

低气压条件下电加热器 自然对流换热性能测试

青岛理工大学 胡松涛[☆] 朱春 王东 张长兴

摘要 从理论上分析了表面传热系数与气压的关系,实验测试了电加热器在低压与常压下的换热性能,得出以下结论:低压与常压下表面传热系数的比值与气压比值的 0.2 次幂成正比;电加热器在低压与常压下散热功率基本相等;表面温度随气压的降低而升高。

关键词 电加热器 低气压 自然对流换热 表面传热系数 测试

Testing of natural convection heat transfer performance of electric heaters under lower air pressure

By Hu Songtao[★], Zhu Chun, Wang Dong and Zhang Changxing

Abstract Theoretically analyses the relations between the surface coefficient of heat transfer and air pressure. Experimentally tests the heat transfer performance under lower air pressure and normal air pressure. Concludes that the ratio of surface heat transfer coefficients under lower air pressure to that under normal air pressure is in direct proportion to 0.2 power of the ratio of lower air pressure value to normal air pressure value, that the heat emission power under lower air pressure is almost equal to that under normal air pressure, and that the surface temperature rises when air pressure falls.

Keywords electric heater, lower air pressure, natural convection heat transfer, surface heat transfer coefficient, test

★ Qingdao Technology University, Qingdao, Shandong Province, China

①

随着青藏铁路建设的不断发展,研究列车客车在高原低压环境下的运行工况是非常必要的。电加热器作为列车冬季供热的主要手段一直被广泛采用。笔者首先从理论上分析了对流换热与气压环境条件的关系,然后通过实验对电加热器在低压与常压下的换热性能进行了测试,具体分析电加热器在低气压条件下的换热性能。

1 测试原理

电加热器一般在自然对流条件下散热,当换热表面的定型尺寸一定时,表面传热系数 α 主要与空气的物性参数有关,即可以归结为是压力和温度的函数。电加热器在低压下的表面传热系数较常压下更难测试,本次测试采用高原模拟舱模拟低气压环境,进行电加热器在常压与低压环境下对流换热的对比测试。

测试采用双管带肋片电加热器,管内用电热丝均匀绕制,通电后电热丝的电能为热能传递到不锈钢管及肋片表面,并向空气散热。当加热器表面温度 t_w 恒定时,电功率 P 即等于对流换热量 Q ,根据牛顿冷却公式得表面传热系数计算公式 $\alpha = Q/[A(t_w - t_f)]$,其中 A 为换热面积, t_f 为空气温度。电加热器面积 A 一定时,在稳态实验条件下,通过测量 t_f, t_w 和 P 即可求出 α 。

由对流换热微分方程组可以导出自然对流换

①[☆] 胡松涛,男,1968年7月生,博士,教授,博士后,副院长
266033 青岛理工大学 281 信箱
(0532) 5071710
E-mail: H-lab@163.com
收稿日期:2004-07-22
一次修回:2004-08-26
二次修回:2006-01-02

热的特征数方程式,工程中广泛使用简化形式 $Nu=C(GrPr)^n$ 。电加热器散热属于常热流情况,习惯采用 $Nu=B(Gr^* Pr)^m$ 形式^[1],其中 $Gr^* = GrNu = g\beta ql^4 / (\nu^2)$, $Pr = \nu/a = \nu\rho c_p / \lambda$ 。在一般压力变化范围(绝对压力 $0.1 \times 10^5 \sim 10 \times 10^5$ Pa)内,特征数 Gr 、空气黏度 μ 、比定压热容 c_p 、导热系数 λ 可认为是与压力无关的常数。将方程中各特征数计算式代入展开,对低压和常压表面传热系数进行比较,在常热流工况下,可得

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{Nu_2}{Nu_1} = \left(\frac{Gr_2^* Pr_2}{Gr_1^* Pr_1} \right)^m$$

$$= \left(\frac{g\beta_2 ql^4 \rho_2 c_p}{\lambda^2 \nu_2} \right)^m = \left(\frac{\rho_2}{T_2 \nu_2} \right)^m = \left(\frac{\rho_2 T_1 \mu}{\rho_1} \right)^m$$

$$= \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^m \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{2m} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^m \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{2m} \quad (1)$$

式中 α_1 和 α_2 分别为低压和常压下电加热器表面的表面传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; $\Delta t_1, \Delta t_2$ 分别为低压和常压下电加热器表面与环境的温差, $^\circ C$; p_1 和 p_2 分别为低压和常压下的绝对压力, kPa; T_1 和 T_2 分别为低压和常压下的特征温度, K, 通常取未受电加热器表面影响的空气温度 T_f 和电加热器表面温度 T_w 的算术平均值^[1], 即 $T = (T_f + T_w) / 2$ 。

实验通过测试不同热流、不同气压工况下电加热器表面温度, 以及环境空气温度, 从而拟合出常压和低压下表面传热系数的计算式, 即确定式(1)中的指数 m 。

2 测试方法和实验设备

由式(1)可见, 电加热器常热流下低压与常压表面传热系数比的测试可转换为常压与低压温差比的测试, 主要过程为: 在低压模拟舱内, 分别调节舱内绝对压力为 100, 90, 80, 70, 60, 50 kPa, 在每个环境压力下, 均调节变压器压力为 110, 130, 160, 190, 220, 250 V, 从而改变电加热器输出功率, 即在不同热流工况下, 测试电加热器管表面温度、肋片温度及环境温度, 测试感温包在不同压力下的通断温度。

使用的主要实验设备如下。

1) 低压舱及控制台: THFC40/0.055-1 型高原模拟舱系统;

2) 电加热器: FM013-00, 0.37 kW/220 V;

3) 测温敏感元件: 铜-康铜热电偶, 用 Aglient 34970A 温度数据采集器作为二次显示仪表。

对电加热器管表面及肋片按照图 1 布置测点, 共布置 11 个测点以测试电加热器局部各点温度。同时布置其他测点测试周围环境温度和电加热器感温包的表面温度。

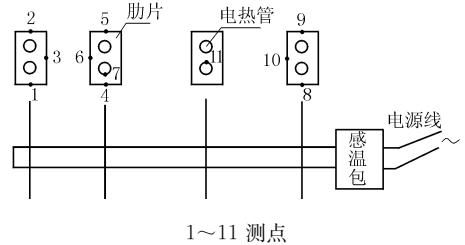


图 1 电加热器测点布置图

3 测试结果

3.1 电加热器功率比较(见表 1)

表 1 电加热器在不同电压、绝对压力 100 kPa 和 50 kPa 下的功率 W

舱内绝对压力/ kPa	电压/V					
	110	130	160	190	220	250
100	88	122	182	268	348	456
50	85	120	182	268	345	448

由表 1 可知, 电加热器在低压与常压下散热功率基本相当, 并且功率符合与电压平方成正比的关系。电加热器在相同电压下低压比常压的散热功率略小 0~8 W, 可认为电加热器在不同的大气压下, 其散热量变化不大, 可视为常热流工况。

3.2 电加热器对流换热测试结果

不同工况下电加热器表面温度的测试结果如表 2 所示, 特征温度 T 列于表 3。

表 2 电压 220 V 时不同气压下表面各点温度 $^\circ C$

测点	舱内压力/kPa					
	100	90	80	70	60	50
1	129.53	130.97	130.00	135.46	139.64	143.31
2	132.72	135.21	137.35	140.71	145.41	149.15
3	125.63	127.15	127.38	129.82	134.96	139.38
4	141.68	143.82	146.12	149.47	153.97	158.03
5	175.67	181.15	182.85	188.29	193.16	194.84
6	133.80	136.55	139.26	143.05	147.85	152.28
7	95.51	97.75	100.09	103.27	106.92	110.05
8	126.98	129.56	132.24	136.30	141.15	145.70
9	129.80	130.98	132.70	135.75	140.13	144.25
10	124.51	126.14	129.04	132.22	136.37	140.21
11	151.32	154.48	157.97	161.44	164.90	169.67
环境温度	16.55	16.49	16.24	16.11	15.58	15.15

表 3 电压 220 V 时不同气压下各点特征温度 K

测点	舱内压力/kPa					
	100	90	80	70	60	50
1	346	347	348	349	351	352
2	348	349	350	352	354	355
3	344	345	345	346	348	350
4	352	353	354	356	358	360
5	369	372	373	375	378	378
6	348	350	351	353	355	357
7	329	330	331	333	334	336
8	345	346	347	349	352	354
9	346	347	348	349	351	353
10	344	344	346	347	349	351
11	357	359	360	362	363	366

由表 3 可知, 低压与常压下的特征温度 T 近似相等(相差小于 3%), 在式(1)中的 m 不大(0.1~10)的情况下, 式(1)右边的特征温度比项可以去掉。故式(1)可简化为

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^k \quad (2)$$

$$k = \frac{\ln \frac{\alpha_1}{\alpha_2}}{\ln \frac{p_1}{p_2}} \quad (3)$$

计算低压下表面传热系数与常压下表面传热系数的比值, 即为计算常压下温差与低压下温差的比值。以电加热器 220 V 电压工况为例, 给出计算结果, 见表 4, 5, 表中各参数的比较基数均为 100 kPa(常压)下的参数值。

表 4 低压下表面传热系数与常压下表面传热系数的比值

测点	舱内压力/kPa				
	90	80	70	60	50
1	0.99	0.97	0.95	0.91	0.88
2	0.98	0.96	0.93	0.89	0.87
3	0.99	0.98	0.96	0.91	0.88
4	0.98	0.96	0.94	0.90	0.88
5	0.97	0.96	0.92	0.90	0.89
6	0.98	0.95	0.92	0.89	0.86
7	0.97	0.94	0.91	0.86	0.83
8	0.98	0.95	0.92	0.88	0.85
9	0.99	0.97	0.95	0.91	0.88
10	0.98	0.96	0.93	0.89	0.86
11	0.98	0.95	0.93	0.90	0.87

由以上测试结果可以看出, 在 50 kPa 气压、220 V 电压下, 电加热器表面各点平均温度比常压下高 16.5 °C。同一功率下电加热器表面温度随气压降低而升高, 表面传热系数随气压的降低而降低。这是因为气压降低时, 空气分子浓度与气压成

表 5 电加热器电压 220 V 时的 k 值

测点	舱内压力/kPa				
	90	80	70	60	50
1	0.13	0.15	0.15	0.18	0.18
2	0.21	0.19	0.20	0.22	0.21
3	0.14	0.08	0.12	0.18	0.19
4	0.17	0.17	0.18	0.20	0.19
5	0.32	0.21	0.22	0.21	0.18
6	0.22	0.22	0.22	0.24	0.23
7	0.27	0.27	0.28	0.29	0.27
8	0.22	0.22	0.24	0.25	0.24
9	0.10	0.13	0.15	0.19	0.19
10	0.22	0.23	0.21	0.20	0.20
11	0.22	0.23	0.21	0.20	0.20
平均值	0.20	0.19	0.20	0.22	0.21

正比例降低, 从而减小了热表面与低压空气的换热强度。

因此, 该电加热器低压与常压下的表面传热系数比满足以下拟合公式:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{0.2} \quad (4)$$

式(4)右边项指数为低压与常压 k 的平均值。由此式可见, 50 kPa 气压环境下的表面传热系数比常压(100 kPa)下减小 13%。由于该公式推导前提为自然对流换热工况, 可见对于夏季制冷工况下的空调换热器和表面冷却器的换热也同样适用。因此, 在青藏铁路线上运行的空调客车, 单就气压环境因素而言, 为得到同样的换热效果, 空调换热器和表冷器的换热量需要比常压下增大 13%, 这一点在进行高原列车暖通相关设备选型时必须给予足够的重视。

3.3 电加热器感温包通断温度测试

由 Aglient 温度数据采集器测试得出电加热器感温包的表面温度随时间的变化曲线, 如图 2 所示。

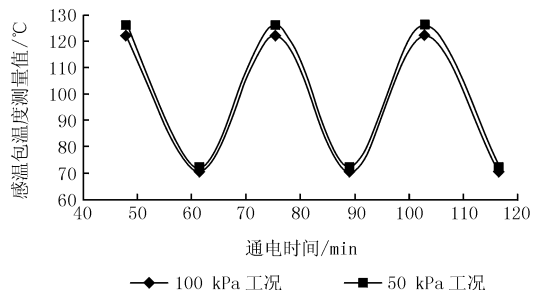


图 2 不同舱内气压下电加热器感温包表面温度变化

定凝固厚度后,相变基本保持匀速。

3 结论

本文对共晶盐蓄冷球的相变凝固过程建立了物理模型和数学模型,并利用 FLUENT 软件进行了数值模拟研究。研究表明采用 FLUENT 软件中的凝固/融化模型对相变问题进行传热分析研究是合理有效的,而且由数值计算的结果还可以得到一些对工程实际中共晶盐蓄冷球的设计和改进行都有参考价值的结论。

3.1 共晶盐蓄冷球外载冷剂的温度越低,传热温差越大,共晶盐蓄冷球的凝固时间越短,相界面移动速度越快。由于共晶盐相变温度高,载冷剂的温度可在 0℃ 以上,但其载冷剂的温度应根据电力低谷时间、蓄冷球蓄冷特性及制冷机效率来确定。

3.2 共晶盐蓄冷球所需的凝固时间与球径成正比,所以设计时球径不能太大,以控制蓄冷时间是在电力低谷时间段,这样才能达到既节能又省钱的目的。

3.3 FLUENT 在分析相变传热问题时具有独特的优势,它界面友好,操作方便,计算简单快捷,具有强大的前后处理功能。

在本文分析的基础上,需要进一步对多维相变问题以及相变和热媒体的耦合等工程问题进行研究分析。

(上接第 24 页)

常压下的感温包温度变化趋势与图 2 相似,温度达到峰值时加热器自动断开,在谷值时加热器重新接通。电加热器通/断温度见表 6。

表 6 电加热器的通/断温度 ℃

	100 kPa	50 kPa
断开温度	122.3	126.2
启动温度	70.7	72.3

根据测试结果可知,能够通过电加热器感温包实现温控通断动作,其通/断的周期为 14 min。从测试数据上看,低压 50 kPa 下感温包通/断温度比常压工况下均高 2~5℃。

4 结论

4.1 电加热器在低压与常压下散热功率基本相当,功率符合与电压的平方成正比的关系。

参考文献

- [1] 郭茶秀,魏新利. 热能存储技术与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005
- [2] 张寅平,胡汉平,孔祥东,等. 相变储能——理论和应用[M]. 北京:中国科技大学出版社,1996
- [3] Sasaguchi K, Sumikawa T. Effect of maximum fluid density on the melting of ice around a finned surface [C]//Proceedings of 10th IHTC, 1994;139-144
- [4] Arnold D. Dynamic simulation of encapsulated ice stores—part 2: model development and validation[G] //ASHRAE Trans, 1994,100(1):1244-1245
- [5] Dumas J P. Modelization of a tank filled with spherical modules containing a phase change material [C]//Proceedings of 10th IHTC, 1994;239-244
- [6] Sasaguchi K, Yoshiyama T. Development of an efficient static-type ice thermal energy storage vessel using a low concentration aqueous solution[C]//Proc of 6th Int TES Conf, 1999;575-584
- [7] 李晓燕. 蓄冷球内高温相变材料蓄冷特性的研究[J]. 节能技术,2004,22(3):9-11
- [8] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004
- [9] Voller V R, Cross M, Markatos N C. An enthalpy method for convection/diffusion phase change[J]. Int J Numer Methods Eng, 1978,24:271-284

4.2 自然对流工况下,表面传热系数在低压与常压下存在如下公式: $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^k$, 其中 k 值经实验测定,平均值为 0.2。表面传热系数随着气压降低而降低,50 kPa 下表面传热系数比常压(100 kPa)下低 13%。

4.3 电加热器表面温度随着气压的降低而升高。在 50 kPa 压力下,在 220 V 电压、370 W 功率下,电加热器表面各点平均温度比常压下高 16.5℃。

4.4 检测低压 50 kPa 下电加热器感温包通/断温度比常压工况下均高 2~5℃,通/断的周期为 14 min。

参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1998