

研  
究  
开  
发CRH<sub>2</sub>型高速动车组CI用  
热管散热器的研制

李春阳, 肖 宁, 杨闽盛

(株洲时代散热技术有限公司, 湖南 株洲 412000)



作者简介: 李春阳 (1939-), 男, 高级工程师 (教授级), 我国首列电动车组主要设计者, 长期从事电力机车及电动车组开发设计工作。

**摘 要:** 叙述了CRH<sub>2</sub>型动车上CI用热管散热器的研制过程、产品性能特点和应用前景。对热管散热器DG7027与H1X3206进行了比较, DG7027散热性能已经达到和超过日本进口件, 完成各项型式试验后, 可实现批量生产。

**关键词:** CRH<sub>2</sub>型动车组; 热管散热器; 电力电子器件; 高速动车组; 国产部件

**中图分类号:** TK172.4; U264.3<sup>+</sup>7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)06-0030-04

Research on Heat Pipe Radiator of CRH<sub>2</sub> EMUs CI

LI Chun-yang, XIAO Ning, YANG Hong-sheng

(CSR Zhuzhou Times Thermal Technologies Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412000, China)

**Abstract:** Development process, product performance, features and application prospects of the heat pipe radiator for CRH<sub>2</sub> EMUs' CI were described. With comparison to H1X3206, domestic heat pipe radiator DG7027 has achieved and exceeded the requirement value of parts imported from Japan. After completion of type test for each item, it can realize batch production.

**Key words:** CRH<sub>2</sub> EMUs; heat pipe radiator; power electronics device; high-speed EMUs; domestic production parts

## 0 引言

高铁列车主变流器CI (Converter Inverter) 的功率大、损耗产生的热量大, 因此散热器的容量也需相应增大。通常散热方式主要有型材风冷、水冷和热管散热3种, 能实现热阻小到0.01 K/W以下的、满足大容量散热能力的只有后2种形式。水冷却散热的水泵循环系统较为复杂, 易出现泄漏问题, 并需要二次风冷系统; 而热管散热器具有结构简单、不需水循环系统、可靠性高、散热效率高、节约材料等特点。后2种形式各有特点, 根据不同场合和需要, 都被广泛应用。

## 1 热管散热器的结构特点及基本参数

通常晶闸管、二极管是平板结构, 最典型的热管散热形式为: 两边压装散热器铝质基板, 与基板中间平行方向压入数目不等的热管, 在热管上压接若干散热翅片, 从而形成合理的热管散热器, 其外观如图1所示。

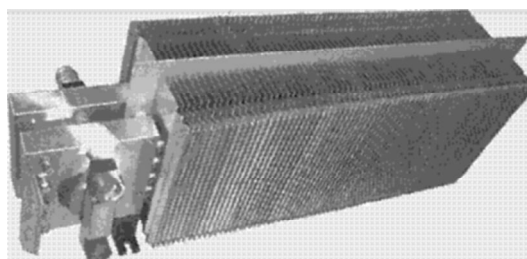


图1 晶闸管热管散热器

集成度极高的IGBT功率模块部件, 除了IGBT元件及其驱动组件, 还有反并联二极管、电容器、复合母排等, 为了减少分布电感, 这些元件必须十分紧凑地布置在同一块散热器铝质基板上。如果IGBT元件需要多个并列布置, 热管与基板面平行方向布置已经不可能, 只能垂直或者接近垂直布置 (图2), 为此, 热管与发热体之间的传热介质面积就存在明显不足的问题。

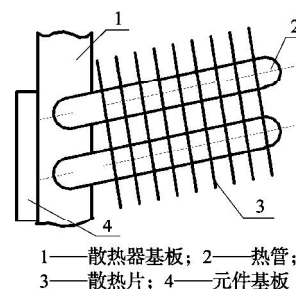


图2 IGBT热管散热器结构

收稿日期: 2012-05-03; 收修改稿日期: 2012-10-08

本文叙述的CRH<sub>2</sub>型动车CI用热管散热器,其IGBT/IPM 元件和散热器设计为一体,组成了独立的相模块形式,根据功能分成脉冲整流器相模块和逆变器相模块。1台动车CI由2台脉冲整流器相模块和3台逆变器相模块组成,之间采用无感母排连接,加上驱动单元、传感器、开关、连接器等放置在强迫通风的机柜中,构成了完整的CI柜,吊挂在车体底架上。

当元件工作时,功耗以热量形式传递到散热器底板,通过热管、散热片,然后强迫通风把热量散发到空气中,以维持某种正常热平衡状态,保证IGBT/IPM 元件在任何工作状态下都不超过允许的温升。如果散热器的热阻过大或者通风量不足,就破坏了这种正常的热平衡状态,则元件就会因温升过高而遭到破坏,从而造成CI故障。

表1是CRH<sub>2</sub>型动车CI用热管散热器相模块的基本技术要求。

表1 CRH<sub>2</sub>型动车CI用热管散热器的基本参数

| 项 目                                      | 脉冲整流器模块 (A)     | 逆变器模块 (B)       |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| 发热功耗 /W                                  | 12 600          | 7 780           |
| 温升 /K                                    | 55              | 44              |
| 冷却风量 /m <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> | 45              | 30              |
| 元件与基板接触面积                                | 384 mm × 849 mm | 384 mm × 438 mm |
| 散热片分布高度 /mm                              | 260             | 260             |
| 计算热阻 /K · W <sup>-1</sup>                | 0.004 365       | 0.005 656       |
| 散热热流密度 /W · cm <sup>-1</sup>             | 4               | 4.63            |

第一代整体铝质蒸发腔体狭缝式热管散热器,制冷剂选择用替代氟利昂FX3250[第一代产品,见图3 (a)];第二代产品为铝基板铜热管散热器,冷媒为纯水(见图3 (b)),前者热管模块是一个整体真空腔系统,工艺十分复杂,要求特高。第二代产品铝基板铜热管散热器,具有结构简单、性能稳定、工作可靠、更加环保的特点。随着中国高速铁路事业的不断推进和发展规模的扩大,研制第二代产品铝基板铜热管散热器显得越来越重要和日益迫切。

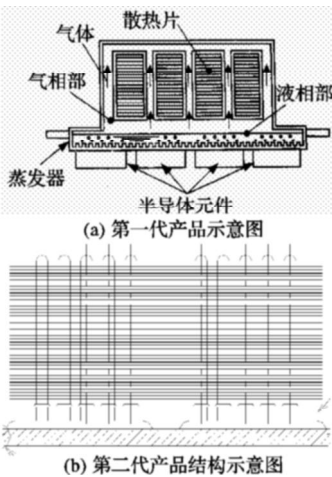


图3 CRH<sub>2</sub>型动车组变流器IGBT热管散热器模块外观图

2 技术改进

散热器传热路径如图4所示。分析可知可进行如下改进:① $R_1$ 是涉及IGBT与散热器的接触热阻,在这里与本散热器无直接关联,不存在改进空间。② $R_2$ 为基板本身的导热热阻,这基本由材料的特性来决定,采用铝材时,该处热阻约0.001 4 K/W;采用铜材时,热阻

约0.000 73 K/W;而如果采用株洲时代散热技术有限公司新开发的新工艺,不论铝、铜材料,该处的热阻可以降低到0.000 5 K/W左右,存在较大的改进空间。③ $R_3$ 为基板和热管的接触热阻,通过焊接等方法,可以得到改进,已经做过铜铝焊接的工艺准备,不存在问题。④ $R_4$ 为热管本身的热阻,之前为采用排气法工艺生产的热管,获得改进的希望很大。⑤ $R_5$ 为热管冷凝端和散热片的接触热阻,此处与散热片、铜管配合尺寸有关,与同心度及其过盈量有关(0.03 mm),可以采用低温焊接工艺进行改进。⑥ $R_6$ 为散热片和空气的换热热阻,是整个散热器最大的一个热阻,通过改进散热片的结构,优化设计片距、热管排列,以及对散热片改用更好的材料,散热器的散热性能可以获得较大的提升空间。

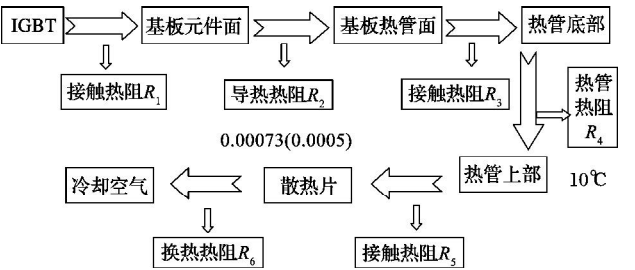


图4 散热器传热路径示意图

3 试制方案和试制结果

3.1 方案1

采用重力式热管。铜管材质,内部介质为纯水,采用由多根直径16 mm管铜与直径30 mm大铜管垂直焊接成热管组件,再把组件焊接到铝基板上的经济合理的紧凑结构(见图5)。

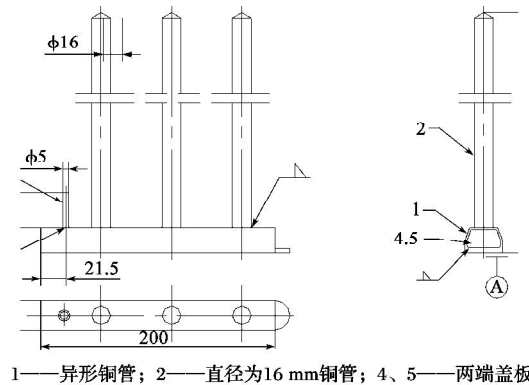


图5 方案1的铜质热管组件的结构图

3.2 方案2

同样采用重力式热管。铜管材质,内部介质为纯水,其热管特点是以单管的形式出现。把直径16 mm的单管的底部与扩大的截面直径(阶梯状变截面)的铜管焊接形成热管;然后再分别压入铝基板中,而且是穿通基板,最后在与元件安装的接触面进行精密细致的加工(见图6)。

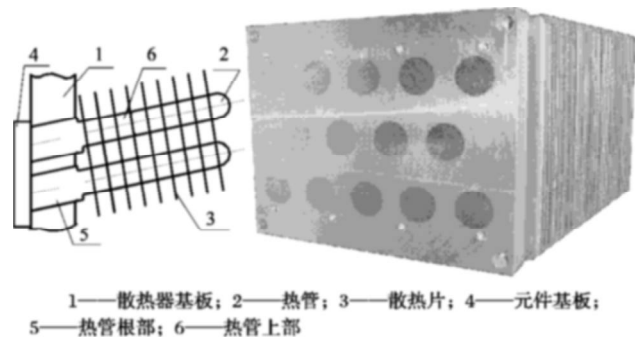


图 6 方案 2 热管散热器的结构示意图  
(图右为中间小试样的外观图)

3.3 散热器的热性能试验

按照《热管散热器 H1X3206 技术条件》和国家标准 GB/T 8446.2—2004《电力半导体器件用散热器 热阻和流阻测试方法》进行测试。

①对方案 2 第一个样品测试，发热功耗 8 080 W，通风量 30 m<sup>3</sup>/min，最高温升为 68 K，高出目标值 24 K。分析原因是热管的蒸发强度与冷凝强度不匹配，散热片退火变软与铜管接触热阻增大有直接的关系。

②对方案 1 的第一个样品测试，温升为 60 K（比前者降低了 8 K），热阻为 0.008 46K/W。分析发现主要原因是个别热管组件（梯形大铜管与多根直径 16 mm 管焊接）的质量存在问题，即局部散热效果差，使得基板的

局部温升偏高，造成同一基板温升差值达到 14 K；另外基板局部变形，造成与发热块接触不良，传热不均。由于方案 1 的结构复杂和工艺的难度大，暂时放弃。

③在方案 2 基础上，铜散热片改用铝散热片，同时进行许多次的摸索，包括 3 次中间阶段的小样试验，重要的是设计理念有所突破，终于完成了方案 2 的首件合格样品的试制，其测试结果表明，在规定的发热功耗、通风量下，温升为 40 K、热阻 0.005 141 K/W，达到和超过了温升 44 K 和 0.005 656 K/W 的目标值要求，而且同批的 2 个样品特性一致，说明工艺十分稳定。

3.4 其他型式试验项目

①振动和冲击试验：武汉统标服务公司检测中心 (SGS) 按照 TB 3058—2002 (IEC 61373)《I 类 B 级振动和冲击试验》，对 DG7027-000-00 样品实施了振动和冲击试验。测试结果：试验后无变形、无裂纹、无泄漏。

②高低温热负荷循环：SGS 按照 JB/8757—1998《电力半导体器件用散热器》，对 DG7027-000-00 样品实施了高低温热负荷循环试验。测试结果：试验后无变形、无裂纹、无泄漏。

完成上述 2 项试验后回公司复测，热性能试验保持原来的数值：温升 39 K，R 为 0.0 051 K/W，合格。

国产样品测试结果与进口产品的主要性能比较见表 2。

表 2 国产样品和进口部件比较表

| 项 目 名 称                                 | DG7027                                          | H1X3206                                                                     | 备 注                                     |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 制 造 者                                   | 株洲时代散热技术有限公司                                    | 日 本                                                                         |                                         |
| 通 风 量 /m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> | 30                                              | 30                                                                          |                                         |
| 加 热 功 耗 /W                              | 7 780                                           | 7 780                                                                       |                                         |
| 温 升 ΔT/K                                | 40                                              | 44                                                                          |                                         |
| 热 阻 /K · W <sup>-1</sup>                | 0.005 141                                       | 0.005 656                                                                   |                                         |
| 散 热 原 理                                 | 常规重力式热管                                         | 常规重力式热管                                                                     | 仅是在结构、工艺上存在差别                           |
| 热 管 材 料                                 | 铜管、纯水                                           | 铜管、纯水                                                                       | 符合环保要求                                  |
| 外 形 安 装 尺 寸                             | 相同                                              | 相同                                                                          | 通用互换                                    |
| 具 体 结 构 特 点                             | 单根直径 16 mm 热管 56 根；分别压入铝基板，底面为接触元件安装面；铝散热片 42 片 | 直径 16 mm 管 54 根分成 14 组；每组 3、5 根与直径 30 mm 的大铜管垂直焊接为组件；14 组大管再与铝基板焊接；散热片 40 片 |                                         |
| 图 片                                     |                                                 |                                                                             |                                         |
| 质量 /kg                                  | 39                                              | 37.6                                                                        |                                         |
| 分 析 比 较                                 | 单管结构简单；工艺稳定可靠；热管嵌入基板；价格大幅降低                     | 多管组件焊缝长，一处泄漏就失效 7% 面积；生产必须有真空设备；大铜管焊接到基板的工艺有一定要求                            | 国产件采用自己专利技术生产、工艺简单、质量稳定（单根热管）、性价比好、公司配套 |

4 关键工艺处理

①热管与铝基板压紧配合，在元件安装接触面进

行精细的铣平，保证元件接触面的平整性，减小接触热阻 R<sub>3</sub>。

②提高热管的热交换性能，即在纯水中加入强化

剂;进行蒸发和冷凝强度的匹配、合理的设计,减小热管自身的热阻 $R_4$ ——最重要的技术关键。

③减小热管和散热片之间的接触热阻 $R_5$ ,采用低温焊接。

## 5 热管散热器的应用情况

热管赋予换热装置以超导热性(类似于超导电性)。

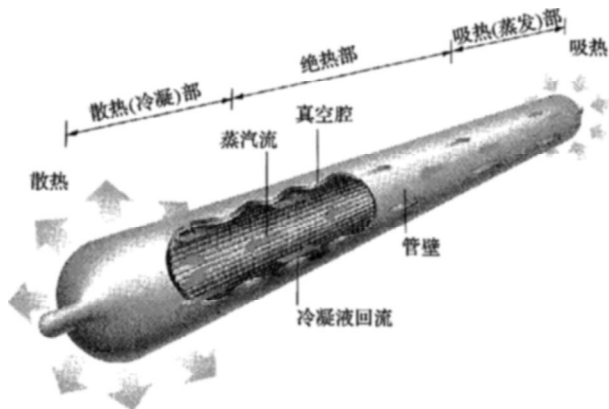


图7 热管剖面示意图

图7是典型热管剖面示意图,它由密封的外壳、管芯和介质液组成,热管内抽真空并填以少量的介质液体,介质的量刚好能使芯层饱和浸润,水是用在电子冷却器热管中的典型介质,而成为热管的组成部分,处于内部气压下液汽两相平衡状态。

当热量进入蒸发部,打破均态产生蒸汽,汽压迅速上升,高压蒸汽流向冷凝端部,在此处迅速降低温度则使蒸汽冷凝并释放出蒸汽中的潜热,然后冷凝成的液体在细芯层吸力的作用下泵回蒸汽部。

这种连续的液汽相变循环作用传导了大量的热能,并是以十分低的温差实现的,而且热管的作用并不需要外助力,即是无源的,仅仅是通过传导热中的余量来驱动的,这种无源作用保证了其高可靠性和长寿命。

热管散热器已广泛应用于SS<sub>4</sub>C交直相控电力机车大修车上,以4柜/车计算,共计装车100台主整流柜、

1000对热管散热器(第1台SS<sub>4</sub>C0283号机车于2004年装车,至今已经运行7年时间共55万km里程),现场运行状态非常良好,并且于2010年在郑州铁路局进行了局级成果鉴定。后又在SS<sub>6</sub>B大修机车、DF<sub>4</sub>和DF<sub>8B</sub>内燃机车上成功装车,单件最小的热阻为0.016 K/W。

总之,装车的各类热管散热器总计达700柜,累计运行里程约450万km,无一次热管引起的故障,无故障时间MTBF=25954h,表现出很高的可靠性。而今CRH<sub>2</sub>型动车CI上采用的热管材料、工艺和前面应用的是完全一致的,即单管铜质-纯水重力式热管、铝基板、铝散热片相同,唯一不同的就是功耗大些、热阻小些,对生产工艺要求更高些。热管底部扩大截面的工艺采用了高频铜焊,更加保证了焊缝的强度和可靠性。

## 6 结论和展望

DG7027样品在散热性能上,完全满足并且超过了进口部件(H1X3206)目标值要求,达到热阻为0.0051 K/W,小于热阻目标值0.005656 K/W,并且有一定的裕量,同时还通过了振动试验和高低温热负荷循环等项目型式试验,为今后工艺上加以完善后实现批量生产奠定了坚实的基础。

### 参考文献:

- [1] 张曙光. CRH<sub>2</sub>型动车组[M]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- [2] 杨阔盛. 300 km 动车热管散热器资料[R]. 株洲:株洲时代散热技术有限公司,2011.
- [3] 朱继贤,李春阳. 一种变流器热管散热器:中国,ZL.2009 2 0065887.7 [P]. 2010-06.
- [4] 李春阳. 新型变流器热管结构及其应用[C]//吕树申. 第十二届全国热管会议论文集. 深圳:中国工程热物理学会热管专业组,2010:324-326.
- [5] 李春阳,徐景秋. 热管散热器在新型变流装置中的开发应用[J]. 机车电传动,2005(2):14-16.
- [6] TB/T 2437—2006, 机车车辆用电力变流器特性和试验方法[S].
- [7] Nelson J Gemart. Heat pipe reliability documentation [J]. 变流技术与电力牵引,2004(6).
- [8] Garner S D. 热管——一种高效换热的实用方法[J]. 变流技术与电力牵引,2004(6).

(上接第29页)冷却空压机后,冬季热空气排到车内,并由车体排气口排出车外;夏季热空气直接通过风道排出车外。每台空压机冷却空气的流量为0.55 m<sup>3</sup>/s。空压机压缩空气用的流量为2.4 m<sup>3</sup>/min,而且空压机不连续工作,所以压缩空气的流量可以忽略。

## 4 结语

HXB<sub>3</sub>C机车已通过型式试验和运用考核,现已出车600余台,担任着我国铁路列车牵引的重要任务,在

长期的运用过程中通风冷却系统没有出现过大故障,经受住了时间的考验。

### 参考文献:

- [1] 张亚军. HXB<sub>3</sub>B型交流传动电力机车通风冷却系统[J]. 电力机车与城轨车辆,2010(2).
- [2] 张有松,朱龙驹. 韶山4型电力机车[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.