

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.011

管式 IGBT 水冷散热器性能的数值模拟研究

唐玉兔¹, 丁 杰²

(1. 南车株洲电力机车研究所有限公司 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001

2. 南车株洲电力机车研究所有限公司 南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘要:为避免平板式水冷散热器可能因虚焊而存在泄漏的风险,设计了一款管式水冷散热器。以管式水冷散热器为研究对象,利用 HyperMesh 软件建立仿真分析用的网格模型,再采用 FLUENT 软件对流速分布、压力分布和温度场分布进行了分析,对比研究了流量、管材和底板厚度对 IGBT 芯片最高温度的影响。研究结果表明,压降基本上呈流量的二次方关系增长,芯片最高温度降低趋势随着流量增加由快速变为缓慢,芯片最高温度随管材的导热系数提高而降低,底板厚度对芯片最高温度的影响很小,采用单根管路的水冷散热器均温性不佳。通过对压力损失的分析,提出了单根管路改为双根管路的优化改进方案,管路压降较改进之前降低约 80%,且温度均匀性更好。该研究结果可为管式水冷散热器的设计提供指导。

关键词:绝缘栅双极型晶体管;管式水冷散热器;压降;温度;流速

中图分类号:TB657.5;TH137.8+6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0870-05

Numerical simulation on performance of tubular water-cooled radiator for IGBT module

TANG Yu-tu¹, DING Jie²

(1. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 2. CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: In order to avoid plate type water-cooled radiator may have the risk of leakage because of the virtual welding, a tubular water-cooled radiator was designed. Take tubular water-cooled radiator as the research object, the grid model for numerical simulation was established by using HyperMesh software, and then the velocity, pressure and temperature distribution of tubular water-cooled radiator were analyzed by FLUENT software. Effects of flow rate, pipe material and thickness of the base plate on the highest temperatures of insulated gate bipolar transistor(IGBT) chip were studied. The research results show that the pressure drop is virtually a quadratic relationship between the flow rate, the highest chip temperature reducing trend with the increase of the flow rate from fast to slow, and the highest chip temperature decreases with the increase of thermal conductivity of pipe material, the plate thickness contribute little to the highest chip temperature, and the temperature uniformity of water-cooled radiator with single pipeline is poor. Through the analysis of the pressure loss, the optimization of a single pipeline to dual pipeline scheme was put forwarded. The scheme can make the pipeline pressure drop by about 80% compared with the previous, and have better temperature uniformity. The research results can provide guidance for the design of the tubular water-cooled radiator.

Key words: insulated gate bipolar transistor(IGBT); tubular water-cooled radiator; pressure drop; temperature; velocity

0 引 言

平板式水冷散热器通常是在导热性能好的铝板材

上加工出冷却水的流道,再焊接一层盖板封闭起来。为提高平板式水冷散热器的性能,研究者们对平直槽道^[1-3]、圆形截面流道^[4]、S 形回弯流道^[5]、S 型加分流

收稿日期:2013-11-22

作者简介:唐玉兔(1987-),女,湖南邵阳人,主要从事电子产品热设计方面的研究。E-mail:tangyutu@126.com.

通信联系人:丁 杰,男,工学硕士,高级工程师,E-mail:dj8083@126.com.

片流道^[6]和翅柱^[7-9]等不同流道结构形式的平板式水冷散热器进行了研究,有部分研究成果中的数值模拟结果得到了实验数据的验证。Lee Tien-Yu^[10]用仿真的方法对 IGBT 功率模块的水冷散热器进行了优化分析。揭贵生^[11]等从理论上对层流范围内平板式水冷散热器的槽道数、槽道高度、槽道占空比与散热器的热阻进行推导,形成了任意尺寸平板式水冷散热器的参数优化方法,并用具体算例进行了理论计算与 CFD 仿真的对比验证。

然而,焊接过程中可能会存在虚焊,导致平板式水冷散热器存在泄漏的风险。管式水冷散热器^[12]通常将铜管或不锈钢管嵌入在铝底板上,管路通过机械压力折弯和轧平,其焊接工序较少,可以有效避免泄漏的风险,在工程中(如矿井、石油、化工等)得到一些应用。李文顶^[13]对管式水冷散热器的不同水道结构进行了仿真分析,制作的样机在长期运行情况下未发生报警现象,证明了管式水冷散热器的设计能满足中压矿用变频器热设计的要求。石书华^[14]等对三电平静止频率变换装置的管式水冷散热器进行了有限元计算,并通过实测数据验证了温度场计算模型的合理性和计算结果的准确性。

为分析某管式水冷散热器的性能,本研究采用 HyperMesh 软件建立仿真分析用的网格模型,再利用 FLUENT 软件得到流速分布、压力分布和温度场分布,对比分析流量、管材和底板厚度对 IGBT 芯片最高温度的影响,并对优化改进方案进行探讨。

1 管式水冷散热器的结构

工程应用中,常常将多个 IGBT 元件安装在同一个散热器上,并搭配一定的电气部件和控制电路,从而组成特定功能的变流器模块。管式水冷散热器上安装了 6 个 IGBT 元件,可用于实现三相桥臂逆变的功能,其结构示意图如图 1 所示。

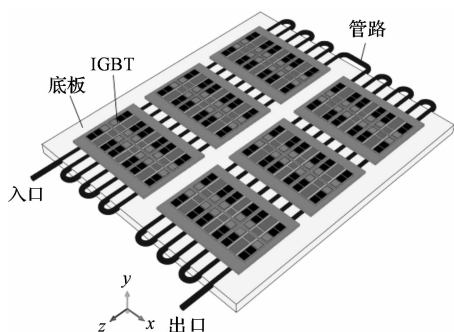


图1 管式水冷散热器的结构示意图

外径 9.5 mm、管厚 1.24 mm 的铜管通过机械压力折弯成多个回路,镶嵌在 14 mm 厚的铝底板(x 和 z 方向的尺寸分别为 480 mm 和 550 mm)中。为了增大铜管与 IGBT 元件的接触面,减小水冷散热器与 IGBT 元件之间的界面热阻,可将铜管轧平(模型的局部结构及网格划分如图 2 所示),并严格控制 IGBT 元件安装面的表面粗糙度。

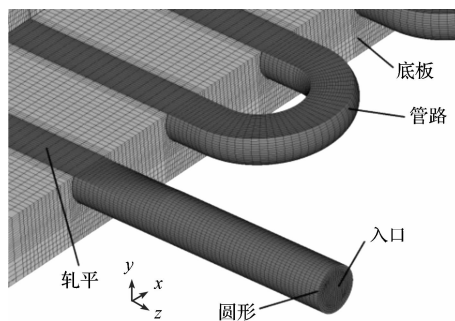


图2 模型的局部结构及网格划分

2 仿真模型

仿真建模过程中,IGBT 元件与底板、铜管与底板之间均设置了 100 μm 的导热硅脂(导热系数为 1 W/m $\cdot$ °C),以考虑接触热阻的影响。综合考虑 IGBT 元件内部包含的 AlSiC 基板、焊料层、铜层、AlN 层、芯片、绝缘材料等材料层的厚度,以及模拟管内流动状态细节的需要^[15],网格最小尺寸选择 0.5 mm,且在靠近管壁处划分了 5 层边界层网格。为限制网格数量过于庞大,稍远离管路的底板网格尺寸由 0.5 mm 逐步过渡至 2 mm。利用 HyperMesh 软件的 linear solid 方法,可以创建圆形管路与轧平管路过渡处的六面体网格(如图 2 所示),其它区域可通过 solid map 方法创建出以六面体为主,极少数为五面体的高质量网格模型。HyperMesh 软件与 FLUENT 软件之间有完全兼容的文件接口,建立的仿真模型网格数量为 1.6×10^7 ,可以准确地导入至 FLUENT 软件中。

通过电气参数的计算可知该水冷散热器上 6 个 IGBT 元件的平均损耗均为 1 500 W,损耗作为 IGBT 元件中的 IGBT 芯片和二极管芯片的均布体积热源进行施加。冷却介质采用 40% 乙二醇和 60% 水组成的混合物,入口温度为 50 °C,对应的冷却介质密度为 1 034.6 kg/m³、比热容为 3 644.6 J/kg $\cdot$ °C、导热系数为 0.454 3 W/m $\cdot$ °C、动力粘度为 1.174 710⁻³ kg/m $\cdot$ s。管路的入口边界条件设置为速度入口,出口边界条件设置为压力出口,参考压力为 1 标准大气压,管壁为无滑移的共轭传热面。冷却介质的入口流量为

10 L/min,折算成入口平均流速为 4.306 m/s, Re 数为 26 624,可以判定管内中心部位的流动状态为湍流,因此,笔者选择标准 $k-\varepsilon$ 模型进行仿真分析。由于管壁对湍流有明显的影响,已有实验研究表明靠近管壁区域称为粘性支层,为层流状态,分子粘性对于动量、热量和质量输运起到决定作用。为反映边界层的影响,本研究采用了 FLUENT 软件中提供的近壁面模型^[16]。

仿真模型中考虑到重力的影响,设置 y 轴负方向为重力方向,加速度值取 9.81 m/s^2 。

求解计算使用了 DELL T7600 台式工作站 (32CPU、256 GB 内存) 和 Windows 764 位操作系统, FLUENT 软件的求解计算设置为 8CPU 并行,将收敛残差准则设置由默认的 10^{-3} 改为 10^{-6} ,计算 1 900 步耗时 30 余小时后,可得到收敛的仿真结果。

3 计算结果及分析

3.1 速度场与压力场分析

管路中间截面的流速分布如图 3 所示。可以看出,冷却水在铜管直线段的流速较为均匀,在圆弧转折区域的流速出现一些变化,圆弧转折区域有较大的局部阻力损失,导致最大流速 (7.12 m/s) 出现在这些区域。从图 3 中还可看出管壁附近的流速最小,管路中心的流速大,这是由于管壁对流体流动有阻碍作用所导致的。

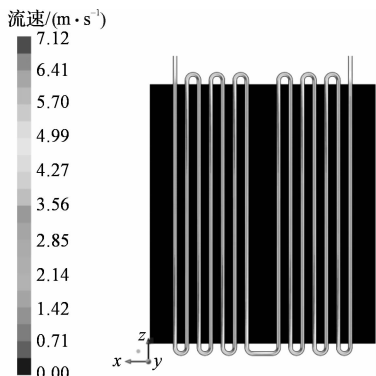


图 3 管路中间截面流速

管路的出口为压力出口边界条件,冷却水从入口进入并在铜管内流动时,必须克服沿程阻力损失和局部阻力损失,由此产生冷却水在管路中的压降为 685 kPa,入口侧的压力比出口侧大,由入口侧到出口侧呈递减的变化趋势。该管式水冷散热器的压降数值远大于平板式水冷散热器。这个压降对于电力机车上的水泵而言,是不能满足使用要求的,但是对于水压一般在几个 MPa 左右的矿井工况,该压降是可以接受的。

3.2 温度场分析

整体的温度场分布如图 4 所示。可以看到 IGBT 元件的芯片温度最高,为 90.09°C ,与冷却水入口温度相比,温升为 40.09°C 。冷却水在管路中流动时,管路的第 2 道与入口侧的第 1 道为逆流关系,第 3 道又与第 2 道为逆流关系,依此类推。从整体来看,冷却水不断从流经的区域吸收热量,冷却水的温度在升高,导致带走热量的能力有所下降,使得靠近入口侧管路的芯片温度最低,靠近出口侧管路的芯片温度最高,两者可以相差约 21.5°C 。

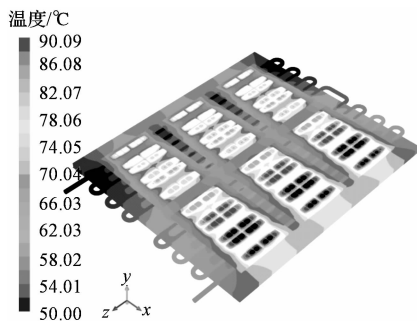


图 4 整体温度分布

通过分析元件安装面的温度场分布可知,靠近出口侧的 IGBT 元件下方的温度比靠近入口侧高,最高温度可达 75.04°C ,与冷却水入口温度相比,温升为 25.04°C 。IGBT 元件的芯片产生热量,需要经过焊料层、AlN 层、铜层、AlSiC 基板和导热硅脂,才能到达散热器上,因此,散热器上的最高温度值要低于 IGBT 元件芯片上的最高温度值。还可得出铜管的温度比临近的铝底板温度低一些,是由于铜管上的热量可以迅速地被冷却水带走,而铝底板的热量需要通过导热硅脂和铜管这些导热途径后被冷却水带走,对应的热阻要大一些。

3.3 对比分析

前面分析了额定流量下的管式水冷散热器计算结果,针对该结构的水冷散热器,通过改变流量可以获得一些曲线,从而了解该散热器更为详细的性能信息。入口流量从 2.5 L/min 至 15 L/min 的压降变化曲线如图 5 所示。可以看出随着流量增加,压降基本上呈流量的二次方关系增长。 15 L/min 流量时,压降大约为 1.42 MPa ,这要求水泵的工作压力必须克服该压降,否则该水冷散热器无法达到相应的冷却性能。由压降的数值可以说明受单根管路沿程阻力损失和局部阻力损失的限制,单根管路所允许的长度是有限的,因此,在实际工程应用中,可以考虑多个管路并联的情况。

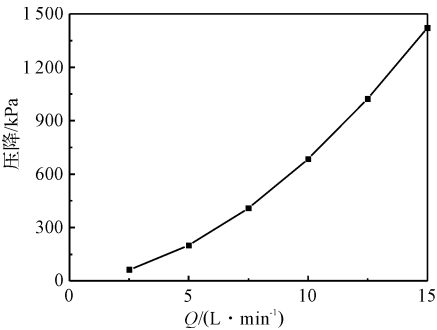


图 5 不同流量下的压降

不同流量(2.5 L/min 至 15 L/min)和管材(铜管和 304 不锈钢)对 IGBT 元件芯片最高温度的影响如图 6 所示。随着流量的增加,采用两种管材散热器上的芯片最高温度均在降低,流量超过 10 L/min 后,芯片最高温度的降低趋势变缓。由于 304 不锈钢的导热系数为 $16.7\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$,与铜的导热系数($386\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)相比,导热系数相当于铜的 $1/23$,由温度的差值较大可以说明导热系数对水冷散热器的热性能有较大影响,因此,在工程应用中,宜选用导热性能好的铜管。

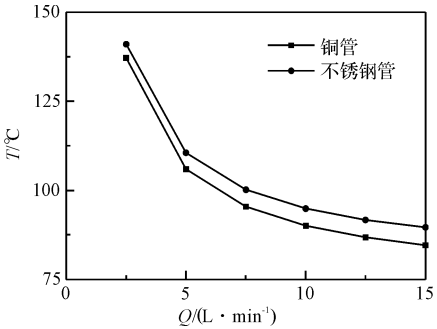


图 6 不同流量和管材对芯片最高温度的影响

入口流量 10 L/min, Al 底板厚度在 14 mm ~ 20 mm 变化时的芯片最高温度对应情况如图 7 所示。由图 7 可知,随着底板厚度的增加,芯片最高温度基本上成线性下降的趋势,由于温度下降的幅度只有 0.27°C ,说明了底板厚度的改变对散热器的热性能改善影响不大,因此,为了节省材料,可以在保证水冷散热器机械强度的前提下,尽量减小底板的厚度。

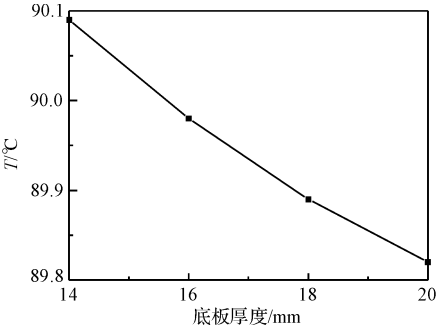


图 7 不同底板厚度对芯片最高温度的影响

4 改进设计

由于单根管路的长度对压力损失的影响很大,使得压降随流量的增加而迅速增大,而散热效果改善的程度在减小,且出口侧和入口侧的温度相差较大,水冷散热器的均温性不好,不利于 IGBT 元件的可靠运行。为克服单管路结构形式的缺点,对水冷散热器的设计进行了改进,改进方案的结构示意图如图 8 所示。图中的水冷散热器采用 2 根管路,管路 1 的入口、出口分别紧挨管路 2 的出口、入口,形成逆流的方式,以实现温度较为均匀的目的。

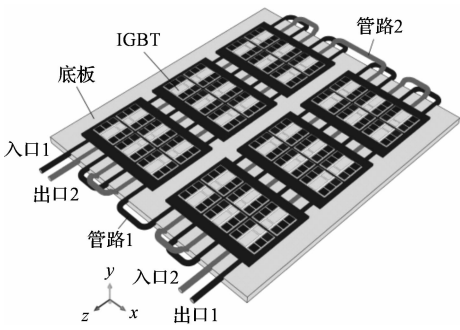


图 8 改进方案的结构示意图

2 根管路的入口流量均为 5 L/min 时,仿真得到的整体温度场分布如图 9 所示。可以看到 IGBT 元件的芯片温度最高,为 90.94°C ,温升为 40.94°C 。靠近管路 1 入口侧的芯片温度最低,靠近管路 1 出口侧的芯片温度最高,两者可以相差约 15.7°C 。由于管路 2 流经发热区域的路径比管路 1 少,冷却介质带走的热量较少,其出口的温度为 62.7°C ,而管路 1 的冷却介质出口温度为 66.01°C ,导致了靠近管路 1 入口侧温度低。芯片最高温度和安装面上的最高温度比改进之前分别高出 0.85°C 和 1.9°C ,但从温度的均匀性来看,芯片温度和安装面温度均比改进之前要好。

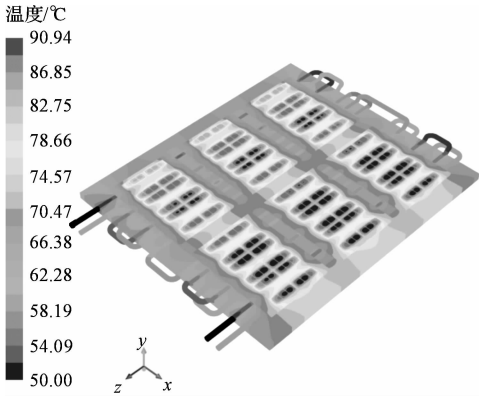


图 9 改进方案的整体温度场分布

冷却介质在管路 1 和管路 2 中的压降分别为

118.4 kPa 和 133.6 kPa, 相较单根管路在 10 L/min 时的压降(685 kPa)降低了约 80%。出现管路 2 的长度比管路 1 短, 压降反而增大的原因在于: 为避免管路 2 与管路 1 干涉, 对管路 2 进行了较为急剧地向上弯折, 导致局部的压力损失很大。从改进前、后的压降数值来看, 改进方案的压降有了明显地降低, 为进一步降低 IGBT 元件芯片温度, 可以适当增加管路 1 和管路 2 的入口流量, 产生的压降仍将小于改进前的方案, 因此, 可以说明适当的优化措施可使管式水冷散热器的性能更好, 有利于在其他场合的推广应用。

5 结束语

本研究通过建立管式水冷散热器的仿真模型, 综合分析了流量、管材和底板厚度对 IGBT 芯片最高温度的影响。研究表明:

(1) 冷却水只能在单根管路内流动时, 缺乏其他旁路的分流, 使得压降随流量的增加而迅速增大至 MPa 级, 过大的流量将不利于水冷系统的安全稳定运行;

(2) 随着底板厚度的增加, 芯片最高温度基本上成线性下降的趋势, 但温度下降的幅度很小, 可以在保证水冷散热器机械强度的前提下, 尽量减小底板的厚度;

(3) 管路的导热系数对水冷散热器的热性能有较大影响, 在工程应用中宜选用导热性能好的铜管;

(4) 由于管式水冷散热器的压降要大于平板式水冷散热器, 入口侧和出口侧的芯片最高温度相差较大, 均温性较差, 可以考虑多管路并联方式的结构设计。

参考文献 (References):

- [1] SALEM T E, BAYNE S B, PORSEHET D, et al. Thermal Performance of Water-cooled Heat Sinks [C]// 20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Texas: IEEE, 2005: 129-133.
- [2] MINSUB H, LEE Su-Dong, CHANOOK H, et al. Development of Water-cooled Heat Sink for High-power IGBT Inverter [C]//The 7th International Conference on Power Elec-

tronics. Daegu, Korea: ICPE, 2008: 295-299.

- [3] 丁 杰, 李江红, 陈燕平, 等. 流动状态与热源简化方式对 IGBT 水冷板仿真结果的影响 [J]. 机车电传动, 2011, 51 (5): 21-25.
- [4] 王 琴, 杨连发, 张 震. 水冷散热器温度场及热变形的模拟分析 [J]. 流体机械, 2011, 39 (1): 83-86.
- [5] 包明冬, 马 展, 崔洪江, 等. 电力电子器件 IGBT 用水冷板式散热器热力性能的数值模拟 [J]. 内燃机车, 2012, 46 (5): 1-4.
- [6] 余小玲, 张荣婷, 冯全科. 大功率模块用新型冷板的传热性能研究 [J]. 电力电子技术, 2009, 43 (12): 79-81.
- [7] HERSEY D W. Thin Liquid Flow through Core with Machined Flow Channels [C]//Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 20th Annual IEEE. San Jose, USA: SEMI-THERM, 2004: 213-220.
- [8] 支森川. 电力电子设备水冷散热器的数值模拟 [D]. 河北: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2006.
- [9] 丁 杰, 何多昌, 唐玉兔. 翅柱式水冷散热器的性能研究 [J]. 大功率变流技术, 2013, 36 (2): 32-36.
- [10] LEE Tien-Yu. Design optimization of an integrated liquid-cooled IGBT power module using CFD technique [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23 (1): 55-60.
- [11] 揭贵生, 孙 驰, 汪光森, 等. 大容量电力电子装置中板式水冷散热器的优化设计 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (2): 99-105.
- [12] 邱成梯, 赵悼受, 蒋全兴. 电子设备结构设计原理 [M]. 修订本. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [13] 李文顶. 中压矿用变频器主电路损耗分析及散热设计黄大贵 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2009.
- [14] 石书华, 李守法, 张海燕, 等. 三电平变频器水冷散热器温度场的计算与分析 [J]. 动力工程学报, 2010, 30 (1): 68-72.
- [15] 丁 杰, 唐玉兔, 忻 力, 等. 网格尺寸对 IGBT 水冷散热器仿真结果的影响 [J]. 大功率变流技术, 2012, 35 (6): 26-30.
- [16] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

唐玉兔, 丁 杰. 管式 IGBT 水冷散热器性能的数值模拟研究 [J]. 机电工程, 2014, 31 (7): 870-874.

TANG Yu-tu, DING Jie. Numerical simulation on performance of tubular water-cooled radiator for IGBT module [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31 (7): 870-874.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>