

DOI: 10.3901/JME.2011.04.131

烧结开孔金属泡沫壁的辐射和自然 对流耦合换热试验研究*

汪天送¹ 屈治国¹ 陶文铨¹ 卢天健²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049;

2. 西安交通大学强度与振动教育部重点实验室 西安 710049)

摘要: 开展烧结开孔金属泡沫壁在大空间条件下的辐射和自然对流耦合换热试验研究, 研究壁面倾角、瑞利数 Ra^* 、泡沫厚度对换热性能的影响。试验所得垂直光滑铜板的结果与文献结果符合一致, 验证了试验方案的有效性。试验结果表明: 在一定的加热功率下, 随着倾角的增加, 纯自然对流努塞尔数和复合努塞尔数先增加后减小, 在倾角为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 达到极大值, 且辐射换热热量占总换热量的 $33\% \sim 44\%$; 竖直放置时, 烧结泡沫壁的辐射换热热量占总换热量的比值小于光壁, 且该值随泡沫厚度增加而增加。与光壁相比, 烧结泡沫壁复合换热的平均努塞尔数和纯自然对流换热的平均努塞尔数分别提高了 $1.52 \sim 1.98$ 倍和 $1.16 \sim 1.66$ 倍。通过对红外相机拍摄的泡沫表面温度分布进行分析验证了基于泡沫表面平均温度的辐射换热热量计算模型的有效性。

关键词: 辐射与自然对流耦合换热 开孔金属泡沫 倾角 瑞利数 厚度

中图分类号: TK124

Combined Heat Transfer of Radiation and Convection on Wall Sintered with Open Celled Metallic Foams

WANG Tiansong¹ QU Zhiguo¹ TAO Wenquan¹ LU Tianjian²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. Key Laboratory for Strength and Vibration of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Experimental investigation of the combined radiation and natural convection heat transfer on wall surface sintered with open celled metal foams at different inclination angles is presented. The effects of wall inclination angle, Rayleigh number Ra^* and thickness on heat transfer performance are studied. The heat transfer results for vertically placed smooth cooper plate are in good agreement with the available data in the literature to show the feasibility of the test rig. With increasing of the inclination angle under the same heat flux, the pure natural convection heat transfer coefficient and total heat transfer coefficient increase firstly to a turning point and then decrease. The maximum heat transfer performance occurs at an inclination angle between 60° and 80° . The radiation heat transfer accounts for $33\% \sim 44\%$ of the total heat transfer. When placed vertically, the ratio of radiation heat transfer of metallic foam sintered surface in the total heat transfer is less than that of the smooth surface, and is improved with increasing of metal foam thickness. Compared to the smooth surface, the mean Nusselt numbers of combined heat transfer and pure natural convection heat transfer of vertically placed sintered surface increase by $1.52 \sim 1.98$ and $1.16 \sim 1.66$ times respectively. The temperature distribution on foam surface photographed by infrared camera are analyzed with image processing technique to validate the thermal radiation heat transfer calculation model based on average foam surface temperature.

Key words: Combined radiation and natural convection heat transfer Open-cell metal foams Inclination angle Rayleigh number Thickness

0 前言

近 20 年来, 金属泡沫作为一种新型的多孔材

料, 被广泛应用在航空航天、汽车、化工和污水处理等领域。由于其具有很大的比表面积($2\ 000 \sim 10\ 000\ \text{m}^2/\text{m}^3$), 已被用在高温换热器和燃烧器上。已有文献中有一些关于多孔介质内的耦合换热的研究报道^[1-5]。LU 等^[1]和 CRITTENDEN 等^[2]数值研究了有导热耦合的辐射换热。HETSRONI 等^[3]通过对水平放置的铝泡沫进行通电来模拟具有内热源的金

* 国家自然科学基金(50806057)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB610306)、教育部新教师基金(200806981013)、教育部新世纪人才计划(NCET-10-0640)和全国优秀博士学位论文作者专项基金(201041)资助项目。20100720 收到初稿, 20101201 收到修改稿

属泡沫内的辐射和自然对流耦合换热。JAMIN 等^[4]试验研究了竖直铜管外侧烧结有高导热系数的碳泡沫辐射和自然对流的耦合换热。ZHAO 等^[5]对真空和不同压力环境下 FeCrAl 泡沫在方腔内的耦合换热进行试验研究发现当孔隙率一定时, 辐射换热量占总的换热量的比例随着孔径和温度的增加而增加。

电子器件的重要冷却方式是在恒热流密度边界条件下散热壁面的辐射和自然对流的耦合换热问题。换热面的尺寸和布置对其换热有很大影响, 而大空间下在不同厚度和布置角度下的辐射和自然对流耦合换热研究至今没有报道。因此, 本文采用试验方法研究了大空间下烧结金属泡沫壁的辐射和自然对流耦合换热, 并讨论了倾斜角度、瑞利数 Ra^* 、泡沫厚度对换热性能的影响。

1 试验系统及不确定度分析

1.1 试验系统

试验系统简图如图 1 所示, 系统由有机玻璃室 (3.0 m×2.8 m×2.0 m)、不锈钢支架、三角架、绝热材料、电加热系统、数据采集系统和试验试件七部分组成, 图 1 中虚线为进行试验的隔离间。

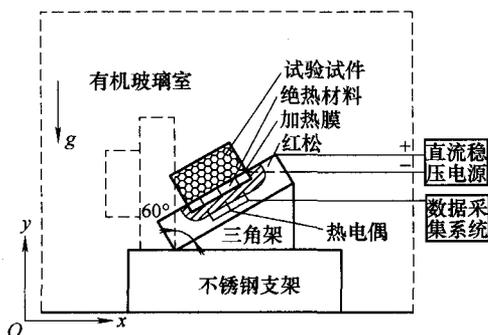


图 1 试验系统示意图(与竖直方向夹角为 60°)

试验试件为烧结在 2 mm 厚铜板的开孔铜泡沫, 具体参数见表 1。试件被固定在木块 (202 mm×202 mm×50 mm) 上, 木块中间开有一槽 (102 mm×102 mm×10 mm), 其中填有硅酸铝(导热系数为 0.035 W/m·K)作为绝热材料。

表 1 泡沫铜的结构参数表

编号	孔隙率 ε	孔密度 ρ/m^{-1}	长×宽×厚 $\frac{l}{\text{mm}} \times \frac{b}{\text{mm}} \times \frac{\delta}{\text{mm}}$
1	0.95	400	100×100×10
2	0.95	400	100×100×40

注: 泡沫表面喷有一层很薄(约 0.5 mm)的发射率为 0.96 的黑漆。

试验采用的加热膜(50 V/50 W)由电压可调的

直流稳压电源进行控制, 加热功率从 6 W 到 18 W。试验系统中布置有 10 个 T 形热电偶, 其中 9 个分布在加热底面上, 其位置分布如图 2 所示(“×”为放置热电偶处), 另外一个用来测量环境温度。试验数据的采集和监控由 Keithley 2700 数据采集系统来完成。辐射表面的平均温度通过红外相机(Ti50FT)拍摄获得。

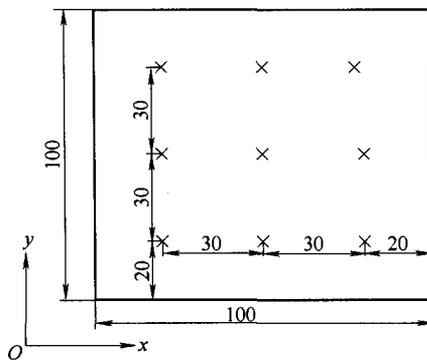


图 2 热电偶位置分布图

1.2 试验数据处理及不确定度分析

底板上加热膜产生的热量通过泡沫层表面的辐射换热和自然对流换热分别传递到环境和空气中。铜泡沫表面对环境的辐射换热量 ϕ_{rad} ^[3] 定义为

$$\phi_{\text{rad}} = E\sigma(\theta_{\text{rad}}^4 - \theta_{\infty}^4)A_{\text{rad}} \quad (1)$$

式中, A_{rad} 为辐射换热面积; E 为发射率; σ 为斯忒藩—波尔兹曼常量; θ_{rad} 和 θ_{∞} 分别为辐射表面的平均温度和环境温度。采用式(1)计算泡沫表面辐射换热量的有效性在下文将进行详细说明。

为了采用红外摄像机测量泡沫表面的温度, 需要确定泡沫表面的发射率 E , 试验中泡沫表面喷亚光黑漆 ($E=0.96$), 则泡沫层表面的自然对流换热量为

$$\phi_{\text{conv}} = \phi - \phi_{\text{rad}} = \phi - E\sigma(\theta_{\text{rad}}^4 - \theta_{\infty}^4)A_{\text{rad}} \quad (2)$$

对应的平均对流换热系数 h_{conv} 定义为

$$h_{\text{conv}} = \frac{\phi_{\text{conv}}}{A(\theta_w - \theta_{\infty})} = \frac{\phi - E\sigma(\theta_{\text{rad}}^4 - \theta_{\infty}^4)A_{\text{rad}}}{A(\theta_w - \theta_{\infty})} \quad (3)$$

式中, ϕ 为加热膜的加热功率, θ_w 为稳态下的加热底板平均温度, 所以纯自然对流换热的平均努塞尔数 Nu_{conv} 按式(4)定义

$$Nu_{\text{conv}} = \frac{h_{\text{conv}}l}{\kappa} \quad (4)$$

式中, 特征长度取底板边长 l , κ 为定性温度 $(\theta_w + \theta_{\infty})/2$ 下空气的导热系数。

如果综合考虑辐射和自然对流的影响, 则对应的平均复合换热系数 h_{av} 和 Nu_{av} 的定义为

$$h_{av} = \frac{\phi}{A(\theta_w - \theta_\infty)} \quad (5)$$

$$Nu_{av} = \frac{h_{av}l}{\kappa} = \frac{\phi l}{A(\theta_w - \theta_\infty)\kappa} \quad (6)$$

加热底板的平均换热系数的不确定度按“二次幂法”^[6]定义如下

$$\frac{\Delta h_{av}}{h_{av}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \phi_{conv}}{\phi_{conv}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \Delta \theta}{\Delta \theta}\right)^2} \quad (7)$$

式(7)中各项的不确定度如表2所示。

表2 试验不确定度表

表示符号	最大值	附注
$\Delta \phi / \phi$	4.00%	加热膜精度
$\Delta \phi_{rad} / \phi_{rad}$	8.06%	计算得到
$\Delta \phi_{conv} / \phi_{conv}$	9.00%	计算得到
$\Delta A / A$	1.00%	$(\Delta A)_{max}=99.75 \text{ mm}^2$; $A=10\ 000 \text{ mm}^2$
$\Delta \Delta \theta / \Delta \theta$	1.39%	$(\Delta \Delta \theta)_{max}=0.29 \text{ }^\circ\text{C}$; $(\Delta \Delta \theta)_{min}=20.88 \text{ }^\circ\text{C}$
$\Delta \theta_{rad} / \theta_{rad}$	2.00%	红外摄像仪误差
$\Delta A_{rad} / A_{rad}$	1.00%	计算得到
$\Delta l / l$	0.50%	$(\Delta l)_{max}=0.5 \text{ mm}$; $l=100 \text{ mm}$

注：不考虑烧结铜板和加热膜粘结剂的热阻及热损失。

对本文试验最恶劣的工况计算得加热底板的平均换热系数的最大不确定度为9.16%，相应的平均努塞尔数的最大不确定度为9.18%。

2 试验结果及讨论

2.1 试验系统校核

本文对相同尺寸的竖直光铜板在 $\phi=1\sim 15 \text{ W}$ 的换热进行研究。本试验的测量结果和已知文献[7-9](表3)对比的结果表示在图3中。

表3 竖直平板的层流自然对流关联式(恒热流)

文献	关联式
文献[7]	$Nu = \frac{2}{360^{1/5}} \left(\frac{Pr}{0.8 + Pr} \right)^{1/5} (Gr_L^* Pr)^{1/5}$
文献[8]	$Nu = 1.25 \left(\frac{Pr}{4 + 9Pr^{1/2} + 10Pr} \right)^{1/5} (Gr_L^* Pr)^{1/5}$
文献[9]	$Nu = \frac{1.25 \times (0.563)^{4/5}}{\left[1 + \left(\frac{0.437}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/45}} (Gr_L^* Pr)^{1/5}$

注： $Gr_L^* = g\beta qL^4 / \kappa\nu^2$ 。

从图3中可以看出，在试验范围内，表面未喷漆的竖直铜板(发射率取0.78^[10])的试验结果和已知文献吻合良好，相对误差在16%以内。从图3还可以看出，对物体表面进行喷漆处理提高了物体表面的发射率(高达0.96)，但加热面的平均温度显著降

低，导致对环境的辐射换热量减小，由式(2)可得对应的自然对流换热量增加，进而提高了自然对流换热的能力。

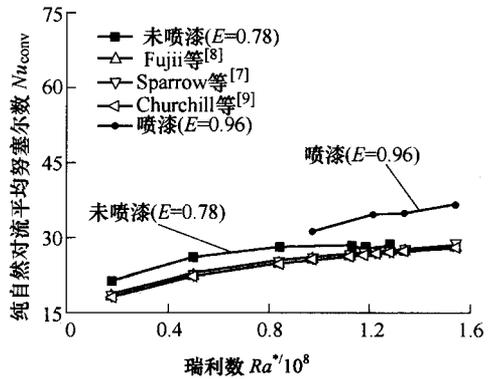


图3 竖直平板的试验结果

2.2 倾角变化对换热的影响

图4表示了二个烧结厚度(10 mm和40 mm)的试件在 $\phi=10 \text{ W}$ 下倾角变化对换热的影响。由图4可见，随着倾角从0°(竖直方向)增加到90°(水平方向)，自然对流换热量先增加后减小，在倾角为60°~80°达到极值。因此，总的换热量随倾角的增加呈先增加后基本保持不变的变化趋势。

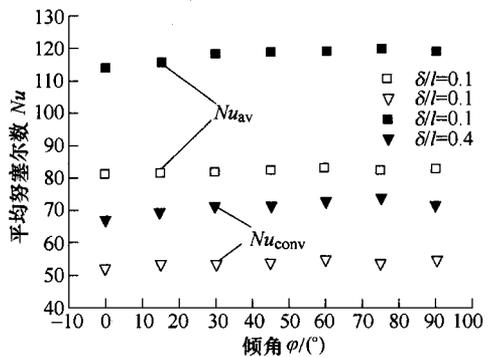


图4 倾角对换热的影响

为了定量描述辐射换热对总的换热的影响，本文引入辐射换热量占总换热量的比值R，其定义式如下

$$R = \frac{\phi_{rad}}{\phi} \quad (8)$$

图5表示了R随倾角的变化规律，在试验范围内，辐射换热量占总的换热量的比值 $R=33.8\%\sim 41.2\%$ ，且烧结厚度为10 mm时，R随着倾角的增大而减小；而烧结厚度为40 mm时R随着倾角的增加先减小，在倾角为75°达到最小值后小幅增加，这主要是因为水平放置时(即 $\gamma=90^\circ$)，平行于加热面的泡沫表面的流动为瑞利-贝纳尔流，特别是烧结厚度较大时，渗透率较小，使水平放置时自然对流换热强度小于倾斜角度为75°对应的自然对流换热

强度, 导致水平放置时辐射换热量所占比值提高, 故该比值在 $\theta = 75^\circ$ 达到一个极小值。从图 5 还可以看出泡沫的烧结厚度越大, 辐射换热量占总换热量的比值越大。

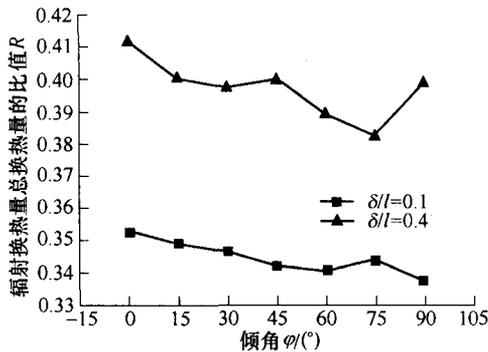


图 5 R 随着倾角的变化规律

2.3 竖直放置条件下瑞利数对换热性能的影响

本文以竖直放置的烧结试件为研究对象, 研究了恒热流条件下瑞利数对换热性能的影响。瑞利数的定义如下

$$Ra^* = \frac{g\beta q_{conv} L^4}{k\nu\alpha} = \frac{g\beta L^4 \phi_{conv}}{k\nu\alpha A} \quad (9)$$

图 6 表示复合换热的平均努塞尔数 Nu_{av} 和纯自然对流换热的平均努塞尔数 Nu_{conv} 随 Ra^* 的变化规律, 当 Ra^* 从 1.05×10^8 变化到 2.6×10^8 时, 二者均随着 Ra^* 的增加而近线性增加。且烧结泡沫竖壁复合换热的平均努塞尔数 Nu_{av} 和纯自然对流换热的平均努塞尔数 Nu_{conv} 分别较光板提高了 1.52~1.98 倍和 1.16~1.66 倍。这主要是因为泡沫层厚度的增加导致换热面积的增加, 而使换热能力得以提高。

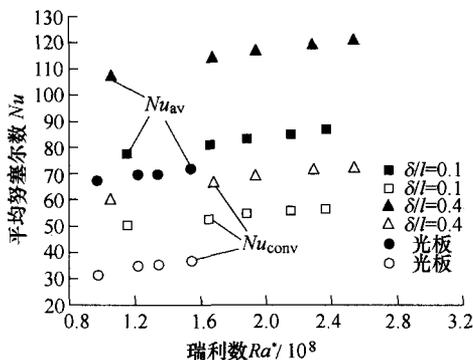


图 6 Nu 随 Ra^* 变化关系曲线

图 7 表示了竖直放置条件下, 辐射换热量占总的换热量的比值 R 随 Ra^* 的变化曲线。对竖直光板, 辐射换热占总换热量的比值在 50% 左右, 且随着 Ra^* 的增加而减小, 这主要是因为辐射量所占比值同时受表面积和表面温度的影响, 光滑竖壁的面积没有得以扩展, 表面温度水平高, 又辐射量与面积一次方成正比, 且近似与温度四次方成正比, 所以辐

射量所占比值较高。当 Ra^* 增加时, 自然对流换热能力得以提高, 而导致辐射量所占比值减小。

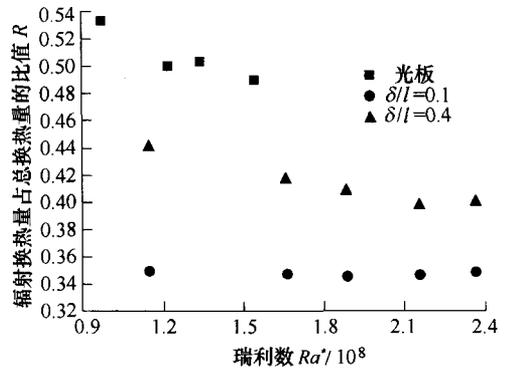


图 7 R 随着 Ra^* 的变化规律

对烧结泡沫的竖壁而言, 辐射换热量占总的换热量比值在试验范围内为 35%~44%, 且辐射量所占比值随着 Ra^* 的增加先减小后基本保持不变, 其原因是泡沫的存在使换热面积得以扩展, 自然对流换热增强, 同时泡沫表面温度降低, 导致面积对辐射量的影响更为突出, 从而使辐射量所占比值比光滑竖壁低。当 Ra^* 增加到一定值后, 泡沫表面引起自然对流的强化和辐射增加的比例接近, 而使辐射换热量所占比值接近于常数。

2.4 辐射换热量计算模型有效性分析

为分析泡沫表面辐射换热量计算模型的准确性, 图 8 给出了热流密度为 1000 W/m^2 时, 烧结泡沫壁竖直放置时平行于加热底面的泡沫外表面的红外温度分布图; 图 9 为通过 Tecplot 处理的沿竖直方向中心线上的温度分布。从图 8 和图 9 中可以看出, 泡沫烧结厚度大的试件 ($\delta/l = 0.4$) 表面温度分布的不均匀性比烧结厚度小的试件 ($\delta/l = 0.1$) 明显, 但通过拟合所得到沿高度方向的平均温度变化则较小, 因此采用方程式(1)所定义的泡沫表面平均温度进行辐射换热量的计算是可行的。

3 结论

(1) 加热功率一定时, 纯自然对流换热和复合换热的平均努塞尔数均随倾角的增加先增加后减小, 在倾角为 $60^\circ \sim 80^\circ$ 达到极值。不同角度下辐射换热量占总的换热量的 33.8%~41.2%。

(2) 竖直放置时, 复合换热的平均努塞尔数 Nu_{av} 和纯自然对流换热的平均努塞尔数 Nu_{conv} 分别较光板提高了 1.52~1.98 倍和 1.16~1.66 倍。对竖直光板, 辐射换热量占总的换热量的比值 R (50%左右) 较烧结泡沫壁的 R (35%~44%) 大, 且泡沫厚度越大, R 越大。

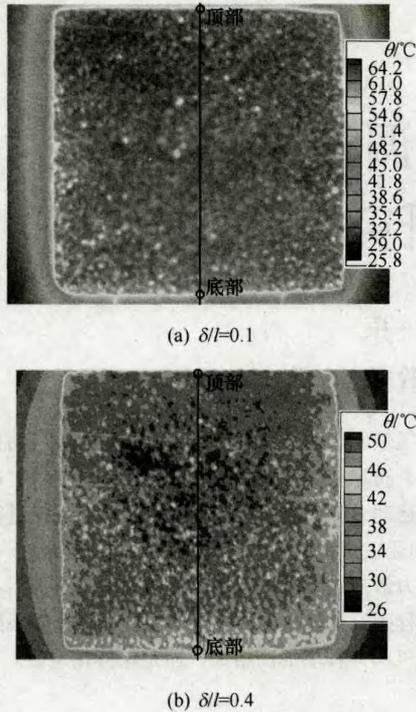


图8 红外测量泡沫表面温度分布

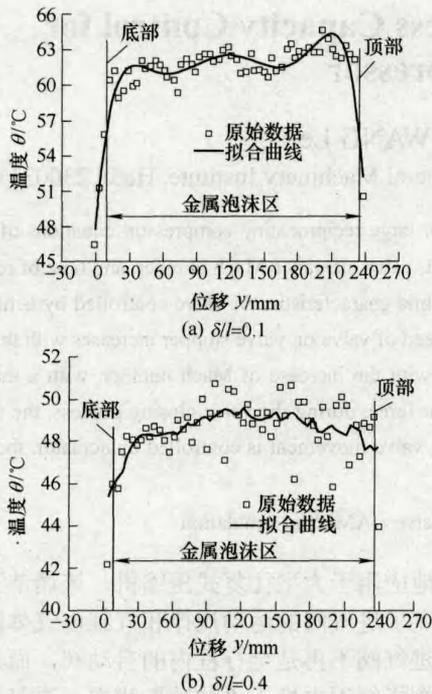


图9 沿中心线高度方向的温度分布

(3) 通过相机红外拍摄的泡沫表面温度分布沿高度方向的变化很小，故基于泡沫表面平均温度的辐射换热量的计算模型是有效的。

参 考 文 献

[1] LU T J, CHEN C. Thermal transport and fire retardance

properties of cellular aluminium alloys[J]. Acta Materialia, 1999, 47 (5): 1469-1485.

[2] CRITTENDEN P E, COLE K D. Design of experiments for thermal characterization of metallic foam[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2005, 19(3): 367-374.

[3] HETSRONI G, GUREVICH M, ROZENBLIT R. Natural convection in metal foam strips with internal heat generation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32 (8): 1740-1747.

[4] JAMIN Y L, MOHAMAD A A. Natural convection Heat transfer enhancements from a cylinder using porous carbon foam: Experimental study[J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130 (12): 122502.1-122502.6.

[5] ZHAO C Y, LU T J, HODSON H P. Thermal radiation in ultralight metal foams with open cells[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (14-16): 2927-2939.

[6] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1 (1): 3-17.

[7] SPARROW E M, GREGG J L. Laminar free convection from a vertical plate with uniform surface heat flux[J]. Trans. ASME, 1956, 78: 435-440.

[8] FUJII T, FUJII M. The dependence of local nusselt number on prandtl number in case of free convection along a vertical surface with uniform heat-flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19 (1): 121-122.

[9] CHURCHIL S W, OZOE H A. Correlation for laminar free convection from a vertical plate[J]. Journal of Heat Transfer-Transactions of the ASME, 1973, 95 (4): 540-541.

[10] ROHSENOW W M, HARTNETT J P, GANIĆ E N. Handbook of heat transfer fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.

作者简介：汪天送，男，1985年出生。主要研究方向为金属泡沫自然对流换热。

E-mail: wts.007@stu.xjtu.edu.cn

屈治国(通信作者)，男，1978年出生，博士，副教授。主要研究方向为金属多孔材料与结构内传热问题，计算流体与计算传热。

E-mail: zgqu@mail.xjtu.edu.cn