

高温环境下硅酸铝纤维的隔热性能

王超 刘婷婷 蒋立异 廖文和

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

文 摘 硅酸铝纤维供应商往往只提供客户硅酸铝纤维在某一温度的热导率,难以指导隔热结构的设计。本文针对市场上常用的硅酸铝纤维板,设计了隔热性能测试装置,实验获得硅酸铝纤维温度随时间的变化曲线,并进行了有限元仿真分析。研究表明,硅酸铝纤维隔热效果稳定且具有一定的抗热辐射能力。有限元分析结果与实验数据基本一致,说明采用有限元分析方法能够支持设计人员较好预测隔热效果。

关键词 硅酸铝纤维,隔热性能,温度,ANSYS,边界条件

中图分类号:TB35

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.014

Heat-Shielding Properties of Aluminum Silicate Fiber in High Temperature Environment

WANG Chao LIU Tingting JIANG Liyi LIAO Wenhe

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094)

Abstract Generally, the suppliers of aluminum silicate fiber only offer customers thermal conductivity at a certain temperature, which make it difficult for engineers to design those insulation structures. In this study, in order to provide reliable temperature data to finite numerical simulation, an experiment was designed to study the heat-shielding properties of aluminum silicate fiber in high temperature environment. It indicates that the heat insulation efficiency of aluminum silicate fiber is stable with the ability to resist thermal radiation and the numerical calculation results agreed with experimental data. The study above lays a solid theory foundation for the design of insulation structure.

Key words Aluminum silicate fiber, Heat-shielding properties, Temperature, ANSYS, Boundary conditions

0 引言

随着生产装备功率的提高,生产过程中的发热量成为不可忽视的问题。尤其是在带有变频器或励磁线圈的大功率设备中^[1-2],其内部的涡流会产生极高的热量。而在很多部件上由于空间、成本和技术的诸多限制,不可能使用水冷进行散热^[3-4],这种情况下使用隔热材料对部件表面进行保护是比较有效的方法^[5]。

硅酸铝纤维材料在工业中已经有40年的应用历史,从耐热材料、绝热材料发展成为隔热材料,其应用领域已广泛涉及能源、化工、冶金、航空航天以及新型隔热材料的开发。目前,硅酸铝纤维制品主要有纤维

垫、纤维毡、纤维板、纤维纸、纤维绳和各类织物等,尤其是厚度薄、质量轻、强度高的硅酸铝纤维纸的研究开发,已经引起了美国、日本、英国等多个国家的重视^[6]。

关于硅酸铝纤维的研究,研究者主要关注其微观结构以及新材料的开发应用。北京科技大学杨海龙博士总结了硅酸铝纤维在高温常压下的热导率及热稳定性的变化特性,但对材料的隔热效率、温度变化过程及分布涉及不多^[7]。华南理工大学赵传山教授研究了硅酸铝纤维的制备条件,认为纤维浓度、增强剂以及表面处理对硅酸铝纤维的性能有很大影响^[8]。在实际应用中,硅酸铝纤维供应商往往只提

收稿日期:2014-07-11

基金项目:国家自然科学基金(51375242);浙江省重中之重学科开放基金资助课题

作者简介:王超,1990年出生,硕士研究生,主要从事高端装备设计与制造技术。E-mail: shizilukou5252@163.com

通讯作者:刘婷婷,1975年出生,博士,副教授,主要从事高端装备数字化设计与制造、激光熔融成形等方面的研究。E-mail: liutingting@mail.njust.edu.cn

供给客户硅酸铝纤维在某一温度的热导率,而缺乏针对具体应用于环境的性能参数,难以指导隔热结构的设计。本文针对硅酸铝纤维开展高温环境隔热实验,通过测定高温下硅酸铝纤维的温度分布及变化研究其隔热性能,采用 ANSYS 进行建模并对比分析,得出与实验吻合的导热模型,为硅酸铝隔热产品的选用提供依据。

1 实验

1.1 实验设计

采用图 1 所示的实验装置,通过感应加热方法加热尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的基板,使其分别处于 800 、 $1\ 000^\circ\text{C}$ 的高温状态,在基板四周围挡高度 100 mm 、厚度 1 cm 的硅酸铝纤维板,在基板下放置 5 mm 厚的硅酸铝纤维板。选用德清科邦晶体纤维有限公司提供的硅酸铝纤维板,其最高使用温度 $1\ 400\sim 1\ 650^\circ\text{C}$, 800°C 下热导率为 $0.167\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比热容为 $900\text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

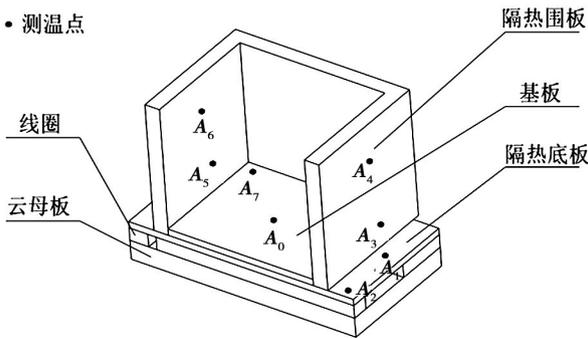


图 1 感应加热试验结构示意图

Fig. 1 Scheme of induction heating experiment

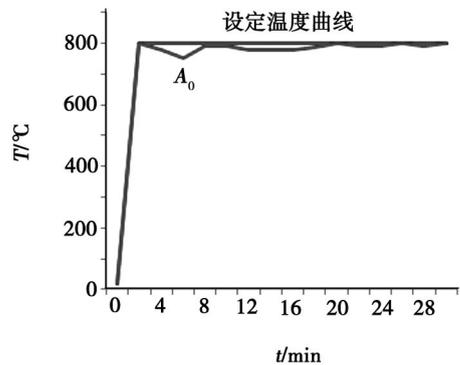
实验对硅酸铝纤维进行 800 和 $1\ 000^\circ\text{C}$ 的隔热实验,基板从常温到达 $800\sim 1\ 000^\circ\text{C}$ 的温升线如图 2 所示,首先将基板快速加热至预设温度,之后调整感应加热器功率使基板温度保持恒定。在温度达到设定温度的同时进行第一次温度测量,以后每两分钟利用红外测温仪采集一次测温点温度。

实验以基板中心点温度为控制参考温度 A_0 ,选取 7 个测温点:隔热底板上的两个测温点 A_1-A_2 、隔热围板外侧的两个测温点 A_3-A_4 、隔热围板内侧的两个测温点 A_5-A_6 (A_3 及 A_5 为下侧测温点)、基板边缘的一个测温点 A_7 。 A_1-A_2 用于获取隔热后热源周围温度; A_3-A_6 用于采集隔热板的高温面温度和低温面温度; A_7 用于掌握加热基板的温度均匀性状态。此外,在分析中取 A_3 与 A_4 平均值 A_8 ,取 A_5 与 A_6 平均值 A_9 。

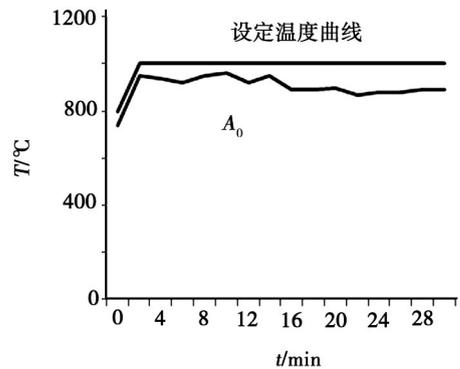
热围板外侧的两个测温点 A_3-A_4 、隔热围板内侧的两个测温点 A_5-A_6 (A_3 及 A_5 为下侧测温点)、基板边缘的一个测温点 A_7 。 A_1-A_2 用于获取隔热后热源周围温度; A_3-A_6 用于采集隔热板的高温面温度和低温面温度; A_7 用于掌握加热基板的温度均匀性状态。此外,在分析中取 A_3 与 A_4 平均值 A_8 ,取 A_5 与 A_6 平均值 A_9 。

1.2 实验结果

通过实验采集获得隔热材料的 A_0 点温度曲线,如图 2 所示。在实验过程中,实际温度曲线与期望温度值存在小范围的偏差,且设定温度与实际控制温度最大偏差为 6.25% 。 $A_3\sim A_6$ 测温点温度如表 1 所示。



(a) 800°C



(b) $1\ 000^\circ\text{C}$

图 2 感应加热基板中心设定温度曲线和实际控制温度曲线

Fig. 2 Predefined and actual temperature curves on the substrate center

硅酸铝纤维经过累计 1 h 的高温试验后,在硅酸铝纤维板底板上产生了明显的黑色印记,在基板边缘温度最高,烧伤最明显。将硅酸铝纤维截开,发现靠近基板边缘的内层材料有发黑的现象。与隔热底板相比,隔热围板的表面在实验前后基本无变化。在实验过程中隔热底板与隔热围板内壁最高温差为 160°C ,在基板边缘的最高温度为 $1\ 120^\circ\text{C}$ 。在隔热底

板的中心位置,存在轻微的黑色烧伤现象,该位置是隔热底板上散热最差的位置,容易积聚热量。

表 1 硅酸铝纤维板各点温度分布表

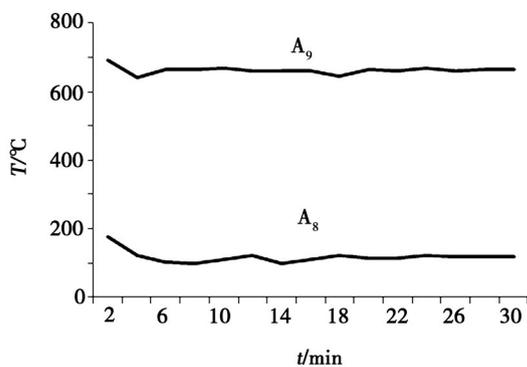
Tab. 1 Temperatures of the aluminum silicate fiber

时间 /min	800℃				1000℃			
	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
2	750	630	168.8	183.3	910	720	104.6	172
4	670	610	100.8	139.7	860	740	93.2	136.8
6	720	610	89.6	115.8	860	740	100.7	168.7
8	710	620	79.6	119	860	730	114	178.5
10	730	610	99	124.9	870	730	114.6	172
12	710	610	113.6	132.5	860	740	115.1	173.4
14	710	608	73	120.9	870	720	110.2	171.3
16	705	620	92	128.8	920	740	113.5	173.3
18	690	600	113.1	131.1	860	730	125.5	180
20	710	620	100	132	870	730	111.3	178.2
22	690	630	94.8	134.3	850	760	131.5	174.4
24	710	630	110.4	132.8	860	730	131.3	180.6
26	710	610	100.7	139	860	740	109.3	173.6
28	710	620	103	134.4	860	730	107.1	175.2
30	710	620	102.4	133.4	880	740	107.2	178.3

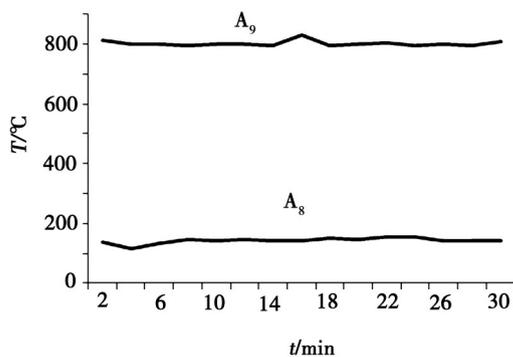
1.3 实验分析

根据表 1,30 min 内硅酸铝纤维外表面温度具有极速上升与平稳波动两个阶段。以 A₅ 点为参考,硅酸铝纤维外表面在前 2 min 内温度上升至 100℃ 以上,随后,温度在此温度上下波动。当基板温度从 800℃ 上升至 1 000℃,内外表面温度变化比较平缓。表明硅酸铝纤维时间敏感性较强,在长时间的工作中,主要依靠热平衡的原理实现隔热。

实验中,在基板中心温度为 800℃ 时,硅酸铝纤维内壁具有 600 ~ 750℃ 的温度分布,且靠近基板的区域温度较高。比较位于同一高度的内外壁两组测温点 A₃、A₅ 及 A₄、A₆,在单纯硅酸铝纤维热传导的作用下其温差达到了 500℃,在基板中心温度 1 000℃ 时这一温差达到 650℃,如图 3 所示。以该温差与隔热内腔平均温度的比值作为材料的隔热效率计算得 1 cm 厚硅酸铝纤维板在 800、1 000℃ 的隔热效率分别为 82.3% 和 82.4%,说明在该温度段硅酸铝纤维的热导率虽然有所上升,但在隔热内壁上升单位温度时隔热外壁能相应地变化,从而保持隔热内外壁温差与隔热内壁温度的比例关系,具有比较稳定的隔热效果。



(a)



(b)

图 3 硅酸铝纤维内外壁温度曲线

Fig. 3 Temperature curves of aluminum silicate fiber on the internal and external wall

2 数值计算

为了验证实验分析正确性,获得硅酸铝纤维高温环境下隔热温度分布的一般模型,本文采用有限元方法进行仿真分析。

2.1 建立模型

硅酸铝纤维的传热方式比较单一,主要涉及固体间的导热及辐射传热。本文所使用的实验装置中,金属基板通过固体材料的导热将热量传递给隔热底板,隔热围板的内壁热量主要由空气的热对流以及热辐射传递;隔热围板内壁到外壁之间的传热可以考虑为材料本身的固体热传导,而整个实验装置的散热过程包括隔热围板外壁与空气的自然对流、基板上部的空气对流和热辐射。据此,建立基板与隔热围板内壁间的辐射导热模型,隔热围板内壁到外壁、基板与隔热底板之间的固体导热模型,以及垂直隔热壁面的空气对流散热模型和金属基板的辐射散热模型。

整个实验装置的热源为加热基板,基板温度在短时间内上升到目标温度之后保持温度不变,隔热板受到基板的恒温加热,属于稳态三维热传导问题。三维问题的稳态热传导方程满足^[9]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中, T 为温度。根据公式(1), 不考虑物体的初始温度分布对最后的稳定温度场的影响, 设定实验装置热辐射、热传导以及空气对流换热边界条件。

在高温环境下, 金属基板与隔热围板内壁间有强的辐射传热。对于本文中的实验装置, 可以近似为一个表面为黑体、其他五面为灰体的多表面封闭系统辐射换热问题。在忽略气体辐射换热的条件下, 通过公式(2)确定每一个表面的净辐射换热量。

$$\Phi_i = \frac{E_{bi} - J_i}{1 - \varepsilon_i} \varepsilon_i A_i \quad (2)$$

式中, E_{bi} 为辐射力, J_i 为有效辐射, ε_i 为各表面的发射率, A_i 表示各表面的辐射面积。通过公式(3)计算出材料的辐射力。

$$E_{bi} = I_{bi} \pi \quad (3)$$

式中, I_{bi} 为定向辐射强度。

隔热围板内壁到外壁、基板与隔热底板之间的导热属于单一的固体热传导。隔热围板的热传导是单个物体的内部热传导, 在给定比热容与热导率的情况下, 仅考虑内外壁的边界条件; 基板与隔热底板间的导热属于不同材料固体间的热传导, 将基板与隔热底板固连并赋予不同的热导率。

实验装置的缸体外壁、内腔以及基板上表面与外部空间相接触, 散热主要由空气的对流换热与辐射换热两部分组成。实验装置的总热流密度 q 可描述为:

$$q = q_h + q_r \quad (4)$$

式中, q_h 表示空气的对流换热热流密度, q_r 表示辐射换热热流密度。

在大空间内流体沿垂直或水平壁面进行自然对流传热时, 可以使用经验公式(5),

$$N_u = C(G_r P_r)^n \quad (5)$$

式中, N_u 为努赛尔数, 努赛尔数主要反映对流换热的强弱, 可以理解为对流传热系数。 G_r 为格拉斯霍夫数(浮升力特征数), 反映了自然对流的强弱程度。 P_r 为普朗特数, 反映了流体物性对传热的影响。系数 C 与指数 n 是与传热面形状和位置相关的常数。当传热面为垂直的平板及圆柱面时, 一般取 $G_r P_r = 10^4 \sim 10^9$, $C = 0.59$, $n = 1/4$, 适用于缸体四壁的传热情况。当传热面为水平板热面朝上时, 一般取 $G_r P_r = 2 \times 10^4 \sim 8 \times 10^6$, $C = 0.54$, $n = 1/4$, 适用于基板。

得出 N_u 后, 由公式(6)得出换热系数 α ,

$$N_u = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (6)$$

式中, l 为散热特征尺寸, λ 为空气的热导率。

由此, 计算获得隔热材料以及基板的对流换热热流密度:

$$q_h = \alpha (T_m - T_e) \quad (7)$$

式中, T_m 为材料的温度, T_e 为环境温度。

基板的辐射热流密度为:

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_m^4 - T_e^4) \quad (8)$$

式中, ε 为金属基板发射率, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

金属基板是一块 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的薄板件, 计算只对基板与空气接触的上表面加入了热辐射的计算, 未考虑基板边界形状对辐射传热产生的影响。

2.2 边界条件

由于金属基板中心温度是按照设定温度上升后保持恒温, 实验装置的热源温度为已知条件, 可以归结为第一类边界条件^[10], 用测得的实际控制温度曲线确定基板中心温度。

隔热围板外侧的自然对流换热密度由公式(7)计算获得, 硅酸铝纤维的热导率设为 $0.167 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容设为 $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。金属基板材料为 TC4, 表面光滑, 发射率取值 0.3 , 热导率取值 $7.955 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容为 $2560.608 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

3 仿真结果及对比分析

根据前述仿真模型及边界条件设置, 采用 Anasys 建模并分析, 获得图 4 所示 800°C 条件下的仿真结果, A_4 和 A_6 点分别稳定在 635.15 和 113.8°C 。

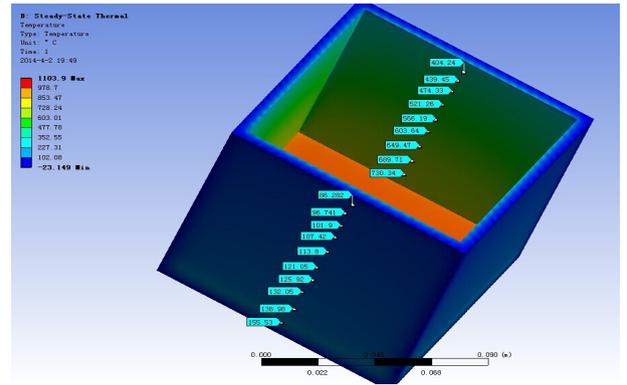


图 4 800°C 温度分布图

Fig. 4 Temperature map at 800°C

比较有限元分析与实验结果显示, 隔热围板上下层均有一定的温差, 在隔热围板内层离热源位置越近的点, 温度越高, 实验与理论计算结果是一致的。实验测得内壁的平均温度为 665°C , 在模拟计算中内壁平均温度为 566.19°C , 误差为 14.9% 。分析认为, 一方面硅酸铝纤维的热导率会随温度的上升而有所上升, 由于材料热导率受温度的变化影响关系比较复杂, 在模拟计算中热导率设为定值, 实验装置的热导率会高于理论计算值, 造成实际实验温度高于理论计算温度。另一方面, 在实验过程中, TC4 基板在 800°C 高温下, 上表面会产生局部氧化, 而氧化的 TC4

合金发射率将提高到 0.5 ~ 0.6, 直接影响了辐射传热的热量, 而在理论模拟中未考虑材料的化学转变因素, 造成了上述误差。

在隔热围板外层, 实验测得外层隔热材料的平均温度为 117.9℃, 而理论计算值为 113.8℃, 误差为 3.5%。实际测量值围板上层温度高于下层温度, 而理论模拟值上层温度低于下层温度。分析认为, 在实验装置内外层都存在着热空气, 在温度比较高的隔热围板内层, 热空气的分布影响较小, 不会引起温度分布的改变。而隔热围板外层围板温度较低, 热空气的影响相对较大, 改变了围板外层的温度分布规律, 在理论计算中并没有考虑这一影响因素。

4 结论

分别在 800 和 1 000℃ 下进行了硅酸铝纤维隔热性能实验和有限元温度场仿真, 获得了试验模型的的温度分布, 仿真结果基本与实验结果一致。

(1) 研究显示硅酸铝纤维高温隔热时在极短时间内就会达到温度平衡, 在具有低热导率的同时也有一定的抗热辐射能力, 具有比较稳定的隔热效果。采用有限元分析方法能够较好地模拟隔热材料在实际隔热装置中的隔热效果, 采用该方法可以较为准确的预测温度变化曲线和温度场, 应用在实际隔热装置设计中, 可以指导设计师进行隔热设计。

(2) 硅酸铝纤维是一种热导率受温度影响比较大的隔热材料。本文的进一步工作是完善现有有限元模型, 更准确的形成有限元分析模型, 从而更好的指导硅酸铝纤维隔热设计。

(上接第 45 页)

3 结论

(1) 对采用沥青常压炭化致密工艺制备的低密度径棒法编织预制体 C/C 复合材料 (1.50 g/cm^3), 坯体密度呈现规律性分布, 坯体沿径向由外侧到中心密度递减; 以坯体中心为参照点, 同一圆周方向密度均匀分布。

(2) 坯体开孔率沿径向由外侧到中心递增; 坯体大孔和中孔孔容积比率沿径向从外侧到中心递增, 而微孔孔容积比率则从外侧到中心递减。

参考文献

[1] 嵇阿琳, 李贺军, 崔红, 等. 不同预制体结构 C/C 复合材料轴向热力学性能分析[J]. 无机材料学报, 2010, 25(9): 994-998

[2] 周红英, 刘建军, 黄寒星. 炭化温度对 C/C 复合材料微观结构及热性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(2): 47-51

[3] 吴小军, 程文, 乔生儒, 等. 树脂浸渍炭化过程中复

参考文献

[1] 刘文明. 感应局部加热封装技术及其应用研究[D]. 华中科技大学博士论文, 2010

[2] Helfrich C A, Carlson R W. Using insulation aging to size transformers in high-ambient-temperature secondary-selective applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2): 1503-1508

[3] Ali Ijam, Saidur R. Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices)[J]. ELSEVIER, 2012, 32(1): 76-82

[4] Panão M P O, Guerreiro J P PV, Moreira A L N. Micro-processor cooling based on an intermittent multijet spray system[J]. ELSEVIER, 2012, 55(11): 2854-2863

[5] Je'rôme Barrau, Manel Ibanez, Ferran Badia. Impact of the insulation materials' features on the determination of optimum insulation thickness[J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2014, 5(2): 79-88

[6] 张娜, 张玉军. 高温低热导率隔热材料的研究现状及进展[J]. 中国陶瓷, 2006, 42(1): 16-17

[7] 杨海龙, 倪文. 硅酸铝纤维增强纳米孔绝热材料的制备与表征[J]. 材料工程, 2007(7): 63-66

[8] 赵传山, 逢锦江. 对硅酸铝隔热纤维纸的探讨[J]. 中华纸业, 2009, 30(2): 24-27

[9] 吴大方, 郑力铭. 非线性热环境下高温合金蜂窝板隔热性能研究[J]. 力学学报, 2012, 44(2): 298-306

[10] 中国机械工程学会热处理专业分会. 热处理手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001

(编辑 任涛)

合材料孔隙演化[J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1402-1408

[4] 田英姿, 陈克复. 用压汞法和氮吸附法测定孔径分布及比表面积[J]. 中国造纸, 2004, 23(4): 21-23

[5] 王蕾, 张福勤, 夏莉红, 等. 压汞法分析 C/C 复合材料平板的孔隙结构[J]. 矿冶工程, 2009, 29(4): 95-98

[6] 付志新, 郭占成. 焦化过程半焦孔隙结构时孔变化规律的实验研究[J]. 燃料化学学报, 2007, 35(3): 274-275

[7] 邢德山, 阎维平. 用压汞法分析工业半焦的孔隙结构特征[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5): 57-63

[8] Tillmanns H. The influence of composition of impregnation pitches on the infiltration rate into carbon artifacts[C]. 5th Biennial Conference on Carbon, 1981, 343-344

[9] 宋永忠, 史景利, 翟更大, 等. 沥青浸渍过程的数学模拟[J]. 新型炭材料, 2000, 15(4): 21-26

[10] Matzinos P D, Patrick J W, Walker A. The efficiency and mechanism of densification of 2-D C/C composites by coal-tar pitch impregnation[J]. Carbon, 2000, 38: 1123-1128

(编辑 吴坚)