析。

3 参数分析

中国现行国家标准《高层民用建筑设计防火规范》(GB 50045—1995:2005)中对建筑外墙的耐火极限要求为 1 h,其中,耐火极限是指任一建筑构件承受标准火灾时,从受到火的作用时刻起,到失去稳定性、完整性或绝热性为止的时间。对于墙体这类非承重构件,主要以绝热性为控制条件,即要求其背火面单点最高温度不超过 180℃且背火面平均温度不超过 140℃。

利用上文建立的有限元模型分别对腹板开孔轻

钢龙骨墙体背火面最高温度以及墙体背火面平均温度进行分析,参数包括龙骨腹板开孔排数、龙骨截面高度、石膏板层数与布置方式。

3.1 龙骨腹板开孔排数

为了研究龙骨腹板上不同的开孔排数对背火面温度的影响,针对腹板高度 $h=100\text{ mm}$ 的轻钢龙骨墙体模型,在其上分别开设 0~6 排孔洞,进行了龙骨开孔排数 n 与火灾下墙体背火面温度之间的规律分析,结果见图 6。由图 6(a)可以看出,龙骨腹板开孔排数对墙体背火面最高温度影响较大,龙骨腹板开孔排数越多,墙体背火面最高温度则越低,但当龙骨腹板开孔排数超过 5 排时,开孔排数对墙体背火

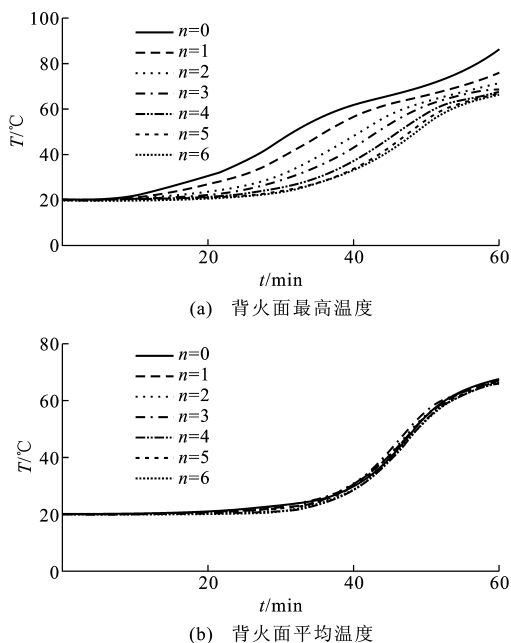


图 6 腹板开孔排数的影响

Fig. 6 Influences of Row Number of Slots on Web

面最高温度的影响较小,因此,继续增加开孔排数对墙体抗火性能的提高幅度不显著。

文献[17]定义了一个用以反映龙骨腹板开孔程度的参数——开孔比例 β ,即腹板开孔范围 L 与腹板高度 h 的比值,如图 7 与公式(5)所示

$$\beta = \frac{L}{h} \quad (5)$$

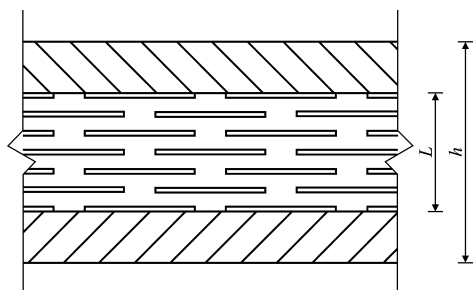


图 7 开孔比例

Fig. 7 Slot Ratio

研究结果表明^[17],当开孔比例为 50% 时,可有效降低腹板开孔墙体的热桥效应,进而降低了墙体的传热系数。当开孔比例超过 50% 时,传热系数虽有进一步降低,但降低幅度较小。对应本文的计算模型,开孔排数为 5 排且腹板高度为 100 mm 的轻钢龙骨,其开孔比例亦近似等于 50%。因此,综合墙体的保温性能与抗火性能,建议龙骨开孔比例取为 50%。

对于墙体背火面的平均温度,开设孔洞对其影响可以忽略,如图 6(b) 所示。这是因为孔洞虽可起

到降低墙体热桥效应的作用,但其影响范围仅为龙骨翼缘对应的背火面局部区域及相邻区域,因此对墙体整体温度影响不大。

需要说明的是,虽然在此算例中,无论是墙体背火面的最高温度还是平均温度在受火 1 h 范围内均低于耐火极限所规定的温度限值,但在实际火灾时,受火面石膏板易出现开裂剥落等现象,而开裂与剥落的发生时间具有较大的随机性和不确定性,很难用有限元模型进行模拟。因此在进行该类墙体抗火设计时,应留有足够的余量。

3.2 龙骨截面高度

对于轻钢龙骨墙体,在实际工程中通常采用不同的龙骨截面高度以适应不同的建筑功能需求。根据工程中常用的龙骨截面高度,确定参数分析中采用的龙骨截面高度分别取 100 mm (5 排孔)、150 mm (7 排孔) 与 200 mm (9 排孔),其中开孔排数根据开孔比例为 50% 的原则确定。图 8 为墙体背火面最高温度和平均温度随受火时间的变化曲线。由图 8 可见,龙骨截面高度对背火面的最高温度和平均温度均影响较大,即龙骨截面高度越高,背火面的最高温度和平均温度越低。当龙骨腹板高度为 200 mm 时,墙体背火面温度接近室温。由此可见,该类墙体在火灾下的绝热性较好。

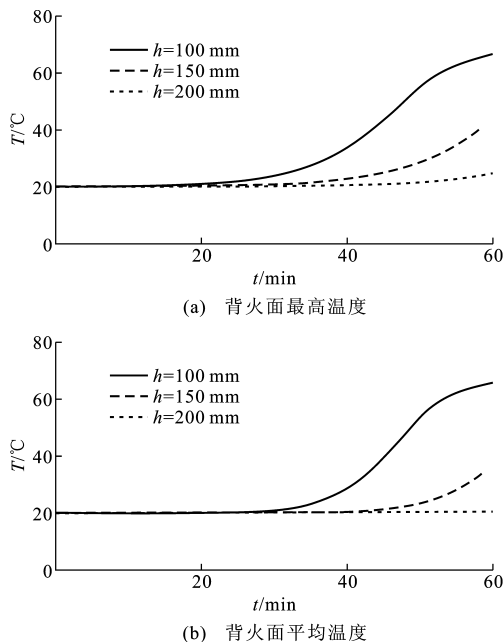


图 8 龙骨腹板高度的影响

Fig. 8 Influences of Stud Web Height

3.3 石膏板层数

在某些特殊情况下,实际工程中常会采用在轻钢龙骨墙体两侧设置不同层数石膏板来达到提高防

火性能或隔声性能等目的。为了研究墙体石膏板层数与墙体内温度场之间的关系,针对龙骨截面高度为 100 mm 的墙体模型,改变其受火面石膏板层数(1,2 层)与背火面的石膏板层数(1,2 层),分析石膏板层数与布置方式对火灾下墙体背火面温度的影响,结果见图 9。图 9 中每个图例的第 1 个数字代表受火面石膏板层数,第 2 个数字代表背火面石膏板层数。

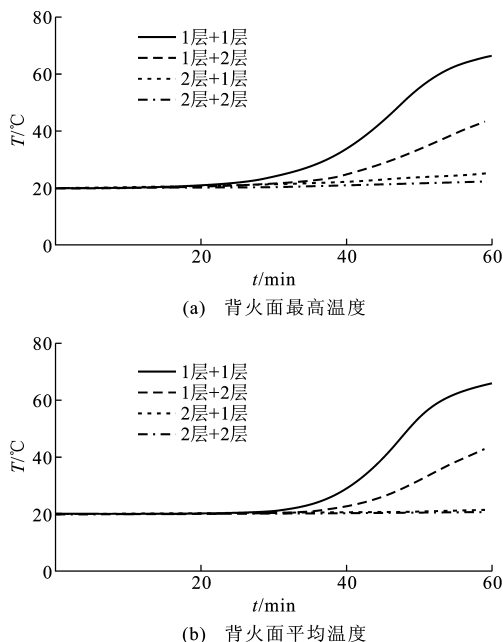


图 9 石膏板层数与布置方式的影响

Fig. 9 Influences of Layer and Arrangement of Gypsum Board

由图 9 可见,石膏板层数与布置方式对墙体背火面最高温度与平均温度影响均较大。整体上,墙体背火面温度随墙体石膏板总层数的增加而降低,当石膏板总层数相同时,在受火 60 min 范围内,将更多的石膏板布置在墙体受火侧对降低墙体背火面最高温度与平均温度更为有效。

4 结 语

(1)在不考虑火灾下受火面墙体石膏板开裂的前提下,腹板开孔轻钢龙骨墙体具有较好的防火性能。对于墙体两面设有单层石膏板且龙骨腹板高度为 100 mm 的墙体(墙体总厚度为 124 mm),其背火面的最高温度和平均温度可低于 1 h 耐火极限所规定的温度限值。

(2)相关参数的影响分析表明:龙骨截面高度与石膏板层数及布置方式均可在较大程度上影响腹板开孔轻钢龙骨墙体背火面的最高温度与平均温度;

腹板开孔排数对墙体背火面最高温度影响较大,但对墙体背火面平均温度则影响不大。

(3)当石膏板总层数相同时,在受火 60 min 范围内,将更多的石膏板布置在墙体受火侧对降低墙体背火面最高温度与平均温度更为有效。

参考文献:

References:

- [1] 金晓飞,杨 华,李 明,等.腹板开孔轻钢墙体传热性能关键参数[J].低温建筑技术,2014(10):134-136.
JIN Xiao-fei, YANG Hua, LI Ming, et al. Key Parameters for the Heat Transportation Behaviour of Enclosing Walls with Light-gauge Slotted Steel Studs[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014 (10):134-136.
- [2] 石敬斌,董晓晨,杨晓杰,等.腹板开孔轻钢龙骨在均布荷载作用下的抗弯性能有限元分析[J].建筑钢结构进展,2013,15(4):1-7.
SHI Jing-bin, DONG Xiao-chen, YANG Xiao-jie, et al. Finite Element Analysis on the Bending Behaviour of Light-gauge Slotted Steel Studs Subjected to Uniformly Distributed Loading[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(4):1-7.
- [3] 耿 悦,王玉银,林敬木.均布荷载作用下保温龙骨足尺墙体的抗弯性能[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(8):16-20.
GENG Yue, WANG Yu-yin, LIN Jing-mu. Bending Behaviour of Full-scale Walls with Light-gauge Slotted Steel Studs Subjected to Distributed Loading[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46 (8):16-20.
- [4] 石敬斌,张 磊,王玉银,等.开窗的保温龙骨墙体抗弯性能有限元分析[J].广西大学学报:自然科学版,2014,39(1):7-13.
SHI Jing-bin, ZHANG Lei, WANG Yu-yin, et al. Finite Element Analysis on Bending Behaviour of Thermal Studenclosing Wall with Window Holes in the Wall[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2014, 39(1):7-13.
- [5] 杨晓杰,马 迪,孙建运,等.腹板开孔轻钢龙骨墙体标准单元抗弯性能有限元分析[J].低温建筑技术,2015(5):40-43.
YANG Xiao-jie, MA Di, SUN Jian-yun, et al. Finite Element Analysis on the Bending Behavior of Enclosing Wall Elements with Light-gauge Slotted Steel Studs[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015(5):40-43.

- [6] 杨晓杰,刘 强,孙鹏程,等.腹板开孔轻钢龙骨围护墙体隔声试验[J].低温建筑技术,2014(10):39-42.
YANG Xiao-jie, LIU Qiang, SUN Peng-cheng, et al. Experiments on the Sound Proof for Enclosing Walls with Light-gauge Slotted Steel Studs[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2014(10): 39-42.
- [7] FENG M, WANG Y C, DAVIES J M. Thermal Performance of Cold-formed Thin-walled Steel Panel Systems in Fire[J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 365-394.
- [8] FENG M, WANG Y C. An Experimental Study of Loaded Full-scale Cold-formed Thin-walled Steel Structural Panels Under Fire Conditions [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(1): 43-63.
- [9] SHAHBAZIAN A, WANG Y C. Calculating the Global Buckling Resistance of Thin-walled Steel Members with Uniform and Non-uniform Elevated Temperatures Under Axial Compression [J]. Thin-walled Structures, 2011, 49(11): 1415-1428.
- [10] CHEN W, YE J H, BAI Y, et al. Full-scale Fire Experiments on Load-bearing Cold-formed Steel Walls Lined with Different Panels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 242-254.
- [11] 计 琳, TAN Kang-hai, 赵均海. 薄壁槽钢柱的抗火计算方法及参数分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 55-60.
JI Lin, TAN Kang-hai, ZHAO Jun-hai. Fire Resistance of Thin-walled Steel Channel Column and Parameter Analysis[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 55-60.
- [12] 陈 驹, 金伟良. 高强冷弯薄壁卷边槽钢柱在高温下的性能[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 167-174.
CHEN Ju, JIN Wei-liang. Behaviour of High Strength Cold-formed Steel Columns Under Elevated Temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 167-174.
- [13] 马奇杰, 王培军, 郑英杰. 腹板开槽冷弯薄壁卷边槽钢抗火性能有限元分析模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(2): 205-209.
MA Qi-jie, WANG Pei-jun, ZHENG Ying-jie. Computational Modeling of Cold-formed Lipped Channels with Slotted Webs for Fire-performance Analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(2): 205-209.
- [14] GUNALAN S, KOLARKAR P N, MAHEN M. Experimental Study of Load Bearing Cold-formed Steel Wall Systems Under Fire Conditions[J]. Thin-walled Structures, 2013, 65(4): 72-92.
- [15] 殷大伟. 轻钢龙骨墙体传热与受弯性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
YIN Da-wei. Thermal and Flexural Property of Light-gauge Steel Stud Wall[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [16] WANG H B. Heat Transfer Analysis of Components of Construction Exposed to Fire[D]. Salford: University of Salford, 1995.
- [17] 颜於滕. 腹板开孔轻钢龙骨围护墙体保温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
YAN Yu-teng. Thermal Insulation Performance of Light-gauge Slotted Steel Stud Enclosing Walls[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.