DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.014　　文章编号：1000-128X(2023)05-0130-09

焊料空洞对 IGBT 模块功率循环寿命的影响

刘　鹏[1]，邓二平[2]，周望君[3]，陈　杰[3]，黄永章[1]
（1.新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学），北京　102206；
2.合肥工业大学 电气与自动化工程学院，安徽 合肥　230009；
3.株洲中车时代半导体有限公司，湖南 株洲　412001）

摘　要：焊料空洞作为焊接层缺陷，对IGBT模块功率循环寿命影响尚且未知，研究焊料寿命影响因素对于提高IGBT模块可靠性具有重要意义。考虑到IGBT模块制造过程中出现的工艺空洞具有随机大小和随机未知的特征，文章针对不同空洞率的双面散热IGBT模块开展同一试验条件下的功率循环试验。试验结果发现，空洞率越高，待测器件的功率循环寿命越短。为了揭示其影响原理，文章建立了具有不同空洞率的IGBT模块三维有限元模型，并且构建的空洞具有与实际工艺造成的空洞相符合的随机大小和随机位置的特征。通过有限元仿真发现，空洞率越高，焊料层和芯片的最高温度越高，引起的黏塑性应变越大，因此其功率循环寿命越短。基于功率循环试验和疲劳仿真结果，IGBT模块焊接层空洞率极限推荐值为3%，该研究成果可为IGBT模块焊料空洞筛选步骤提供参考。

关键词：功率循环寿命；焊料空洞；空洞率；有限元仿真；随机大小；随机位置
中图分类号：TN325⁺.2　　**文献标识码：**A

Study on influence of solder voids on power cycling lifetime of IGBT module

LIU Peng[1], DENG Erping[2], ZHOU Wangjun[3], CHEN Jie[3], HUANG Yongzhang[1]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China; 3. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Studying the influencing factors of solder lifetime is of great significance to improve the reliability of IGBT modules, but the influence of solder voids as a solder layer defect on the power cycling lifetime of IGBT modules is still unknown. Considering that the process voids generated in the IGBT module manufacturing process have random size and random unknown characteristics, power cycling tests were conducted under the same test conditions for double-sided cooled IGBT modules with different void ratios. The test results show that the higher the void ratio, the shorter the power cycling lifetime of the device under test. In order to reveal its influence mechanism, a three-dimensional finite element model of IGBT modules with different void ratios was established, and the voids built have random size and random position characteristics consistent with the actual process voids. Through finite element simulation, it is found that the higher the void ratio, the greater the maximum temperature of the solder layer and the chip, and the greater the viscoplastic strain caused, so the power cycling life is shorter. According to the power cycling test and fatigue simulation results, the recommended limit value for the void ratio of the IGBT module solder layer is 3%. The research results can provide guidance for the screening steps of solder voids of IGBT modules.

Keywords: power cycling lifetime; solder void; void ratio; finite element simulation; random size; random position

---

基金项目：国家自然科学基金项目（52007061）
通信作者：邓二平（1989—），男，博士，教授，博士生导师，主要从事功率半导体器件方面的研究；E-mail: erping.deng@hfut.edu.cn
引用格式：刘鹏, 邓二平, 周望君, 等. 焊料空洞对IGBT模块功率循环寿命的影响[J]. 机车电传动, 2023(5): 130-138.
Citation: LIU Peng, DENG Erping, ZHOU Wangjun, et al. Study on influence of solder voids on power cycling lifetime of IGBT module[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 130-138.

0　引言

绝缘栅双极性晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）已广泛应用于轨道交通、新能源汽车和智能家电等领域，其可靠性关系整个运行系统的稳定性。因此，针对IGBT模块开展一系列可靠性测试，其中功率循环测试是考核IGBT模块封装可靠性中最重要的测试，通过一定程度的加速老化手段提前暴露器件封装薄弱点，有助于改进器件的封装结构，提升可靠性；此外，还可以构建IGBT寿命模型[1]。

IGBT模块的多种寿命模型（如CIPS08寿命模型[2]）均表明，结温波动和结温是影响其寿命的主要因素。通过降低IGBT模块封装热阻从而降低工作结温，能够显著提高IGBT模块的工作寿命。在IGBT模块中，芯片焊料和系统焊料作为芯片、覆铜陶瓷板（Direct Bonded Copper, DBC）和基板之间的连接层，是热量向下耗散的重要一环。然而，相关研究表明[3]，焊料空洞的出现阻碍了热流向下传递，增加了散热路径上的热阻，造成IGBT模块结温升高，进而影响了IGBT模块的可靠性。此外，空洞的存在影响了焊料的机械稳定性，其位置往往也是裂纹萌发和扩展的起点。

国内外不少学者针对焊料空洞对IGBT模块的影响进行了研究。文献[4]通过仿真研究发现芯片焊料空洞对IGBT模块热性能影响高于系统焊料空洞，并且不同空洞位置影响模块结温和最大等效应力分布。文献[5]仿真发现，对于单空洞模型，对角线上空洞对结温影响最大；对于多空洞模型，中心集中分布情况对结温影响较大。文献[6-7]研究发现大面积中心焊料空洞对功率器件热阻有显著影响，并且相比于系统焊料空洞，芯片焊料空洞使结温和热阻值增加明显。

上述国内外研究主要分析了焊料空洞位置、大小和空洞率对于IGBT模块结温、热阻和热应力等方面的影响，对于指导IGBT模块的制造提供了一定的参考。但同时也存在以下局限性：第一，在模块制造过程中，由于工艺问题产生的空洞是焊料空洞的主要形成方式，通常是回流焊过程中助焊剂高温裂解时产生的气体未及时排出而产生的。工艺空洞的形成通常具有随机大小和随机位置的特征，目前相关研究往往只考虑了单一空洞或者多空洞规律分布情况，与实际空洞大小位置特征具有一定差别，准确性值得探究。第二，上述研究大多通过仿真手段分析了焊料空洞对IGBT模块热性能的影响，但针对焊料空洞对IGBT模块的功率循环寿命研究暂时处于空白状态，特别在试验研究方面，上述研究的定量分析对IGBT模块的工艺判断的准确性值得考虑。

针对上述研究的局限性，本文首先定制了具有不同焊料空洞率的双面散热IGBT模块（Double-sided Cooling IGBT Module, DSC IGBT），并开展了相同结温条件下的功率循环试验，而且DSC IGBT模块中的焊层空洞具有随机大小和随机位置特性，符合实际情况。对于功率半导体器件的封装工艺，一般要求单个焊接空洞率不大于1%，总的空洞率不大于3%，为了更好地匹配实际情况和分析不同空洞率的影响，试验设置了焊料的空洞率为2%~6%。随后建立了典型IGBT模块三维有限元模型，进行相同条件下的功率循环有限元仿真，解释了焊料空洞对IGBT模块的功率循环寿命影响原理，并进行了极限空洞率界定。该研究成果可为IGBT模块制造过程中焊层空洞率筛选步骤提供指导。

1　功率循环试验

1.1　试验器件

由于焊料空洞是焊接层的缺陷部位，对焊接层具有直接影响。为了能通过试验直观反映焊料空洞对焊料的影响作用，本文选择750 V/400 A DSC IGBT半桥模块作为试验器件，其垂直结构图如图1所示。DSC IGBT模块通过垫高代替键合线导通电流，不仅可降低寄生电感，而且消除了键合线失效模式，所以封装失效上只存在焊料失效模式。对DSC IGBT模块的研究表明[8]，在功率循环过程中芯片产生的热量更多从底面耗散，造成焊料3温度梯度远远大于焊料2，这导致3层焊料中一般为焊料3率先老化，其次是焊料2，而焊料1距离芯片较远，在功率循环过程中基本不会老化。因此，本文的6个待测器件在制造过程中保持焊料1和焊料2无空洞，焊料3产生随机大小、随机位置与不同空洞率的空洞。为了避免热耦合对功率循环试验结果产生影响，6个待测器件只对上桥臂进行测试。利用超声波扫描显微镜（Scanning Acoustic Microscope, SAM）得到各个器件上桥臂焊料1、焊料2和焊料3图像，如图2所示。由图2可知，焊料3具有较多空洞，并且空洞大小位置随机分布；而焊料2和焊料1较为完整，几乎没有空洞。需要注意的是，焊料2上黑色细条纹是扫描时焊料3空洞产生的倒影。利用Image pro软件统计空洞面积，定义空洞率为空洞面积与焊料总面积之比，最后得到6种不同空洞率的DSC IGBT模块，如图3所示。

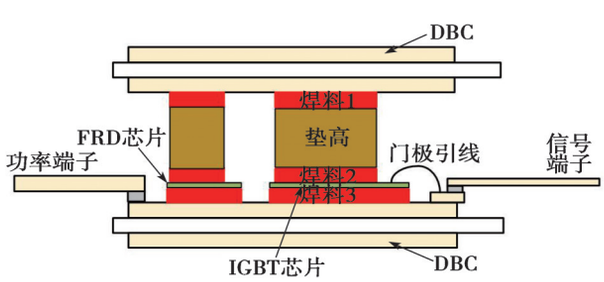
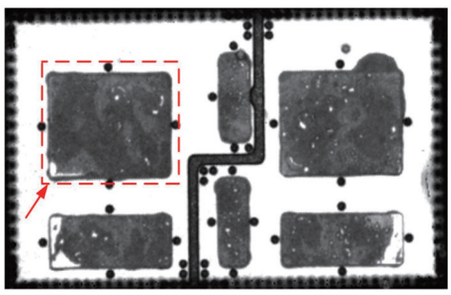
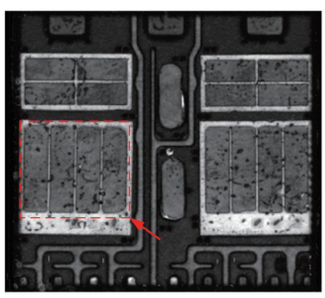


图1　DSC IGBT模块垂直结构图

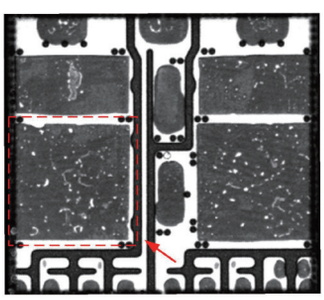
Fig. 1　Schematic diagram of vertical structure of DSC IGBT module



(a) 焊料 1



(b) 焊料 2



(c) 焊料 3

图 2　DSC IGBT 模块焊料层 SAM 图像（G_6）

Fig. 2　SAM image of solder layer of DSC IGBT module (G_6)

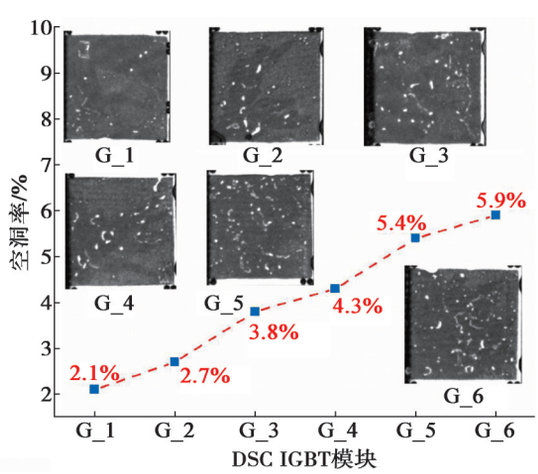


图 3　不同空洞率的 DSC IGBT 模块(焊料 3)

Fig. 3　DSC IGBT modules with different void ratios(solder 3)

1.2　试验设计

为了研究不同焊料空洞对 DSC IGBT 模块功率循环寿命的影响，采用控制变量法，控制与 IGBT 模块功率循环寿命有关的测试试验条件保持一致。不少学者和厂商通过进行大量的功率循环试验得出 IGBT 模块的寿命影响因素，以及众多经验寿命模型，其中以 CIPS08 寿命模型最为常用[2]，其数学表达式为

$$N_{\mathrm{f}}=K\cdot\Delta T_{\mathrm{j}}^{\beta_1}\cdot \mathrm{e}^{\frac{\beta_2}{T_{\mathrm{j\,min}}+273}}\cdot t_{\mathrm{on}}^{\beta_3}\cdot I^{\beta_4}\cdot V^{\beta_5}\cdot D^{\beta_6} \tag{1}$$

式中：ΔT_{j} 为测试时 IGBT 模块的结温波动；$T_{\mathrm{j\,min}}$ 为测试的最低结温；t_{on} 为测试时 IGBT 模块的开通时间；I 为流过单个键角电流大小；V 为芯片电压等级；D 为键合线直径；K、β_1、β_2、β_3、β_4、β_5、β_6 为通过大量试验数据拟合得到的系数，其中 K =9.30×10^{14}、β_1=−4.416、β_2=1 285、β_3=−0.463、β_4=−0.716、β_5=−0.761、β_6=−0.5。

从式(1)以及其拟合系数可以看出，影响 IGBT 模块寿命最主要的测试条件因素为结温波动 ΔT_{j}，其次是最低结温 $T_{\mathrm{j\,min}}$，最后是流过单个键角电流大小 I 和开通时间 t_{on}。需要注意的是，由于最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}=T_{\mathrm{j\,min}}+\Delta T_{\mathrm{j}}$，即最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}$ 与结温波动 ΔT_{j} 存在相关性。CIPS08 寿命模型为了能单独体现寿命与测试结温相关性，使用最低结温 $T_{\mathrm{j\,min}}$ 代替最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}$ 作为结温变量，但进行功率循环【‘试验设计时结温变量通常使用最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}$。此外，CIPS08 寿命模型中 β_4 反映的是寿命和流过单个键角电流大小 I 的关系，但本质上反映的是寿命与测试总负载电流 I_{load} 的关系。因此，控制 6 个待测器件 4 个影响因素相同（即结温波动 ΔT_{j}≈100 K、最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}$≈150 ℃、负载电流 I_{load}=392 A、开通时间 t_{on}=1 s）。由于各个器件涂抹的导热硅脂厚度不能保证完全一致，以及可能存在的安装误差，导致 6 个待测器件的试验条件很难保持完全一致，本文在试验时通过调节待测器件的门极电压来保证试验的 6 个待测器件的结温波动相同，这也是 AQG324 标准推荐的试验方法。为了提高测试效率，设置了 3 条测试支路，每 2 个器件串联作为 1 条支路。当 1 条支路上的待测器件被负载电流加热时，另外 2 条支路上的器件同时被冷却，因此试验中冷却时间 t_{off} 是开通时间 t_{on} 的 2 倍[9]。

由于功率循环试验时最高结温 $T_{\mathrm{j\,max}}$ 是测试延时后测得的结温值，因此本文使用 ΔZ_{th} 进行测量延时（t_{md}=260 μs）时间内的结温反推[10]，得到延时阶段结温下降约 4 K，最后得到 6 个器件的试验条件如表 1 所示。

表 1　6 个待测器件的测试条件

Table 1　Test conditions for six devices under test

参数名称	模块 G_1	模块 G_2	模块 G_3	模块 G_4	模块 G_5	模块 G_6
ΔT_{j}/K	102.51	102.47	103.75	105.12	105.82	104.07
$T_{\mathrm{j\,max}}$/℃	151.21	152.67	154.75	154.12	154.82	152.07
V_{GE}/V	17.0	15.8	12.5	12.5	12.5	15.5
t_{on}/s	1	1	1	1	1	1
t_{off}/s	2	2	2	2	2	2
I_{load}/A	382	382	382	382	382	382

对于待测器件的失效判据，由于焊料既是导热路

径的一部分，又是导电路径的一部分，焊料裂纹产生也会导致“集电极-发射极”之间的饱和电压$V_{\mathrm{CE\,sat}}$上升，因此仍然采用传统的失效判据标准——$V_{\mathrm{CE\,sat}}$的变化量$\Delta V_{\mathrm{CE\,sat}}$增长达到初始值的5%或者芯片PN结与冷却液之间的热阻变化量$\Delta R_{\mathrm{th\,j_w}}$增长达到初始值的20%，即认为待测器件失效[11]，并将此时的功率循环次数作为该器件的寿命。

1.3　试验结果

1.3.1　热特性对比

图4为在功率循环测试前，基于同一测试条件下不同空洞率的DSC IGBT模块瞬态热阻曲线。从图4可以看出，各条曲线从0.001 s后就开始分离，这表明热流经过焊料层时遇到的阻力有所差异，主要原因为空洞会阻碍热流的传递，导致焊料层有效导热面积减小，热阻增加。从图4中的放大图还可以看出，空洞率越大，对应焊料层热阻越大。值得注意的是，器件最后得到的稳态值还与实际安装条件有关，但从器件内部热阻来看，空洞率越大，热阻越大。

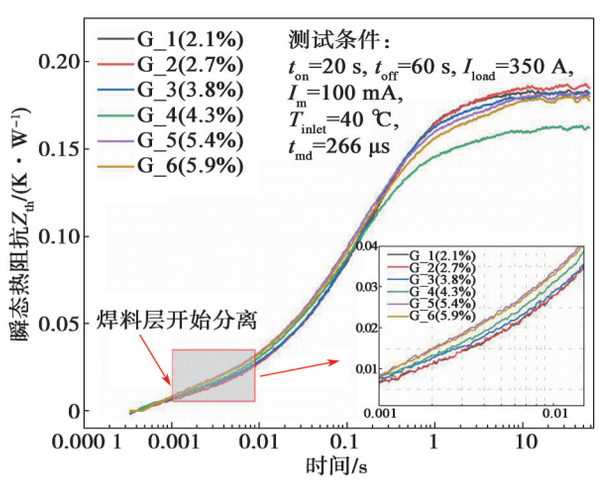


图4　不同空洞率的DSC IGBT模块瞬态热阻曲线

Fig. 4　Transient thermal impedance curves of DSC IGBT modules with different void ratios

1.3.2　功率循环结果

在功率循环过程中，6个DSC IGBT模块的$R_{\mathrm{th\,j_w}}$和$V_{\mathrm{CE\,sat}}$如图5所示。由图5可知，除了器件G_6的$V_{\mathrm{CE\,sat}}$先达到失效标准外，其他器件均是$R_{\mathrm{th\,j_w}}$先达到失效标准；G_6的饱和电压$V_{\mathrm{CE\,sat}}$在后期出现明显振荡，该试验现象与文献[12]介绍的DSC IGBT模块在功率循环试验中$V_{\mathrm{CE\,sat}}$出现的振荡现象一致。因此，推断IGBT模块焊料层内部较早出现了裂纹，裂纹的存在增加了导电路径上的电阻，导致功率循环试验中监测的$V_{\mathrm{CE\,sat}}$上升，因此率先达到失效标准，而且当$V_{\mathrm{CE\,sat}}$达到失效标准时，热阻$R_{\mathrm{th\,j_w}}$也很快呈现指数增长趋势，这表明此时的焊料老化也很严重。焊料老化后裂纹的扩展过程也是导致$V_{\mathrm{CE\,sat}}$呈现剧烈波动的主要原因。

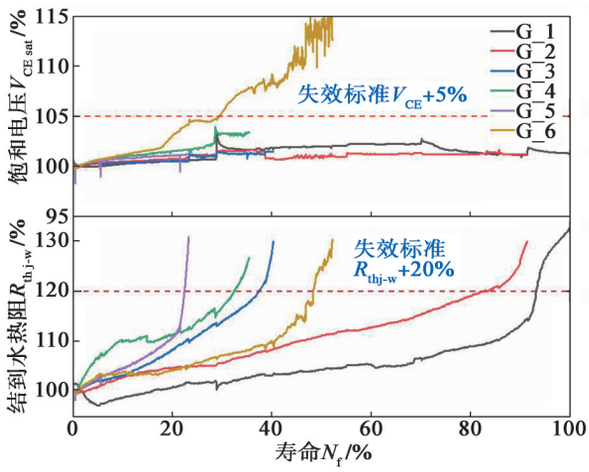


图5　功率循环试验中$R_{\mathrm{th\,j_w}}$和饱和电压$V_{\mathrm{CE\,sat}}$的变化

Fig. 5　Variation of $R_{\mathrm{th\,j_w}}$ and saturation voltage $V_{\mathrm{CE\,sat}}$ during power cycling test

本文将6个器件的功率循环寿命通过CIPS08寿命模型校准到同一条件（$T_{\mathrm{j\,max}}$=150 ℃，ΔT_{j}=100 K）下，以G_1器件的寿命为归一化基准值，对其他5个器件寿命做归一化处理，处理结果如图6所示。由图6可知，随着空洞率的增加，功率循环寿命逐渐降低，其中G_4、G_5和G_6寿命较短，平均寿命仅为G_1的30%，而且G_5的寿命最短，仅为G_1寿命的28%；当空洞率超过2.7%后，功率循环寿命迅速下降。在功率循环过程中，焊料老化分为裂纹形成和裂纹扩展2个过程，前者占到整个寿命周期的90%以上，裂纹形成后一旦进入扩展阶段，热阻会呈现指数函数增长趋势，直至达到失效标准，如图5所示。因此，焊料的寿命长短主要取决于裂纹形成的时间。焊料裂纹的形成过程与温度有直接关系，温度越高，焊料的塑性应变越剧烈，其裂纹形成过程越短。前文提及，空洞内主要为空气，其热导率仅为0.002 3 W/(m·K)，严重阻碍了热量向下耗散，导致焊层与芯片局部温度升高。从图7各个器件的最大结温变化可以看出，器件G_4、G_5和G_6空洞率较高，前期结温增加速度远远高于G_1和G_2，导致在功率循环开始后焊料的温度较高。因此，G_4、G_5和

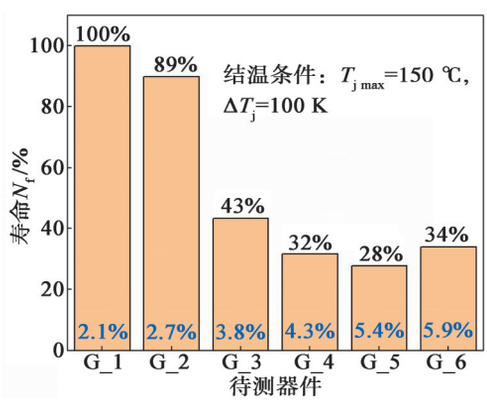


图6　不同空洞率的DSC IGBT模块功率循环寿命

Fig. 6　Power cycling lifetime of DSC IGBT modules with different void ratios

G_6率先形成裂纹，其功率循环寿命也越短。需要进一步说明的是，G_6之所以在功率循环过程中发生电气振荡现象，是因为其失效机理发生了改变，不同于其他模块的焊料老化失效，因此不严格符合空洞率越大，寿命越低的规律。同时，样品间存在的些许差异也会影响最终的测试结果。

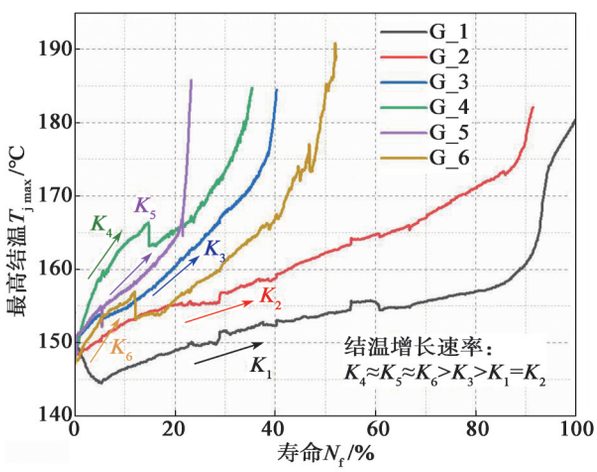


图7　功率循环试验中$T_{j\,max}$变化

Fig. 7　$T_{j\,max}$ trends of the devices during power cycling test

2　功率循环仿真分析

通过上述功率循环试验可以发现，焊料空洞率对IGBT模块功率循环寿命有显著影响：焊料空洞率越大，功率循环寿命越短。这主要是由于在功率循环过程中焊料高空洞率造成模块内部结温和焊料温度上升过快，进而影响IGBT模块的功率循环寿命，但功率循环试验往往难以监测模块内部温度和应力应变的分布，而三维有限元仿真可以解决这一问题。本章将基于标准IGBT模块，同样构建随机大小、随机位置的焊料空洞，并通过功率循环仿真分析焊料空洞率对模块的温度、应变和疲劳寿命的影响。

2.1　仿真模型

2.1.1　焊料空洞构建

工艺焊料空洞形成过程往往具有随机大小、随机位置和外形规则不一的特征。为简化建模过程，本文中的空洞均设置为圆形、贯穿焊料层，研究表明芯片焊料空洞对模块的危害远远大于系统焊料层[3-5]，因此本文只对芯片焊料层进行空洞建模。利用Digimat软件构建二维随机空洞焊料层平面，使空洞大小、位置随机分布。对于最大空洞直径的确定，从6个试验器件的焊料3 SAM图中得到单个最大空洞率为0.3%左右，并以单个空洞率不大于0.3%为基础，计算得到最大空洞直径为0.74 mm，同时考虑到空洞太小不利于网格划分和仿真收敛，本文设置最小空洞直径为0.10 mm，因此空洞直径在0.10~0.74 mm内变化。图8所示为空洞率为3%的焊层平面。分别构建空洞率为1%、3%和6%的焊层平面，然后代入COMSOL软件拉伸处理，并构建IGBT模型进行“热–力–疲劳”仿真。

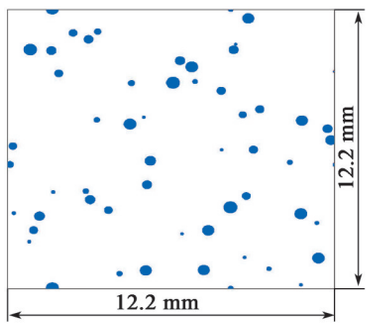


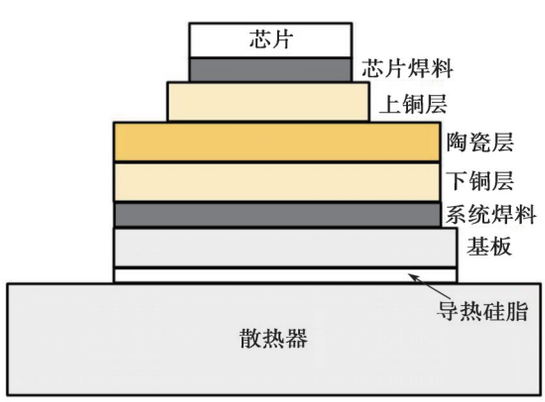
图8　空洞率为3%的芯片焊料层平面

Fig. 8　Plane of chip solder layer with void rate of 3%

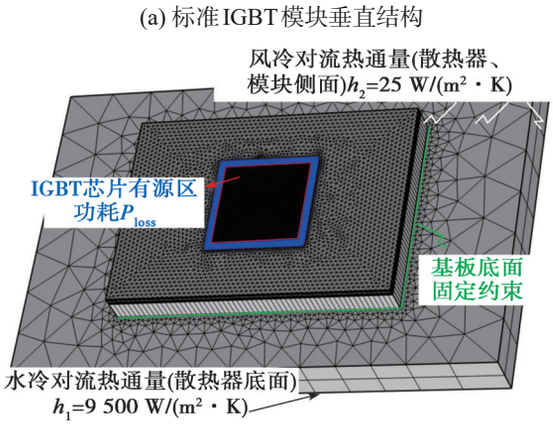
2.1.2　仿真模型构建

由于DSC IGBT三维模型组件较多，网格单元数庞大，并且需要对空洞网格细化处理。为了减少计算量，同时使计算结果具有可参考性，本文基于标准IGBT模块进行仿真，其垂直结构如图9(a)所示，仿真材料参数来源于文献[13]。随后对IGBT模块进行热力物理场边界条件设置和网格划分，如图9(b)所示。主要设置的边界条件如下：

①温度场：设置芯片有源区为体热源，功率损耗



(a) 标准IGBT模块垂直结构



(b) 仿真模型网格划分及边界条件设置

图9　标准IGBT模块仿真模型构建

Fig. 9　Simulation model construction of standard IGBT module

为P_{loss}；散热器底面为水冷强制对流换热过程，换热系数为9 500 W/(m^2·K)；散热器侧面和模块侧面为风冷自然对流换热过程，换热系数为25 W/(m^2·K)。

②结构力学场：本文只对模块进行力学仿真，设置铜基板底面固定约束，同时设置焊料为黏塑性材料，采用Anand模型来描述其黏塑性行为，其他材料均设置成弹性材料。

2.2　功率循环仿真

2.2.1　空洞率对温度分布影响

在功率循环仿真前，先定义结温T_j为芯片表面平均温度，该温度与用$V_{CE\,sat}(T_j)$方法测量得到的虚拟结温接近[14]。为了尽量和试验保持一致，设置3组不同空洞率的功率循环仿真试验条件均为$T_{j\,max}$=150 ℃, ΔT_j=100 K, t_{on}=1 s，通过调整功率损耗P_{loss}和水温T_{water}来实现。图10为空洞率为1%、3%和6%时的IGBT模块瞬态热阻抗仿真曲线。从图10可知：①由于模块热容的存在，模块开通至少需要10 s到达稳态。因此，考虑1 s的开通时间和2 s的关断时间，功率循环需要6个周期

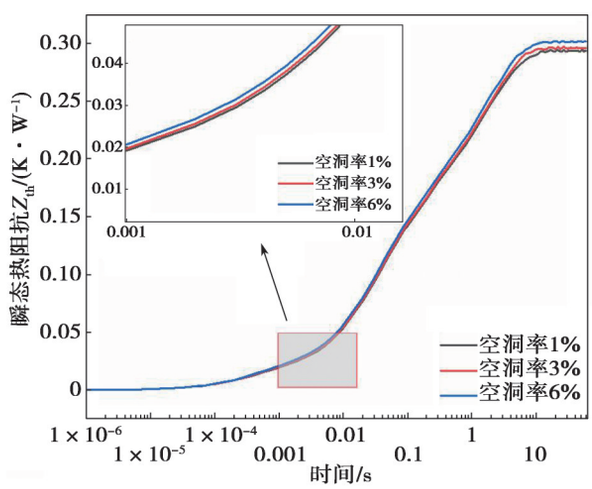


图10　不同空洞率IGBT模块的瞬态热阻抗曲线(仿真)

Fig. 10　Transient thermal impedance curves of IGBT modules with different void ratios(simulation)

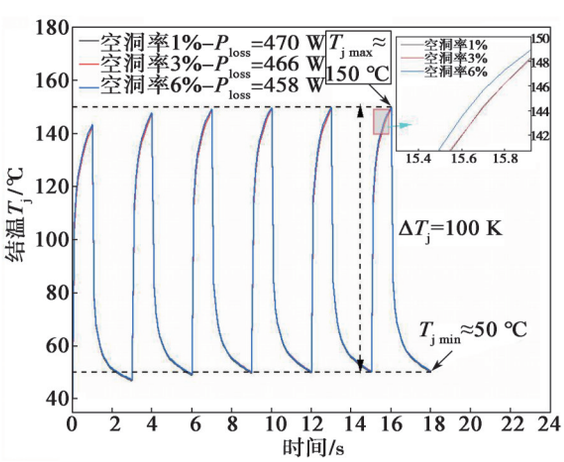


图11　功率循环仿真结温变化

Fig. 11　Junction temperature variation of power cycling simulation

达到稳定状态，这样可满足IGBT模块能够完全进入稳态的要求，稳定后的结温波动和最高结温曲线如图11所示。由图11可以看出，空洞率为6%的结温上升曲线略微高于其他2组，这主要是由于空洞率较高，导致的焊接层热阻较大。②曲线从芯片焊接层开始分离，虽然三者之间的Z_{th}曲线差异较小，但空洞率为6%的Z_{th}曲线仍高于其他2组。这是因为结温取的是芯片表面温度平均值，空洞对模块的温度影响还不足以通过结温变化和Z_{th}曲线体现，若选取芯片表面最大结温，这种差异会更明显。

提取稳定周期中t=16 s时刻芯片对角线的温度分布，结果如图12所示。从图12可以发现，空洞率越高，对角线温度曲线凸起越多；从空洞率6%的芯片表面温度分布上可以看出，空洞所在的位置会引起芯片局部温度的增高，空洞越大，芯片局部温度越高；空洞分布的位置越靠近芯片中心，芯片表面的最高温度也会越高，造成温度梯度越大。但是由于空洞的随机位置的特征，空洞率越大，空洞才越有可能产生于中间位置，在图12中当空洞率为1%时中心位置无温度凸起，而当空洞率为6%时中间温度有2个凸起，这就证明了这一结论，即空洞率越高，芯片和焊料表面最高温度越高并且温度梯度越大。

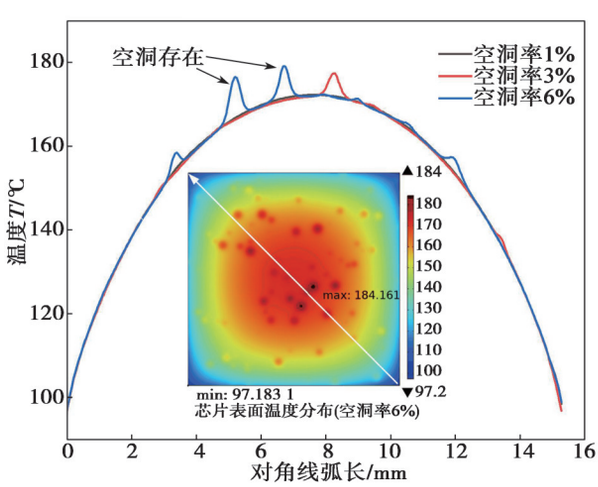


图12　不同空洞率芯片对角线温度分布(t=16 s)

Fig. 12　Diagonal temperature distribution of chips with different void ratios(t=16 s)

2.2.2　空洞率对应变分布影响

材料总应变ε_{tot}由弹性应变$\varepsilon_{elastic}$和塑性应变$\varepsilon_{plastic}$组成[15]，其关系如式(2)所示。由于功率循环属于加速老化试验，在高结温波动情况下，材料之间热膨胀系数不匹配会产生较大的热应力，通常该热应力会超过材料的屈服极限，应变主要以塑性应变为主，因此功率循环试验也是低周疲劳试验。根据材料疲劳理论，材料的疲劳老化与塑性应变累积有关，由于焊料属于黏塑性材料，提取其最大应变点黏塑性应变ε_{vp}随时间变化的趋势，结果如图13所示。同时，提取稳定周期中t=16 s时刻焊料表面温度和应变分布，结果如图14所

示。从图 13 和图 14 可知，空洞率越高，其黏塑性应变 ε_{vp} 越大，并且每个循环黏塑性累积应变也越大；焊料最大应变点与温度最大点相对应。分析其原因，根据前述结论，空洞率越高，焊料表面最高温度越高并且温度梯度越大，焊料的应变与其同一温度吊环呈正相关的关系，同一温度定义为焊料的工作温度与熔点温度（焊料 SnAgCu 一般为 221 ℃）的比值。这意味着，焊料的温度越高，其同一温度也更大，因此黏塑性应变也会更大。

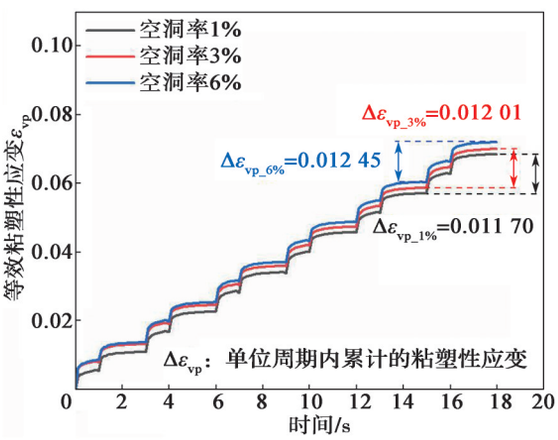
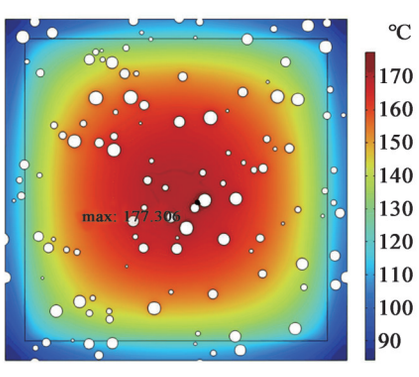
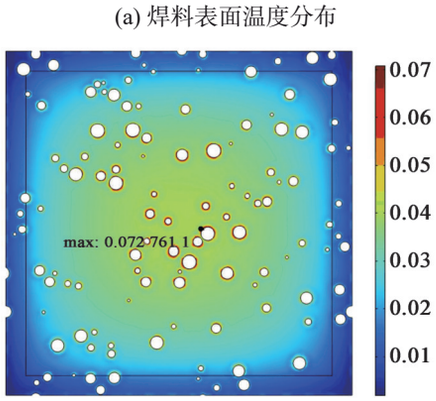


图 13　不同空洞率焊料层最大应变点粘塑性应变随时间变化

Fig. 13　Variation of viscoplastic strain at maximum strain point of solder layer with different void ratios as a function of time



(a) 焊料表面温度分布



(b) 焊料表面粘塑性应变分布

图 14　t=16 s 时焊料表面温度和应变分布（空洞率 6%）

Fig. 14　Solder surface temperature and strain distribution at t=16 s (void rate of 6%)

$$\varepsilon_{tot}=\varepsilon_{elastic}+\varepsilon_{plastic} \tag{2}$$

上述不同空洞率的最大应变点均产生在位于中心位置的最大空洞处，这表明空洞的大小也影响其黏塑性应变大小。以空洞率 6% 为例，分别提取位于中心位置直径为 0.70 mm 的空洞最大应变点 A、直径为 0.25 mm 空洞最大应变点 B 和位于边缘位置直径为 0.70 mm 空洞最大应变点 C 的应变变化，其结果如图 15 所示。从图 15 可知，边缘空洞的应变远远小于中心位置空洞应变，即中心空洞危害远远大于边缘空洞，失效最先从中心空洞开始；空洞越大，其应变也越大。这与前文分析得到的结论是一致的。

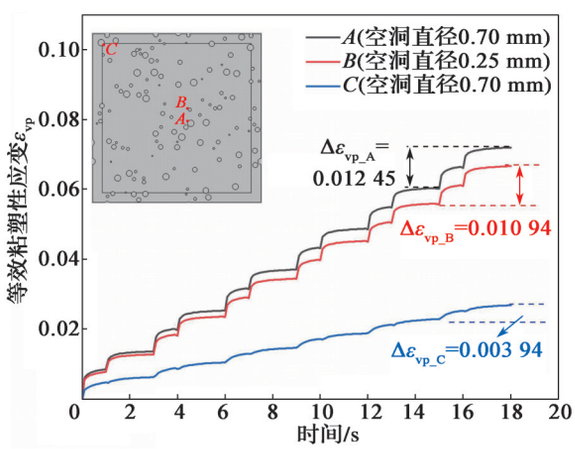


图 15　空洞大小和位置对黏塑性应变影响

Fig. 15　Effect of void size and position on viscoplastic strain

2.2.3　空洞率对疲劳寿命影响

在功率循环过程中，不断累积的黏塑性应变最后在焊料层形成裂纹，裂纹形成后会快速扩展，最终导致材料疲劳失效，这种由应变导致的疲劳失效形式称为应变疲劳，最常用的应变疲劳模型是 Coffin-Manson 疲劳模型，其数学表达式为

$$\frac{\Delta\varepsilon_{vp}}{2}=\varepsilon_f'\left(N_f\right)^c \tag{3}$$

式中：$\Delta\varepsilon_{vp}$ 为稳定周期后 1 个周期内累积的黏塑性应变；ε_f', c 为与材料疲劳相关的参数，取 ε_f'=3.2, c=−0.49，这 2 个参数可由功率循环试验数据拟合得到。

图 16 为空洞率为 6% 的焊层疲劳寿命分布，其中寿命最小点与图 14(b)应变最大点相对应。由于疲劳仿真一般代表着裂纹形成过程，这就意味着裂纹首先从寿命最小点（即空洞处）开始萌发，也验证了空洞往往是裂纹萌发的起点这一结论。为了更好判断空洞率对 IGBT 模块功率循环寿命的影响，除了计算空洞率为 1%、3% 和 6% 时的疲劳寿命外，还分别计算了空洞率为 0.5%、2.0% 和 4.5% 时 IGBT 模块疲劳寿命，得到的结果如图 17 所示。由图 17 可知，IGBT 模块的疲劳寿命随着空洞率的增加基本呈现下降的趋势，其中空洞率为 0.5% 的疲劳寿命最高，空洞率为 2% 和 3% 的疲劳寿命平均下降了 15%，并且这一阶段处于平台期，疲劳寿命没有较大变化；当空洞率超过 3% 时，疲劳寿命

进一步下降，空洞率为6%的疲劳寿命下降了25%。因此，结合功率循环试验数据，推荐IGBT模块焊料空洞率的筛选合格值为3%。当IGBT模块空洞率超过3%后，IGBT模块的功率循环寿命会快速下降，当然空洞率要求越低，对焊接成本的要求也越高。

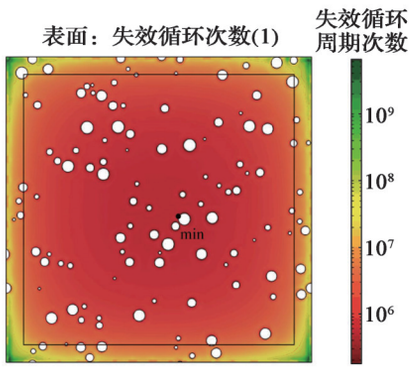


图16　空洞率为6%时焊层疲劳寿命分布

Fig. 16　Fatigue lifetime distribution of solder layer when a void rate of 6%

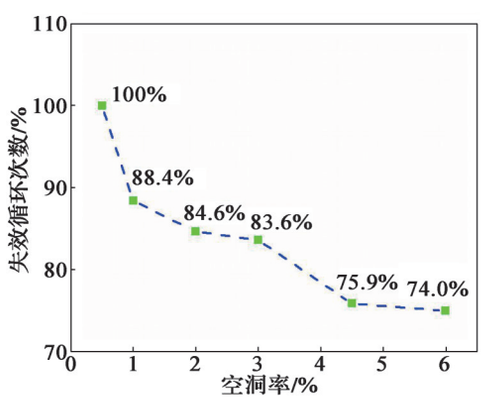


图17　不同空洞率时IGBT模块疲劳寿命

Fig. 17　Fatigue lifetime of IGBT module at different void ratios

3　结论

本文通过功率循环试验和仿真相结合的方法，研究了焊料空洞对IGBT模块功率循环寿命的影响，该研究成果可为IGBT模块空洞筛选过程提供指导，最后结论总结如下：

①焊料空洞对IGBT模块功率循环寿命有显著影响。中心位置空洞危害大于边缘位置空洞，并且空洞越大，其黏塑性应变也越大，疲劳寿命越短；焊料空洞率越高，IGBT模块的功率循环寿命越短。通过试验和仿真数据，推荐IGBT模块焊料空洞率须控制在3%以内。

②焊料空洞会阻碍热量向下耗散，造成焊料和芯片局部温度升高。由于芯片具有热耦合特征，中心温度远高于边缘温度，空洞率越高，空洞出现在芯片中心正下方位置的概率越大，引起芯片和焊料表面最高温度越高并且温度梯度越大，此时焊料表面具有最高温度的位置（空洞）将产生更大的黏塑性应变，其功率循环寿命也越短。

③根据功率循环仿真发现，焊料空洞位置具有最小的疲劳寿命，因此裂纹会从焊料空洞处产生并扩展。

本文研究是在“教育部6 000 A压接型IGBT器件测试平台（设备）的产品开发”项目的资助下进行的，在此表示感谢。

参考文献：

[1] 邓二平, 严雨行, 陈杰, 等. 功率器件功率循环测试技术的挑战与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5132-5151.
DENG Erping, YAN Yuxing, CHEN Jie, et al. Power cycling test technologies for power semiconductor devices-challenges and analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5132-5151.

[2] BAYERER R, HERRMANN T, LICHT T, et al. Model for power cycling lifetime of IGBT modules-various factors influencing lifetime[C]//VDE. 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg: VDE, 2008: 1-6.

[3] 王铮铎. 功率芯片互连空洞的形成机理及其对互连可靠性的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
WANG Zhengduo. Formation mechanism of solder voids in power chips and the effects of voids on interconnect reliability[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[4] 吴煜东, 常桂钦, 彭勇殿, 等. 焊层空洞对IGBT模块热应力的影响[J]. 大功率变流技术, 2014(1): 17-23.
WU Yudong, CHANG Guiqin, PENG Yongdian, et al. Effect of solder voids on IGBT thermal and stress performance [J]. High power converter technology, 2014(1): 17-23.

[5] 肖飞, 罗毅飞, 刘宾礼, 等. 焊料层空洞对IGBT器件热稳定性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1499-1506.
XIAO Fei, LUO Yifei, LIU Binli, et al. Influence of voids in solder layer on the temperature stability of IGBTs[J]. High voltage engineering, 2018, 44(5): 1499-1506.

[6] SHI Yidian, ZHU Wenhui, HE Hu. A novel approach to evaluate and predict the impact of randomly distributed voids on junction temperature for power modules[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2022, 12(1): 42-50.

[7] KATSIS D C, VANWYK J D. A thermal, mechanical, and electrical study of voiding in the solder die-attach of power MOSFETs[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2006, 29(1): 127-136.

[8] 欧开鸿, 曾正, 王亮, 等. 双面散热SiC功率模块的可靠性分析和寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3293-3304.
OU Kaihong, ZENG Zheng, WANG Liang, et al. Reliability

analysis and lifetime assessment of double-sided cooling SiC power module[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (9): 3293-3304.

[9] 陈杰, 邓二平, 张一鸣, 等. 功率循环试验中开通时间对高压大功率IGBT模块失效模式的影响及机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7710-7720.
CHEN Jie, DENG Erping, ZHANG Yiming, et al. Influence and mechanism analysis of load pulse duration on failure mode of high power IGBT module under power cycling condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7710-7720.

[10] DENG Erping, BORUCKI L, LUTZ J. Correction of delay-time-induced maximum junction temperature offset during electrothermal characterization of IGBT devices[J]. IEEE transactions on power electronics, 2021, 36(3): 2564-2573.

[11] European Center for Power Electronics. Qualification of power modules for use in power electronics converter units (PCUs) in motor vehicles: AQG 324[S]. Nuremberg: ECPE Working Group, 2018.

[12] MA Yaqing, LI Jianfeng, DONG Fangfang, et al. Power cycling failure analysis of double side cooled IGBT modules for automotive applications[J]. Microelectronics reliability, 2021, 124: 114282.

[13] LUTZ J, SCHLANGENOTTO H, SCHEUERMANN U, et al. Semiconductor power devices: physics, characteristics, reliability[M]. 2nd ed. Switzerland: Springer Cham, 2018.

[14] ZENG Guang, CAO Haiyang, CHEN Weinan, et al. Difference in device temperature determination using p-n-junction forward voltage and gate threshold voltage[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(3): 2781-2793.

[15] CIAPPA M. Lifetime modeling and prediction of power devices[C]//VDE. 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Nuremberg: VDE, 2008: 1-9.

收稿日期：2023-07-23
修回日期：2023-08-17