

文章编号:1000-2278(2012)03-0361-04

陶瓷粉末中固相物质导热系数的计算方法

陆琳 江丽 冯青 汪和平

(江西景德镇陶瓷学院材料科学与工程学院,江西景德镇333001)

摘要

对于未知具体组成成分的微粒介质,例如瓷土、沙子、陶瓷粉末等,包含的固相物质的真实导热系数很难得出。本文提供一种计算微粒介质中固相物质导热系数的方法,只需简单测量微粒介质在绝对干燥和绝对润湿的状态下的导热系数,即可计算出微粒介质中固相物质的导热系数,并对 Al_2O_3 陶瓷粉末进行实验测量,将实验计算的结果和理论数据进行比较,结果表明,公式计算值与理论值有较好的一致性。

关键词 导热系数 微粒介质 热探针

中图分类号:TQ174.6*5 文献标识码:A

0 引言

多孔介质或微粒介质的传热过程,不仅涉及陶瓷技术应用、填充床化工生产、石油热采、地热开采与利用、地下储能、建筑保温、食品加工、干燥、制冷等领域,而且关系到热管技术、高温元部件发散冷却、强化传热,甚至生物医疗技术等。导热是微粒介质中热量传递的一个重要过程,虽然人们早已开始对这一过程进行研究、开发和利用,并取得了不少成果,但由于该过程的复杂性和多边性,因此迄今为止对于微粒介质导热过程的机理、计算式以及实验研究,仍带有局限性,有待进一步的改进与拓展。对于微粒介质来说,一般可看成两相材料(固—液)或三相材料(固—水—空气),则影响微粒介质导热过程的因素包括微粒介质中固相颗粒的组成和物性、空隙尺寸形状及分布和流体的种类和特性等,如果知道固相的具体组成成分和物性以及固液相各自的体积配比,则可近似用有效导热系数来描述微粒介质的导热过程。几十年来,许多国内外学者进行过微粒介质中导热过程的理论计算方面的研究,并提出过各种各样的微粒介质有效导热系数的计算方法,其中较为著名的有Maxwell公式^[1]和有效介质理论(EMT)模型^[2]等。这

些方法都是基于已知固液相的具体物性参数基础上的,而对于未知固相具体组成成分和物性的微粒介质来说,例如瓷土、沙子等,因其固相组成未知,其固相导热系数也未知,则很难正确描述该微粒介质的导热过程。本文提供一种计算微粒介质中固相物质导热系数的计算方法,只需简单测量微粒介质在绝对干燥和吸湿饱和状态下的导热系数,即可计算出微粒介质中固相物质的导热系数,并对氧化铝粉末进行实验测量,将实验计算的结果和理论数据进行比较,结果表明,公式计算值与实际值有较好的一致性。

1 理论方法

对于多孔介质或微粒介质来说,如果知道其各相的导热系数和体积百分比,则其导热系数可以用下面的代数方程式来描述:

$$k_e = k_c(k_1, k_2, \dots, v_1, v_2, \dots) \quad (1)$$

其中 k_e 为有效导热系数, k_1, k_2 为微粒介质中各相的导热系数, v_1, v_2 为各相的体积百分比。

然而,微粒介质的导热不仅取决于固、气相介质本身的热物理特性,而且在很大程度上还与微粒介质中固相网络和孔隙结构有关。从微粒介质结构类型讲,大致可分为颗粒堆积型、圆柱体或纤维型、管束

收稿日期:2011-11-22

通讯联系人:陆琳, E-mail: lulin03@126.com

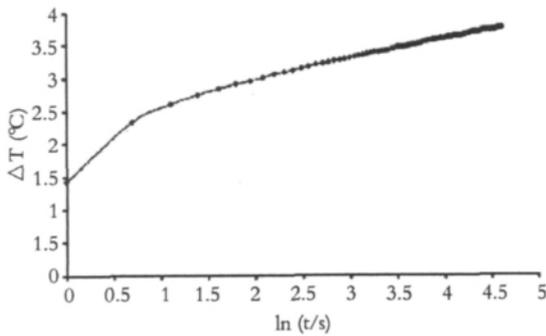


图1 探针温升和时间对数的关系曲线

Fig.2 ΔT as a function of ln(t)

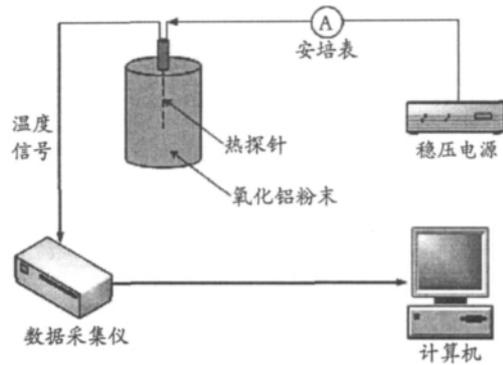


图2 导热系数测量系统图

Fig.2 The measurement system of thermal conductivity

型、网络型等等,因此,对于公式(1),针对两相微粒介质的不同种结构类型,有多种不同的表达形式,具体如下:

$$k_e = \frac{1}{\frac{(1-v_2)}{k_1} + \frac{v_2}{k_2}} \quad (2)$$

$$k_e = k_1(1-v_2) + k_2v_2 \quad (3)$$

$$k_e = k_1 \left(\frac{2k_1 + k_2 - 2(k_1 - k_2)v_2}{2k_1 + k_2 + (k_1 - k_2)v_2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{k_1 - k_e}{k_1 + 2k_e} + \frac{k_2 - k_e}{k_1 + 2k_e} = 0 \quad (5)$$

上述公式中的有效导热系数都是针对微粒介质中颗粒分布的特定结构来定义的,只适应于相应结构的导热系数的计算,为了能让有效导热系数的计算更具通用性,在公式(1)的基础上引入经验结构因子f:

$$k_e = k_e(k_1, k_2, \dots, v_1, v_2, \dots, f) \quad (6)$$

其中不同的颗粒分布结构有着不同f值,f值则可以在大量的实验中归纳得出。将经验结构因子引入Maxwell公式,得到如下Maxwell修正公式:

$$k_e = k_1 \left(\frac{fk_1 + k_2 - f(k_1 - k_2)v_2}{fk_1 + k_2 + (k_1 - k_2)v_2} \right) \quad (7)$$

本文则在Maxwell修正公式(7)的基础上,总结出一种计算微粒介质中固相物质导热系数的计算方法,首先必须通过实验测量出微粒介质在绝对干燥以及绝对润湿状态下的导热系数 k_{dry} 和 k_{wet} ,根据阿基米德原理,结合公式(7),并假设微粒介质在绝对干燥和绝对润湿状态下的经验结构因子f保持一致,则可推导出两种状态下的微粒介质的导热系数为:

$$k_{dry} = k_a \frac{fk_a + k_s - f(k_a - k_s)(1 - \varepsilon)}{fk_a + k_s + (k_a - k_s)(1 - \varepsilon)} \quad (8)$$

$$k_{wet} = k_w \frac{fk_w + k_s - f(k_w - k_s)(1 - \varepsilon)}{fk_w + k_s + (k_w - k_s)(1 - \varepsilon)} \quad (9)$$

其中 k_{dry} 为微粒介质绝对干燥状态下的导热系数, k_a 为空气的导热系数, ε 为孔隙率, k_s 为微粒介质中固相的导热系数, k_{wet} 为微粒介质绝对润湿状态下的导热系数, k_w 为水的密度。

上式中,空气和水的导热系数已知, k_{dry} 和 k_{wet} 可通过实验测量,则可通过公式(8)和(9)迭代计算出该微粒介质中固相物质的导热系数 k_s 和经验结构因子f。

2 实验测量

微粒介质在绝对干燥和绝对润湿状态下的导热系数由探针法进行测量,探针法是基于非稳态导热测量原理的一种导热系数测量方法^[3-9],源于线热源理论,被测介质的导热系数取决于探针的温升和测量时间的对数值:

$$k = \frac{Q}{4\pi(\Delta T - \Delta T_0)} \left[\ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \right] \quad (10)$$

其中,Q为探针的加热功率, ΔT 和 ΔT_0 为时间在t和 t_0 时刻的温升,探针的温升和时间对数在一定的测量时间段是一一对应的,其关系曲线示例如图1。

测量系统如图2,测量样品为 Al_2O_3 粉末,其中 Al_2O_3 含量99%以上,待测样品被放入物料圆筒,热探针竖直插入样品 Al_2O_3 粉末中,圆筒置于恒温水浴中,设定恒温水浴的温度稳定在 $25^\circ C \pm 0.1^\circ C$,测量前 Al_2O_3 样品和热探针处于热平衡状态,探针和水的温差为 $\pm 0.1^\circ C$ 。探针中加热丝两端加一恒定电压,稳压

表1 导热系数计算结果

Tab.1 Thermal conductivity results

样品	孔隙率	k_{dry} W/(m·K)	k_{wet} W/(m·K)	f	k_s 计算值 W/(m·K)	k_s 理论值 W/(m·K)
Al ₂ O ₃	0.4	0.116	0.945	1.2	34.38	36

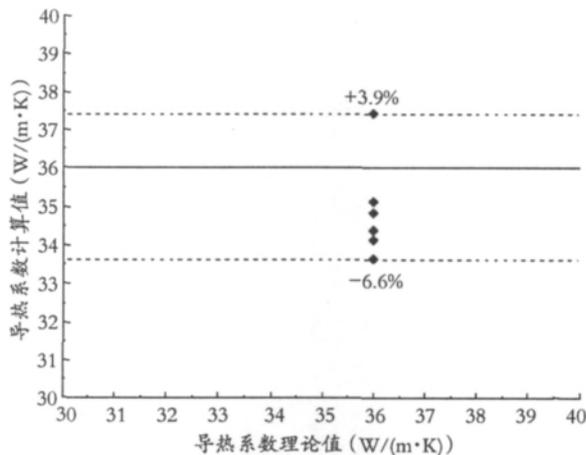


图3 导热系数计算值和理论值的比较

Fig.3 The comparison between experimental value and theoretical value of thermal conductivity

电源可调,用电流表测量电流。测定开始前等待一段平衡时间使待测样品和探针处于热平衡状态,然后热电偶测到的探针温度通过数据采集卡实时传输给计算机进行数据采集与处理,由此计算出温度变化梯度和对应的导热系数。

3 测试与计算分析

测量前,待测样品 Al₂O₃ 粉末的孔隙率通过容重法测定^[10],待测样品首先放在加热炉中持续加热直至待测样品的重量不再变化,加热炉温度为 101℃,此时的样品处于绝对干燥状态下,将此样品放入物料圆筒中进行导热系数的测量,测量时间为 20s,结合公式(10)得到绝对干燥状态下的导热系数 k_{dry} ,在盛有绝对干燥样品的物料筒中注入纯水,完全浸没样品后进行导热系数的测量,得到绝对润湿状态下的导热系数 k_{wet} ,将实验测量的 k_{dry} 和 k_{wet} 代入公式(8)和(9),用 Matlab 软件进行迭代求解可得到 Al₂O₃ 粉末中 Al₂O₃ 的导热系数 k_s 和经验结构因子 f,结果如表 1。

将 Al₂O₃ 粉末分为 6 批次,并在同一实验条件下

进行测量和计算,所得 Al₂O₃ 粉末中 Al₂O₃ 的导热系数的实验计算值与理论值的比较如图 3。

图中可以看出,6 次测量计算出来的 Al₂O₃ 的导热系数和 25℃ 时 Al₂O₃ 导热系数的理论值(36W/(m·K))^[11]相差不大,最大正向相对偏差为 3.9%,最大负向相对偏差为 6.6%,即应用公式所得的计算值与理论值有较好的一致性,本文提出的微粒介质中固相物质导热系数的计算方法是合适的。

4 结论

对于未知具体组成成分的微粒介质,例如瓷土、沙子而言,包含的固相物质的真实导热系数很难得出,本文在 Maxwell 修正公式的基础上,提出一种计算微粒介质中固相物质导热系数的计算方法,通过测量微粒介质在绝对干燥和绝对润湿状态下的导热系数,可计算出该微粒介质中固相物质的导热系数,以 Al₂O₃ 粉末为例进行实验计算,所得 Al₂O₃ 导热系数的计算值和理论值有较好的一致性,说明本计算方法对预测微粒介质中固相物质的导热系数是适合的。

参考文献

- 1 MAXWELL J C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 3rd ed. New York: Dover Publications Inc., 1954
- 2 LANDAUER R. The electrical resistance of binary metallic mixtures. Journal of Applied Physics, 1952, 23: 779~784
- 3 ANDERSSON P, BACKSROM G. Thermal conductivity of solids under pressure by transient hot-wire method. Review of Scientific Instruments, 1976, 47: 205~209
- 4 GOODHEW S, GRIFFITHS R. Analysis of thermal-probe measurements using an iterative method to give sample conductivity and diffusivity data. Applied Energy, 2004, 77: 205~223
- 5 WANG J F, CARSON J K, NORTH M F, et al. A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2006, 49: 3075~3083
- 6 CARSON J K, LOVATT S J, TANNER D J, et al. Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 2150~2158
- 7 金鹏,方清,林峰等.采用热线法的高温粉体材料导热系数自动测试仪. *计算机测量与控制*, 2009, 17(5): 23~25
- 8 吕兆华. 泡沫型多孔介质等效导热系数的计算. *南京理工大学学报* 2001, 25(3): 257- 261
- 9 赵惠忠,刘震炎,张敏等.瞬时热探针法测量沸石复合吸附剂导热系数. *上海交通大学学报*, 2007, 41(3): 437~441
- 10 陆琳,陆方,罗永浩等.探针法测量水稻秸秆热导率. *上海交通大学学报*, 2009, 43(9): 1461~1468
- 11 刘光启,马连湘,刘杰. *化学化工物性数据手册(无机卷)*.北京: 化学工业出版社, 2002

A Method for Calculating Thermal Conductivity of the Solid Phase in Ceramic Powder

LU Lin JIANG Li FENG Qing WANG Heping

(School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen Jiangxi 333403, China)

Abstract

It is not easy to work out the real thermal conductivity of the solid phase in a particulate material such as porcelain clay, sand, or ceramic powder due to its unknown concrete components. This paper came up with a method to measure the thermal conductivity of the solid phase of a particulate material. A bar probe was used to measure the thermal conductivity of a particulate material in both absolute dry and wet conditions. Then the thermal conductivity of the solid phase in the particulate material could be calculated from the measured results. An experiment was conducted to measure the thermal conductivity of Al_2O_3 powder. Comparing the experiment results with the theoretical data showed good consistency between the calculated value and the theoretical value.

Key words thermal conductivity; particulate materials; thermal probe