

文章编号:1671-251X(2016)10-0048-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.10.011
王侃. 基于热管技术的矿井透地通信主机散热结构设计[J]. 工矿自动化, 2016, 42(10): 48-51.

基于热管技术的矿井透地通信主机散热结构设计

王侃^{1,2}

(1. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;
2. 瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室, 重庆 400037)

摘要:为解决透地通信系统主机散热问题,基于热管技术设计了矿井透地通信主机散热结构,采用数值计算方法研究了热管散热结构传递热阻,结果表明,该散热结构能满足主机散热性能要求;采用数值仿真得到了热管散热结构的温度场云图,结果与数值计算十分吻合。样机温度监测试验验证了设计的正确性。

关键词: 矿井透地通信; 通信主机; 隔爆; 散热; 热管技术; 热阻

中图分类号:TD684 文献标志码:A 网络出版时间:
网络出版地址:

Design of heat dissipation structure of host computer of mine through-the-earth
communication based on heat pipe technology

WANG Kan^{1,2}

(1. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. State Key Laboratory of
the Gas Disaster Detecting, Preventing and Emergency Controlling, Chongqing 400037, China)

Abstract: In order to solve problem of heat dissipation of host computer of mine through-the-earth communication system, a heat dissipation structure of host computer of mine through-the-earth communication based on heat technology was designed. Transfer thermal resistance of dissipation structure of heat pipe is researched by numerical calculation method, and the calculation result is verified that the heat dissipation structure meets requirement of heat dissipation performance of the host computer. Finally temperature field cloud of the dissipation structure of heat pipe is obtained by numerical simulation method, and the simulation result coincides with the numerical result. Correctness of the design is verified by temperature monitoring test of a prototype.

Key words: mine through-the-earth communication; communication host computer; flameproof; heat dissipation; heat pipe technology; thermal resistance

0 引言

目前,煤矿开采已由地表浅部开采逐渐转向深部开采阶段,许多矿井开采深度甚至达上千米。一旦这些矿井井下发生安全事故,井下与地面之间的有线通信系统瘫痪,矿工就无法与地面联系,地面救援人员也无法及时定位受困矿工具体位置,给营救工作带来巨大障碍。矿井透地通信系统以分层大地

为传播介质,采用超低频无线电磁波穿透大地,实现井下与地面之间的无线通信^[1]。系统通常由地面及井下部分组成,地面部分包括地面天线及地面收发主机;井下部分包括井下天线及井下收发主机。井下收发主机为实现通信传播距离长的问题,通常设计为较大功率,大功率透地通信系统主机在防爆方式上无法做成本质安全型,因此,往往做成隔爆型结构,通过将大功率器件放在一个密闭的壳体内,很好

收稿日期:2016-04-12;修回日期:2016-06-13;责任编辑:张强。

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-003)。

作者简介:王侃(1983—),男,四川巴中人,助理研究员,现主要从事煤矿安全仪器仪表结构研发工作,E-mail:wangkan83@126.com。

地解决了整体防爆问题,不过也带来了另一个关键问题,即整机的散热问题。散热问题是井下透地通信系统主机能否正常工作的关键,一旦密闭壳体内部温度过高(超过功率器件自身允许范围),整机将无法工作。为解决透地通信系统主机散热问题,笔者设计了基于热管技术的矿井透地通信主机散热结构,采用数值计算方法研究了热管散热结构传递热阻,结果表明,该散热结构能满足主机散热性能要求。

1 透地通信主机散热方案

传统的散热方式主要有水冷、风冷、油冷等^[2],这几种散热方式应用的场合各有不同。矿井井下环境具有瓦斯浓度高、相对湿度大的特点,传统散热方式都不适合用在矿井隔爆型透地通信主机中。随着散热技术的不断发展,热管已成为高效传热的散热元件,它通过工作介质吸收和释放汽化潜热来传递热量^[3],通常只有很小的热阻,很大的热量可以在小温差下得到传递,通过这种独特的传热方式实现异乎寻常的传热效果。应利用热管高效传热的理论,将热管散热技术应用到矿井透地通信主机结构上,不仅散热效果远远好于实体散热器,复杂性大大低于传统散热技术,而且可靠性也大大高于传统散热技术。结合目前矿用隔爆交流变频器结构特点^[4],在隔爆型透地通信主机中采用了热管自然冷却散热方案。其外观示意图如图1所示。

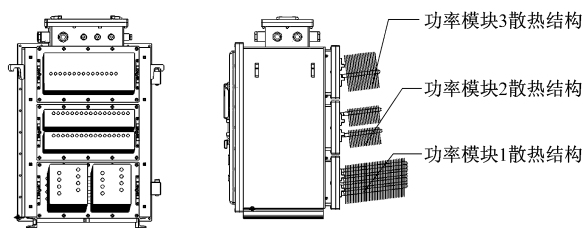


图1 隔爆型透地通信主机外观结构

主机在井下避难硐室使用,设其环境温度为25℃。选用热管工质为水和紫铜,铜导热系数 $\lambda_p = 380 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。热管参数:外径 $d_0 = 16 \text{ mm}$,蒸发段管壁内径 $d_i = 15.22 \text{ mm}$,蒸发段芯子内径 $d_v = 13.28 \text{ mm}$,总长 $L = 500 \text{ mm}$,蒸发段长 $L_e = 150 \text{ mm}$,绝热段长 $L_a = 60 \text{ mm}$,冷凝段长 $L_c = 290 \text{ mm}$ 。热源芯片直接安装在基板上,结合界面上涂覆导热绝缘硅脂,热管蒸发段直接嵌入基板内部并与热源芯片靠近。基板采用紫铜材料,同时加工形成法兰隔爆面与主机箱体连接。功率模块1功耗 $Q_1 = 500 \text{ W}$,共16根热管,使用矩形散热筋片,共76片,尺寸

为长度 $L_1 = 190 \text{ mm}$,宽度 $h_1 = 180 \text{ mm}$,厚度 $\delta_1 = 0.8 \text{ mm}$,间距 $S_1 = 8 \text{ mm}$ 。其散热结构如图2所示。功率模块2功耗 $Q_2 = 400 \text{ W}$,共34根热管,使用矩形散热筋片,共40片,尺寸为长度 $L_2 = 430 \text{ mm}$,宽度 $h_2 = 85 \text{ mm}$,厚度 $\delta_2 = 0.8 \text{ mm}$,间距 $S_2 = 8 \text{ mm}$ 。其散热结构如图3所示。功率模块3功耗 $Q_3 = 300 \text{ W}$,共15根热管,使用矩形散热筋片,共34片,尺寸为长度 $L_3 = 380 \text{ mm}$,宽度 $h_3 = 120 \text{ mm}$,厚度 $\delta_3 = 0.8 \text{ mm}$,间距 $S_3 = 8 \text{ mm}$ 。其散热结构如图4所示。

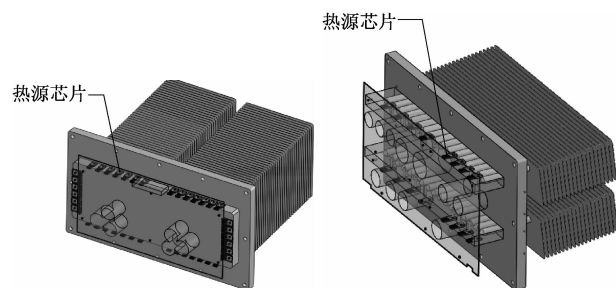


图2 功率模块1散热结构

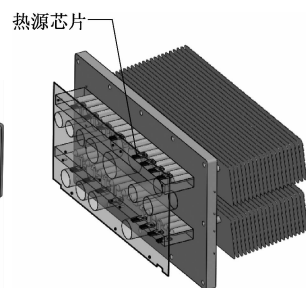


图3 功率模块2散热结构

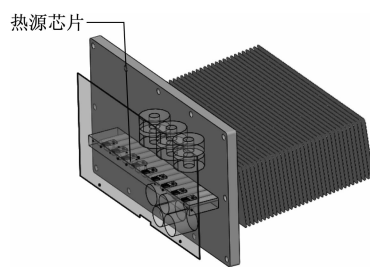
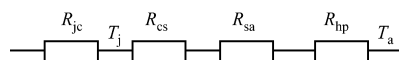


图4 功率模块3散热结构

2 热管散热结构热阻数值计算

由于篇幅限制,下面选取功率模块1进行数值计算。整个功率模块的热阻等效电路如图5所示。



R_{jc} —功率器件结点到管壳热阻; T_j —芯片结温; R_{cs} —管壳到基板热阻;

R_{sa} —基板到热管热阻; R_{bp} —热管到环境空间热阻; T_a —环境温度

图5 功率模块的热阻等效电路

总热阻为

$$R = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} + R_{bp} \quad (1)$$

基板到热管蒸发段热阻为

$$R_{sa} = \frac{1}{\pi d_0 L_e \lambda_p} \quad (2)$$

代入前面参数,可得 $R_{sa} = 0.068 \text{ K/W}$ 。

$$R_{bp} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (3)$$

式中: R_1 为蒸发段管壁热阻; R_2 为蒸发段芯子热阻; R_3 为热管绝热段热阻; R_4 为冷凝段芯子热阻; R_5 为冷凝段管壁热阻; R_6 为冷凝段与环境之间热阻。

$$R_1 = \frac{\ln(d_0/d_i)}{2\pi L_e \lambda_p} \tag{4}$$

代入前面参数可得 $R_1=0.372\ 9\times10^{-3}\ \text{K/W}$ 。

$$R_2 = \frac{\ln(d_i/d_v)}{2\pi L_e \lambda_e} \tag{5}$$

代入前面参数可得 $R_2=0.045\ 5\ \text{K/W}$ 。

$$R_3 = \frac{R_g T_v^2 \Delta P_{ve}}{\varphi r_s P_v} = \frac{T_v \Delta P_{ve}}{\varphi r_s P_v} \tag{6}$$

式中: R_g 为气体常数; T_v 为蒸发段芯子温度; ΔP_{ve} 为蒸发段和冷凝段的蒸气压力差; φr_s 为压力差常数; P_v 为冷凝段压强。

由于在绝热段蒸气压力损失小,通常忽略 R_3 。

$$R_4 = \frac{\ln\left(\frac{d_i}{d_v}\right)}{2\pi L_e \lambda_e} \tag{7}$$

代入前面参数可得 $R_4=0.023\ 5\ \text{K/W}$ 。

$$R_5 = \frac{\ln(d_0/d_i)}{2\pi L_e \lambda_p} \tag{8}$$

代入前面参数可得 $R_5=0.192\ 9\times10^{-3}\ \text{K/W}$ 。

$$R_6 = \frac{1}{\alpha A_t} \tag{9}$$

式中: α 为热管外壁与周围环境之间的表面传热系数; A_t 为冷凝段的总面积,因冷凝段有筋片,故 $A_t=A_p+\eta A_f$ (A_p 为基管表面积, A_f 为筋片表面积, η 为筋片效率)。

对于空气横掠筋片管的情况,布里格斯 (Briggs) 和杨格 (Young) 关系式为

$$N_u = 0.134 R_e^{0.681} P_r^{1/3} \left(\frac{S_f - \delta_f}{l}\right)^{0.2} \left(\frac{S_f - \delta_f}{\delta_f}\right)^{0.1134} \tag{10}$$

式中: R_e 为雷诺数; P_r 为普朗特数; S_f 为筋片间距, $S_f=0.008\ \text{m}$; δ_f 为筋片厚度, $\delta_f=0.000\ 8\ \text{m}$; l 为筋片高度, $l=0.19\ \text{m}$ 。

空气在 $25\ ^\circ\text{C}$ 时的物理特性参数^[5]见表 1。

表 1 空气在 $25\ ^\circ\text{C}$ 时的物理特性参数

项目	导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K}^{-1})$)	比热容/($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K}^{-1})$)	黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	普朗特数	速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
符号	λ_a	C_{pa}	μ_a	ρ_a	P_r	ν_a
数值	0.026 7	1 005	1.86×10^{-5}	1.165	0.701	2

$$R_e = \frac{\rho_a \nu_a d_0}{\mu_a} = 2\ 004.3 \tag{11}$$

将表 1 中参数及式(11)代入式(10),可得努赛尔系数 $N_u = 14.068$ 。

表面传热系数为

$$\alpha = \frac{N_u \lambda_a}{d_0} = 23.476\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}) \tag{12}$$

则筋片效率为 0.96 时, A_t 16 根热管、76 片筋片为

$$A_t|_{m^2} = 3.14\times0.016\times0.29\times16 + 0.96\times0.19\times0.18\times2\times76 = 5.224 \tag{13}$$

将式(13)及式(12)代入式(9),可得 $R_6 = 0.008\ 2\ \text{K/W}$ 。

将式(4)一式(9)代入式(3),得热管到环境空间热阻为

$$R_{hp}|_{\text{K/W}} = \frac{R_1 + R_2 + R_4 + R_5}{16} + R_6 = 0.012\ 5 \tag{14}$$

基板到热管热阻为 $R_{sa}=0.068\ 2\ \text{K/W}$,则热管基板的温度为(把底板作为恒温元件)

$$T_d|_{^\circ\text{C}} = T_a + (R_{sa} + R_{hp})Q_1 = 25 + 0.080\ 7\times500 = 65.35 \tag{15}$$

功率模块 1、功率模块 2、功率模块 3 均选用

SBL3030PT 芯片, $R_{jc}=0.08\ \text{K/W}$, $R_{cs}=0.009\ \text{K/W}$,代入式(1),则总热阻 $R = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} + R_{hp} = 0.169\ 7\ \text{K/W}$ 。

故可得到芯片结温温度为

$$T_j|_{^\circ\text{C}} = (25 + 0.169\ 7\times500) = 109.85$$

该芯片允许的最大结温为 $150\ ^\circ\text{C}$,基本上能满足工作要求。同样按照上述方法可以计算得到功率模块 2、功率模块 3 也满足散热性能要求。

3 热管散热结构热仿真分析

前文对功率模块 1 热管散热结构等效热阻进行了数值计算,得到了功率模块 1 热管底板温度及芯片结温。现再对功率模块 1 热管散热结构进行热仿真分析,并与数值计算结果进行对比。采用六面体单元网格离散化热管散热结构三维模型,对热管与散热片、热管与底板之间定义为绑定接触。在底板正面施加 $500\ \text{W}$ 热流量,定义空气环境温度为 $25\ ^\circ\text{C}$,对流传热系数为 $15\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,对散热片及热管冷却段施加自然对流边界条件^[6-7]。运算得到功率模块 1 热管散热结构温度场分布云,如图 6 所示,热流密度分布云如图 7 所示。

从图 6 可知,功率模块 1 热管散热结构最大温

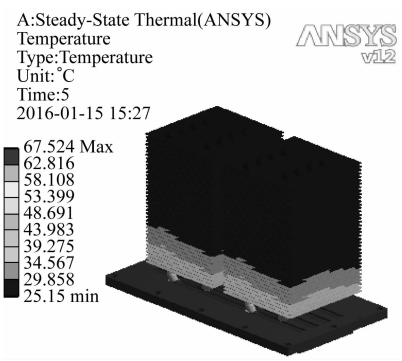


图6 功率模块1热管散热结构温度场分布云

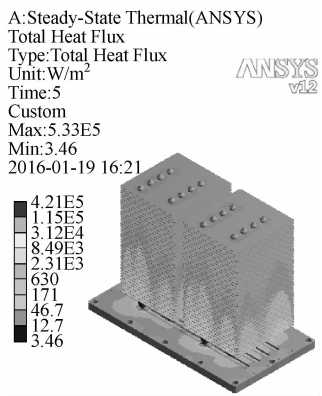


图7 功率模块1热管散热结构热流密度分布云

度在底板背面安装热源芯片区域,最高温度达到67.52℃。靠近热管蒸发段区域散热片温度较高,热管冷却段区域散热片温度分布均匀,几乎与环境温度接近,表明热管起到了很好的散热效果。前面数值计算结果为65.35℃,与数值仿真结果十分接近。从图7可知,热流密度最大的区域主要集中在热管蒸发段及与其接触的部位,热管冷却段附近散热片热流密度明显降低,表明热管在高热流密度散热中起到了极大的作用。

4 样机散热性能验证

结合前面设计,加工制造出隔爆型透地通信主机样机。按照实际工况将透地通信主机连续运行8 h以上,直到隔爆腔温度稳定,在功率模块1热管散热器基板上加装热电偶测试其温度变化,同时监测功率模块1上芯片热源的温度,前1 h每隔10 min测量1次温度,1~3 h每间隔30 min测量1次温度,3 h后,每隔1 h测量1次温度,测量数据见表2。从表2可看出,基板与芯片热源温度变化曲线趋势较为吻合,在透地通信主机正常运行1 h后温度基本稳定,其中基板温度在67℃左右波动,芯片热源温度在105℃左右波动。样机试验结果与数字计算及仿真结果较为吻合。

表2 测量数据

测量时 间/min	温度/℃		测量时 间/min	温度/℃	
	基板温度	芯片热源℃		基板温度	芯片热源℃
10	29.8	50.8	180	67.5	104.5
20	36.8	57.8	240	67.7	106.8
30	44.7	68.9	300	67.2	105.7
40	50.9	72.5	360	66.7	104.2
50	60.8	88.5	420	66.8	104.8
60	66.7	92.4	480	67.1	105.9
90	66.9	101.5	540	67.4	104.9
120	67.8	104.8	600	67.5	105.3
150	68.2	105.6	660	66.9	105.9

5 结语

当煤矿发生突发事件,其他通信设备均被损坏时,矿井透地通信系统将发挥重大的作用。目前,煤矿开采大多采用深部开采,透地通信穿透距离增大,故透地通信系统均采用了较大功率,隔爆型矿井透地通信系统散热问题是亟需解决的问题。本文设计的基本热管技术的矿井透地通信主机散热结构较好地解决了这一问题,并对整个结构热阻进行了详细数值计算,得出了该散热器允许的功率模块最大结温,并对热管散热结构进行了热仿真分析。温度场云图与数值计算结果十分吻合,样机温度监测试验也验证了设计的正确性,为类似散热结构设计提供了一定的参考。

参考文献:

[1] 钱彬. 井下环境中透地通信技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.

[2] 胡建辉,李锦庚,部继斌,等. 变频器中的IGBT模块损耗计算及散热系统设计[J]. 电工技术学报,2009,24(3):159-163.

[3] 庄骏,张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

[4] 全振兴. 矿用隔爆交流变频器的结构分析及设计[D]. 西安:西安理工大学,2007.

[5] 徐志鸥. 防爆环境下大功率三电平变换器功率损耗与散热方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.

[6] 华云峰,李争显,杜明焕,等. 大功率LED热管散热器的热设计研究[J]. 光学与光电技术,2011,9(2):73-76.

[7] 刘红,童思成,蒋兰芳. 热管散热器数值仿真模型[J]. 半导体光电,2012,33(2):194-196.