

国产4 500 V/3 000 A双面烧结弹性压接IGBT模块多物理场建模及可靠性分析

李盈¹, 谭令其¹, 马凯¹, 邢震², 赖伟², 李辉², 熊岩³, 周月宾³, 袁智勇³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080; 2. 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044; 3. 直流输电技术全国重点实验室, 广州 510663)

摘要: 国产化高压大容量绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)器件成为制约我国柔性直流工程经济性和安全性的关键技术之一。针对国产4 500 V/3 000 A双面烧结弹性压接IGBT模块, 建立计及纳米银烧结层Anand本构模型和碟簧机械特性的多物理场模型, 并对其进行可靠性分析。首先建立了IGBT模块的多物理场仿真模型并且验证其有效性; 其次, 基于IGBT模块MMC实际服役电流应力进行整流工况和逆变工况下各功率器件的损耗计算, 并且对IGBT器件处于逆变工况下的损耗进行热-力仿真分析; 最后, 根据实际服役应力对国产4 500 V/3 000 A双面烧结弹性压接IGBT模块的集电极烧结层和发射极烧结层进行疲劳分析和寿命预测。仿真结果表明, 发射极烧结层在芯片与发射极铜片所接触的4个边角区域部位寿命最低, 双面烧结封装和碟簧的增加有助于提高模块的可靠性。

关键词: 双面烧结; 弹性压接IGBT; 寿命预测; 可靠性

Multi-Physical Field Modeling and Reliability Analysis of Domestic 4 500 V/3 000 A Double-Sided Sintered Elastic Crimping IGBT Modules

LI Ying¹, TAN Lingqi¹, MA Kai¹, XING Zhen², LAI Wei², LI Hui², XIONG Yan³, ZHOU Yuebin³,
YUAN Zhiyong³

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. National Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of HVDC, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Domestically produced high-voltage high-capacity insulated gate bipolar transistor (IGBT) devices have become one of the key technologies that constrain the economic and safety of China's flexible and straight engineering. Focusing on the domestically produced 4 500 V/3 000 A double-sided sintered elastic pressure bonded IGBT modules, a multi-physical field model is established which takes into account the Anand constitutive model of the nano silver sintered layer and the mechanical properties of the disc spring, and reliability analysis is conducted. Firstly a multi-physical field simulation model for IGBT modules is established and its effectiveness is verified. Secondly, based on the actual service current stress of the IGBT module MMC, the losses of various power devices under rectification and inversion conditions are calculated, and the losses of IGBT devices under inversion conditions are analyzed through thermal mechanical simulation. Finally, fatigue analysis and life prediction are carried out on the collector and emitter sintered layers of domestically produced 4 500 V/3 000 A double-sided sintered elastic pressed IGBT modules based on actual service stress. The simulation results show that the sintering layer of the emitter has the lowest lifespan in the four corner areas where the chip contacts the emitter molybdenum sheet. The addition of double-sided sintering packaging and disc springs helps to improve the reliability of the module.

Key words: double-sided sintering; elastic crimping IGBT; life prediction; reliability

基金项目: 国家自然科学基金-国家电网智能电网联合基金资助项目(U1966213); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20222548)。
Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China-State Grid Corporation Joint Fund for Smart Grid (U1966213); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20222548)。

0 引言

随着能源需求的增加和电力系统的不断升级,柔性直流输电技术作为一种具有诸多优点的电力传输方式,相比传统的交流输电技术,柔性直流输电技术具有低输电损耗、高灵活性和无电容升压效应等显著优势^[1-2],正在成为解决远距离电力传输和提高电力系统稳定性的关键技术。为满足柔性直流输电系统对高压大容量的需求,高电压、高功率压接绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)器件是当前研究热点,该器件综合了IGBT与GTO的优势,功率密度高,寄生电感小,双面散热,失效短路等特性^[3-5],适用于柔性直流输电等高电压大容量换流设备^[6-7]。

根据《全球能源互联网骨干网架研究》的报告,未来20年全球计划建设的柔性直流输电工程超过220个,高压大功率IGBT器件需求超过300万只^[8]。如大湾区中南通柔直工程中所需IGBT器件总数约3万支,仅器件成本就高达10亿元,并且国产化压接IGBT器件在工程上应用数量比例已经达到50%。以张北±500 kV柔直工程为例,其约需要4万只IGBT器件,统计显示IGBT器件早期失效率为500 ppm,相当于投运初期有20只IGBT器件失效^[9],严重影响工程可靠运行。如果因IGBT器件发生故障造成柔性直流输电系统暂停运行,其造成的经济损失将不可估量。因此,目前IGBT器件的可靠性仍然是一个巨大挑战,特别是在高压大容量柔性直流工程中。

对于压接型IGBT器件来说,接触热阻对其性能影响至关重要。为了解决IGBT器件接触热阻问题,提高其散热性能和可靠性,天津大学的梅云辉教授等人^[10-11]首次将纳米银用于压接式IGBT器件中,研究结果显示,该方法可以降低IGBT的热阻,提高IGBT器件的可靠性。因为压接型IGBT器件实际工程中无法直接获取其内部的电热应力分布规律,所以大量研究人员采用有限元建模来分析压接型IGBT器件处于实际工程中的电热性能和可靠性。文献[12]分析了单面银烧结IGBT器件和全压接封装IGBT器件内部电热应力差异,表明烧结封装可以有效提高散热性能及可靠性。高电压大容量IGBT模块的芯片数量更多,部件尺寸更大,电流等级更高,对部件所受压力均衡方面要求更高,而弹性压接封

装能够吸收和缓解外部冲击或振动对模块的影响,使得芯片的应力具有更好的一致性,从而提高模块的可靠性^[13-14]。文献[15]搭建了弹性压接IGBT器件和凸台式压接IGBT器件的有限元模型,对比分析表明弹性压接IGBT器件由于碟簧的存在使得器件在正常工作状态下的压力分布更加均匀。

综上所述,现有文献所提的压接型IGBT器件的多物理场模型仅针对单面银烧结器件或者弹性压接无烧结器件。但是目前国产化4 500 V/3 000 A IGBT模块已经作为柔性直流输电系统中的重要组成部分,该模块结合弹性压接封装与纳米银烧结封装,其性能和可靠性对于整个系统的稳定运行和效率至关重要。基于此,本文将以国产4 500 V/3 000 A双面烧结弹性压接IGBT模块为研究对象,对其进行多物理场建模,主要考虑烧结层Anand本构模型和碟簧的机械特性,然后根据其MMC实际服役电流应力进行损耗计算以及建模分析,最后基于实际服役应力对集电极烧结层和发射极烧结层进行疲劳寿命预测,分析双面烧结弹性压接IGBT模块的可靠性。

1 国产IGBT模块多物理场建模及验证

1.1 国产IGBT模块几何结构和材料属性

国产化4 500 V/3 000 A双面烧结弹性压接IGBT模块的外形如图1所示^[16],该IGBT功率模块内部结构如图2所示,自上而下主要包含:发射极铜板、金属板、碟簧、金属片、塑料片、PCB板、铝柱、塑料板、PEEK支架、发射极铝片、发射极烧结层、IGBT/FRD、集电极烧结层、集电极铝片、集电极铜板等。通过外部所加的夹具给模块施加压力,使得模块各部件紧密接触在一起,从而实现电热传导功能。双面烧结弹性压接IGBT模块芯片空间布局如图3(a)所示,双面烧结IGBT芯片子模组结构如图3(b)所示。

在搭建双面烧结弹性压接IGBT模块的多物理场模型时,模型的尺寸、结构、材料属性与模块实际尺寸、结构、材料属性的偏差会导致模型模拟的精度受到很大的影响,因而需要对其进行精确的数据采集。通过对IGBT模块的实际测量、数据手册查阅^[17],获得了其三维多场耦合模型的几何参数、材料物理属性参数。IGBT模块各个部件的结构尺寸参数如表1所示,相关材料的物理属性参数如表2所示^[18-19]。



图1 国产4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块外形

Fig. 1 Appearance of domestic 4 500 V/3 000 A double-sided sintered elastic crimping IGBT module

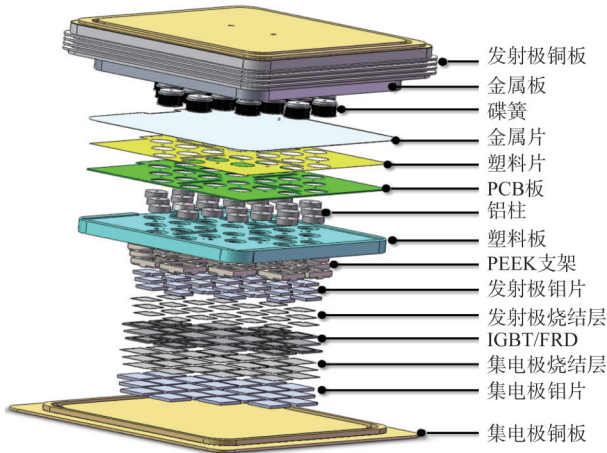


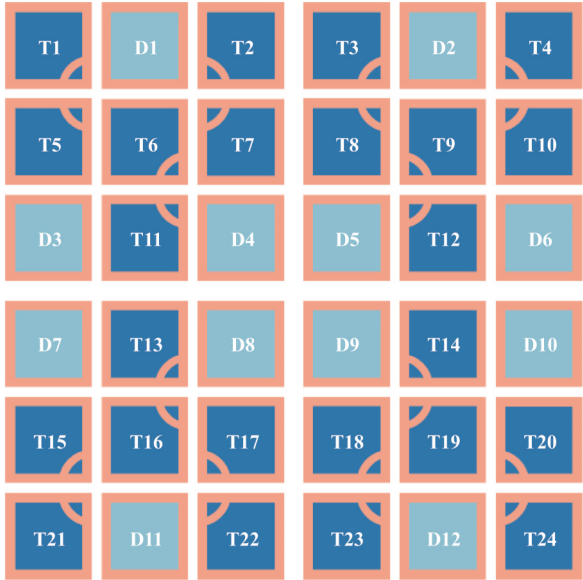
图2 国产4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块结构

Fig. 2 Structure of domestic 4 500 V/3 000 A double-sided sintered elastic crimping IGBT module

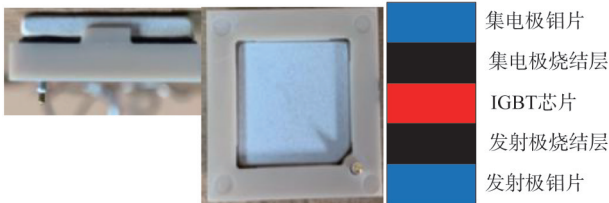
1.2 国产IGBT 模块多物理场建模

双面银烧结 IGBT 模块通过纳米银焊膏将集电极铝片、芯片、发射极铝片三者经过烧结的工艺连接成为一个整体。在烧结时, 纳米银焊膏会发生一系列的冶金反应, 从而使得其电热性能和纯银材料不同^[18]。因此, 双面银烧结弹性压接 IGBT 多物理场模型需采用合理的网格剖分方法, 将纳米银烧结层的材质特性引入到模型中, 实现对 IGBT 组件电、热特性的精确模拟。

纳米银焊膏烧结之后在交变电热应力下产生的形变有弹性形变, 也有与温度和时间相关的非弹性形变(塑性形变、蠕变形变)。其中, 弹性形变在电热应力消失后可以恢复初始状态, 而非弹性形变则是不可逆的^[19]。



(a) 芯片布局



(b) 芯片结构

图3 双面烧结 IGBT 模块芯片布局与结构

Fig. 3 Layout and structure of double-sided sintered IGBT module chip

表1 IGBT 模块各部分结构尺寸

Tab. 1 Structural dimensions of each part of IGBT module

部件	材料	表面积/mm ²	厚度/mm
集电极铜板	铜	206×206	5. 4
集电极铝片	铝	21×21	2. 5
集电极烧结层	纳米银	21×21	0. 03
芯片	硅	21×21	0. 51
发射极烧结层	纳米银	15. 4×15. 4	0. 03
发射极铝片	铝	15. 4×15. 4	2. 5
金属柱	铝	174. 17	4. 8
碟簧	50CrVA	254. 5	12. 2
发射极铜板	铜	159×159	11. 0

与时间有关的蠕变形变和与时间无关的塑性形变都起因于烧结层分子的位错运动, 目前被广泛用于烧结层力学描述的是 Anand 本构模型^[20], 式(1)所描述的为塑性应变率方程。其中, T 为运行温度, R 为气体常数, ε_p 为非弹性应变速率, s_0 为给定温度和应变速率时内部变量的饱和值。

表 2 IGBT 模块各部分材料物理属性参数

Tab. 2 Physical property parameters of materials for various parts of IGBT module

材料名称	热导率/(W/(m·K))	杨氏模量/GPa	电导率/(S·m ⁻¹)	泊松比
铜	138	312	1.89×10 ⁷	0.30
银	429	83	8.3×10	0.37
铜	401	110	5.998×10 ⁷	0.35
硅	130	170	99.40×10 ⁴	0.28
铝	238	70	37.7×10 ⁶	0.33
50 CrVA	46	210	1.05×10 ⁶	0.30
纳米银	160	50	61.7×10 ⁶	0.25

$$\varepsilon_p = f(\sigma, s, T) = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \quad (1)$$

式中: A 为常数; Q 为活化能; m 为应变率灵敏指数; ξ 为应力乘子; s 为内部状态变量, 其实质是对非弹性应变各向同性的阻抗的描述。针对内部变量 s 的演化方程如式(2)所示。

$$s = h(\sigma, s, T) \varepsilon_p \quad (2)$$

式中 $h(\sigma, s, T)$ 为硬化函数, 与材料的回复过程和动态应变硬化有关, 具体形式为:

$$h = h_0 \left| 1 - \frac{S}{s_0} \right|^a \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{S}{s_0}\right) \quad (3)$$

式中: S 为饱和系数; h_0 为硬化/软化常数; a 为与硬化/软化相关的应变率敏感指数。将 h_0 作为一种等效应力代入式(1)中, 其演化方程如式(4)和式(5)所示。

$$s = \left\{ h_0 \left| 1 - \frac{S}{s_0} \right|^a \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{S}{s_0}\right) \right\} \cdot \varepsilon_p \quad (4)$$

$$s_0 = S \left[\frac{\varepsilon_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n \quad (5)$$

式中 n 为形变阻抗饱和值的应变敏感率指数。

根据上面公式, 确定 A 、 Q 、 a 、 S 、 h_0 、 m 、 n 、 ξ 以及形变阻力初始值 s^* 这 9 个参数就可以描述纳米银烧结的热力学性能。

采用文献[21]中所提出的纳米银焊膏 Anand 模型的物理属性参数, 用以表征双面烧结弹性压接 IGBT 器件工作时纳米银烧结层的电热性能, 如表 3 所示。

由于国产 4 500 V/3 000 A IGBT 器件封装结构复杂、芯片数量较多、组件大小尺寸差异较大, 网格划分过粗会导致仿真精度不佳、网格划分过细会导致仿真速度过慢。本文所用国产双面烧结弹性压

表 3 Anand 模型物理属性参数

Tab. 3 Anand model physical property parameters

名称	A/S^{-1}	$Q/(J \cdot \text{mol}^{-1})$	S/MPa	ξ	a
数值	9.81	47 442	101.7	12	1
名称	m	n	h_0/MPa	S^*/MPa	
数值	0.657 2	0.003 26	14 600	2.93	

接 IGBT 器件的纳米银烧结层的实际厚度为 30 μm , 与之相邻的芯片厚度为 1.2 mm, 铜片厚度为 2.2 mm, 三者之间的厚度差异较大, 因此需要单独对烧结层、铜片层和芯片层进行网格划分, 这样可以提高仿真速度也不降低仿真精度。

为了简化双面烧结弹性压接 IGBT 器件的有限元建模过程, 降低计算仿真的复杂性, 且不影响其仿真精度, 需要做出假设如下^[19]: 1) 对 IGBT 器件电-热性能几乎没有影响的组件不考虑建模, 例如 PEEK 支架、PCB 板、塑料板等; 2) 认为各接触面的接触热阻和接触电阻是一个固定值, 即忽略 IGBT 模块在运行的时候所产生的接触压力的瞬态变化; 3) 忽略夹具和散热器的实际建模, 夹具所施加的压力通过在 IGBT 器件集电极铜层表面设置边界载荷来模拟, 水冷散热器的作用等效为 IGBT 器件的俩极表面的对流散热系数; 4) 将纳米银烧结层视为非线性材料, 不考虑烧结层的焊料材料配比及烧结工艺对纳米银烧结层疲劳老化的影响。

碟簧的存在可以吸收和缓解外部冲击或振动对模块的影响, 并且使得芯片的应力具有更好的一致性, 有助于提高模块的可靠性, 碟簧的结构图如图 4 所示。

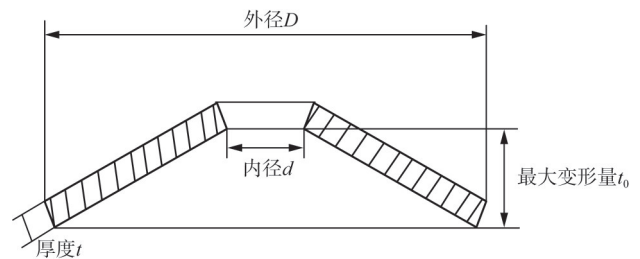


图 4 碟簧结构图

Fig. 4 Structure diagram of disc spring

针对本模块中的对合组合碟簧, 其压平时碟簧负荷计算值为:

$$F_c = \frac{4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{h_0 t^3}{K_1 D^2} \cdot K_4^2 \quad (6)$$

式中: E 为弹性模量; μ 为泊松比; h_0 为无支撑面

碟簧压平时变形量的计算值; t 为碟簧的厚度; D 为碟簧的外径, 无支撑面碟簧 $K_4=1$, 系数 K_1 的计算如下, 其中 C 为碟簧的直径比, 即 $C=D/d$, 其中 d 为碟簧内径。

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{[(C - 1)/C]^2}{(C + 1)/(C - 1) - 2/\ln C} \quad (7)$$

根据实际单个碟簧组受到的负荷 F_1 , 计算 F_1/F_0 的值, 然后对照碟簧的特性曲线, 可得对应的 f/h_0 的值, 其中 f 为单个碟簧的变形量, 进而可得单个碟簧组受到的负荷对应的整体变形量, 碟簧物理属性参数对应的值如表 4 所示, 可以计算得到单个碟簧组的变形量为 0.936 mm, 仿真对应的结果如图 5 所示。得到特定负荷下碟簧的弹性变形量, 以便评估碟簧组的性能与可靠性, 进而评估 IGBT 模块的可靠性。

表 4 碟簧物理属性参数

Tab. 4 Physical property parameters of disc spring

参数	数值
$E/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-2})$	206 000
μ	0.3
D/mm	18
d/mm	9.2
t/mm	1
h_0/mm	0.4
F_1/N	2 361

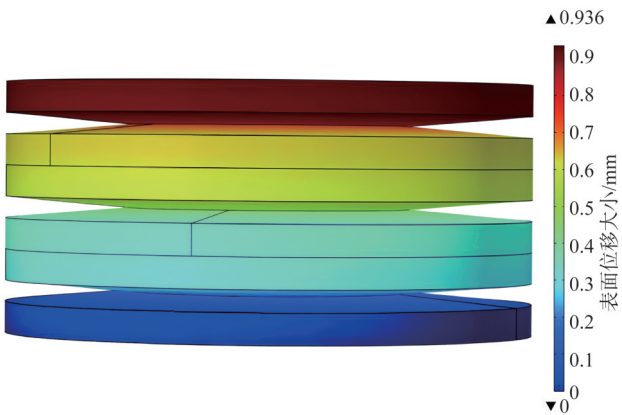


图 5 碟簧仿真结果图

Fig. 5 Simulation results of disc spring

为了建立准确的双面银烧结弹性压接 IGBT 模块多物理场模型, 基于表 1 和表 2 的数据以及上述建模假设, 并且对模型进行电-热-力多场耦合设置。具体地, 对模块进行了如下的网格划分: 整体网格

划分, 根据模块的几何形状进行了整体的网格划分, 以构建有限元模型。针对烧结层和碟簧, 考虑到双面烧结弹性压接的特点, 单独对烧结层和碟簧进行精细化网格划分处理。对纳米银烧结层采用自由四面体网格划分, 并且为了准确表征烧结层与铜片层、芯片层的接触特性, 使用自由三角形网格划分方法划分烧结层与芯片、铜层的接触表面。如图 6(a)所示为模块整体网格划分图。

在设置双面银烧结弹性压接 IGBT 器件的电-热-力物理场参数和边界条件时, 考虑了多芯片 IGBT 器件的运行工况, 如图 6(b)所示。电场设置: 在集电极铜层表面设置电流终端, 通入额定电流 $I=3\,000\text{ A}$; 发射极铜层表面设置为接地, 电势设置为 0。热场设置: 环境温度设置为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 根据实际的水冷温度、流速、散热板与集电极间的接触面积, 设置集电极铜层和发射极铜层表面的散热系数为 $5\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。接触设置: 针对集电极铜层与集电极铜层、发射极铜层与圆柱凸台、圆柱凸台与金属片、金属片与碟簧、碟簧与发射极铜层共 5 个接触面, 对这 5 个接触面分别设置对应的接触电阻和接触热阻, 并且对其他的表面进行电绝缘和热绝缘的设置。力场设置: 设置模块发射极铜层表面为固定支撑, 设置模块集电极铜层表面 85 kN 的压力载荷, 用来对外部夹具所施加的压力进行模拟。以上设置能够有效建立双面银烧结弹性压接 IGBT 模块的多物理场模型, 并且保证了计算仿真的精度。

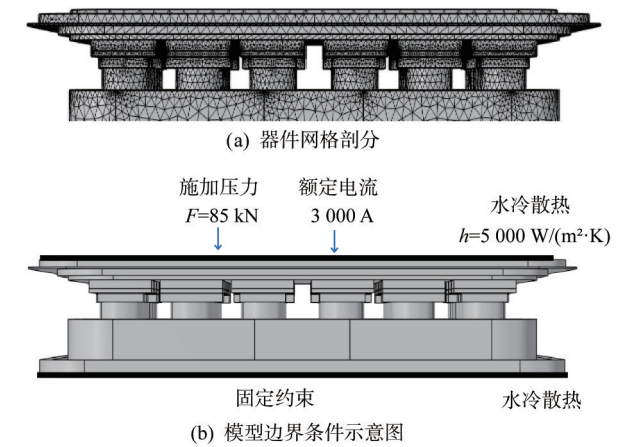
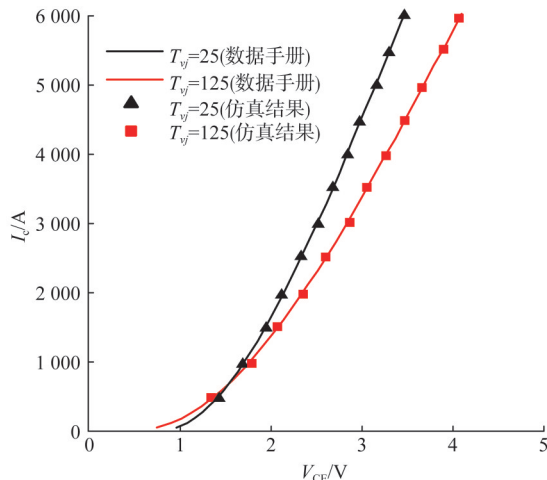


图 6 国产 4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块有限元模型

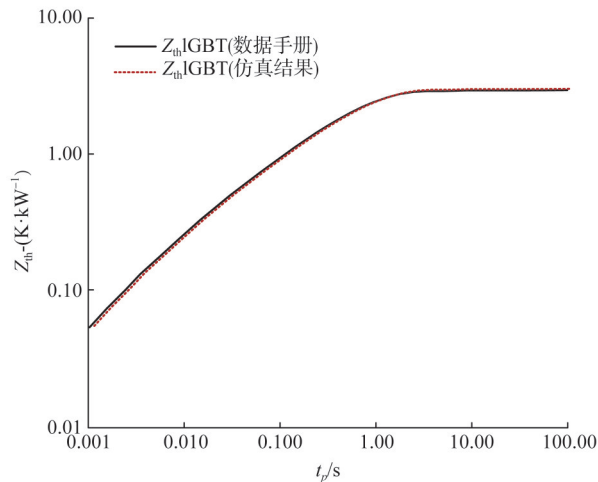
Fig. 6 Finite element model of domestic 4 500 V/3 000 A double-sided sintered elastic crimping IGBT module

1.3 IGBT 模块多物理场模型验证

为了验证建立的国产化 4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块的多物理场模型的有效性,对多物理场模型进行仿真,得到不同温度下的不同电流值对应的电压值,即模块的输出特性曲线。再将所得的输出特性曲线与数据手册中的输出特性曲线进行对比验证^[22]。具体的仿真过程如下:设置总激励电流,从 500 A 电流大小开始,每次增加 500 A 的电流大小直到电流大小为 6 000 A。在 IGBT 器件中加入了等效电阻率及电阻温度系数。对模块模型的集电极铜层和发射极铜层的散热系数进行统一调整,得到 25 ℃ 的平均结温和 125 ℃ 的平均结温,加载不同的激励电流得到相应的导通电压。为了验证模型的有效性和准确性,将数据手册中的输出特



(a) 输出特性曲线对比



(b) 瞬态热阻曲线对比

图7 仿真结果与数据手册对比

Fig. 7 Comparison between simulation results and data manual

性曲线与上述得到的仿真输出特性曲线进行对比,结果如图 7(a)所示。

当通入总激励电流为 3 000 A 时,模块的瞬态结壳热阻抗(Z_{thjc})可以根据式(8)计算得到,其中 $T_j(t)$ 为在 t 时刻的器件结温, $T_c(t)$ 为在 t 时刻的器件壳温, P_{loss} 为器件损耗,如图 7(b)所示。

$$Z_{thjc}(t) = \frac{T_j(t) - T_c(t)}{P_{loss}} \quad (8)$$

分析图 7 可知,模型瞬态热阻曲线仿真结果和数据手册结果误差在 3 % 以内。因此,建立的国产双面烧结弹性压接 IGBT 模块的有限元模型能够较好地对实际模块的电热特性进行模拟。

综上所述,国产双面烧结弹性压接 IGBT 模块的多物理场模型的具体建模过程如图 8 所示。

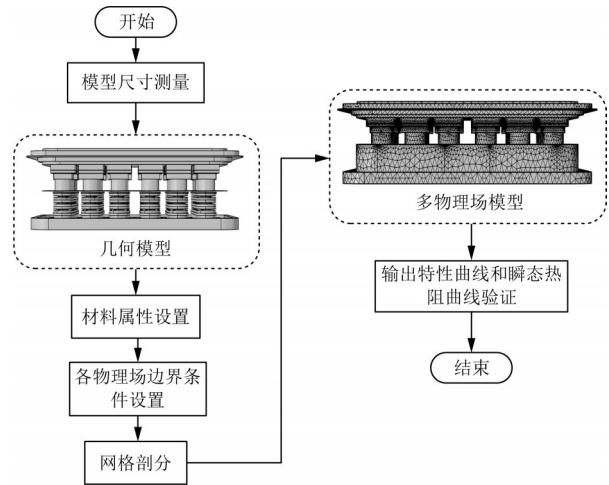


图8 国产器件多物理场建模流程图

Fig. 8 Flow chart of multi-physical field modeling for domestic devices

2 国产 IGBT 模块实际 MMC 服役应力分析

2.1 实际 MMC 服役电流应力下模块损耗计算

MMC 的拓扑图表示各相的上、下桥臂是通过多个子组件(SM)与电抗器 L_0 串联构成的。MMC 换流器实际是包括在图 9(a)中的桥臂虚拟框中的多个子模块^[23]。每个子模块由 IGBT 模块 1(T1、D1)、IGBT 模块 2(T2、D2)、子模块控制系统、电源供给和电容等组成,如图 9(b)所示。其中,子模块控制系统还包括子模块控制器、驱动板和光纤通信等。

如图 10 所示,4 个不同的工作模式分别对应子模块的不同状态,即当桥臂电流与 IGBT 切换状

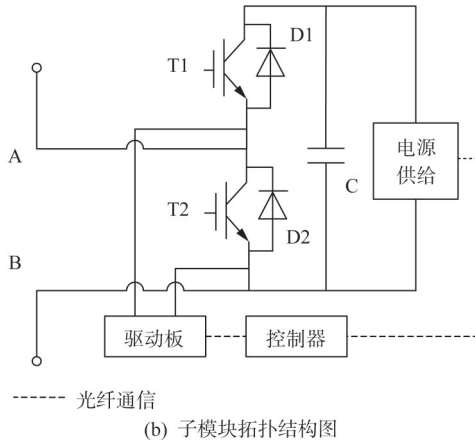
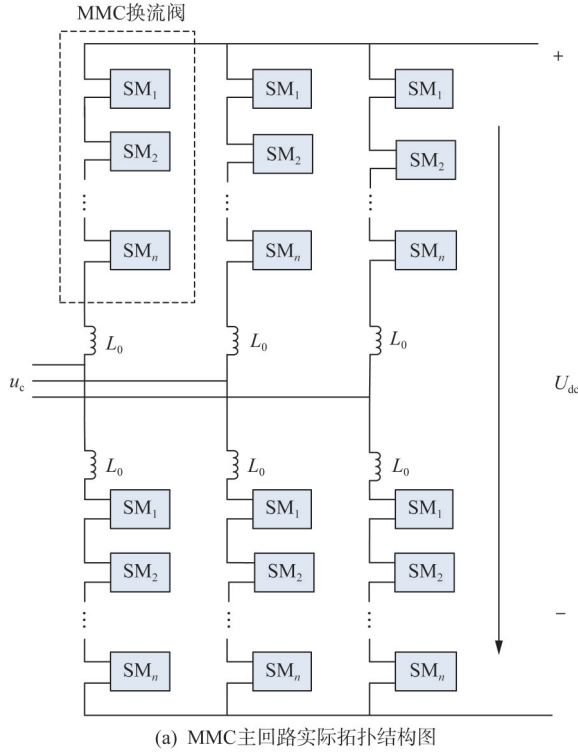


图 9 MMC 实际拓扑图

Fig. 9 MMC actual topology diagram

态不同时,其工作模式也会随之改变,4种工作模式分别为:1)T2导通,输出电压为0;2)D1导通,输出电容电压,电容充电;3)T1导通,输出电容电压,电容放电;4)D2导通,输出电压为0。根据不同工作模式的持续时间,可以得到一个完整的电流周期被划分为4个区间,其中T1—T4表示每个区间的持续时长。通过分析图10可以得知在整流工况和逆变工况下,桥臂电流的波形存在差异,因此在MMC换流阀中,功率半导体器件的损耗分布并不均匀。在整流工况下,由于电流负向

偏置,导致D2导通时间最长,电流有效值也最大,因此D2的损耗最高。而在逆变工况下,由于电流正向偏置,T2导通时间最长,导致T₂的损耗最大^[24-25]。这种不均匀的损耗分布对于整个MMC的运行稳定性和器件可靠性具有重要影响。特别是对于IGBT这类功率半导体器件,其敏感性和对温升的响应要求更加关注逆变工况下的损耗情况。

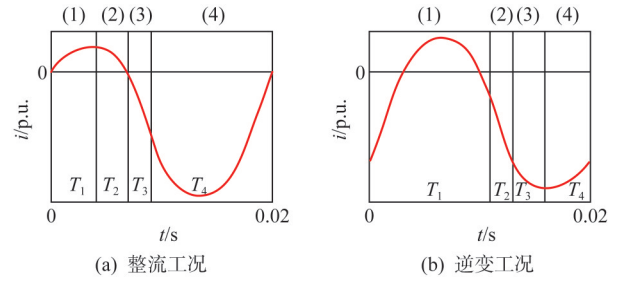


图 10 桥臂电流在整流和逆变工况下的波形

Fig. 10 Waveform of bridge arm currents under rectification and inverter conditions

以大湾区中通道±300 kV 柔性直流输电工程为例,其中MMC换流阀的参数为单相每个桥臂由302个子模块构成,桥臂额定电流为833.3A的直流分量和1506.9A的工频分量,IGBT模块采用4500V/3000A双面烧结弹性压接IGBT模块,模块内部由多个IGBT芯片和二极芯片并联封装构成。

基于MMC的柔直换流阀,由于桥臂电流为交流分量和直流分量组合,导致功率模块各器件负载不对称,器件的工作时间、损耗以及结温都存在很大差异性。以直流电流833.3A+交流电流1506.9A为基准电流,计算额定工况下功率模块各器件损耗,其中IGBT的开关损耗计算如式(9)~(10)所示。

$$P_{L,S} = f_{sw} E_{L,S} (I_{L,(t)}) \quad (9)$$

$$E_{L,S} (I_c) = (E_{on} + E_{off}) \times \frac{U_{dc} \times I_c}{U_N \times I_N} \times (1 + K_{L,S} (125 - T_{j,I})) \quad (10)$$

式中: $E_{L,S} (I_{L,(t)})$ 为IGBT器件断开和闭合一次的能量损失; E_{off} 和 E_{on} 分别为IGBT器件在额定条件下的关断损耗和导通损耗; U_{dc} 为变流器直流侧电压; U_N 、 I_N 分别为IGBT模块额定电压和额定电流; $K_{L,S}$ 为IGBT开关能量损耗的温度校正系数; f_{sw} 为开关频率。IGBT通态损耗计算如式(11)所示。

$$P_{1,c} = V_{ce(sat)} i_c + r_1 i_c^2 \quad (11)$$

式中： r_1 为IGBT的通态电阻； i_c 为流过IGBT的电流； $V_{ce(sat)}$ 为IGBT处于导通状态时产生的饱和电压降。再根据IGBT模块的数据手册里面所给出的伏安特性曲线，可以得到不同结温下的 r_1 和 $V_{ce(sat)}$ 的数值，其关系式如(12)–(13)所示。

$$V_{ce(sat)} = V_{ce,25} + K_{V,1}(T_{j,1} - 25) \quad (12)$$

$$r_1 = r_{1,25} + K_{r,1}(T_{j,1} - 25) \quad (13)$$

式中： $r_{1,25}$ 和 $V_{ce,25}$ 分别为IGBT在25℃下的通态电阻和初始饱和压降； $K_{r,1}$ 和 $K_{V,1}$ 分别为导通电阻和初始饱和压降的温度系数； $T_{j,1}$ 为IGBT器件的结温。

同理可以计算得到额定工况下的二极管的损耗，不同运行模式下各功率器件损耗如图11所示。从图11可知，在逆变和整流两种运行工况下MMC功率模块各功率器件损耗差异较大；如逆变工况时，T2导通时间更长，损耗相对更大，而整流工况时，D2导通时间更长，损耗更大。

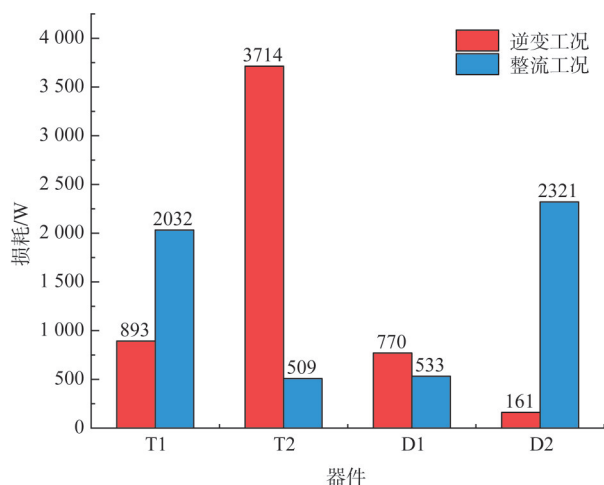


图 11 不同运行模式各功率器件损耗

Fig. 11 Power device losses under different operating modes

2.2 基于实际损耗的国产IGBT模块应力分析

根据图11所示的各器件处于不同运行模式下的损耗情况，基于器件T2处于逆变工况下的损耗3714 W，仿真得到图12的芯片层的温度分布以及应力分布。由于IGBT器件具有较高的功率密度，因此散热器应始终保持开启状态^[26]，以确保散热效果。在仿真过程中，始终对器件的两端进行散热处理。

有限元模型仿真结果如图12所示，由图12可

知，IGBT芯片的结温度最高可达81.9℃。查询数据手册可得该模块的最高允许运行结温为125℃，正常稳态运行最高结温需要留最少30℃的裕量，根据仿真结果可知其结温裕量达到43.1℃。

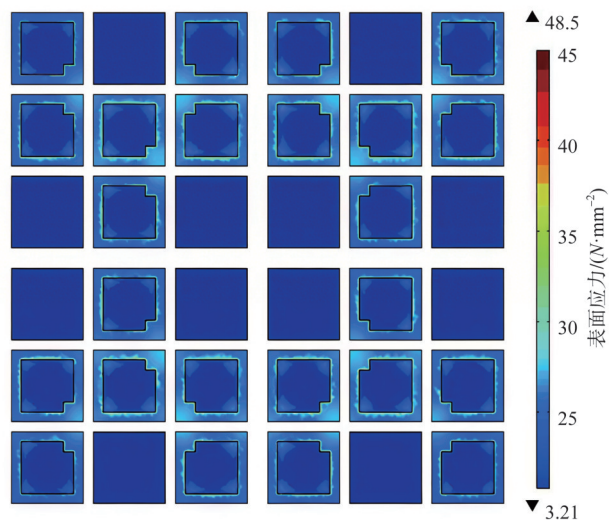
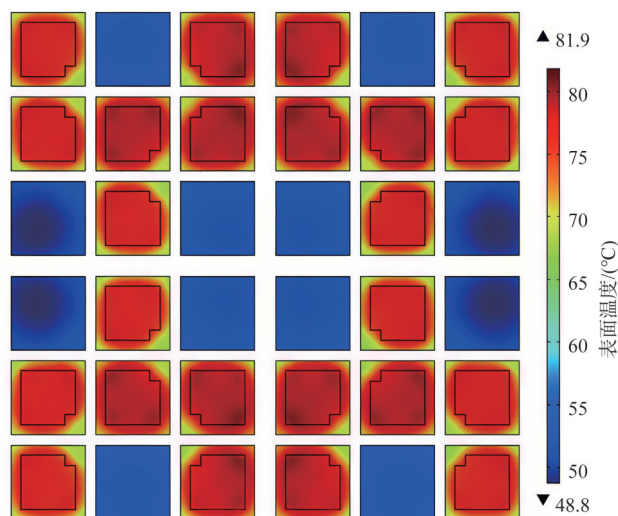


图 12 芯片发射极表面温度与应力分布

Fig. 12 Temperature and stress distribution on the surface of the chip emitter

为了对比有无碟簧对IGBT模块芯片应力的影响，将碟簧换成高等宽的铜柱，放到多物理场模型中，在相同工况下进行有限元仿真，其芯片发射极表面应力分布如图13所示。对比分析图12(b)和图13可知，带碟簧的模块的IGBT芯片所受应力的平均值更小，且芯片表面应力分布更加均匀。这种均匀的应力分布有利于压装行程与芯片受力的一致性，从而提高了IGBT模块的可靠性。

3 国产 45 00 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块可靠性评估

双面银烧结弹性压接 IGBT 器件有集电极烧结层和发射极烧结层, 由于工艺原因使其在服役时形成的交变热应力下易引起高温蠕变、粘塑性

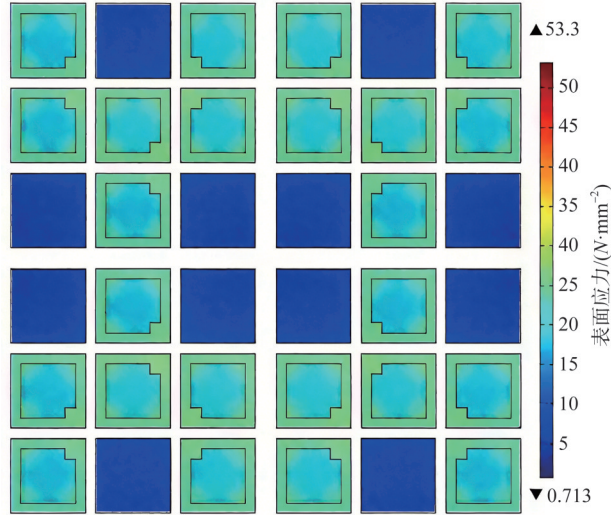


图 13 无碟簧模型芯片发射极仿真结果

Fig. 13 Simulation results of the emitter of the chip without disc spring model

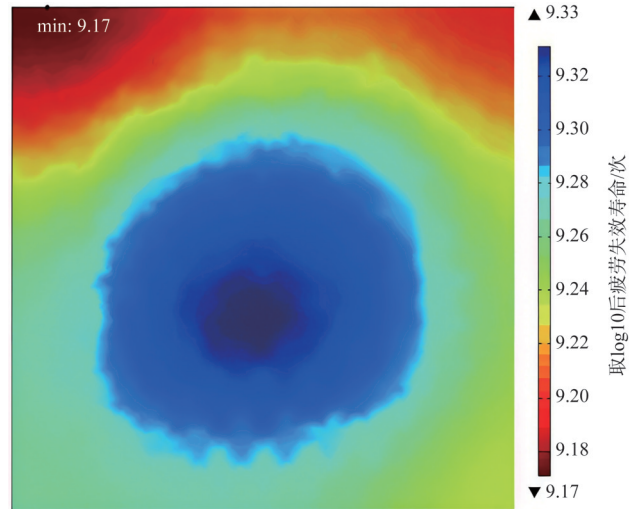
变形。已有研究表明, 常规焊接型 IGBT 器件的焊接层在工作过程中容易发生疲劳和老化, 从而导致整体故障^[27]。本文拟采用修正 Coffin-Manson 模型^[28]对寿命进行计算。在该模型中, 纳米银的蠕变疲劳寿命与循环塑性应变能之间呈现指数关系, 可以根据烧结层焊料的蠕变应变能来估计烧结层的疲劳寿命。结合 Miner 线性累积疲劳准则^[29], 根据一个循环周期的累计能量值获得纳米银焊料层的疲劳失效的循环次数。

$$N_f = W_f (\Delta W_c)^m \quad (14)$$

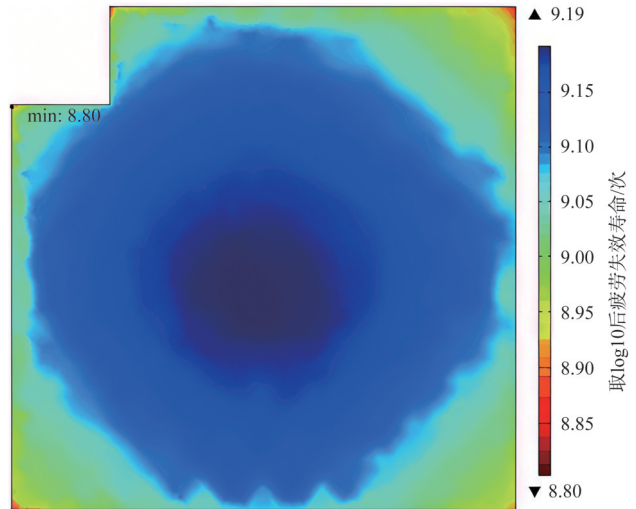
式中: ΔW_c 为纳米银焊料层在每次功率循环仿真中所累积的蠕变能量; m 为疲劳能量指数; W_f 为疲劳能量系数; N_f 为纳米银焊料层的疲劳失效循环次数。本文不考虑纳米银焊料的烧结工艺和材料组成的情况, 根据文献^[28]中的所给出的数据来评估烧结层的蠕变寿命, 其中 $W_f=0.16$, $m=-2.96$ 。

前文对双面烧结弹性压接 IGBT 器件进行有限元建模时, 考虑纳米银烧结层的特性, 采用了 Anand 模型来描述纳米银烧结层的疲劳失效过程和

电热性能。将仿真结果代入式(14)预测双面银烧结弹性压接 IGBT 器件的烧结层蠕变疲劳失效寿命, 集电极、发射极芯片与铜片之间的烧结层结果如图 14 所示。



(a) 集电极烧结层



(b) 发射极烧结层

图 14 烧结层蠕变疲劳失效寿命

Fig. 14 Creep fatigue failure lifes

基于 COMSOL Multiphysics 软件计算烧结层蠕变疲劳失效寿命, 得到的结果以底数为 10 的对数值表示。根据图 14 可知, 在双面银烧结 IGBT 器件中, 烧结层 4 个边角区域的寿命最低, 这些边角区域与 IGBT 芯片和铜层的接触位置对应, 其中集电极烧结层失效循环次数最低为 $10^{9.17}$ 次, 最高为 $10^{9.33}$ 次。由于发射极烧结层的接触面积相对较小, 其寿命较集电极烧结层更低, 失效循环次数最低为

$10^{8.8}$ 次, 最高为 $10^{9.19}$ 次。为了对比分析双面烧结与单面烧结的烧结层疲劳失效寿命, 在相同工况下, 仅保留发射极侧烧结层, 仿真结果如图 15 所示, 发射极侧单面烧结失效循环次数最低为 $10^{8.71}$ 次, 最高为 $10^{9.16}$ 次, 相比于双面烧结器件其疲劳失效寿命更低。因此, 可基于双面烧结器件的发射极烧结层的蠕变疲劳失效寿命对双面烧结弹性压接 IGBT 器件的可靠性进行评估。

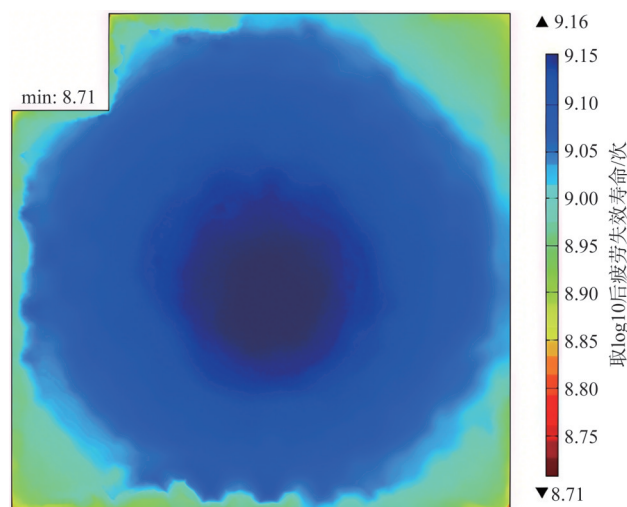


图 15 发射极侧单面烧结蠕变疲劳失效寿命

Fig. 15 Single sided sintering creep fatigue failure lifes

4 结论

本文基于国产 4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块, 考虑其物理结构特性, 建立计及烧结层 Anand 本构模型和碟簧机械特性的多物理场模型, 并在实际工况下分析其可靠性, 得到以下结论。

1) 在考虑实际 MMC 服役电流应力的基础上计算 IGBT 模块不同工况下的损耗, 其中处于逆变工况下损耗最大, 在该工况下对模块进行热-力仿真分析。仿真结果表明, 芯片最高温度为 $81.9\text{ }^{\circ}\text{C}$, 距离最高允许运行结温 $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 有 $43.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结温裕量; 采用铜柱等效碟簧的方式, 对比有无碟簧的仿真结果, 表明碟簧的存在使得芯片表面的应力分布更均匀。

2) 根据实际服役应力, 对国产 4 500 V/3 000 A 双面烧结弹性压接 IGBT 模块的集电极烧结层和发射极烧结层进行疲劳寿命预测。仿真结果表明, 在

双面烧结 IGBT 模块中, 烧结层的 4 个边角区域与 IGBT 芯片和钼片的接触位置寿命最低, 并且由于发射极烧结层的接触面积较小, 导致其 4 个边角的寿命相较于集电极烧结层更低, 可达到 $10^{8.8}$ 次循环次数。该研究有助于指导国产 IGBT 模块的设计改进和可靠性评估, 从而提高国产功率半导体器件的竞争力。

参考文献

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760 - 1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. Development and application of advanced AC/DC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760 - 1771.
- [2] 刘淑军, 郭铸, 黄伟煌, 等. 海上风电柔性直流输电系统新型电压-频率控制策略[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 12 - 19.
LIU Shujun, GUO Zhu, HUANG Weihuang, et al. A new voltage frequency control strategy for flexible DC transmission system of offshore wind power[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 12 - 19.
- [3] TAKAHASHI Y, YOSHIKAWA K, KOGA T, et al. Ultra high-power 2. 5kV-1800A power pack IGBT[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's, June 12 - 15, 1997, Weimar, German. New York: IEEE, 1997: 233 - 236.
- [4] KON H, KITAGAWA M. The 4500V trench gate IEGT with current sense function[C]//Proceedings of the 14th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, August 10 - 13, 1999, Dallas, TX, USA. New York: IEEE, 1999: 676 - 681.
- [5] WAKEMAN F, BILLETT K, IRONS R, et al. Electromechanical characteristics of a bondless pressure contact IGBT[C]//Proceedings of the 14th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, August 10 - 13, 1999, Dallas, TX, USA: IEEE, 1999: 312 - 317.
- [6] WAKEMAN F, PITMAN J, STEINHOFF S. Long term short-circuit stability in Press-pack IGBTs[C]//Proceedings of the 18th European Conference on Power Electronics and Applications, May 21 - 23, 2016, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE, 2016: 1 - 10.
- [7] 莫跃, 刘明, 王健, 等. 基于观测器的 MMC 功率模块故障诊断方法[J]. 广东电力, 2021, 34(9): 80 - 86.
MO Yue, LIU Ming, WANG Jian, et al. Observer based fault diagnosis method for MMC power module [J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(9): 80 - 86.
- [8] 刘振亚. 全球能源互联网骨干网架研究[EB/OL]. <http://www.elecfans.com/d655645.html>
- [9] 黄勇. 张北柔性直流电网和白鹤滩混合直流工程[DB/OL]. <http://www.csee.org.cn/pic/u/cms/www/201912/04143258uk71.pdf>.
- [10] 梅云辉, 冯晶晶, 王晓敏, 等. 采用纳米银焊膏烧结互连技术的中高压 IGBT 模块及其性能表征[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3307 - 3312.
MEI Yunhui, FENG Jingjing, WANG Xiaomin, et al.

- Medium and high voltage IGBT modules using nano silver solder paste sintering interconnection technology and their performance characterization [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3307 – 3312.
- [11] FENG J, MEI Y, LI X, et al. Characterizations of a proposed 3300-V press-pack IGBT module using nanosilver paste for high-voltage applications [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 2245 – 2253.
- [12] LI Y, WANG P, LI J, et al. Electro-thermal stress comparison between full pressure and silver sintered package press-pack IGBT [C]//V/2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), April 14 – 15, 2019, Xi'an, China. New York: IEEE, 2019: 7 – 12.
- [13] 刘招成, 崔翔, 李学宝, 等. 弹性压接型IGBT器件封装结构对芯片内部电场的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 274 – 284.
- LIU Zhaocheng, CUI Xiang, LI Xuebao, et al. Research on the influence of packaging structure of elastic pressure bonded IGBT devices on the internal electric field of the chip [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 274 – 284.
- [14] SIMPSON R, PLUMPTON A, VARLEY M, et al. Press-pack IGBTs for HVDC and FACTS [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 302 – 310.
- [15] 安琦, 邓二平, 任斌, 等. 不同结构压接型IGBT器件压力分布对比[J]. 中国电力, 2019, 52(9): 11 – 19, 29.
- AN Qi, DENG Erping, REN Bin, et al. Comparison of pressure distribution of different structure compression IGBT devices [J]. Electric Power, 2019, 52(9): 11 – 19, 29.
- [16] 刘国友, 窦泽春, 罗海辉, 等. 高功率密度3 600 A/4 500 V压接型IGBT研制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4855 – 4862, 4991.
- LIU Guoyou, DOU Zechun, LUO Haihui, et al. Development of high power density 3 600 A/4 500 V crimping IGBT [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4855 – 4862, 4991.
- [17] IGBT tg3000sw45zc-p200 product data sheet [EB/OL]http://pro29431d.pic46.websiteonline.cn/upload/p200.pdf.
- [18] 赵晓晨. 低温烧结纳米银焊膏全寿命棘轮行为的本构描述[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [19] 龙海洋. 纳米银烧结压接封装IGBT器件的电-热-力多物理场建模及失效分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [20] YU D J, CHEN X, CHEN G, et al. Applying ANAND model to low temperature sintered nanoscale silver paste chip attachment [J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 4574 – 4579.
- [21] 邓吉利. 柔性直流换流阀压接式IGBT器件可靠性建模与评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [22] 丁雪妮. 基于磁感应强度的多芯片并联IGBT模块健康状态评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [23] 秦星. 风电变流器IGBT模块结温计算及功率循环能力评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [24] 何智鹏, 李岩, 侯婷, 等. 基于等效电导率的压接型IGBT器件温度场仿真[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 19 – 24.
- HE Zhipeng, LI Yan, HOU Ting, et al. Simulation of temperature field in pressure bonded IGBT devices based on equivalent conductivity [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 19 – 24.
- [25] 侯婷, 苟浪中, 李岩, 等. 压接型IGBT在MMC系统中的电热耦合仿真[J]. 南方电网技术, 2020, 14(5): 28 – 36.
- HOU Ting, GOU Langzhong, LI Yan, et al. Electro-thermal coupling simulation of press-pack IGBT in MMC system [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(5): 28 – 36.
- [26] 唐勇, 汪波, 陈明, 等. 高温下的IGBT可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 17 – 23.
- TANG Yong, WANG Bo, CHEN Ming, et al. Reliability and online evaluation of IGBT under high temperature [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 17 – 23.
- [27] 付善灿. 纳米银焊膏无压低温烧结连接方法的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块封装应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [28] KNOERR M, KRAFT S, SCHLETZ A. Reliability assessment of sintered nano-silver die attachment for power semiconductors [C]// Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), September 10 – 11, 2010, Montreal, Canada. New York: IEEE, 2011: 1 – 10.
- [29] HASHIN Z. Reinterpretation of the palmgren-miner rule for fatigue life prediction [J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2): 446 – 447.

收稿日期: 2023-12-20; 网络首发日期: 2024-06-26

作者简介:

李盈(1994), 女, 工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术与电力电子装备, liying2014ncepu@163.com;

谭令其(1991), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为柔性直流输电与电力电子技术, abctlk2724@163.com;

马凯(1985), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为智能电网、柔性直流及电力电子技术, makai20023711@163.com。