DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.05.107

大功率器件

电力机车服役 IGBT 模块焊料层空洞演化机理研究

李涵锐[1]，赖　伟[1]，李　辉[1]，姚　然[1]，于　凯[2]，安军鹏[2]

（1. 重庆大学 电气工程学院，重庆　400044；
2. 中车永济电机有限公司，山西 永济　044502）

摘　要：牵引变流器作为电力机车关键部件，通过大功率绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）实现直流能量与交流能量之间的转换，达到对交流牵引电动机启动、制动和调速的控制，其可靠性直接关系电力机车运行安全，而焊料层失效是IGBT模块主要失效模式之一，分析研究焊料层缺陷变化规律对IGBT模块可靠性至关重要。通过对电力机车服役前后的IGBT模块焊料层进行CT扫描，统计结果显示不同服役里程数的IGBT模块焊料层空洞数量服从泊松分布，并且泊松分布方差λ值与器件服役里程数具有映射关系；基于空洞统计分布规律建立了计及初始缺陷的电力机车用IGBT模块多物理场仿真模型，从焊料层上下表面的应变数学描述研究了随机空洞的演化诱因与规律；基于能量的疲劳寿命模型得到了空洞分布、尺寸与演化速率的关系，为指导器件优化设计和主动运维提供支撑。

关键词：大功率IGBT模块；空洞分布；空洞演化；多物理场有限元仿真；电力机车

中图分类号：TN325^{+}.2；U264　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0138-11

Research on solder layer void evolution mechanism for IGBT module of electric locomotive in service

LI Hanrui[1], LAI Wei[1], LI Hui[1], YAO Ran[1], YU Kai[2], AN Junpeng[2]

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji, Shanxi 044502, China)

Abstract: As a key component of electric locomotives, the traction converter works for the DC to AC energy conversion through a large power insulated gate bipolar transistor (IGBT), thus exerting control over starting, braking and speed regulation of the AC traction motor. Its reliability is directly related to the operational safety of electric locomotives. Since the solder layer failure is one of the main failure modes of IGBT modules, it is very important to clarify the solder layer defect evolution law, for the sake of reliability of IGBT modules. In this paper, the solder layer of an IGBT module was firstly scanned by CT before and after putting into service of the electric locomotive. The statistical results showed that the number of solder layer voids in the IGBT module with different service mileages was in line with the Poisson distribution, of which the variance (λ) had a mapping relationship with the service mileage of the devices. Secondly, a multi-physical field simulation model of IGBT modules for electric locomotives was established, based on the statistical distribution law of voids and considering the initial defects, and the evolution inducements and law of random voids were studied by means of the strain mathematical description on the upper and lower surfaces of the solder layer. Finally, the relationship among void distribution, size and evolution rate was generated according to the energy-based fatigue lifetime model, which provided a basis for guiding optimal

收稿日期：2021-12-07；修回日期：2022-06-23
基金项目：山西省科技厅揭榜招标项目（20201101017）；中央高校基本科研业务费资助项目（2022CDJKYJH009）
通信作者：赖　伟（1986—），博士，副教授，主要从事电力电子器件可靠性寿命建模和状态监测研究；
E-mail: laiweicqu@126.com

design and active maintenance of the devices.

Keywords: high power IGBT module; void distribution; void evolution; multi-physical field finite element simulation, electric locomotive

0　引言

在铁路运营里程不断增长的环境下，中国铁路机车保有量逐年增长，截至2018年底中国铁路机车保有量为2.1万台，其中电力机车占比高达61.3%[1]。牵引变流器作为机车关键部件，通过大功率绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）实现直流能量与交流能量之间转换，达到对交流牵引电动机启动、制动和调速的控制，其可靠性直接关系电力机车运行安全，然而由于机车启停、负载变化和封装材料属性不匹配等因素使得大功率IGBT失效机理不明，难以准确表征IGBT器件寿命。同时，根据相关调查，在HXD1型、HXD1C型和HXD1D型电力机车牵引变流器故障中，IGBT器件失效占比分别为82%，71%，90%[2]。究其原因，认为是对器件性能衰退和缺陷的产生、演化和失效的物理过程认识不足而导致的。因此，亟需开展机车用IGBT失效演化机理研究，为指导器件优化设计和主动运维提供支撑。

IGBT器件失效可分为芯片失效与封装失效。其中，芯片失效主要为过压、过流和长时间运行疲劳累积所致，而封装失效主要为交变热应力引起的键合线失效、焊料层失效、金属化层重构等问题。在实际应用中，焊料层失效是IGBT器件主要封装失效模式。现有研究表明，焊料层存在初始微小孔洞，在交变应力作用下，空洞会演化增大，导致焊料层分层与脱落，最终器件失效。文献[3-5]从焊料层厚度、空洞分布位置与空洞尺寸角度分析了芯片温度分布的影响。文献[6-7]采用有限元分析法研究了焊料层不同固定位置下空洞对IGBT器件温度的影响，指出中心空洞对温度影响最大。文献[8]提出了生长融合模型来模拟空洞的扩展，并利用热阻评估焊料层空洞生长程度。文献[9]利用CT扫描结果分析空洞的扩展问题，并指出了焊料层内部空洞的应力分布情况。文献[10]研究发现导通电阻和器件热阻随着空洞率的增加而增大。文献[11]提出了利用IGBT集电极和发射极之间的电压V_{CE}变化反应焊料层的退化过程。

综上所述，目前国内外学者已经对器件失效机理开展了大量的研究，然而并没有考虑在器件服役期间空洞的扩展对IGBT模块参数的影响，缺乏空洞扩展的理论分析。另外，目前对于焊料层空洞可靠性分析的研究对象多为单芯片器件[3-11]，而对机车用多芯片器件内部焊料层空洞分布研究很少。因此，本文针对多芯片器件内部焊料层空洞可靠性问题，从试验、仿真和理论角度进行分析研究。

1　机车用IGBT模块运行前后芯片焊料层空洞分布分析

1.1　工业CT扫描测试分析

在IGBT器件生产制造过程中，焊料层起着连接芯片与DBC上铜层、铜底板和DBC下铜层的作用，但无论是采用传统的PbSn焊料，还是采用目前常用的SnAg焊料，以及采用未来将大力推广的纳米银焊料，都无法避免在焊接过程产生气泡，这些气泡最终会发展为焊料层内部的初始空洞。在IGBT出厂检测时，通常保证焊料层空洞率低于5%，而这些初始缺陷不会引起IGBT特性变化。但焊料层中的空洞在完成功率循环后会产生扩展，在IGBT芯片的边界处发展成裂纹[12]，在这种情况下，进一步的损伤可能不会引起应力集中，反而会增加疲劳非弹性应变。下面将根据机车用IGBT运行前后的状态，分析芯片焊料层空洞的分布及其扩展规律。

CD-50BG CT试验仪的辐射能量在穿透任何材料后都会损失一部分，其辐射能量的衰减取决于材料的性质和被检测物体的大小，利用该特性可检测焊料层内部的缺陷。目前，CT扫描已广泛应用在工业金属探伤环节[9]。本文对电力机车用CM600HG-130H IGBT模块（6 500 V/600 A，其结构如图1所示）在全新状态下进行拆封，采用CT扫描技术对焊料层的微观结构进行分析，全新模块芯片焊料层扫描结果如图2所示。

根据图2的扫描结果可以看到，对于全新模块，在焊料层内部分布着数量众多的小尺寸空洞，含有极少

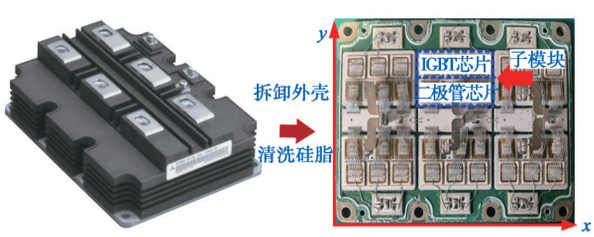
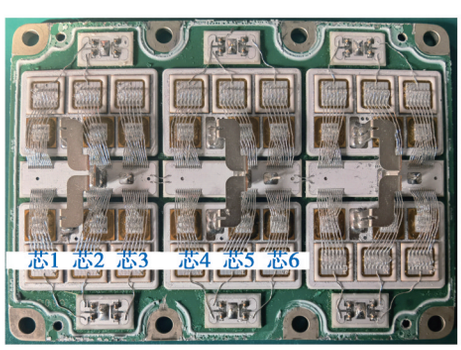
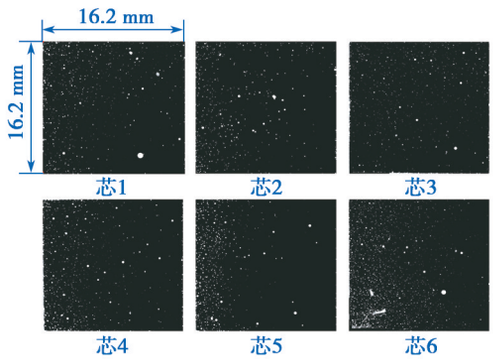


图1　CM600HG-130H IGBT模块实物图

Fig. 1　Picture of a real CM600HG-130H IGBT module



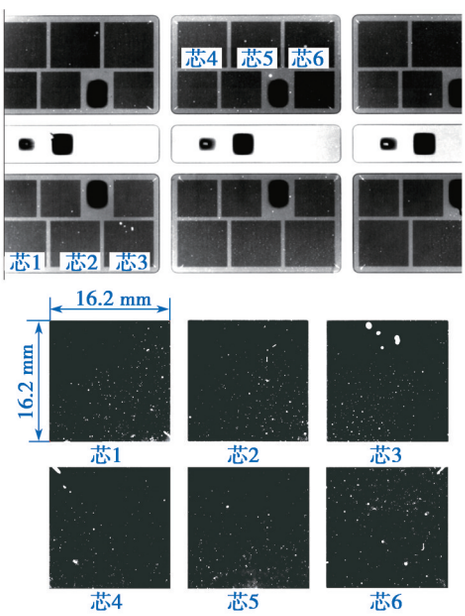
(a) IGBT芯片位图



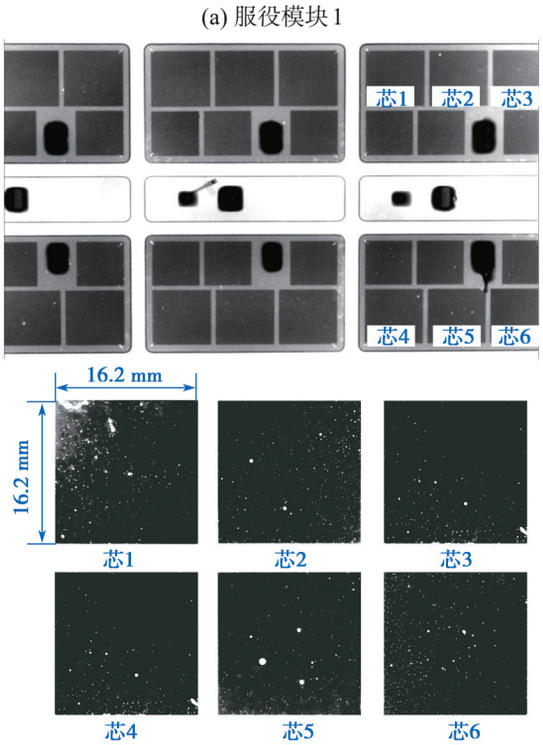
(b) CT扫描结果

图2　全新模块

Fig. 2　New module



(a) 服役模块1



(b) 服役模块2

图3　2个服役模块CT扫描结果

Fig. 3　CT scanning results of 2 modules in service

量的大尺寸空洞；按其位置分布，空洞主要分布在焊料层的边缘位置，这说明，IGBT在经过一段时间的功率循环后，边角最先开始产生裂纹。

为了对比服役前后IGBT模块空洞分布变化规律，拆解了运行于“九台南—长春”的机车运行480万km后的IGBT模块，这些IGBT模块经过了约80万次功率循环，在模块服役过程中模块平均结温 T_{jmean}=60 °C，结温波动 ΔT_j=35 °C。图3为服役后IGBT模块焊料层CT扫描结果。

由图3可知，经过服役的IGBT模块空洞尺寸显著增大，并且产生了新空洞，焊料层边角处已演变为裂纹，而且空洞数量和尺寸均明显增加。可以推测，若模块仍持续运行，焊料层裂纹和空洞会逐渐扩展，模块中“芯片–散热器”的有效散热面积减少，导致“芯片–环境”热阻增大，结温上升，从而使得模块发生过热失效。

为了能够统计出机车用多芯片IGBT模块运行前后空洞个数和大小的变化情况，在Python中导入Opencv工具包，利用其内置函数实现图像处理，跟踪和统计焊料层空洞面积和数量的变化。经测量，全新IGBT模块总空洞面积为12.023 mm^2，空洞率约为2.55‰，而功率循环结束后测得服役IGBT模块总空洞面积为50.239 mm^2，空洞率约为1.064%。焊料层失效标准为5%，这表明模块虽然未失效，但随着服役时间增加模块发生故障概率增大。

1.2　模块空洞分布规律建模

在多物理场建模时，为得到更准确的结果，将符合实际模块空洞分布的工况融入仿真中，并对空洞分布进行统计规律分析。对于每一个IGBT样本，其中包含有上百个可测量的空洞，这些空洞以多种形式存在，如贯穿圆柱型、内置球型等。考虑机车用IGBT模块的结构焊料层厚度为0.2 mm，为了便于随机空洞统计和计算，假定焊料层中的空洞均为贯穿圆柱型。全新模块与服役模块空洞个数与占比统计结果如图4、图5和表1所示。

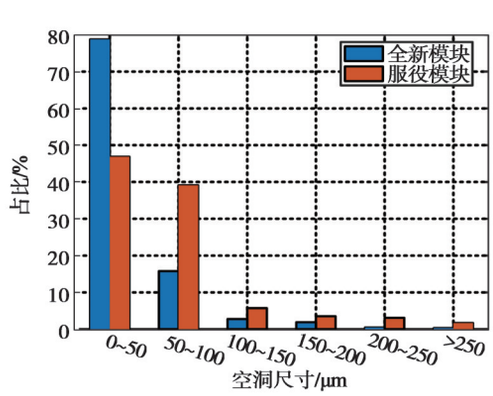


图4　全新模块与服役模块空洞尺寸分布

Fig. 4　Void size distribution of new module and module in service

观察图2与图3空洞的分布，可发现边缘处空洞个数明显多于中心位置，小空洞数量居多，而经过功率循环后，大空洞数量显著增多，大多分布于边缘处，形成的裂纹均分布在芯片边角位置。从图4可发现，功率循环后的空洞尺寸分布整体向增大方向发展。由图5的统计结果可知，对于全新IGBT模块，0~100 μm的空洞数量服从泊松分布，其中10~20 μm的空洞数量最多，随着空洞尺寸的增大，对应的空洞数量减少。根据表1可知，全新模块0~100 μm的空洞占全部空洞数量90%以上，经过功率循环后，0~50 μm的空洞数量急剧下降，而50~150 μm的空洞数量显著增大，占到空洞总数的40%以上，这说明小空洞逐渐向大空洞演化。大尺寸空洞逐渐扩展，最终与周围空洞合并形成裂纹，但数量极少。因此，大空洞更易分布在芯片边缘位置处，使得空洞发展后容易与周围空洞合并形成裂纹，进而影响焊料层的寿命。从热力学的角度看，曲率越大而空洞越小，其周围区域的应力集中程度越高，随着空洞尺寸的增大，曲率减小使得应力减小，这可能会引起空洞的扩展速率随着半径的增长而减小，大空洞的扩展速率低于小空洞扩展速率，小空洞具有更快的增长速率，这一结论将在下节通过有限元模拟进一步研究。

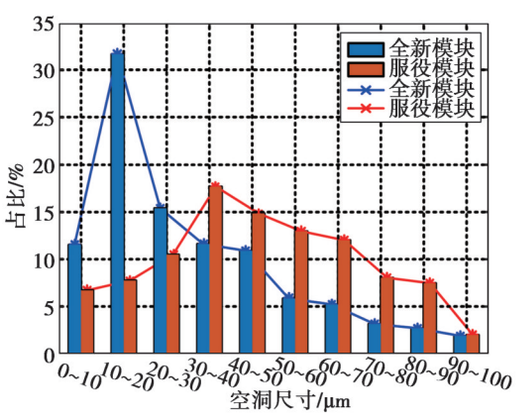


图5　芯片焊料层0~100 μm空洞尺寸分布

Fig. 5　Void size distribution of chip solder layer (0~100 μm)

表1　全新模块与服役模块空洞尺寸统计表

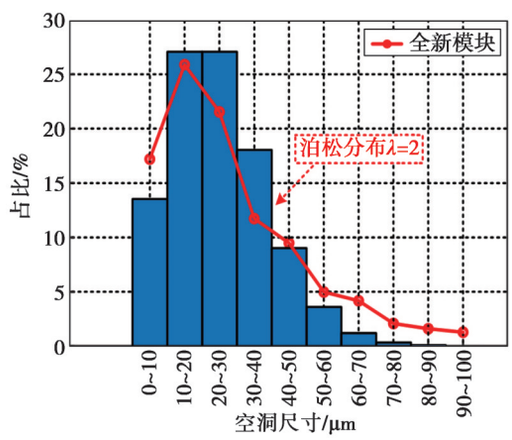
Table 1　Statistics table of void size of new module and module in service

项 目	空洞尺寸/μm					
	0~50	50~100	100~150	150~200	200~250	>250
全新模块空洞数	998	200	35	24	6	4
服役模块空洞数	532	444	65	40	35	19
增长率/%	−46.7	122.0	85.7	66.7	483.3	375.0

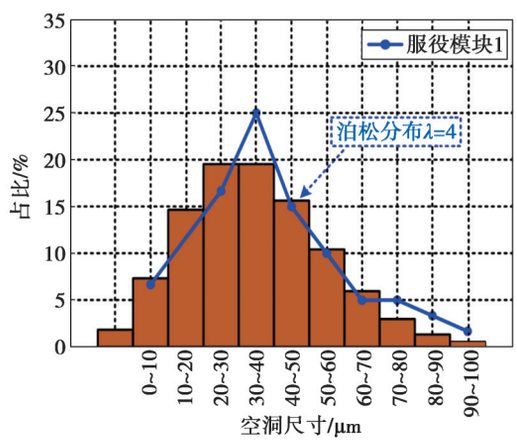
为了对比全新模块与服役模块不同空洞尺寸下的数量分布规律，分别进行了数理统计的分析，分析结果如图6所示。由图6可知，各个模块不同尺寸的空洞数量服从泊松分布，概率密度函数为

$$f(x|\lambda)=\frac{\lambda^x}{x!}e^{-\lambda} \tag{1}$$

式中：λ表示单位面积内随机事件的平均发生率。



(a) 全新模块空洞尺寸分布情况



(b) 服役后模块空洞尺寸分布情况

图6　不同模块下空洞尺寸分布情况

Fig. 6　Void size distribution in different modules

对不同尺寸下的空洞数量进行拟合，可发现对于全新模块和服役后模块，当λ分别为2和4时，拟合效果较好。这表明，全新模块的空洞尺寸分布在10~20 μm的最多，其空洞尺寸相对较小，而服役后模块的空洞尺寸分布在30~40 μm的最多，并且服从λ=4的泊松分布。

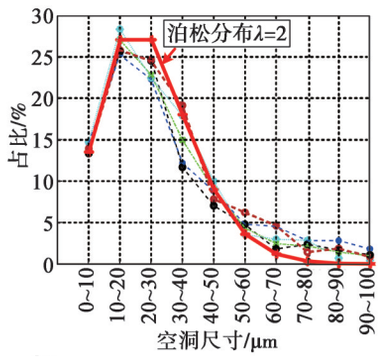
随后又拆解了数个相同工况下服役后的IGBT模块进行验证，经相同的数理统计分析后，其结果如图7所示。从图7(a)可知，全新模块空洞数量百分比均匀分布在λ=2泊松分布曲线附近，这说明这2个服役后模块服从λ=2的泊松分布；从图7(b)可知，服役后模块其分布近似服从λ=4的泊松分布。

利用该分布规律可为后续有限元仿真中模拟空洞分布提供依据，同时也可以在统计不同尺寸的空洞数量分布情况后，利用方差λ判断焊料层的疲劳程度。

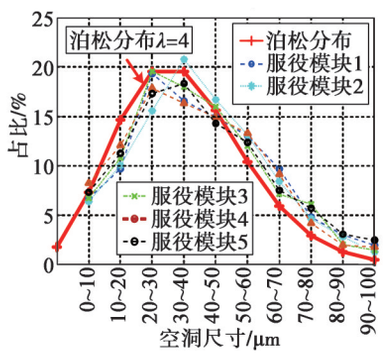
2　机车用多芯片IGBT模块“电-热-力”多物理场建模

2.1　CM600HG-130H器件多物理场建模

CM600HG-130H IGBT模块结构图如图8所示，包含有18个IGBT芯片和二极管芯片，其中IGBT芯片和二极管芯片并联放置在DCB铜层上部。在IGBT模块



(a) 全新模块空洞尺寸分布验证



(b) 服役后模块空洞尺寸分布验证

图7 全新模块与服役后模块空洞尺寸分布情况

Fig. 7 Void size distribution of new module and module in service

中，芯片通过焊料层焊接在铜层上，而陶瓷层主要起绝缘和支撑作用，芯片通过铝键合线与铜层连接。为了获得更好的散热效果，实际运行中的IGBT模块一般通过导热硅脂放置在散热器上。

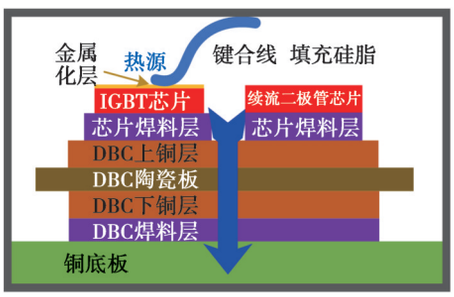


图8 器件结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of device structure

CM600HG-130H IGBT模块器件封装材料部分参数如表2所示。

根据实际测绘结果与材料属性，为了节省仿真时间，同时考虑电极对仿真结果影响较小，因此在仿真模型中简化了电极引出端，基于COMSOL仿真软件建立了器件几何模型，如图9所示。

IGBT模块底板设置为对流换热边界，具体数值根据仿真温度调节，基板四周设置为自然对流换热，其系数为12.5 W/(m·K)；同时，在芯片上施加与实际服役条件下等效的初始热源项。

为了加强迭代计算过程的收敛性和提高精度效率，采用多层次网格划分方式。芯片键合线、芯片焊料层和底板焊料层是器件封装中最为关键的部分，该部分采用精细网格剖分，而其余部分采用标准网格剖分，自定义剖分后的有限元模型网格数为505 330个。

表2 焊接型IGBT器件封装材料参数

Table 2 Package material parameters of welded IGBT devices

内部结构	材料	热膨胀系数/$\times10^{-6}K^{-1}$	电导率/$(\times10^{6}S\cdot m^{-1})$	弹性模量/$\times10^{9}Pa$	泊松比
铜底板	Cu	17.5	59.980	110.00	0.35
底板焊料层	SnAg	21.7	9.099	0.04	0.40
DBC下铜层	Cu	17.5	59.980	110.00	0.35
DBC陶瓷层	Al_2O_3	6.8	0	300.00	0.22
DBC上铜层	Cu	17.5	59.980	110.00	0.35
芯片焊料层	SnAg	21.7	9.099	0.04	0.40
IGBT芯片	Si	2.6	64×(1−0.0017T)	170.00	0.28
铝键合线	Al	23.5	37.740	70.00	0.33

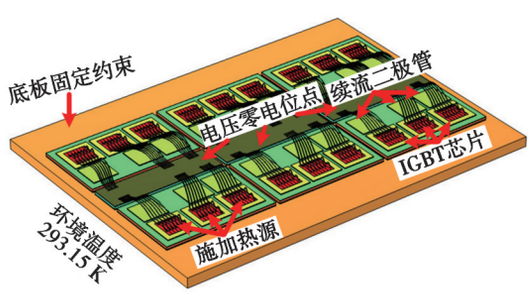


图9 CM600HG-130H模块几何模型

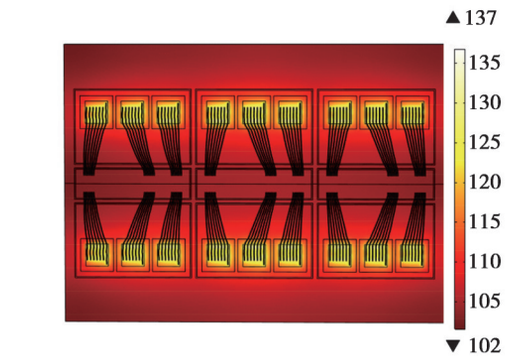
Fig. 9 Geometric model of CH600HG-130H module

利用该有限元模型进行稳态仿真分析，导通压降与芯片温度如图10所示，经进一步计算，导通压降为4.63 V，芯片平均温度（结温T_j）为124.94 °C。这个数据与数据手册中结温为125 °C时，导通压降为4.60 V吻合。

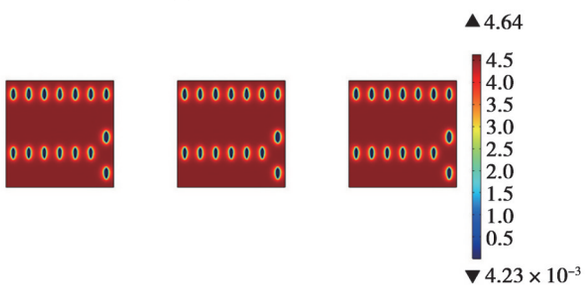
图11为仿真得到的瞬态结壳热阻抗曲线。由图11可知，其曲线与数据手册提供的瞬态结壳热阻抗曲线具有较好的一致性。当有限元模型导通时，瞬态结壳热阻抗迅速增长，大约在2 s时达到稳态常值，此时可以得到有限元模型的稳态结壳热阻R_{thjc}。仿真得到的稳态结壳热阻为0.978 K/W，与数据手册中的稳态结壳热阻1 K/W的误差为2.2%，处于误差允许范围内。误差产生的原因包括建模过程中物理几何尺寸差异、模块布局差异和材料属性差异，以及有限元计算误差等。

2.2 基于CM600HG-130H器件有限元模型随机空洞应力分布分析

由上节机车用多芯片IGBT模块空洞分布情况可



(a) IGBT模块温度分布



(b) IGBT模块导通压降

图 10　“电–热–力”多物理场模型稳态仿真结果

Fig. 10　Steady-state simulation results of electric-thermo-mechanical multi-physical field model

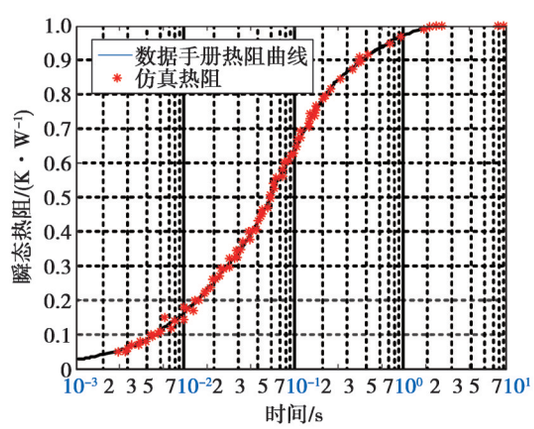


图 11　瞬态热阻曲线

Fig. 11　Transient thermal resistance curve

知，若手动绘制焊料层空洞会存在2个问题：①手动绘制所需时间长，如需模拟数量大的空洞，会导致巨大的工作量且结果不准确；②焊料层空洞的初始位置与大小均存在一定的随机性，手动绘制时较难控制。因此，为了进一步评估初始空洞对焊料层可靠性的影响，亟需可与COMSOL有限元模型进行联合仿真的焊料层空洞模拟模型。

本文基于COMSOL底层JAVA脚本文件，开发了可定义空洞位置、空洞数量与空洞大小的空洞模拟模型。根据上节空洞分布结论，对于全新模块设置空洞数量分布服从于λ=2的泊松分布；设置服役后模块的空洞数量同样也服从泊松分布，并通过设置方差λ表征模块的老化程度。如图12所示，该模型可直接生成对应的焊料层几何结构，并与IGBT器件多物理场模型进行联合仿真。图13所示是采用脚本生成随机空洞分布情况。

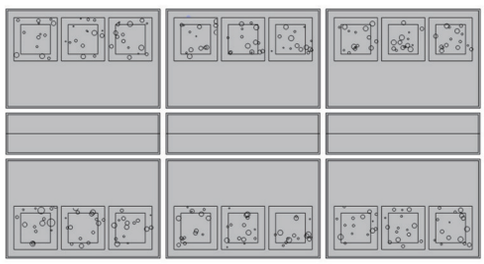


图 12　含有随机空洞的IGBT多物理场模型

Fig. 12　IGBT multi-physical field model with random voids

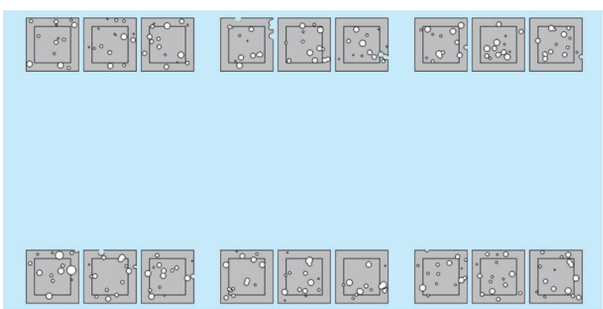


图 13　利用JAVA脚本生成随机空洞后的芯片焊料层

Fig. 13　Chip solder layer afttr generating random void with JAVA script

在芯片上施加1.4×10⁹ W/m³热源，加热与冷却时间设置在30 s左右。在这种热源条件下，仿真模型的结温变化可以控制在与机车运行条件相同的结温工况（结温波动ΔT_j=35 °C和平均结温T_{jmean}=60 °C），IGBT芯片焊料层应变仿真结果如图14所示。由图14可知，在芯片焊料层的边角、芯片焊料层与IGBT芯片的边界相连位置处的应变最大，这意味着芯片焊料层的边角与IGBT芯片的边界相连位置最先发生老化。对于含有初始空洞的芯片焊料层，在功率循环过程中裂纹将会在焊料层边角与IGBT芯片边界的下方位置产生；应力聚集在空洞尖端处，在这个局部区域聚集高强度的非弹性应变，导致空洞沿芯片界面向焊料层中心逐渐加速生长，若周围存在空洞，将与周围空洞合并形成裂纹，造成焊料层疲劳，这与上节试验结果一致。

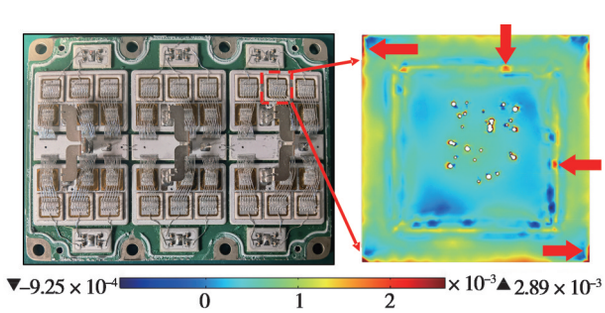


图 14　焊料层有限元应变仿真结果

Fig. 14　Finite element strain simulation results of solder layer

图15为在功率循环条件下不同尺寸空洞对应的非弹性应变。由图15可知，非弹性应变的变化与结温变

化规律基本一致。值得注意的是，在每个循环周期内，应变上升幅值总大于下降幅值，这说明材料的性质随着功率循环的进行，发生了不可恢复的非弹性应变。

在相同仿真条件下，空洞周围的应变分布情况如图 16 所示。从整体观察，芯片焊料层上表面应变以中心为原点呈放射状分布，所有空洞的上表面均在向外部扩展，从而引起整体空洞往尺寸增大方向发展。对比不同尺寸的空洞可发现，对于小空洞，约 1/2 的边长承受着较高强度的应变；而对于大空洞，承受较大应变的区域仅不到空洞边长的 1/4，即小空洞应变较大的区域占比远大于大空洞应变较大的区域占比，并且小空洞边缘应变强度大于大空洞应变强度。图 17 为同等条件下不同尺寸空洞的变形情况，其中“红色”标红边界是空洞的初始位置，在进行功率循环后，小空洞的形变明显大于大空洞的形变，进一步验证了小空洞具有更快的生长速率。根据上节的数据可知，100 μm 以下的空洞数量占到了初始空洞 80% 以上，导致模块因过热失效产生的故障概率增大。

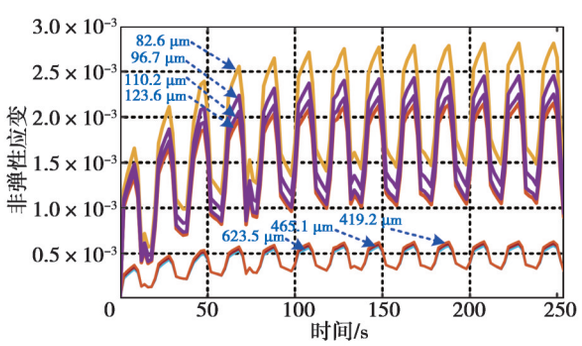
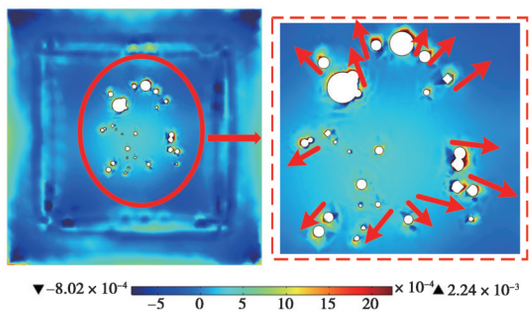


图 15　焊料层有限元仿真结果

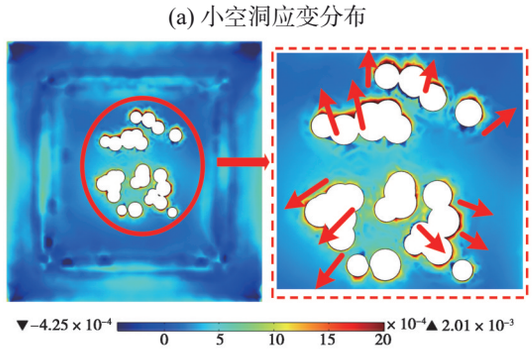
Fig. 15　Finite element simulation results of solder layer

从芯片焊料层上下表面观察应变分布情况，其分布如图 18 所示。其中，图 18(a)是贴近 IGBT 芯片的芯片焊料层上表面应变分布，图 18(b)是贴近 DBC 的芯片焊料层下表面应变分布。从整体观察，下表面与上表面应变方向相反，即下表面所有空洞应变方向向中心位置聚集，并且下表面焊料层边角位置和 IGBT 芯片边界相连处的应变最小，与上表面应变形成两个极端。

图 19 为图 18 空洞的局部放大图。从图 19 可以看到，对于芯片焊料层单个空洞的上表面，空洞面向外侧的剪切应变大于空洞内侧的剪切应变，而对于芯片焊料层单个空洞的下表面，空洞内侧的剪切应变大于空洞外侧的剪切应变。由于芯片焊料层存在高度差，将会在上下表面形成一对扭矩，对空洞进行拉扯，造成空洞以更快的速度生长。图 20 为空洞变形过程的示意图，最终会形成如图 21 所示的芯片焊料层中空洞的形变情况，引起空洞上下表面不均等的形变，即空洞的上表面向外侧方向伸展，空洞的下表面向内侧方向压缩，逐渐形成“Z”字形空洞。另外，根据热力学应力集中效应和仿真结果，可以得出小空洞承受着相对较大的应变，大空洞承受的应变相对较小，即小空洞比大空洞更容易出现大的形变，小空洞比大空洞具有更快的生长速率。



(a) 小空洞应变分布



(b) 大空洞应变分布

图 16　空洞周围应变分布

Fig. 16　Strain distribution around voids

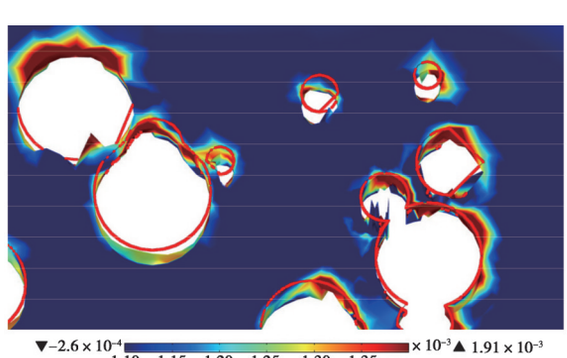
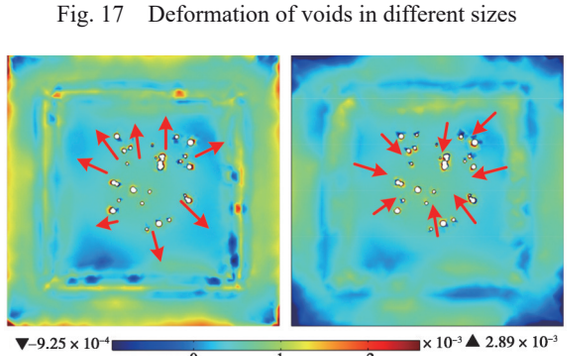


图 17　空洞不同尺寸下的形变情况

Fig. 17　Deformation of voids in different sizes

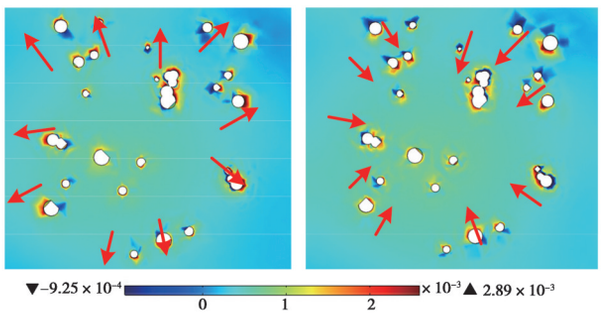


(a) 焊料层上表面应变分布　(b) 焊料层下表面应变分布

图 18　芯片焊料层上下表面应变分布情况

Fig. 18　Strain distribution on upper and lower surface of chip solder layer

考虑到不同 IGBT 芯片空间布局位置的差异，对比分析了相同的焊料层空洞分布在模块不同位置对其应变的影响规律，分析结果如图 22 所示。与图 14 相比，



(a) 焊料层上表面应变分布　(b) 焊料层下表面应变分布

图 19　芯片焊料层上下表面局部应变分布情况

Fig. 19　Local strain distribution on upper and lower surface of chip solder layer

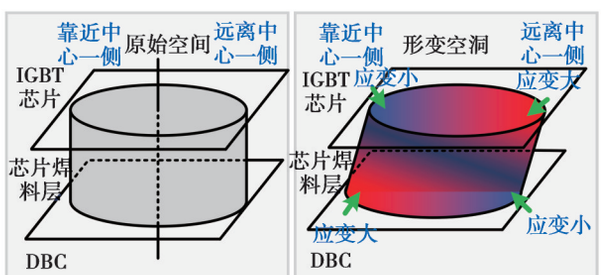


图 20　芯片焊料层上下表面局部应变分布情况

Fig. 20　Local strain distribution on upper and lower surfaces of chip solder layer

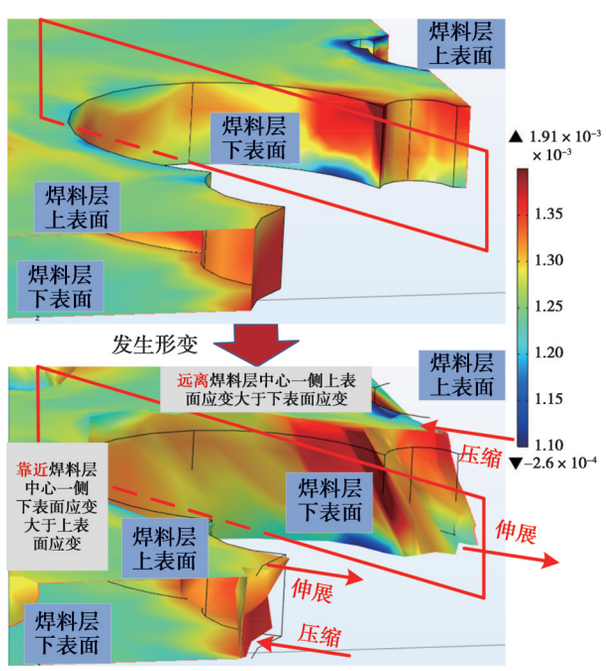


图 21　空洞形变

Fig. 21　Void deformation

即使具有相同的空洞分布，位于模块中间位置的芯片承受了近4倍的边缘位置芯片所承受的应变，这更容易促使焊料层空洞产生蠕变而发生退化。究其原因，在相同的运行条件下，受热耦合作用，IGBT模块中间温度要高于两侧温度，中间芯片承受着较大的热载荷，因此在功率循环过程中，中间位置焊料层比边缘位置焊料层应变要大很多。

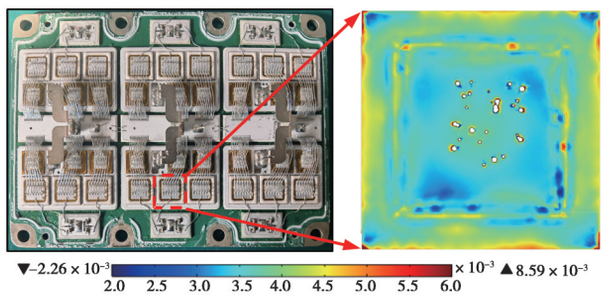


图 22　空洞形变分析结果

Fig. 22　Analysis results of void deformation

3　焊料层空洞上下表面应变分析

在IGBT模块运行过程中，模块功率损耗P通过各连接层传递至散热底板完成热传递过程。IGBT模块的热网络如图23所示，模块结温T_j可以通过热阻、功率损耗和外壳温度计算，计算公式为：

$$\left.\begin{aligned} Z_{JC} &= Z_{die} + Z_{D\text{-}S} + Z_{DBC} + Z_{B\text{-}S} + Z_{base} \\ T_J &= P \times Z_{JC} + T_C \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：Z_{die}为IGBT芯片热阻；$Z_{D\text{-}S}$为芯片焊料层热阻；Z_{DBC}为DBC热阻；$Z_{B\text{-}S}$为底板焊料层热阻；Z_{base}为基板热阻。

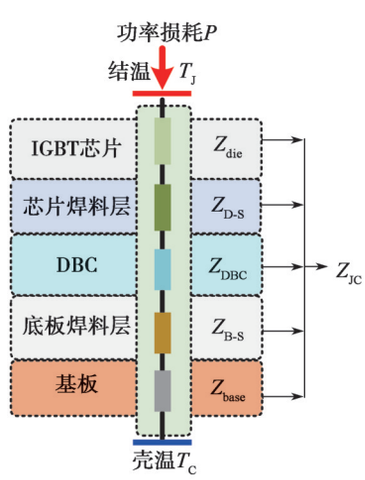


图 23　IGBT模块热网络模型

Fig. 23　Thermal network model of IGBT module

IGBT模块的结构由多层不同材料组成，每层材料膨胀系数CTE如表3所示。

在功率循环过程中，由于热阻的影响，IGBT芯片的温度明显要高于其他层，芯片的温度波动ΔT_d与芯片焊料层的温度波动ΔT_{ds}的关系为

$$\frac{\Delta T_d}{\Delta T_{ds}} = \frac{T_{d_max} - T_{d_min}}{T_{ds_max} - T_{ds_min}} = \frac{\left(Z_{JC} - Z_{die}\right)}{Z_{JC}} = \eta_1 \tag{3}$$

式中：ΔT_d为芯片温度波动；ΔT_{ds}为芯片焊料层的温度波动；T_{d_max}，T_{d_min}分别为芯片最高温度和最低温度；T_{ds_max}，T_{ds_min}分别为芯片焊料层的最高温度与最低温度；η_1为芯片温度波动与芯片焊料层温度波动比值。

在功率循环过程中，IGBT模块温度波动，使得

表3 IGBT模块各层材料和膨胀系数CTE

Table 3 Material and coefficient of thermal expansion (CTE) at IGBT module layers

模块层	材料	CTE	相邻层CTE差值
键合线	Al	22.0	19.0
IGBT芯片	Si	3.0	25.0
芯片焊料层	SnAg	28.0	10.5
DBC上铜层	Cu	17.5	10.5
DBC陶瓷层	Al_2O_3	7.0	10.0
DBC下铜层	Cu	17.5	10.5
底板焊料层	SnAg	28.0	10.5
铜基板	Cu	17.5	

IGBT芯片与附着在其下方的芯片焊料层发生形变，出现膨胀和收缩现象。由于IGBT芯片的热膨胀系数（CTE值）较小，与芯片焊料层间的CTE值相差较大，芯片焊料层的应变要远大于IGBT芯片的应变，IGBT芯片与芯片焊料层的形变情况如图24所示。

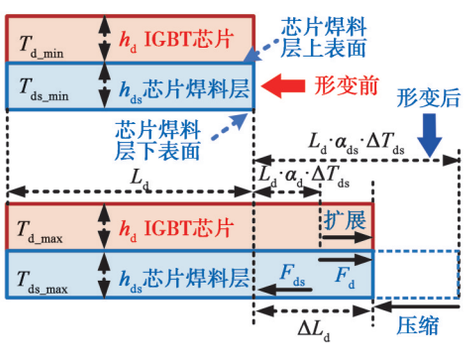


图24 IGBT芯片与芯片焊料层形变情况

Fig. 24 Deformation of IGBT chip and chip solder layer

IGBT芯片的热应变ε_d与芯片焊料层的热应变ε_{ds_u}为：

$$\varepsilon_d=\frac{\left|\Delta L_d-L_d\times\alpha_d\times\Delta T_d\right|}{L_d}=\left|\frac{\Delta L_d}{L_d}-\alpha_d\times\Delta T_d\right| \tag{4}$$

$$\varepsilon_{ds_u}=\frac{\left|\Delta L_d-L_d\times\alpha_{ds}\times\Delta T_{ds}\right|}{L_d}=\left|\frac{\Delta L_d}{L_d}-\alpha_{ds}\times\Delta T_{ds}\right| \tag{5}$$

式中：L_d为IGBT芯片长度；ΔL_d为IGBT芯片长度L_d在温度升高后的变化量；α_d为IGBT芯片形变系数；α_{ds}为芯片焊料层的形变系数。

根据牛顿第三定律，IGBT芯片作用力F_d与芯片焊料层作用力F_{ds}大小相等而方向相反，具体为

$$F_d=h_d\times E_d\times\varepsilon_d=F_{ds}=h_{ds}\times E_{ds}\times\varepsilon_{ds_u} \tag{6}$$

式中：h_d为IGBT芯片高度；E_d为IGBT芯片弹性模量；h_{ds}为芯片焊料层的高度；E_{ds}为芯片焊料层的弹性模量。

因此，式(5)可以改写为

$$\varepsilon_{ds_u}=\frac{\left|\alpha_d\Delta T_d-\alpha_{ds}\Delta T_{ds}\right|\times h_dE_d}{h_dE_d+h_{ds}E_{ds}}=\frac{\left|\eta_1\alpha_d-\alpha_{ds}\right|\times\Delta T_{ds}h_dE_d}{h_dE_d+h_{ds}E_{ds}} \tag{7}$$

同理，芯片焊料层下表面的热应变可以改写为：

$$\frac{\Delta T_{uc}}{\Delta T_{ds}}=\frac{\left(T_{d_max}-T_{d_min}\right)\left(Z_{JC}-Z_{die}-Z_{D\text{-}S}\right)}{\left(T_{d_max}-T_{d_min}\right)\left(Z_{JC}-Z_{die}\right)}=\frac{Z_{JC}-Z_{die}-Z_{D-S}}{Z_{JC}-Z_{die}}=\eta_2 \tag{8}$$

$$\varepsilon_{ds_l}=\frac{\left|\alpha_c\Delta T_{uc}-\alpha_{ds}\Delta T_{ds}\right|\times h_{uc}E_{uc}}{h_{uc}E_{uc}+h_{ds}E_{ds}}=\frac{\left|\eta_2\alpha_c-\alpha_{ds}\right|\times\Delta T_{ds}h_{uc}E_{uc}}{h_{uc}E_{uc}+h_{ds}E_{ds}} \tag{9}$$

式中：α_c为上铜层的形变系数；h_{uc}为上铜层的高度；E_{uc}为上铜层的弹性模量。

由于CTE值的差异，使得芯片焊料层不能同时与IGBT芯片、上铜层完美匹配。根据式(7)和式(9)，芯片焊料层上表面与下表面的热应变在功率循环过程中始终不会相等，并且上表面应变向外扩展，而下表面向靠近焊料层中心方向扩展，由于上下表面存在高度差，将会在空洞周围产生一对扭矩，对空洞进行拉扯，促使空洞不断扩展，空洞上下表面的应变呈现出中心对称的关系。剪切应变是芯片焊料层老化的主要因素，最终会影响到IGBT模块的寿命。

空洞引起的剪切应变对焊料层局部具有破坏性，Morrow理论[13]认为材料发生非弹性形变需要一定的能量，每个周期内的应力应变滞后还反映了在1个加载周期中材料消耗的能量。这些能量一部分转化为热能，另一部分对材料造成损伤，使焊料层失效。基于能量的疲劳寿命模型[14]为

$$\Delta W_c=W_f\left(2\times N_f\right)^{-m}=\frac{E\times\varepsilon^2}{2} \tag{10}$$

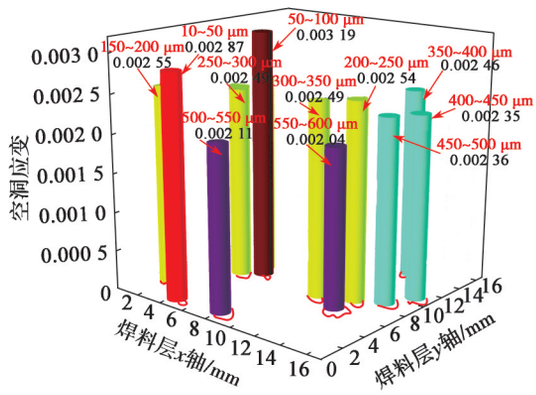
式中：ΔW_c为单周期内非弹性应变能密度增量；W_f为每一个循环中的塑性功密度的累积；N_f为空洞寿命；m为常数；E为芯片焊料层的弹性模量；ε为芯片焊料层的应变。

由式(10)可知，根据空洞周围的局部剪切应变可计算出该空洞周围最先发生疲劳部位的寿命，进而可以计算出不同大小空洞的寿命。取W_f=5.5×10^6 J/m^3，m=0.69，E=5.4×10^{10} Pa，可得

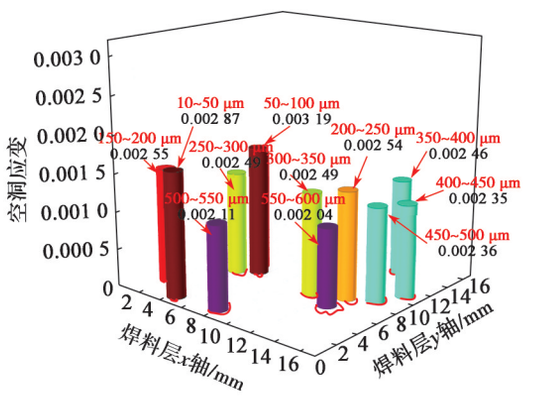
$$N_f=\frac{1}{2}\sqrt[m]{\frac{W_f}{\Delta W_c}}=\frac{1}{2}\sqrt[m]{\frac{2\times W_f}{E\times\varepsilon^2}}=\frac{1}{2}\sqrt[0.69]{\frac{2\times5.5\times10^6}{5.4\times10^{10}\times\varepsilon^2}} \tag{11}$$

利用前文的有限元仿真模型，统计不同尺寸的空洞上下表面最大平均应变和对应应变下的空洞寿命，计算结果如图25所示。

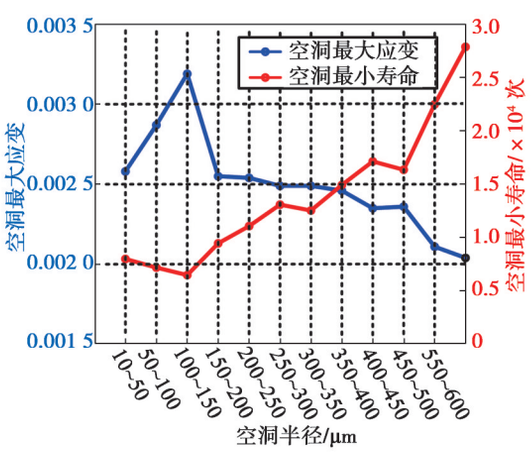
由图25可知，空洞的平均应力随空洞尺寸的增大而减小，并且焊料层上表面的应变值明显高于下表面应变值。另外，根据式(11)可知，空洞寿命与其应变值呈平方反比的关系，这意味着小空洞具有更短的寿命，



(a) 芯片焊料层上表面应变分布



(b) 芯片焊料层下表面应变分布



(c) 尺寸最大应变与最小寿命

图25　焊料上下表面不同空洞尺寸应变与寿命分布

Fig. 25　Strain and life time distribution of upper and lower surfaces of solder with different void sizes

而随着功率循环的进行，更多的小空洞向大空洞扩展，而大空洞则会经过相对较长的功率循环后才会发生老化，小空洞具有更快的扩展速率。

如果将测试条件设置为真实应力结温波动 ΔT_j=35 ℃和平均结温 T_{jmean}=60 ℃，那么需要测试时间非常长[15]。为了缩短测试时间，同时对比模块在不同状态下的参数变化情况，将4只同一批次的IGBT模块置于平均结温 T_{jmean}=100 ℃和结温波动 ΔT_j=100 ℃的条件下进行功率循环试验，每进行2万次功率循环后对IGBT模块进行静态特征参数测试，参数测试结果如表4所示。其中，ΔR_{th}为归一化的热阻值，ΔV_{CEsat}为归一化的导通电压值。

表4　IGBT特征参数测试结果（T_{jmean}=100 ℃，ΔT_j=100 ℃）

Table 4　Test results of IGBT characteristic parameters (T_{jmean}=100 ℃, ΔT_j=100 ℃)

模块	参数	功率循环次数/×10⁴次					
		2	4	6	8	10	14
全新模块	ΔV_{CEsat}	1.034	1.060	1.012	1.002	*	*
	ΔR_{th}	0.995	0.941	0.997	1.004	*	*
360万km模块1	ΔV_{CEsat}	*	1.005	1.018	1.069	1.069	1.020
	ΔR_{th}	*	1.149	1.046	1.053	1.053	1.271
360万km模块2	ΔV_{CEsat}	1.050	0.999	0.990	0.993	**	**
	ΔR_{th}	1.125	1.099	1.178	1.167	**	**
480万km模块1	ΔV_{CEsat}	1.026	0.993	**	**	**	**
	ΔR_{th}	0.985	1.266	**	**	**	**
480万km模块2	ΔV_{CEsat}	1.000	**	**	**	**	**
	ΔR_{th}	1.249	**	**	**	**	**

注：“*”表示未测试；“**”表示停止测试。

从表4可知，IGBT模块热阻增加的幅度大于导通电压的变化幅度，同时热阻增加先于导通电压增加，故焊料层会先于键合线失效。其原因在于模块由不同材料组成，材料之间的热膨胀系数不匹配引起交变热应力，初始缺陷空洞扩展，逐渐形成裂纹，从而影响热路传热性能，导致热阻增大。因此，研究模块老化时需要重点考虑焊料层演化机制。

4　结论

本文首先对比了全新模块与服役模块芯片焊料层间空洞分布的差异，随后利用不同服役模块空洞的分布规律，建立了准确的多物理场模型，研究了芯片焊料层中空洞的演化机理，最后根据焊料层上下表面应变分布的数学表达式，验证了多物理场模型空洞的蠕变规律，具体结论如下：

①焊料层疲劳失效是IGBT模块的主要失效方式之一，芯片焊料层中边缘位置处的空洞数量多于其他位置处空洞数量；对于全新模块，100 μm空洞数量约占整体空洞数量的80%以上，其中不同空洞尺寸的数量服从 λ=2 的泊松分布，10~20 μm空洞居多，而服役后不同空洞尺寸的数量服从 λ=4 的泊松分布，模块空洞尺寸整体增大，因此可以在统计不同尺寸的空洞数量分布情况后，利用泊松分布的方差 λ 来判断焊料层的疲劳程度。

②对于芯片焊料层的上下表面，在相同条件下，上表面应变方向以中心为原点呈放射状，所有空洞的上表面均在向外扩展，而下表面应变方向与上表面相

反，即所有空洞的下表面应变方向向中心汇聚。由于芯片焊料层存在高度差，将会在空洞的上下表面形成一对扭矩，对空洞进行拉扯，从而引起整体空洞加速往增大尺寸方向偏移。

③对于不同尺寸的空洞，小空洞逐渐向大空洞演化，大空洞将逐渐扩展，与周围空洞合并形成裂纹。小空洞承受的应变要大于大空洞承受的应变，根据基于能量的疲劳寿命模型，寿命与应变大小呈负相关，小空洞比大空洞更容易疲劳老化；观察应变分布情况，小空洞约一半边长承受较大应变，而大空洞承受较大应变对应边长仅不到大空洞边长的 1/4，进一步说明小空洞比大空洞具有更快的生长速率。

参考文献：

[1] 林双双. 基于信号处理的牵引逆变器IGBT的故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIN Shuangshuang. Fault diagnosis of IGBT based on signal processing methods in traction inverter system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[2] 陶宣彤. 大功率电力机车牵引变流器故障诊断与寿命预测[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
TAO Xuantong. Fault diagnosis and remaining-life prediction of traction converter for high power electric locomotive [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[3] 徐玲, 周洋, 张泽峰, 等. IGBT模块焊料层空洞对模块温度影响的研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(2): 125-129.
XU Ling, ZHOU Yang, ZHANG Zefeng, et al. Influence of solder void to thermal distribution of IGBT module[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2014, 9(2): 125-129.

[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] 江南. 计及疲劳累积效应的IGBT模块焊料层失效机理及疲劳损伤研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
JIANG Nan. Study on failure mechanism and fatigue damage of the solder layer in the IGBT module considering cumulative damage[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[6] 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.

[7] DU Mingxing, GUO Qiuya, WANG Hongbin, et al. An improved cauer model of IGBT module: inclusive void fraction in solder layer[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(8): 1401-1410.

[8] 唐圣学, 马强, 陈冬, 等. IGBT模块焊料层空洞生长分析与评估方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 244-254.
TANG Shengxue, MA Qiang, CHEN Dong, et al. IGBT module solder layer void growth analysis and evaluation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 244-254.

[9] HU Borong, KONAKLIEVA S, KOURRA N. Long-term reliability evaluation of power modules with low amplitude thermomechanical stresses and initial defects[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 602-615.

[10] 郑钢涛, 陈素鹏, 胡俊, 等. 焊料层空洞面积对功率器件电阻和热阻的影响[J]. 半导体技术, 2010, 35(11): 1059-1063.
ZHENG Gangtao, CHEN Supeng, HU Jun, et al. Effects of void area in solder layer on resistance and thermal impedance of power devices[J]. Semiconductor Technology, 2010, 35(11): 1059-1063.

[11] JIA Yingjie, HUANG Yongle, XIAO Fei, et al. Impact of solder degradation on V_{CE} of IGBT module: experiments and modeling[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4536-4545.

[12] SYED A. Accumulated creep strain and energy density based thermal fatigue life prediction models for SnAgCu solder joints[C]//IEEE. 54th Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas: IEEE, 2004: 737-746.

[13] ABUELNAGA A, NARIMANI M, BAHMAN A S. A Review on IGBT module failure modes and lifetime testing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 9643-9663.

[14] 方鑫, 周雒维, 姚丹, 等. IGBT模块寿命预测模型综述[J]. 电源学报, 2014(3): 14-21.
FANG Xin, ZHOU Luowei, YAO Dan, et al. An overview of IGBT life prediction models[J]. Journal of Power Supply, 2014(3): 14-21.

[15] LAI Wei, CHEN Minyou, RAN Li, et al. Experimental investigation on the effects of narrow junction temperature cycles on die-attach solder layer in an IGBT module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1431-1441.