

柔直换流阀用压接式 IGBT 器件物理场建模及内部压强分析

潘艳¹, 李金元¹, 李尧圣¹, 王鹏¹, 李辉², 姚然², 邓吉利², 龙海洋², 赖伟²

(1. 全球能源互联网研究院有限公司 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:压接式 IGBT 器件是柔性直流换流阀的核心, 器件内部压强分布直接影响器件及系统可靠性, 而内部压强又受各种材料及复合应力相互耦合作用, 针对不同应力耦合效果及其对内部压强的影响, 进行压接式 IGBT 器件物理场模型仿真以及器件内部最大压强分布趋势的研究。首先, 基于 3.3 kV/50 A 压接式 IGBT 器件实际结构, 建立了多物理场模型, 分析了机械、机-热和机-热-电不同耦合模型下器件内部压强分布的差异, 并获取了器件承受内部最大压强的薄弱环节及各种内部应力作用的耦合效果。然后, 基于机-热-电耦合模型, 分析了不同环境温度、外部压力、导通电流对压接式 IGBT 器件内部薄弱层最大压强及性能的影响。最后, 建立了压接式 IGBT 器件功率循环平台, 通过恒导通工况和功率循环实验验证了机-热-电耦合模型的有效性和薄弱层分析的合理性。研究结果表明, 机-热-电耦合模型能更好地表征压接式 IGBT 器件多应力耦合作用效果, 内部最大压强的薄弱环节为 IGBT 芯片与发射极钼层间, 且内部最大压强随环境温度、外加压力和导通电流的增加而增加。

关键词:柔性直流换流阀; 压接式 IGBT 器件; 物理场建模; 内部压强; 薄弱环节

中图分类号: TN 32

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.006

0 引言

随着高压直流输电 HVDC (High Voltage Direct Current) 系统电压等级和传输能力的提高, 柔性直流换流阀等电力电子化设备得到了广泛应用^[1-2]。相比焊接式 IGBT 功率器件, 压接式 IGBT 器件具有双面散热、短路失效模式等独特的优势, 正逐步应用于柔性直流换流阀中, 成为高压直流输电设备的核心, 势必也加大了对压接式 IGBT 器件运行可靠性的要求^[3-4]。然而, 不同于传统焊接式 IGBT 器件, 压接式 IGBT 器件的运行可靠性既受器件外部压力作用又受内部压强及电热应力影响, 尤其是压接式 IGBT 内部压强分布直接影响各层材料的电热性能^[5]。因此, 为了准确分析器件内部压强以及多应力耦合影响, 建立压接式 IGBT 器件物理场模型并揭示其内部压强变化趋势, 对提高压接式 IGBT 器件及柔性换流阀的运行可靠性具有重要的现实意义。

目前, 虽然通过建立压接式 IGBT 物理场模型开展其内部性能研究已有文献报道, 但主要侧重在压接式 IGBT 器件外部压力作用下失效模式的研究^[6-8], 如文献[6]研究了压接式 IGBT 外部施加压力和功率循环作用下, 边界处 IGBT 芯片出现边界翘曲的失效模式; 文献[7]研究了压接式 IGBT 芯片在外部压力作用和内部材料热膨胀作用下, 引起微动磨损的失效机制。上述文献虽然通过建立多物理场

耦合模型开展了失效模式的研究, 但是很少涉及压接式 IGBT 器件内部压强及在复合应力作用下的影响分析, 也未确定在内部复杂结构下受最大压强的薄弱环节。虽然近年来已有一些文献开展了压接式 IGBT 器件内部压强分布及影响的研究^[9-11], 如文献[9]研究了压接式 IGBT 不同外部压力下对内部芯片表面压强均匀度的影响; 文献[10]研究了压接式 IGBT 在外部压力一定情况下, 内部材料工艺尺寸变化对内部压强分布的影响。然而上述文献大多仅考虑压强与材料的机械应力作用, 很少分析压强与电、热应力的耦合影响, 往往导致其内部压强的分布及变化趋势分析不准确。

基于此, 为了较准确地分析压接式 IGBT 器件内部压强分布规律及受机、电、热应力耦合影响的效果, 本文从可靠性分析角度, 提出以器件内部最大压强值为指标, 建立压接式 IGBT 器件物理场模型并对器件内部最大压强分布趋势展开研究。首先, 针对不同应力耦合效果及其内部压强提取的准确分析, 进行压接式 IGBT 器件物理场模型仿真以及器件内部最大压强分布趋势的研究。首先, 基于 3.3 kV/50 A 压接式 IGBT 器件实际结构, 建立了多物理场模型, 分析了机械、机-热和机-热-电耦合模型下器件内部压强分布差异, 获取了器件承受内部最大压强的薄弱环节以及各种内部应力作用的耦合效果。然后, 基于机-热-电耦合模型, 分析了不同环境温度、外部压力、导通电流情况对压接式 IGBT 器件内部受最大压强薄弱层的影响。最后, 建立了压接式 IGBT 器件功率循环平台, 通过恒导通工况实验和功率循环实验分别验证所建耦合模型以及器件薄弱层分析的有效性。

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0901800)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2016YFB0901800)

1 压接式 IGBT 器件结构及物理场建模

1.1 压接式 IGBT 器件结构

柔性直流换流阀用压接式 IGBT 器件结构通常采用全压接型^[12],以某 3.3 kV/50 A 单芯片压接式 IGBT 器件为例,其内部材料分布和结构如图 1 所示,从上至下,主要包含电极铜板、集电极/发射极铜层、IGBT 芯片、银垫片、铜底座、栅极探针等部件,各个部件通过外部施加压力固定在支架内。

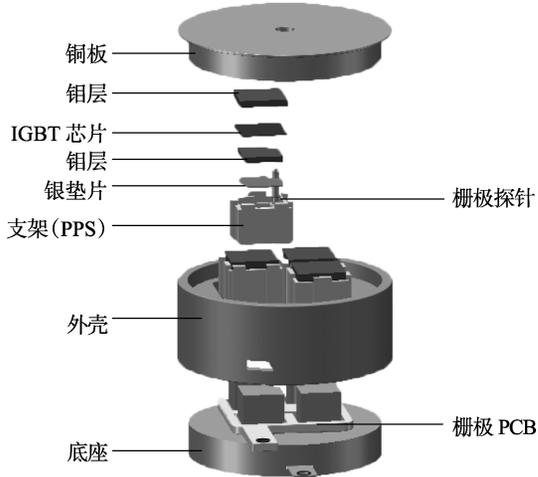


图 1 压接式 IGBT 器件结构示意图

Fig.1 Schematic of press-pack IGBT device

1.2 压接式 IGBT 器件物理场建模

考虑 COMSOL 软件采用多线程与共享内存技术可提高多物理场仿真速度的特点,以及计算内核更适用于多物理场建模的优势,本文在建立压接式 IGBT 器件物理场模型及仿真时采用了 COMSOL 软件。其建模与仿真的主要流程如图 2 所示。



图 2 压接式 IGBT 器件多物理场建模流程图

Fig.2 Flowchart of physical field modeling of press-pack IGBT

按照 3.3 kV/50 A 单芯片压接式 IGBT 器件实际结构和尺寸,采用 COMSOL 多物理场仿真软件建立器件物理场模型。为确保建模时物理场仿真的合理性,本文在仿真中考虑了以下设置。

a. 考虑压接式 IGBT 中各层材料受粗糙度、斜率、接触压力的影响,存在接触热阻、接触电阻^[13]。

$$h_c = 0.125k_s \frac{m}{\sigma} \left(\frac{P}{H} \right)^{0.95} \quad (1)$$

$$R_{\text{thermal}} = \frac{1}{Ah_c} \quad (2)$$

$$R_{\text{electrical}} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{P}} \quad (3)$$

其中, h_c 为接触导热系数; k_s 为接触界面热导率的调和平均数; m 为表面相对斜率; σ 为表面相对粗糙度; P 为接触压力; H 为材料微硬度; R_{thermal} 为接触热阻; A 为材料面积; $R_{\text{electrical}}$ 为接触电阻; ρ_1 和 ρ_2 为 2 层材料的电导率。

b. 考虑各层材料受压缩形变与热膨胀形变的耦合影响,计算模型形变^[14]。

$$l_1 - l_0 = \frac{Fl_0}{EA} \quad (4)$$

$$l_2 = l_0 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (5)$$

其中, l_0 、 l_1 、 l_2 分别为初始长度、压缩长度、热膨胀长度; F 为施加压力; E 为弹性模量; α 为热膨胀系数; T_0 、 T_1 分别为初始温度与最终温度。

c. 考虑各层材料电流热效应的电-热耦合计算,计算材料焦耳热^[15]。

$$W = \frac{U^2 Sp}{L} \quad (6)$$

其中, W 为材料焦耳热; U 为材料两端导通压降; S 为电流流过面积; ρ 为电导率; L 为电流流过材料长度。

d. 栅极 PCB、栅极探针和支架的传热以及模块外壳表面的辐射散热对模块温度分布的影响忽略不计,在几何建模时省略上述结构,同时忽略模块内部倒角、圆角等细微结构。

建立的 3.3 kV/50 A 压接式 IGBT 多物理场仿真模型如图 3 所示,为了方便叙述压接式 IGBT 力学分析,下面将图 3 中各层材料的相接触部位分为 5 层:第 1 层为集电极铜板与集电极铜层;第 2 层为集电极铜层与 IGBT 芯片;第 3 层为 IGBT 芯片与发射极铜层;第 4 层为发射极铜层与银垫片;第 5 层为银垫片与铜柱。其中内部各层材料属性、电导率、热膨

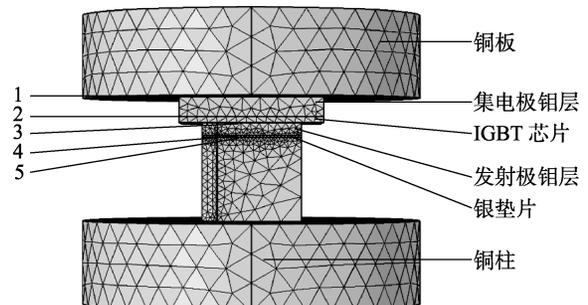


图 3 压接式 IGBT 仿真模型

Fig.3 Simulation model of press-pack IGBT

胀系数如表 1 所示^[10,16]。

表 1 压接式 IGBT 各层材料属性

层	材料	热膨胀系数/ K^{-1}	电导率/ $(S \cdot m^{-1})$
铜盖板	Cu	1.7×10^{-5}	5.998×10^7
集电极铜层	Mu	4.8×10^{-6}	1.89×10^7
硅芯片	Si	2.6×10^{-6}	90.404
发射极铜层	Mu	4.8×10^{-6}	1.89×10^7
银垫片	Ag	1.89×10^{-5}	6.16×10^7
底层铜柱	Cu	1.7×10^{-5}	5.998×10^7

2 压接式 IGBT 器件不同物理场模型仿真

2.1 仅考虑机械压力的物理场模型及仿真

为了比较不同应力耦合作用对器件内部压强的影响,本节首先分析在外加压力 1 200 N 的情况下仿真 IGBT 器件内部不同材料的最大压强分布。在本文以下的仿真设置中,集电极铜板外加压力,发射极铜柱底面固定约束,设置环境温度,集电极、发射极铜板外表面水冷散热,散热率为 $5\ 500\ W/(m^2 \cdot K)$;集电极施加导通电流,发射极接地。为了便于不同应力耦合效果的比较,可以在设置中修改环境温度、外加压力和导通电流的大小来进行仿真比较。仅考虑外加压力 1 200 N 时,压接式 IGBT 器件内部冯米斯(von Mises)等效应力分布如附录 A 中图 A1 所示。

从附录 A 图 A1 中可以看出 von Mises 等效应力主要集中在 IGBT 芯片及其发射极铜层和银垫片。为了进一步比较器件内部压强分布趋势,提取器件内部各层材料受到的压强分布如附录 A 中图 A2 所示。

从附录 A 图 A2 中可以看出,由于各层材料属性和截面积不同,器件各层间最大压强分布是不均匀的,第 1 层最大压强集中在铜盖板与集电极铜层的边缘,第 2 层最大压强集中在中心部位,第 3 层最大压强集中在芯片与发射极铜层的边缘,第 4、5 层压强均匀分布在银垫片上下两层。其中,器件内部最大压强在第 3 层位置,为 IGBT 芯片下表面与发射极铜间,可认为该处是器件内部的薄弱环节。

2.2 考虑机-热耦合场模型及仿真

为了比较机-热应力耦合作用对器件内部压强的影响,本节分析在外加压力 1 200 N 和 IGBT 芯片热源 160 W 的条件下,进行机-热应力耦合下对 IGBT 器件内部压强分布情况的仿真。压接式 IGBT 器件内部 von Mises 等效应力和整体温度分布如附录 A 中图 A3 所示。

从附录 A 图 A3 中可以看出,von Mises 等效应力和温度较高区域主要集中在芯片上下层表面。为了进一步比较器件内部最大压强分布规律及机-热耦合影响,相关机-热耦合模型对应的器件内部各层材料受到的压强分布如附录 A 中图 A4 所示。其中,第 1 层出现负数的压强,这是因为功率循环使材

料热膨胀产生向上的形变,其他各层压强分布趋势并未发生变化,器件内部最大压强位置仍然是第 3 层。与纯机械应力仿真比较,考虑机-热耦合后各层材料的最大压强值都明显增大,尤其是薄弱环节的最大压强值为仅考虑机应力时的 3 倍。

2.3 考虑机-电-热耦合场模型及仿真

为了进一步分析机-热-电应力耦合作用对器件内部压强的影响,本节分析在外加压力 1 200 N 和电流 50 A 焦耳发热的机-热-电应力作用下,仿真压接式 IGBT 器件内部各层材料受到的压强分布如附录 A 中图 A5 所示。

从附录 A 图 A5 中可以看出,在考虑机-热-电耦合情况下,第 1 层出现负数的压强,这是由于考虑机-热-电耦合情况下 IGBT 芯片因电流功率发热所致,其他各层压强分布趋势并未发生变化,而且各层压强分布、最大压强值与考虑机-热耦合时相同。但在芯片表面结温分布上出现不同,附录 A 中图 A6 显示了机-热耦合以及机-热-电耦合模型下 IGBT 芯片表面的结温分布对比。

从附录 A 图 A6 中可以看出,在机-热-电耦合模型下芯片表面温度分布,中间高边缘低;而采用机-热模型时由于简单考虑芯片热源输入,导致芯片表面温度分布出现中间低、边缘高的不合理结果。

图 4 比较了在机械、机-热和机-热-电耦合模型下器件内部各层材料受到的最大压强。

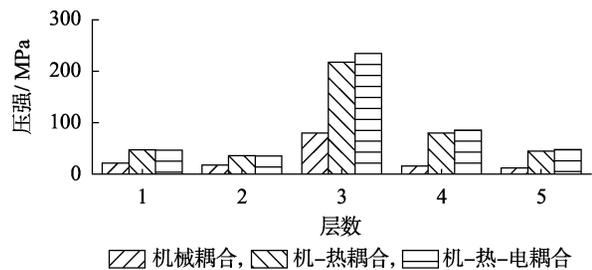


图 4 不同耦合模型下压接式 IGBT 各层最大压强分布

Fig.4 Maximum pressure distribution of each layer of press-pack IGBT with different coupling models

从图 4 中可以看出,器件内部最大压强位置是芯片下表面与发射极铜间,但是考虑机-热-电耦合后其最大压强值有所增大,其他各层材料的最大压强值也有些变化。原因是在机-热-电耦合模型中考虑电-热焦耳热后各层材料也有部分发热,而在机-热耦合模型时仅考虑了芯片为功率热源的结果。因此,从各层材料压强分布变化、芯片表面温度分布以及薄弱环节最大压强分析可以看出,机-热-电耦合模型更能表征压接式 IGBT 器件内部性能。

3 不同应力对 IGBT 器件内部性能的影响

压接式 IGBT 器件在实际工作中会受到不同环境温度、不同外加压力和不同导通电流的作用,为了

分析器件在不同应力作用下对器件内部压强和器件性能的影响,本节基于上述的机-热-电耦合模型,对不同应力作用下器件内部薄弱层最大压强分布趋势以及芯片结温和导通压降的器件性能进行了仿真分析。

3.1 不同环境温度应力对器件内部性能的影响

保持外加压力 1 200 N、额定导通电流 50 A 不变,设置环境温度从 0 到 100 °C 变化,对器件内部性能变化进行仿真,薄弱层的最大压强、芯片最高结温和器件导通压降的变化趋势如表 2 所示。

表 2 环境温度对压接式 IGBT 内部性能的影响

Table 2 Influence of ambient temperature on internal performance of press-pack IGBT

环境温度/°C	结温/°C	电压/V	压强/MPa
0	44.68	3.29	99.12
10	55.38	3.34	166.18
20	66.11	3.39	234.40
30	76.87	3.45	302.71
40	87.65	3.51	371.12
50	98.46	3.57	439.63
60	109.30	3.63	508.25
70	120.18	3.69	576.98
80	131.09	3.76	645.83
90	142.03	3.83	714.81
100	153.01	3.90	783.93

从表 2 中可以看出,随着环境温度增加,压接式 IGBT 器件薄弱层的压强大小、芯片结温最大值和导通压降也随之增加,成正相关性。此外,当环境温度在正常范围内(20 °C 左右)时,器件的芯片最高结温和饱和压降都在正常范围内,但是薄弱层的最大压强值在 200 MPa 左右,从可靠性角度,压强可作为评价器件内部材料疲劳的重要指标。

3.2 不同外加压力对器件内部性能的影响

保持环境温度 20 °C、额定导通电流 50 A 不变,设置外加压力从 1 000 N 到 2 000 N 变化,对器件内部性能变化进行仿真,薄弱层的最大压强、芯片最高结温和器件导通压降的变化趋势如表 3 所示。

表 3 外加压力对压接式 IGBT 内部性能的影响

Table 3 Influence of external force on internal performance of press-pack IGBT

施加压力/N	结温/°C	电压/V	压强/MPa
1 000	69.02	3.59	232.143 59
1 100	67.43	3.48	232.834 67
1 200	66.11	3.39	234.401 61
1 300	64.99	3.32	236.642 35
1 400	64.03	3.26	239.412 89
1 500	63.20	3.20	242.607 76
1 600	62.47	3.15	246.147 91
1 700	61.83	3.11	249.972 91
1 800	61.25	3.07	254.035 73
1 900	60.74	3.03	258.299 24
2 000	60.27	3.00	262.733 69

从表 3 中可以看出,随着外加压力的增加,压接式 IGBT 器件薄弱层的最大压强随之增加,成正相关性;芯片结温最大值和导通压降值则随之下降,成负相关性。因此,从材料可靠性角度,器件内部压强最大值更适合作为外加压力约束的一个条件。

3.3 不同电流应力对器件内部性能的影响

保持环境温度 20 °C、外加压力 1 200 N 不变,设置器件导通电流从 10 A 到 90 A 变化,对器件内部性能变化进行仿真,薄弱层的最大压强、芯片最高结温和器件导通压降的变化趋势如表 4 所示。

表 4 导通电流对压接式 IGBT 内部性能的影响

Table 4 Influence of current on internal performance of press-pack IGBT

施加压力/N	结温/°C	电压/V	压强/MPa
10	21.74	0.64	84.69
20	26.99	1.29	99.31
30	35.92	1.95	128.25
40	48.81	2.65	173.54
50	66.11	3.39	234.40
60	88.57	4.21	313.46
70	117.44	5.13	415.23
80	155.01	6.22	547.89
90	206.45	7.65	730.07

从表 4 中可以看出,随着外加导通电流增加,压接式 IGBT 器件薄弱层的最大压强、结温最大值和导通压降也随之增加,成正相关性。当导通电流大于额定电流 50 A 时,薄弱层钼层的最大压强急剧上升,可以看出,过电流很大程度上也影响器件内部薄弱层最大压强的大小。

4 实验验证

4.1 机-热-电耦合模型验证

为了验证本文建立压接式 IGBT 器件的机-热-电耦合模型有效性,本文建立了 3.3 kV/50 A 压接式 IGBT 器件(具体模块结构如附录 B 中图 B1 所示)的功率循环实验平台(具体结构如附录 B 中图 B2 所示),进行恒导通工况实验,通过由 FLIR SR7700 红外热成像仪测量器件不同温度分布进行验证。其中,实验采用夹具压力设定为 1 200 N,可编程直流电源输出电流为 50 A,环境温度为 25 °C,水冷箱冷却水温设为 17 °C。

压接式 IGBT 模块达到热稳态时的红外热成像温度分布如附录 B 中图 B3 所示。可以看出,陶瓷外壳贴近集电极部分较室温更高,外壳存在一定温升,表明部分热量通过陶瓷外壳散失。为与仿真计算结果进行对比,测量芯片、发射极、上钼片、下钼片和环境温度,如附录 B 图 B3 中区域 1—5 所示。

将实验测得热稳态时压接式 IGBT 不同结构表面的平均温度与机-热-电耦合场仿真结果进行对比,如表 5 所示。可以看出,本文建立的机-热-电物

理场耦合模型计算结果与器件实际测试温度分布基本一致,证明了机-热-电物理场耦合模型的有效性,间接证明了本文分析压接式 IGBT 器件内部压强分布及薄弱环节的有效性。

表 5 仿真与红外热成像仪测量结果对比

Table 5 Comparison of simulative results and measured results by infrared camera

位置	稳态平均温度/°C		相对误差/%
	机-热-电耦合模型结果	红外热成像仪测量结果	
上铜片侧面	57.01	58.49	2.5
芯片侧面	58.93	59.67	1.2
下铜片侧面	54.59	57.18	4.5
发射极侧面	46.26	42.25	9.5

4.2 器件内部薄弱层分析验证

为了进一步验证上述分析器件内部最大压强位置,即芯片下表面与发射极铜层间为薄弱层的结果,本文在所建立功率循环平台上对 3.3 kV/50 A 压接式 IGBT 器件进行了功率循环老化实验,拟验证获得的薄弱层是否会出现初始失效。

被选用的实际压接式 IGBT 器件经过 12 000 次功率循环后,进行显微镜观察,发现其芯片下表面出现了裂纹,功率循环前后的结果比较如附录 B 中图 B4 所示。而此时器件结温和饱和压降都在正常范围内,因此,导致其裂纹出现的原因可能是器件内部的最大压强,且出现的裂纹位置进一步证明了本文分析薄弱环节的有效性。

5 结论

本文以实际柔性直流换流阀用压接式 IGBT 器件为对象,建立了考虑接触热阻、电阻,机-热耦合形变,电流焦耳热的器件多物理场模型,比较了机、机-热和机-热-电不同耦合模型下器件内部压强分布的差异,提取了器件内部各层的最大压强,分析了不同温度、外加压力和导通电流下器件内部薄弱环节最大压强的变化趋势以及对器件结温和导通压降等性能的影响规律,通过功率循环实验验证了建模结果。得到以下主要结论。

a. 在外加压力一定的情况下,压接式 IGBT 器件内部压强分布会受器件机、热、电应力的影响而增加,有必要考虑机-热-电耦合模型进行压接式 IGBT 器件内部压强和性能分析。

b. 压接式 IGBT 器件内部最大压强分布位置为芯片与发射极铜层间,其次为 IGBT 芯片与集电极铜层间,从材料屈服疲劳等效应力角度,压接式 IGBT 器件芯片下表面为薄弱层,在器件可靠性设计和运行监测时有必要给予重视。

c. 压接式 IGBT 器件薄弱层最大压强值随环境温度、外加压力和导通电流的增加而增加,而器件结

温和导通压降会随外加压力增加而减少。从器件可靠性角度,压接式 IGBT 器件内部薄弱层最大压强值的变化可作为内部材料疲劳判断的重要指标。

d. 通过压接式 IGBT 器件功率循环平台,验证了本文建立的机-热-电耦合模型有效性,以及器件内部最大压强位置为薄弱层分析的合理性。

上述结论为换流阀用压接式 IGBT 器件设计、优化和运行提供了一定支撑,但是实际压接式 IGBT 器件结构复杂,而且需要考虑多芯片结构和材料差异等因素,因此如何准确计算压接式 IGBT 器件内部性能和测试,还有待进一步深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):3-14.
- [2] 胡文旺,唐志军,林国栋,等. 柔性直流输电工程系统调试技术应用、分析与改进[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):197-209.
HU Wenwang, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Application, analysis and improvement of system commissioning technology for flexible DC transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):197-209.
- [3] 赵东元,刘江. 压接式 IGBT 在电力系统应用特性分析[J]. 电力电子技术,2015,49(12):46-48.
ZHAO Dongyuan, LIU Jiang. Application analysis of the press-pack IGBT in the power electronic field[J]. Power Electronics, 2015, 49(12):46-48.
- [4] 李辉,白鹏飞,李洋,等. 抑制 IGBT 器件结温的双馈风电变流器分段 DSVPM 策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):37-43.
LI Hui, BAI Pengfei, LI Yang, et al. Segmented DSVPM strategy to depress IGBT junction temperature of wind-power converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):37-43.
- [5] DENG Erping, ZHAO Zhibin, XIN Qingming, et al. Analysis on the difference of the characteristic between high power IGBT modules and press pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 78:25-37.
- [6] TINSCHERT L, ÅRDAL A R, POLLER T, et al. Possible failure modes in press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6):903-911.
- [7] FRANK Ø B. Power cycle testing of press-pack IGBT chips[D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [8] DENG Erping, ZHAO Zhibin, XIN Qingming, et al. Analysis on the difference of the characteristic between high power IGBT modules and press pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2017, 78:25-37.
- [9] POLLER T, D'ARCO S, HERNES M, et al. Influence of the clamping pressure on the electrical, thermal and mechanical behaviour of press-pack IGBTs[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(9-11):1755-1759.
- [10] 邓二平,赵志斌,张朋,等. 压接型 IGBT 器件内部压力分布[J].

- 电工技术学报,2017,32(6):201-208.
- DENG Erping,ZHAO Zhibin,ZHANG Peng, et al. Clamping force distribution within press pack IGBTs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(6):201-208.
- [11] POLLER T,BASLER T,HERNES M, et al. Mechanical analysis of press-pack IGBTs [J]. Microelectronics Reliability,2012,52(9-10):2397-2402.
- [12] 窦泽春,刘国友,陈俊,等. 大功率压接式 IGBT 器件设计与关键技术[J]. 大功率变流技术,2016(2):21-25.
- DOU Zechun,LIU Guoyou,CHEN Jun, et al. Design and key technologies of high-power press-pack IGBT device [J]. High Power Converter Technology,2016(2):21-25.
- [13] DENG Erping,ZHAO Zhibin,ZHANG Peng, et al. Study on the methods to measure the junction-to-case thermal resistance of IGBT modules and press pack IGBTs [J]. Microelectronics Reliability,2017,79:248-256.
- [14] 陈卫东,陈浩,于艳春. 有限体积法的弹性结构动力学随机分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(11):1447-1451.
- CHEN Weidong,CHEN Hao,YU Yanchun. Dynamic stochastic analysis of an elastic structure based on the finite volume method [J]. Journal of Harbin Engineering University,2011,32(11):1447-1451.
- [15] 米林,杨德兴,姜亚军,等. 基于焦耳热的光纤布喇格光栅电压传感器研究[J]. 光子学报,2014,43(9):906005-1-5.

MI Lin,YANG Dexing,JIANG Yajun, et al. Investigation of FBG voltage sensor based on joule heat [J]. Acta Photonica Sinica,2014,43(9):906005-1-5.

- [16] BUSCA C,TEODORESCU R,BLAABJERG F, et al. Dynamic thermal modelling and analysis of press-pack IGBTs both at component-level and chip-level [C] // IECON 2013,39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE,2013:677-682.

作者简介:



潘 艳

潘 艳(1969—),女,北京人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为大功率电力电子技术及其在电力系统中的应用 (E-mail:panyan@geiri.sgcc.com.cn);

李金元(1976—),男,北京人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为灵活交流输电、大功率电力电子器件与试验技术

(E-mail:lijinyuan@geiri.sgcc.com.cn);

李尧圣(1988—),男,北京人,工程师,硕士,主要研究方向为电力电子器件可靠性试验与分析 (E-mail:18501342756@163.com)。

Physical field modeling and internal pressure analysis of press-pack IGBT device based VSC-HVDC converter

PAN Yan¹,LI Jinyuan¹,LI Yaosheng¹,WANG Peng¹,LI Hui²,
YAO Ran²,DENG Jili²,LONG Haiyang²,LAI Wei²

(1. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Press-pack IGBT device is the core of the VSC-HVDC converter, the pressure distribution inside the device directly influences the reliability of the device and the converter system, and the internal pressure is coupled by various materials and composite stresses in IGBT devices. According to different stress coupling effects and their influences on internal pressure, the physical field model simulation of press-pack IGBT device is carried out and the trend of maximum internal pressure distribution in the device are studied. Firstly, based on the actual structure of 3.3 kV/50 A press-pack IGBT device, a multi-physical field model is established, and the difference of pressure distribution in the device under different coupling models of mechanical, mechanical-thermal and mechanical-thermal-electrical types is analyzed, and the weak layers of the device withstanding the maximum internal pressure and the coupling effects of various internal stresses are obtained. Secondly, based on the mechanical-thermal-electrical coupling model, the influence of different ambient temperatures, external pressure and current values on the maximum pressure and performance of the internal weak layer of press-pack IGBT devices are analyzed. Finally, a power cycle platform of the press-pack IGBT device is established, and the validity of the mechanical-electrical-thermal coupling model and the rationality of weak layer analysis are testified by the power cycle experiments. The results show that the mechanical-thermal-electrical coupling model can be better used to present the performance of the press-pack IGBT device with the multi-stress mutual coupling effect. The internal maximum pressure weak layer is between IGBT chip and emitter molybdenum layer, and the internal maximum pressure is increased along with the increase of ambient temperature, external pressure and conduction current.

Key words: VSC-HVDC converter; press-pack IGBT device; physical field modeling; internal pressure; weak layer

附录 A

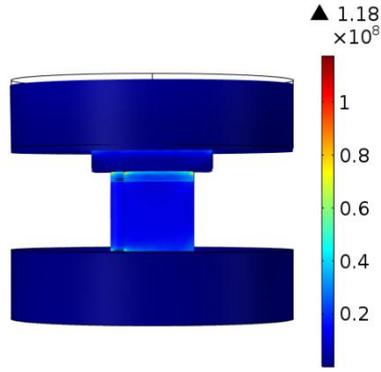


图 A1 压接式 IGBT 器件内部 von Mises 等效应力分布

Fig.A1 Internal von Mises equivalent stress distribution in press-pack IGBT devices

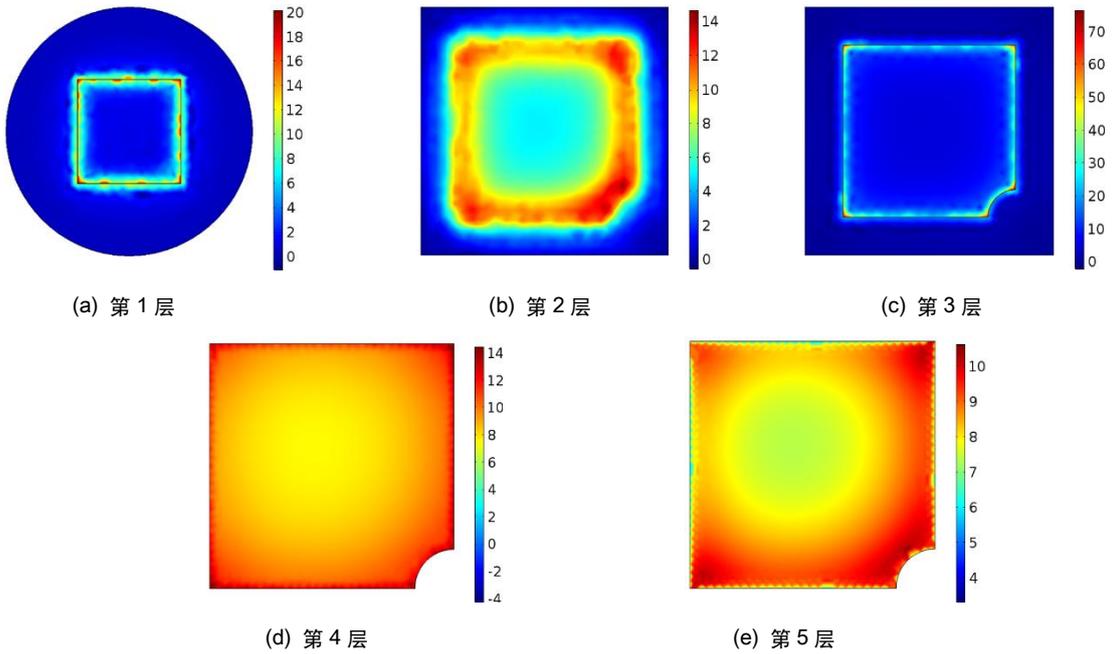


图 A2 外加 1200N 下压接式 IGBT 各层压强分布

Fig.A2 Pressure distribution of each layer of press-pack IGBT under 1200N external force

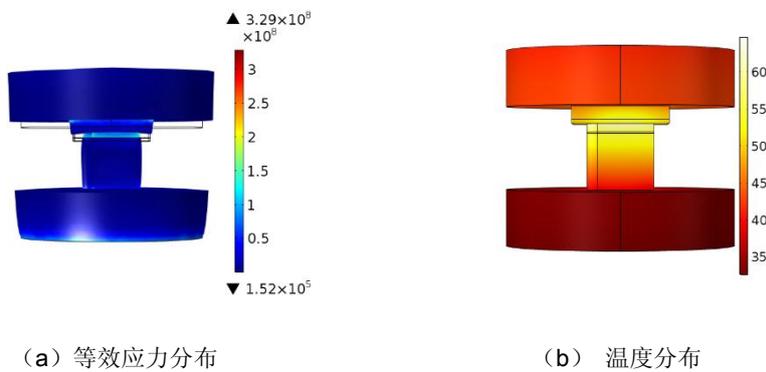


图 A3 机-热耦合 IGBT 内部 von Mises 等效应力与温度分布

Fig.A3 Internal von Mises equivalent stress and thermal distribution in press-pack IGBT devices by considering mechanical-thermal coupling

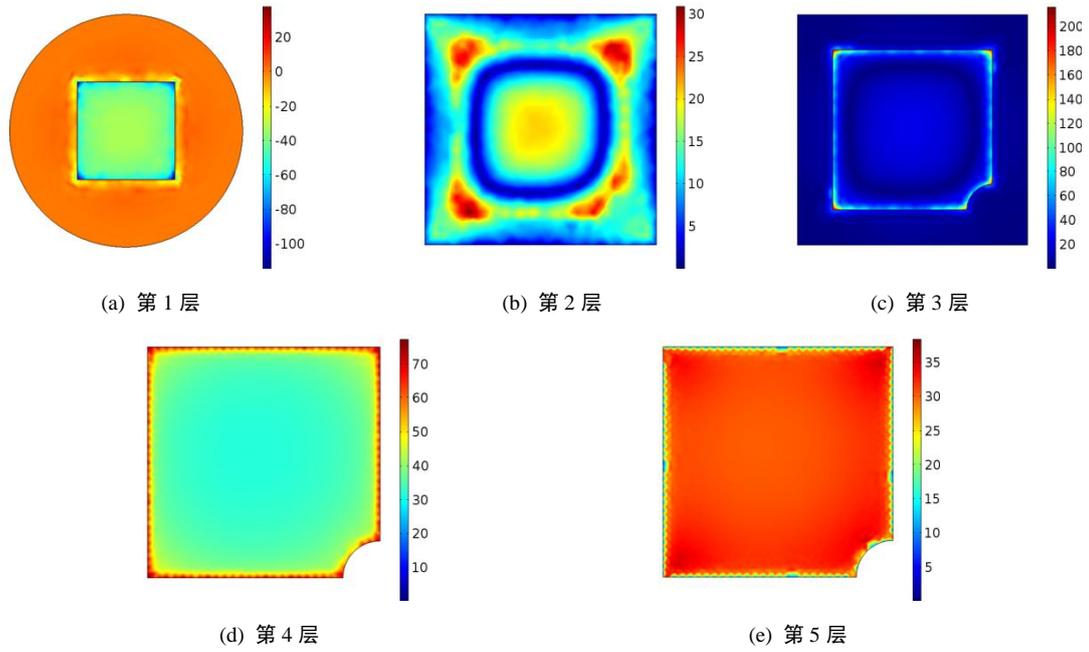


图 A4 机-热耦合下压接式 IGBT 各层压强分布

Fig.A4 Pressure distribution of each layer of press-pack IGBT by considering mechanical-thermal coupling

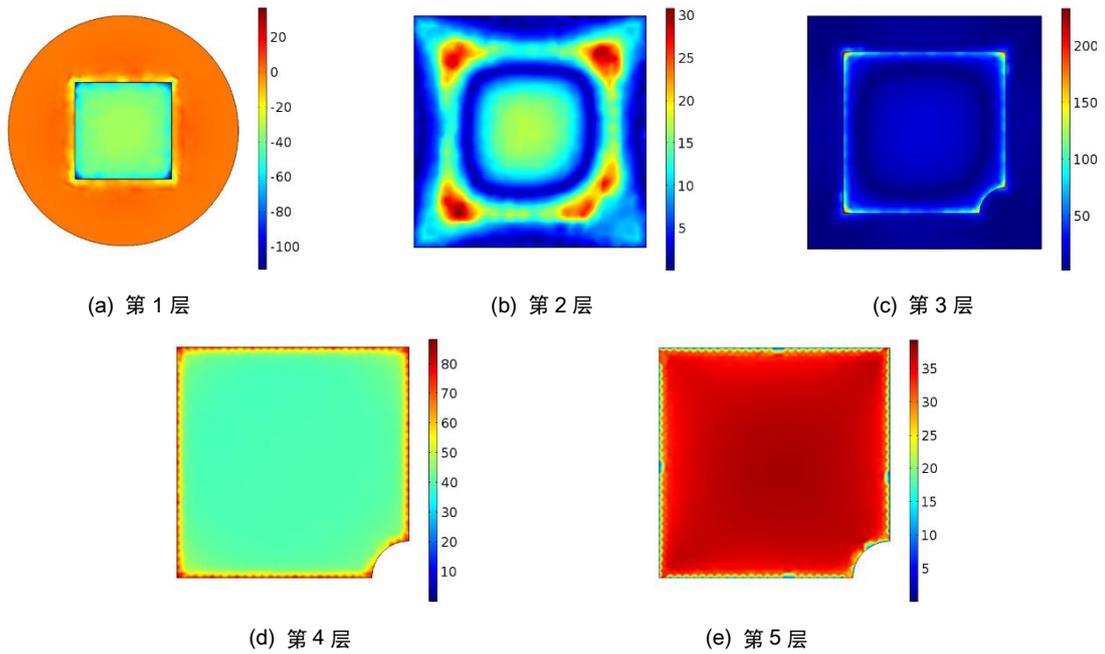
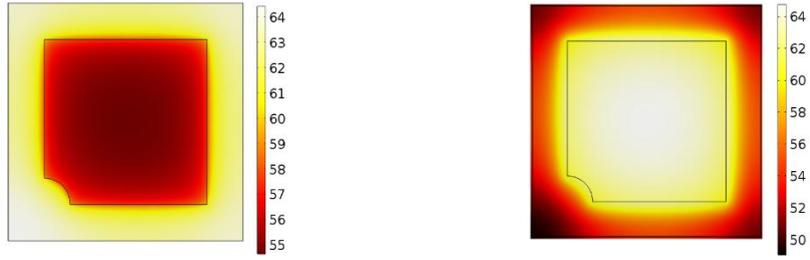


图 A5 机-热-电耦合下压接式 IGBT 各层压强分布

Fig.A5 Pressure distribution of each layer of press-pack IGBT by considering mechanical-thermal-electric coupling



(a) 机-热耦合

(b) 机-热-电耦合

图 A6 不同耦合模型下芯片表面温度分布

Fig.A6 Surface temperature of IGBT chip by using different coupling models

附录 B

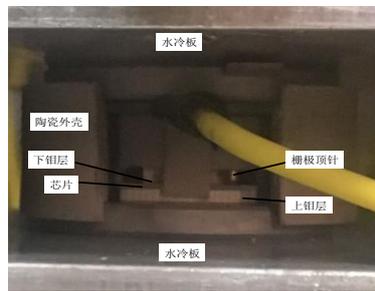


图 B1 3.3kV/50A 压接式 IGBT 模块

Fig.B1 3.3kV/50A press-pack IGBT module



图 B2 功率循环实验平台

Fig.B2 Power cycle testing platform

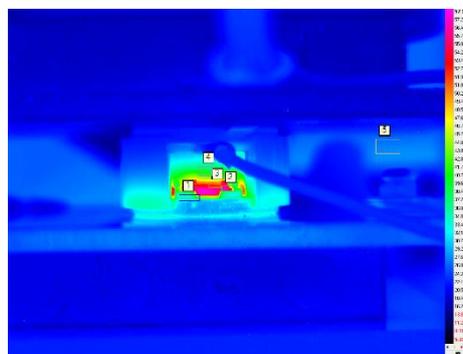


图 B3 热稳态时 IGBT 模块红外成像温度测量结果

Fig.B3 Temperature measuring results of IGBT module by infrared camera when reaching steady state



(a) 功率循环前芯片



(b) 功率循环后芯片

图 B4 功率循环前后芯片实际效果

Fig.B4 Real results of IGBT with and without power cycle