

纤维加入量对莫来石隔热材料温度场分布的影响

魏瀚¹,

1. 瑞泰科技股份有限公司, 北京, 中国。

摘要

轻质保温材料具有的低导热系数与材料内部所形成的结构有一定的关系。本课题所制备的轻质保温材料中由气孔、材料基质以及纤维三相组成。为研究纤维占比量对材料温度场分布的影响, 采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件来模拟纤维加入量不同时, 材料温度场的分布情况; 通过图像分析软件, 分析不同孔半径对材料导热系数的关系。模拟结果表明: 随着纤维加入量的增加, 材料高温区域面积随着纤维加入量的增加面积逐渐缩小, 低温区域面积逐渐增加, 材料冷面温度下降。

关键词: 纤维加入量, 温度场的分布

一、简介

为有效降低高温工业领域的碳排放量, 轻质隔热耐火材料作为关键的保温层材料, 已广泛且深入地应用于各类高温热工设备之中。目前, 应用最为广泛的轻质隔热材料是采用烧失法制备的多孔莫来石轻质耐火材料, 该材料主要采用 PVC 球作为造孔剂, 将造孔剂加入材料基质中, 制品在高温烧制过程中造孔剂受热烧失后在材料中形成圆形孔洞^[1]。尽管采用烧失法生产的轻质隔热材料的制备流程相对简便, 但该材料的体积密度一般在 $0.5\text{g}/\text{cm}^3$ – $1.2\text{g}/\text{cm}^3$, 导致其在保温隔热性能上表现并不显著。当前, 一种通过物理发泡技术制备的微孔莫来石保温材料因其卓越的隔热性能, 受到了热工领域客户的青睐。然而, 采用物理发泡法虽然可以制备容重在 0.2 – $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 、导热系数 $\leq 0.2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的轻质莫来石保温材料。但当材料在 1250°C 的高温下烧成时, 材料表面及内部产生较多的裂纹, 且烧后线收缩率 $> -2\%$, 材料在一次烧成时体积变化大, 不能够应用于现场施工, 而只能在烧成后通过加工等方式制成预制件后使用, 限制了材料的使用环境^[2-6]。为了解决这一问题, 需要在材料体系中引入耐火纤维, 通过引入纤维改善材料的内部孔洞结构, 从而达到消除材料的开裂, 减小材料的烧后线收缩, 进一步提高材料保温性能的目的。本文主要研究了纤维占比量对材料温度场分布的影响, 采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件热力学有限元分析模块来模拟纤维加入量不同时,

材料温度场的分布情况; 通过图像分析软件, 分析不同孔半径对材料导热系数的关系。从而找到合理的耐火纤维加入量。

二、实验设计

2.1 模型设计

由于实际模型中纤维在样本中排布杂乱无章, 模型无法对纤维排列方向进行具体描述。因此模型不考虑纤维的具体排列形式, 单位面积中纤维的面积占比多少作为变量模拟。取二维模型如图 7.1 所示, 设定模型边长为 0.9mm 的正方形, 被 18 条的的矩形条垂直相交, 并将正方形的面积分割成为 100 个小矩形。纤维以矩形条表示, 也可以是矩形条的相交部分; 材料基质以分割后的小矩形表示, 也可以用矩形条及相交区域表示。

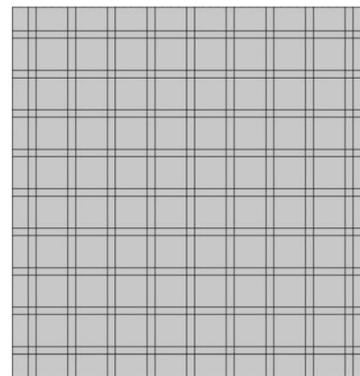


图 2.1 材料模型

2.2 实验设计

表 2.1 纤维加入量

纤维加入量 (wt%)	3	6	9	12
编号	M1	M2	M3	M4

根据表 2.1 所示，纤维加入量为 3wt%、6wt%、9wt%、12wt%，模拟上述纤维加入量对模型温度场分布的影响。纤维加入量的体现方式是纤维面积占模型整体面积的百分比。并设定在模型过程中，纤维是均匀分布在整体模型面积中的。

2.2 材料热性能参数设定

模拟对实验材料的热性能进行了设定，见表 2.2 所示。

表 2.23 材料热性能参数

材料名称	密度 kg/m ³	恒压热容 J/(kg·k)	导热系数 W/(m·k)
材料基质	303	200	4.0
加入纤维	100	1550	0.05

2.3 模型边界条件设定

为简化计算，采用自然冷却的方式。模型左边界设定为热面(工作面)，热面温度为 1020°C；右边界设定为冷面(而非工作面)，冷面温度为 25°C。在不考虑热辐射的情况下，模型热面温度恒定不变，且冷面自然散热，不考虑对流传热的现象。

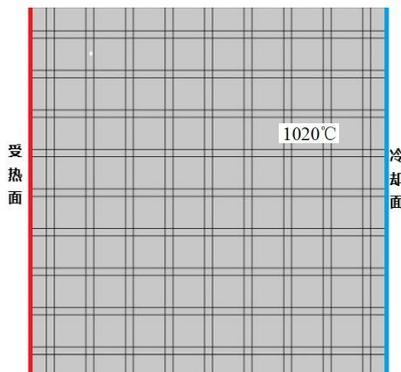


图 2.2 模型边界条件

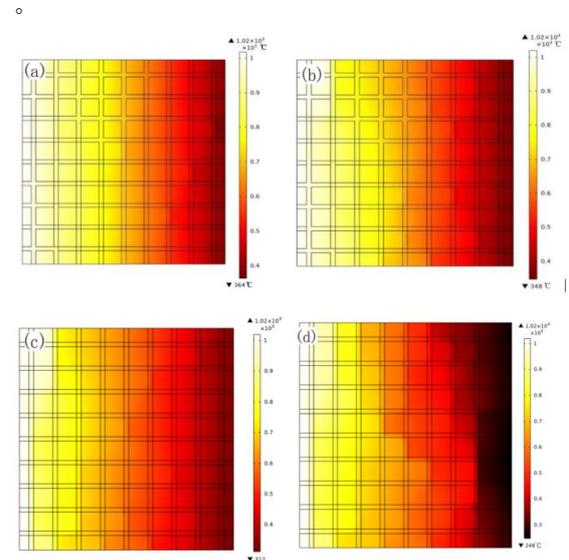
您可以根据需要添加二级标题。这里是引用会议论文的格式示例[1]。

2.4 仿真过程

对本模拟过程主要采用热力学传热模块中的稳定传热接口。设定受热面的温度为恒定热源，冷却面采用自然对流作为边界条件。

三、实验结果及讨论

为方便分析结果，考察纤维加入量对试样的温度场分布的影响。如图 7.3 所示纤维加入量 3wt%，6wt%，9wt%，12wt% 的温度分布情况。



(a) 纤维量 3wt% (b) 纤维量 6wt% (c) 纤维量 9wt% (d) 纤维量 12wt%

图 3.1 M1-M4 温度分布

如图 3.1 可知，随着纤维量的增加，M1 模型冷面温度为 364°C，M4 模型冷面温度为 226°C，纤维加入对系统温度分布有一定程度的影响。温度分布区域的分布能够映射出此时模型内部热阻的大小，为了方便划分温度区域，将模型所对应的温度范围进行划分，实验设定：1020°C-700°C(高温区)、700°C-400°C(中温区)、<400°C(低温区)，对上述温度分布范围进行图像处理，计算每个温度范围的面积百分比。如图 7.4 所示为模型不同温度面积占比情况。可知纤维的加入能够有效的改变材料内部温度场的分布情况，M1-M4 模型内部高温区域与中温区域逐渐减小，低温区域逐渐增加，系统低温区域范围向热面偏移；M4 中温区域面积占比上升。

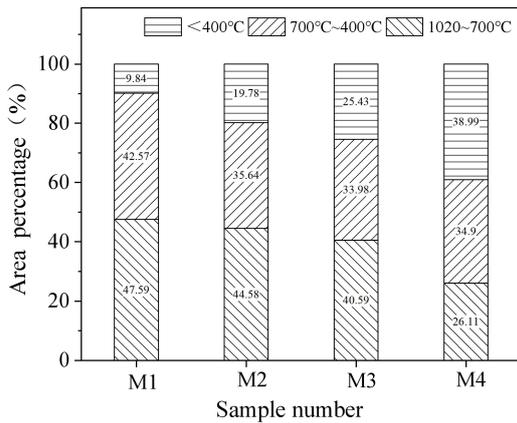


图 3.2 温度范围面积占比

对 M1-M4 模型测量水平方向上的温度下降情况，如图 7.5 所示，热面端的温度由 1020°C 开始，随着模型水平长度方向的增加，温度值逐渐下降。

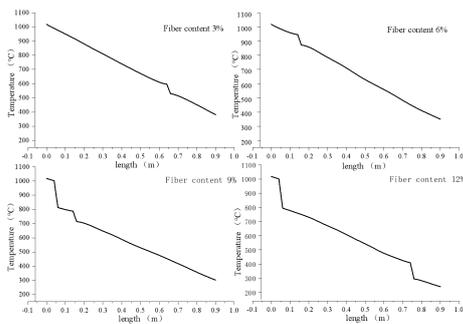


图 3.3 模型温度下降曲线

纤维量 3wt% (b) 纤维量 6wt% (c) 纤维量 9wt% (d) 纤维量 12wt%

从图 7.5 中可以发现，随着纤维量的增加，材料内部热阻逐渐增加，温降曲线出现折线，这是由于在热量在基质中传导时，碰到了纤维，由于纤维导热系数仅为 $0.05\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，作为热阻明显减缓了热量在方向上的流动速度，故而一次函数上出现了折线。如图 7.5(a) 可知，M1 模型纤维量为 3wt% 时，由于在 0.6-0.7m 此处存在纤维所以导致在出现了曲线的弯折。通过对比 M3, M4 的温度下降曲线的对比，发现在边长 0.15m 处温度点分别为 700.1°C 与 734°C ，M4 温度下降趋势慢于 M3，在 0.75m 处，M3 该点温度为 390.88°C ，M4 该点温度为 381.58°C 。M4 的中温区温度下降较慢是由于纤维量的增加导致系统内部热阻上升，热流流速减缓；此外纤维自身的恒压比热为 $1550\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，具有较好的蓄热能力，基于上述两点，导致 M4 中温局域面积增加。模型中纤维在系统中作为热阻，改变系统的内部热量的流速从而对系统温度场分布产生较大的影响。

结论

本章采用有限元模拟软件研究了不同纤维加入量对材料温度场分布的影响；得到如下结论：随着纤维加入量的增加，材料高温区域面积随着纤维加入量的增加面积逐渐缩小，低温区域面积逐渐增加，材料冷面温度下降。

参考文献

- [1] 关海兰. 发展隔热耐火材料的意义及前景 [J]. 山西冶金, 2021, 44 (05): 135~136
- [2] 李庆彬, 潘志华. 轻质隔热材料的研究现状及其发展趋势 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30 (5): 1089~1093
- [3] T. Shimizu, K. Matsuura, H. Furue, et al. Thermal conductivity of high porosity alumina refractory bricks made by a slurry gelation and foaming method [J], J. Eur. Ceram. Soc., 2013, 33 (15): 3429-3435
- [4] 杨凤坤. 莫来石多孔结构设计性能 [D]. [硕士学位论文] 北京: 北京交通大学, 2012
- [5] 李楠, 顾志华, 赵惠忠. 耐火材料学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010. 132~138
- [6] 钱之荣, 范之举. 耐火材料实用手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社. 1993. 405.