

文章编号:0253-4339(2013) 05-0090-05

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.05.090

牵引整流器热管式空气冷却器散热性能实验研究

罗爱华¹ 金鹰² 岳良² 金苏敏¹

(1 南京工业大学能源学院 南京 211816; 2 青岛宏达赛耐尔科技股份有限公司 青岛 266111)

摘要 为了科学合理的掌握机车 IGBT 功率模块冷却器在正常运行过程中的传热特性,搭建标准风洞实验系统,研究风速 5 ~ 7m/s,散热器进风温度 30 ~ 45℃,基板温度分别为 70℃和 80℃条件下,热管式空气冷却器的散热量,基板的工作温度范围以及进风速度和温度对换热的影响。实验结果表明:在实验进风速度和进风温度下,冷却器正常工作时,基板温度越高,冷却器散热量就越大,当基板温度为 80℃时,冷却器的散热量在 5400 ~ 7400W 之间。通过冷却器的散热量可以得到:在机车正常工作时,冷却器基板的最佳工作温度在 70 ~ 90℃之间。进风速度小于进风温度对换热量的影响,考虑到降低能耗和减少噪音污染,流经冷却器的风速应不超过 7m/s。以上实验结果为高速动车组牵引整流器热管式空气冷却器的选型和设计提供科学参考。

关键词 IGBT; 牵引整流器; 热管; 温度

中图分类号:TB61; TB657

文献标识码:A

Experimental Study on Heat Pipe Cooler of Electric Locomotive Traction Converters

Luo Aihua¹ Jin Ying² Yue Liang² Jin Sunmin¹

(1. Nanjing University of Technology, Nanjing, 211816, China; 2. Qingdao Hongda Schnell Science Technology Co., Ltd., Qingdao, 266111, China)

Abstract To master heat transfer characteristics of locomotive IGBT power module cooler, experimental system on the heat dissipation, substrate temperature range and the effects of air velocity and inlet air temperature on the heat transfer of the heat pipe cooler is built. The experiments are conducted under air velocity at 5 ~ 7m/s, inlet air temperature at 30 ~ 45℃ and substrate temperature at 70 ~ 80℃. Experimental results show that the higher the substrate temperature is, the more heat is dissipated; when the substrate temperature is at 80℃, the heat dissipating capacity is 5400 ~ 7400W. The results also show that the optimal working temperature of substrate is at 70 ~ 90℃ for the cooler. Inlet air temperature has more effects on the heat transfer than air velocity. Considering energy consumption and noise level of the air velocity flowing through the cooler should not be more than 7m/s. Experimental results provide a scientific basis for the selection and design of the cooler.

Keywords IGBT; traction rectifiers; heat pipe; temperature

IGBT(Insulate Gate Bipolar Transistor)绝缘栅双极晶体管作为新型电力电子器件的代表,是整机系统提高性能指标和节能指标的首选产品。它集高频率、高电压、大电流等优点于一身^[1],是国际上公认的电力电子技术第三次革命的最具代表性的产品^[2]。IGBT是电力机车中的牵引变流器、制动电阻电路断路器、逆变器核心电器设备的核心部件,由 IGBT 晶体管组成的功率模块是牵引变流器最主要的统一化元件^[3],伴随其高频、大功率^[4]和高集成化发展,设备单位面积的热流密度越来越高,IGBT 芯片温度直接影响到 IGBT 承载电流的能力^[5-6],工作效率和使用寿命,较高的散热量是无法通过常规的冷却方式来保证功率模块的安全运行,因此需要根据发热的情况

采取各种不同的冷却措施以保证其安全工作^[7-8]。再加上电力机车受到重量、体积的严格限制、对机车用功率器件必然是对与其相匹配的风冷散热器的要求比地面装置苛刻得多^[9]。通过实验研究动车牵引整流器热管式空气冷却器的传热特性,科学合理的掌握热管式散热冷却设备在机车运过程中的散热量,基板温度的工作范围,从而为电力机车 IGBT 功率模块散热器的选型和设计提供科学依据。

1 牵引变流器冷却器工作原理

高速动车牵引整流器热管式空气冷却器冷凝段为热管冷凝段外加平直铝翅片,受热段为实心铝板,热管的蒸发段钎焊于实心铝板内,热管在基板上的排

列根据半导体器件热流密度的大小成非均匀分布。工作过程电力电子元器件的发热模块将运行产生的热量通过具有较高导热率和绝缘的导热硅脂传递给冷却器的导热基板^[10],导热基板以导热的方式将热量透过热管蒸发段管壁进入内腔,对处于负压状态下的工质进行加热并使其相变为饱和蒸汽,形成压差,产生的蒸汽沿着内部通道上升到冷凝段冷凝释放出

热量,热管冷凝段有铝质翅片扩展散热表面,散热翅片在强制风冷作用下不断将热量带走^[11]。蒸汽在冷凝段的内壁放出汽化潜热凝结成液体,在重力作用下流回蒸发段。制冷剂在冷却器内部不断重复以上过程把电子器件产生的热量散掉。图 1 为热管式冷却器工作原理图。

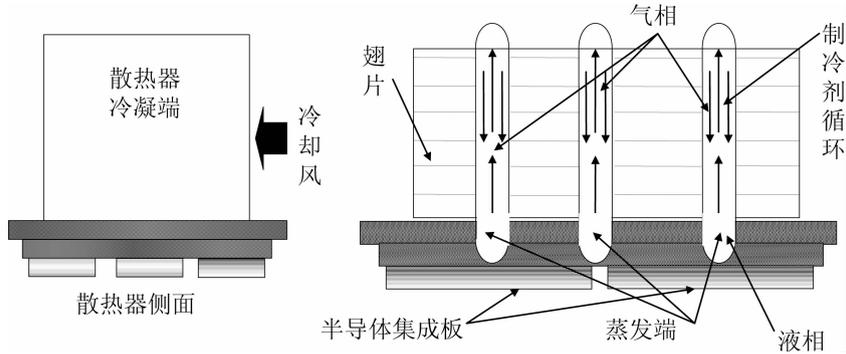


图 1 热管式散热器工作原理图

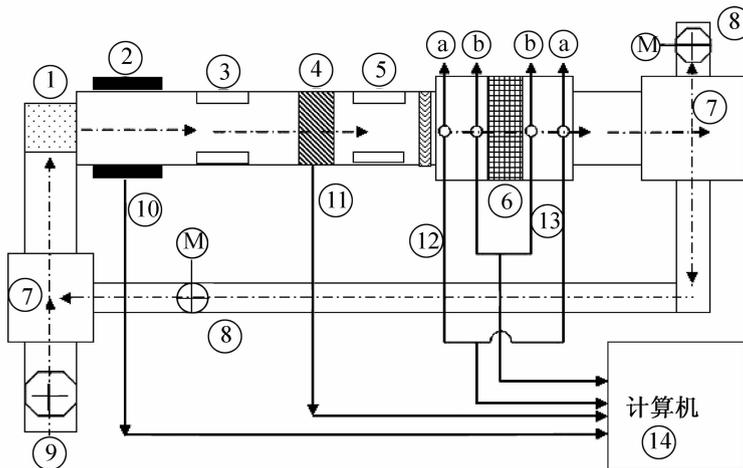
Fig. 1 Heat pipe radiator work principle diagram

2 实验系统及测试条件

图 2 为热管式空气冷却器换热及压降特性测试实验原理图。测试台为一开式风洞实验系统,可提供 4 ~ 8m/s 的风速,空气加热器最大功率为 15kW,水箱加热器最大功率为 9kW。流经冷却器前的空气温度通过安装在冷却器之前的空气加热

器来调节;空气流量或者风速通过变频器来调控;测试过程夏季工况排风阀、新风阀常开,回风阀设定开启度;冬季工况排风阀、新风阀设定开启度,回风阀常开。

热管式空气冷却器前后的温度通过 pt100 热电阻测得,热电阻测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$;流经冷却器的空气流量通过智能涡街流量计测得,流量计测量精度为



1 离心式风机 2 空气加热器 3 风道直管 4 涡街流量计 5 风道直管 6 测试端(热管式冷却器)7 静压箱 8 电动风阀 9 手动风阀(新风进口)10 电加热传感器 11 流量传感器 12 pt100 热电阻 13 压差变送器 14 计算机 a 温度测孔 b 压差测孔

图 2 实验测试装备示意图

Fig. 2 Schematic of experimental set up

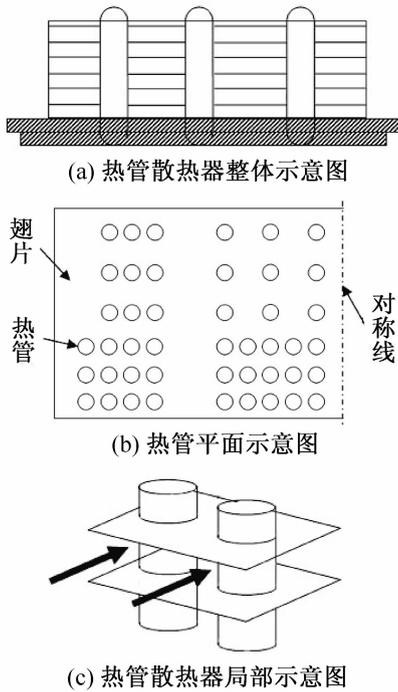


图 3 热管散热器整体与局部示意图

Fig.3 The whole and the parts of heat pipe radiator

$\pm 1.0\%$; 热管冷却器前后压力降通过压差变送器测得, 测量精度 $\pm 1\%$ 。

表 1 中列出了实验的条件和工况。一般来说, 散热器空气侧的换热系数与空气流量以及换热器的表面结构相关, 所以散热器前后的温度测量, 流经空气流量的测量十分重要, 需要通过较高精度的设备进行测得, 在实验测试中采用的 pt100 热电阻测温, 智能涡街流量计测流时流量。为了更好的维持冷却器导热基板的温度和减少不必要的热量损失, 需要对散热器加热装置做良好的保温处理, 实验选择水蒸汽加热, 并对水箱加热器采用厚度 8cm 的石棉做好保温。

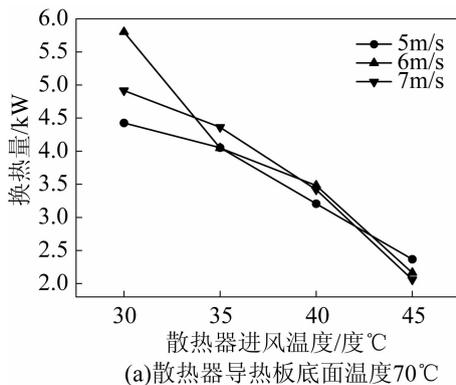


表 1 实验条件
Tab. 1 Test conditions

参数名称	值
冷却器进口温度/ °C	30, 35, 40, 45
冷却器导热基板温度/ °C	70, 80
迎面风速/ (m/s)	5, 6, 7
翅片类型	连续平直翅片
翅片间距/ mm	4.6
管排数	6
管排方式	顺排, 非均匀

3 实验结果与分析

3.1 风速和温度对总换热量的影响

从图 4(a) 可以看出: 当基板底部外壁温度为 70°C 时, 热管式空气冷却器的换热量在 2000 ~ 5000W/s 之间, 成稳定变化。换热量随着进风温度升高逐渐减少, 且受冷却风速影响比较小。这是因为实验风速下流经冷却器的空气成紊流状态, 对换热系数的改变比较小, 而进风温度的高低直接影响的是冷却器换热温差大小的原因。在进风温度为 30°C, 风速为 6m/s 时, 由于外界因素的干扰导致测量值变大。从图 4(b) 可以看出: 当基板底部外壁温度为 80°C 时, 冷却器换热量在 5400 ~ 7400W 之间。换热量随着进风温度的升高而下降, 在进风温度小于 35°C 时降低的比较缓慢, 进风温度高于 35°C 时换热量下降的比较快; 风速对换热量的影响: 在进风温度小于 36°C 左右时, 风速的大小对换热量的影响比较大, 当进风温度高于 36°C 时, 风速对换热量的影响趋于一致。

3.2 风速和温度对冷却器传热系数的影响

冷却器的传热系数是根据实验测得的换热量, 冷

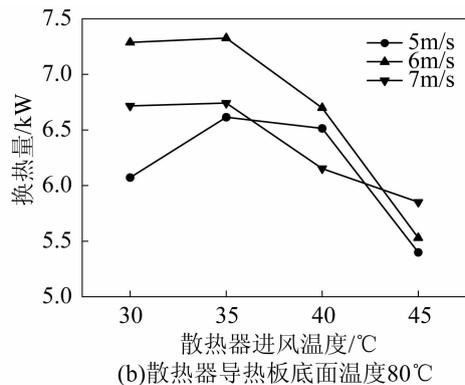


图 4 风速、进风温度与散热器换热量的关系

Fig. 4 The relationship between radiator heat transfer of the air speed and inlet temperature

冷却器平均传热温差和以基板面积为基准换热面积计算得到。从图5(a)可以看出:当基板底部外壁温度为70℃时,冷却器传热系数随着进风温度升高先是略有升高后逐渐降低,且受冷却风速影响较小。原因分析同图4(a)冷却器换热量。从图5(b)可以看出:当基板底部外壁温度为80℃时,冷却器传热系数随

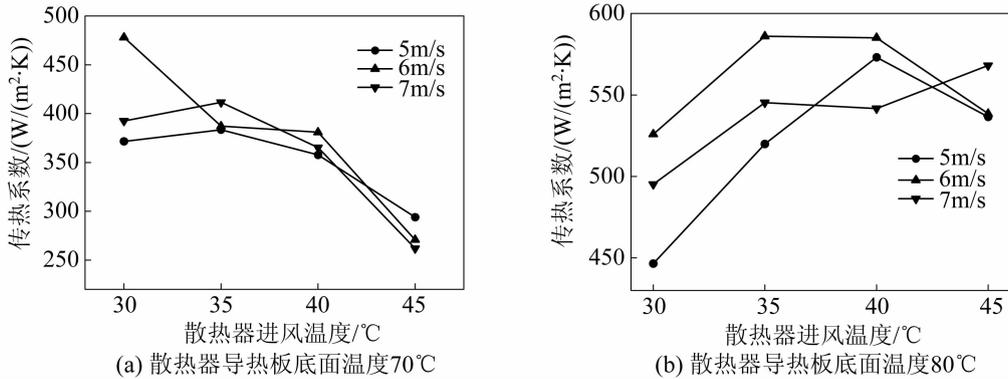


图5 风速、进风温度与传热系数的关系

Fig. 5 The relationship between heat transfer coefficients of the air speed and inlet temperature

3.3 风速和温度对散热器压力损失的影响

图6为实验条件下的冷却器阻力损失关系图,冷却器导热基板底面温度为70℃时的阻力损失用实线表示,冷却器导热基板底面温度为80℃时的阻力损失用虚线表示。从图中可以看出,迎面风速是影响该热管散热器压损的主要因素。风速越高冷却器阻力损失越大。所以在对该类型冷却器进行选型和设计时,要适当控制冷却器进风速度的大小,当选取的风速过高时会产生较大的阻力损失,从而造成能源的浪费,成本的增加,噪声的增大和设备占用空间体积的增大。如果工作环境温度不超过40℃时,冷却器进风速度最好不要超过6m/s;如果环境温度经常维持在45℃左右时,冷却器进风速度最好不要超过7m/s。

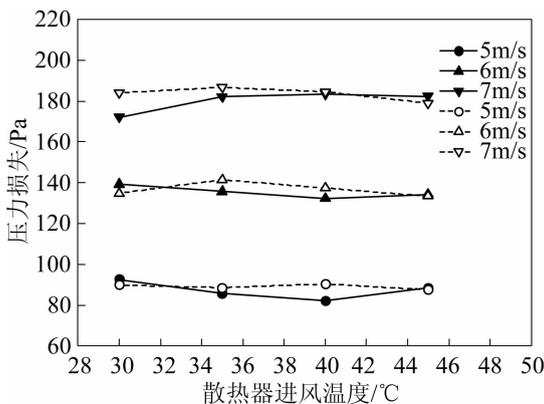


图6 风速、进风温度与压力损失的关系

Fig. 6 The relationship between pressure loss of the air speed and inlet temperature

着进风温度升高先是增大并维持一定高度后开始下降。这是因为在进风温度小于40℃时,冷却器换热量降低的百分比小于冷却器换热温差减小的百分比。风速对冷却剂换热系数的影响和进风温度的高低有关,进风温度低时风速对传热系数的影响比较明显,进风温度高时风速对传热系数的影响趋于一致。

4 结论

1) 在实验测试工况下,基板底部外壁温度为70℃时,热管式空气冷却器的换热量在2000~5000W/s之间;基板底部外壁温度为80℃时,冷却器换热量在5400~7400W之间。

2) 在实验条件下,热管式空气冷却器导热基板底面壁温在最近工作温度:高于70℃,低于90℃。70℃时热管冷气却处于一个开始启动工作状态,90℃时,冷却器的散热量和模拟IGBT集成半导体的产热量在达到散热平衡时,使得冷却器基板的温度无法超过90℃。

3) 综合换热量、传热系数和阻力损失等因素,冷却器导热基板底部外壁温度处在80℃左右最佳。工作环境温度在40℃左右时,冷却器进风速度最好不要超过6m/s;工作环境温度在45℃左右时,冷却器进风速度最好不要超过7m/s。

参考文献

[1] 王树振,单威,宋玲玲. IGBT 绝缘栅双极晶体管发展简述[J]. 微处理机,2008(2):41-43. (Wang Shuzhen, Shan Wei, Song Lingling. Development of IGBT [J]. Microprocessors, 2008(2):41-43.)

[2] 李恩玲,周如培. IGBT 的发展现状及应用[J]. 半导体杂志,1998,23(3):48-51. (Li Enling, Zhou Rupei. New developments and applications of IGBT [J]. Semiconductor, 1998, 23(3):48-51.)

[3] 田睿(译). 大功率 IGBT 晶体管牵引变流器[J]. 国内外内

燃机车,2011,420(6):7-14. (Tian Rui. High power IGBT transistors traction converters [J]. Foreign diesel locomotive, 2011,420(6):7-14.)

[4] Thomas Luttin. IGBT technology in high-power applications [J]. International Railway Journal, 2000(4):28-29.

[5] Hans—Joachim Knaak. IGBT technology in traction converter-advantages and experiences of the new transistor technology [J]. Der nahverkehr,1994(12):23-28.

[6] 王雄,马伯乐,陈明翊,等. 轨道车辆大功率IGBT散热器的热设计与试验研究[J]. 机电传动,2012(4):71-73. (Wang Xiong, Ma Bole, Chen Mingyi, et al. Thermal design and experimental research on High-power IGBT m module heat sink applied in rail vehicle [J]. Electric drive for locomotives, 2012(4):71-73.)

[7] 李春阳,徐景秋. 热管散热器在新型交流装置中的应用[J]. 机车电传动,2005(2):14-18. (Li Chunyang, Xu Jingqiu. Application of heat-pipe heat sink to new converter[J]. Electric drive for locomotives,2005(2):14-18.)

[8] 付成勇,范斌,沈希军. SS7E型电力机车大功率元件热管散热整流装置设计[J]. 大功率变流技术,2009(5):16-18. (Fu Chengyong, Fan Bin, Shen Xijun. Design of

SS7E Electric Locomotive Rectifier with High Power Element and Heat Pipe Radiator [J]. High power converter technology,2009(5):16-18.)

[9] 王正星. 功率器件用风冷散热器的新型结构[J]. 机电电传动,1986(1):40-43. (Wang Zhengxing. New air-cooled radiator for power devices [J]. Electric drive for locomotives, 1986(1):40-43.)

[10] 宗朝晖. 现代电力电子的冷却技术[J]. 交流技术与电力牵引,2007(4):6-12. (Zong Chaohui. Cooling technology of modern power electronics [J]. Converter technology & Electric traction, 2007(4):6-12.)

[11] 袁斌. 矩形平翅片热管散热器的传热分析和数值模拟[D]. 江苏:江苏大学,2006.

通信作者简介

罗爱华,男(1987-),硕士研究生,南京工业大学能源学院,E-mail:ceo0512@163.com. 研究方向:制冷及低温工程研究。

About the corresponding author

Luo Aihua (1987-), male, Master, Energy College of Nanjing University of Technology, E-mail:ceo0512@163.com. Research fields: Refrigeration and Cryogenic Engineering.

(上接第58页)

[4] 伏龙,丁国良,张春路,等. 螺杆式冷水机组稳态仿真模型的开发与应用[J]. 暖通空调,2005,35(5):71-75. (Fu Long, Ding Guoliang, Zhang Chunlu, et al. Development and application of a screw-type water steady-state simulation model [J]. Journal of HVAC, 2005,35(5):71-75.)

[5] 柴沁虎,马国远,江亿,等. 带经济器的涡旋压缩机制冷循环热力学分析[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(10):1401-1404. (Chai Qinhu, Ma Guoyuan, Jiang Yi, et al. Thermodynamic analysis of scroll refrigeration system with economizer [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2003,43(10):1401-1404.)

[6] 田津津,张哲. 风冷热泵结霜工况下的实验研究[J]. 制冷与空调(四川),2008,22(1):88-90. (Tian Jinjin, Zhang Zhe. Experimental study on air-cooled heat pump on frosting conditions [J]. Refrigeration and air conditioning (Sichuan), 2008,22(1):88-90.)

[7] 高智翔. 应用EPI热式质量流量计系统测试半封闭式螺杆制冷压缩机的排气量的研究[J]. 制冷与空调(四川),2005(1):33-34. (Gao Zhixiang. Study for test compressor's discharge volume using EPI thermal mass flowmeter test on semi-closed screw refrigeration compressor [J]. Refrigeration and air conditioning (Sichuan), 2005(1):33-34.)

[8] Wu Huagen, Cui Tiansheng, Peng Xueyuan, et al. Experimental Study On the Characteristics of Twin Screw Compressor in Air-source Heat Pump System [R]//Proceedings of the 4~(th) International Conference on Compressor and

Refrigeration, Xi'an, China, International Institute of Refrigeration (IIR)、Chinese Association of Refrigeration (CAR)、National Natural Science Foundation of China (NSFC),2003.10

[9] 李玉春,蔡志鸿,何永锋,等. 带经济器的热泵性能特征研究[J]. 制冷学报,2011,32(6):17-19,23. (Li Yuchun, Cai Zhihong, He Yongfeng, et al. Study on performance characteristic of heat pump with economizer [J]. Journal of Refrigeration, 2011,32(6):17-19,23.)

[10] 吴华根,彭学院,邢子文,等. 经济器补气压力对双螺杆制冷压缩机性能影响的试验研究[J]. 制冷学报,2003,24(4):10-13. (Wu Huagen, Peng Xueyuan, Xing Ziwen, et al. Experimental study on effects of superfeed pressure of economizer on twin-screw refrigeration compressor performance [J]. Journal of Refrigeration, 2003,24(4):10-13.)

[11] 刘源全,李宙华. 经济器在风冷热泵机组上的应用[J]. 节能,2002(8):32-33. (Liu Yuanquan, Li Zhouhua. Application of economizer on the air-cooled heat pump units [J]. Journal of the energy-saving, 2002(8):32-33.)

通信作者简介

秦黄辉,男(1974-),硕士研究生,高级工程师,南通航运职业技术学院轮机系,(0513)85965672, E-mail:qhh@ntsc.edu.cn. 研究方向:高温热泵和低温制冷系统的优化研究。

About the corresponding author

Qin Huanghui(1974-), male, Master, Senior engineer, Marine Department of Nantong Shipping College, (0513)85965672, E-mail:qhh@ntsc.edu.cn. Research fields: optimization of high temperature heat pump and refrigeration system.