

重频脉冲电流下晶闸管结温研究

脉冲功率技术的一个重要发展方向就是重频脉冲电源。晶闸管作为主要开关器件，其在重频下运行的特性是重频脉冲电流源发展的一个重要前提，晶闸管在重频运行一个关键问题就是热积累问题。基于晶闸管热传导和对流过程，建立了暂态热传导模型，仿真分析了晶闸管在重频脉冲电流下的结温变化。根据仿真结果，合理设置晶闸管工作的重复频率，保证晶闸管的结温不超过临界温度，并通过实验验证了晶闸管在该重复频率下可以可靠工作。

吴利红 宋耀东 王 冰 陈启明/中国电子科技集团公司第二十七研究所



吴利红/工程师

随着半导体技术的发展，各类半导体开关被广泛应用于脉冲功率系统，包括晶闸管、门极可关断晶闸管GTO、集成门极换流晶闸管IGCT、绝缘门极双极型晶体管IGBT和光控晶闸管LCT等^[1-4]。但晶闸管是目前大功率半导体器件中应用最为普遍的。晶闸管有着耐压高、通流大、寿命长、配套装置简单且价格低廉等众多优点。而且经过多年的发展，晶闸管的生产技术和工艺水平都得到了极大的提高。目前，国内外晶闸管的最大尺寸可达150 mm（6英寸），功率容量提高了数千倍，单片晶闸管的额定电压可达12 kV，额定电流可达6.8 kA，电流上升率可达22 kA/ μ s^[5]。

关键词/Keywords

晶闸管·
热传导模型·
结温·
重复频率·

晶闸管应用于脉冲领域，由于流过晶闸管的电流峰值很高，所以会在晶闸管上产生大量的功率损耗。这些耗散功率会转化为热量，使晶闸管阀片的温度上升。晶闸管的结温过高会改变器件的特性，影响器件的正常工作。晶闸管的泄漏电流随着温度的上升呈指数形式增大，结温超过150℃时会导致漏电流过大，器件失去阻断能力，产生不受门极

控制的误导通^[6-7]。在重频应用情况下，虽然单次的热量积累不足以使结温超过临界温度，但重频下晶闸管散热时间短，热量会不断积累使得结温有可能超过临界温度导致器件误导通，影响重频使用。因此需要校验重频脉冲电流下晶闸管的结温升，确定晶闸管能正常工作的安全重复频率。

晶闸管几何模型

本文以株洲南车电气时代股份有限公司生产型号为KPc3400-52的4英寸晶闸管为分析对象，图1为晶闸管结构剖面图。

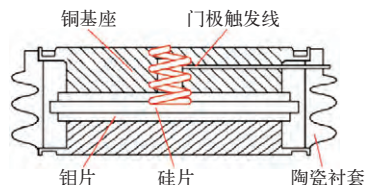


图1 晶闸管结构剖面图

晶闸管采用双面冷却结构，分为五层：中间层为半导体层，在计算传热的时候，忽略半导体层的掺杂，只考虑硅的传热特性；硅片两侧为铜片，铜片两侧为铜基座；外壳采用陶瓷封装，陶瓷与半导体层之间充有惰性气体。在计算中，忽略晶闸管的不规则形状，将其简化为五层圆柱体结构，同时由于陶瓷的导热性能很差，而且半导体层与管壳之间的惰性气体完全封闭在内部，不易流动，所以半导体层，铜片和铜基座的侧面很难与外界发生热交换，所以忽略半导体层、铜片和铜基座侧面的传热过程，认为侧面是热绝缘。这样晶闸管模

型可以简化为如图2所示。

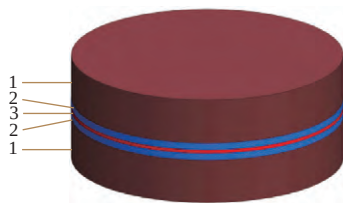


图2 简化晶闸管几何模型

1—铜基座 2—铜片 3—硅片

在Comsol仿真软件中，采用二维轴对称的方式建立的晶闸管模型如图3所示。

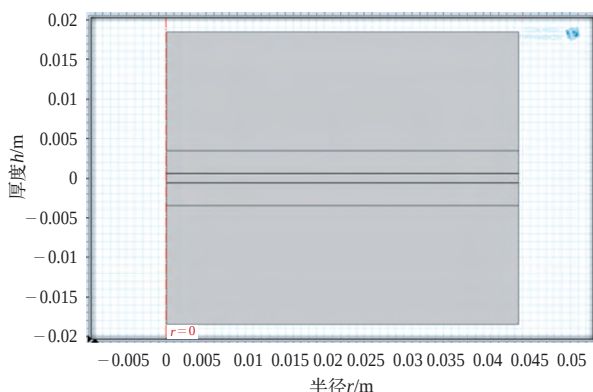


图3 晶闸管仿真模型

晶闸管传热模型建立

传热是指热能从高温向低温部分转移的过程，传热有三种方式：热传导、热对流和热辐射^[8-9]。

热传导指物质在无相对位移的情况下，物体内部具有不同温度、或者不同温度的物体直接接触时所发生的热能传递现象。固体中的热传导是源于晶格振动形式的原子活动。非导体中，能量传输只依靠晶格波（声子）进行；在导体中，除了晶格波还有自由电子的平移运动。热传导一般通过傅里叶定理来描述^[10]

$$\text{div}(\lambda \nabla T) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中， T 为温度场； λ 为介质热导率； ρ 为介质密度； c 为介质比热容； q 为热源； t 为时间。

在晶闸管传热模型中，硅片、铜片和铜基座各自的内部，以及硅片与铜片之间，铜片与铜基座之间均为热传导过程。由于铜片和铜基座的电阻率均很小，所以消耗在铜片和铜基座上的功率

均可忽略，热量 q 只考虑硅片上的功率损耗。

热对流是指由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移，冷热流体相互掺混所引起的热量传递过程。对流传热可分为强迫对流和自然对流。强迫对流是由于外界作用推动下产生的流体循环流动。自然对流是由于温度不同密度梯度变化，重力作用引起低温高密度流体自上而下流动，高温密度流体自下而上流动。热对流一般用牛顿冷却公式来描述^[11]

$$Q = \alpha \Delta T \quad (2)$$

式中， Q 为对流传热量； ΔT 为气体或液体不同区域的温度差； α 为对流传热系数。

在晶闸管传热模型中，在铜基座和周围空气的接触面上为热对流过程，外界环境温度为室温20℃，在空气自然对流的情况下， α 一般取值范围为5~15。在本文中 $\alpha=5$ ，意味着计算是在周围散热比较差的情况下进行的。

热辐射是一种物体用电磁辐射的形式把热能向外散发的传热方式。它不依赖任何外界条件而进行，是在真空中最为有效的传热方式。热辐射与辐射体的诸多特性相关，理想的热辐射称为黑体辐射，一般用斯蒂芬-波尔兹曼定理来描述^[12]

$$Q = \sigma A T^4 \quad (3)$$

式中， Q 为辐射热量； A 为表面积； T 为绝对温度； σ 为一个常数，称为黑体辐射常数。在晶闸管传热模型中，忽略热辐射过程。

整个模型的圆柱侧面均为绝热面，用热力学第二类边界条件来描述^[13]

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

式中， n 为接触面的法线方向。

晶闸管传热模型中，所有边界条件均已描述，只剩热源 q 的计算，在重频使用情况下，晶闸管持续工作时间长，可以认为晶闸管处于全面开通状态，电流均匀分布在硅片上，所以热量也均匀分布在硅片上。

热源 q 即为晶闸管的耗散功率，通过晶闸管的电流与导通压降乘积计算，如式（5）所示。晶闸管的电流采用流过晶闸管的实际脉冲电流，晶闸

管导通压降一般通过ABB公司给出的经验计算如式(6)所示,式中A、B、C和D为与具体器件相关的常系数,一般通过对厂家提供的通态伏安特性曲线拟合得到

$$P(t)=U(t)I(t) \quad (5)$$

$$U(t)=A+BI(t)+C\ln[I(t)]+D\sqrt{I(t)} \quad (6)$$

图4为本文所用晶闸管的通态伏安曲线。对其进行拟合后得到式(6)的各系数为: $A=0.755\ 51$; $B=0.000\ 335\ 87$; $C=0.088\ 329$; $D=-0.008\ 586\ 6$ 。

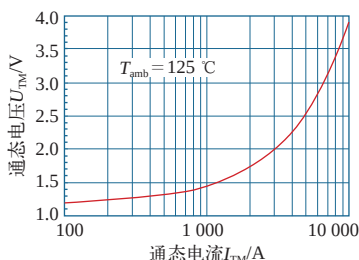


图4 4英寸晶闸管的伏安特性曲线

仿真结果

对于式(6)中的电流,采用双指数电流波形,如图5所示,电流峰值为60 kA,脉宽为3.5 ms。

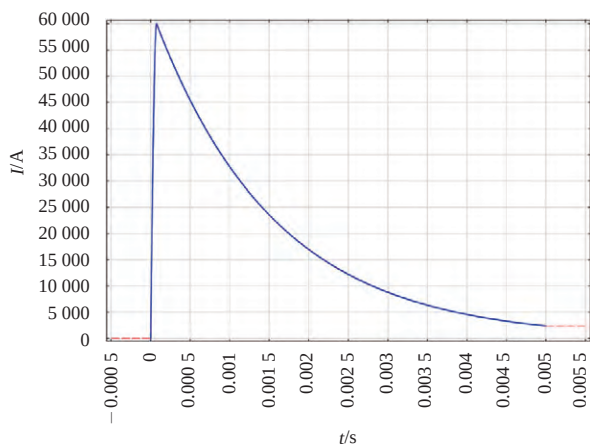


图5 Comsol中设置的电流波形

晶闸管重复频率设置为10 Hz,即晶闸管在流过脉冲电流之后散热时间接近100 ms。晶闸管在100 ms时的温度如图6所示。

硅片最高温度为306 K,相对于初始温度293 K,温升为13 K。单次脉冲下晶闸管温升为13 K,在10 Hz重频下运行1 s,总共放电次数为10次,累计温升为13 K $\times$ 10=130 K,不超过临界温度150 K,

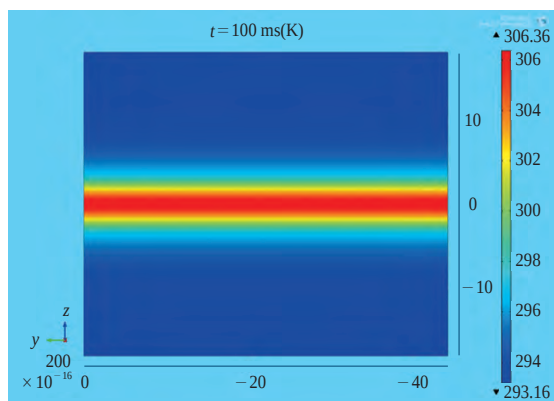


图6 晶闸管在100 ms后阀片温度
即晶闸管能满足重复频率为10 Hz工作要求。

晶闸管重频测试

采用典型脉冲形成回路对晶闸管进行重频测试,晶闸管为株洲南车生产的4英寸管,型号为KPc3400-52。晶闸管采取后置形式,采用脉冲发电机对电容器充电,充电电压为3 kV左右,单次放电电流峰值为65 kA左右,脉宽为3.5 ms左右,重复频率为10 Hz,持续时间为1 s。实验总共进行5轮,相邻两轮试验之间间隔约20 min,以确保前次实验的热量完全散掉。

单次放电电流波形如图7所示,图8为1 s内10次

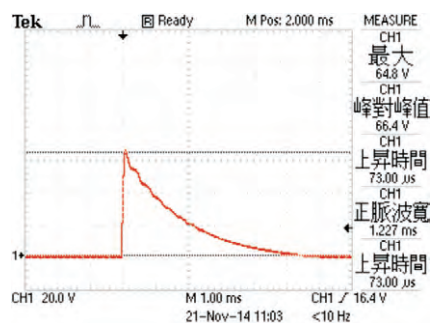


图7 单次放电电流波形

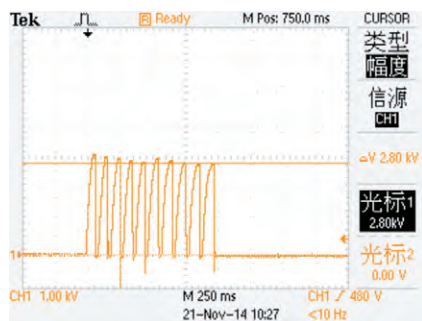


图8 1 s内10次重频充放电电压波形

充放电电压波形，下表为1 s内共10次放电瞬间电压和放电电流数据。

表 10 Hz/1 s重频试验放电电压与电流幅值对应表

序号	放电电压/kV	电流幅值/kA
1	3.09	71.39
2	2.99	69.08
3	2.95	68.15
4	2.89	66.77
5	2.83	65.38
6	2.96	68.38
7	2.88	66.54
8	2.82	65.15
9	2.76	63.76
10	2.77	64

5轮实验中，晶闸管单次放电电流都维持在60 kA以上，实验结束后，晶闸管无损坏现象，说明晶闸管在10次重频实验中结温的积累并没有超过150 ℃，该晶闸管能承受峰值为60 kA，脉宽为3.5 ms，重复频率为10 Hz，持续时间为1 s的脉冲电流。

结束语

本文基于热力学基本理论，分析了晶闸管热传导和对流过程，建立了晶闸管暂态热传导模型，仿真分析晶闸管在重频脉冲电流下的结温升，并对晶闸管重频脉冲电流下运行进行了实验验证。

1) 仿真结果表明，晶闸管在峰值为60 kA，脉宽为3.5 ms的单次脉冲电流作用下，经过100 ms散热时间后的最高结温升为13 K，这样在10 Hz重频下运行1 s的累计温升为130 K。

2) 晶闸管重频脉冲电流实验结果表明，该晶闸管能承受峰值为60 kA，脉宽为3.5 ms，重复频率为10 Hz，持续时间为1 s的脉冲电流而不发生误导通或损坏。

参考文献

[1] Bernet S. Recent developments of high power

converters for industry and traction applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000 (15) : 1102-1117.

[2] 孟志鹏, 张自成, 杨汉武, 等. 半导体开关在脉冲功率技术中的应用 [J]. 中国物理C, 2008, 32 (S1) : 277-279.

[3] Pastore R, Kingsle L, Singh H. Reverse blocking capability of symmetric SCRs at high current and high voltage reversals [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995 (1) : 306-311.

[4] Spahn E, Buderer G, Wenning W. A compact pulse forming network based on semiconducting switches for electric gun applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999 (35) : 378-382.

[5] 钱照明, 盛况. 大功率半导体器件的发展与展望 [J]. 大功率变流技术, 2010 (1) : 1-9.

[6] 维捷斯拉夫·本达, 约翰·戈沃, 邓肯 A·格兰特. 功率半导体器件——理论及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[7] 聂代祚. 电力半导体器件 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1994.

[8] 张奕. 传热学 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.

[9] 纽春萍, 陈德桂, 刘颖异, 等. 交流接触器温度场仿真及影响因素的分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22 (5) : 71-77.

[10] 任伟. 晶体管热谱学的基础研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.

[11] 蓝元良, 汤广福, 印永华, 等. 大功率晶闸管热阻抗分析方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (19).

[12] 彭勇殿, 李世平, 黄建伟, 等. 高压直流输电系统故障电流下晶闸管的温升计算 [J]. 交流技术与电力牵引, 2008 (1) : 20-23.

[13] 董汉彬. 功率晶闸管的暂态热特性研究及应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

(收稿日期: 2015-01-12) EA