DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.011　　文章编号：1000-128X(2023)05-0107-06

基于应力差改善的SiC模块用氮化硅衬板匹配性研究

黄世东[1]，王顾峰[1]，沈轶聪[1]，常桂钦[2]，刘成臣[2]
（1.浙江德汇电子陶瓷有限公司，浙江 嘉兴 314000；
2.株洲中车时代半导体有限公司，湖南 株洲 412001）

摘　要：功率半导体器件的快速发展，特别是SiC功率模块的广泛应用对模块中的陶瓷覆铜衬板提出了更高要求，模块封装中陶瓷覆铜衬板的翘曲将影响其可靠性。文章研究了陶瓷覆铜衬板的应力状态以及应力与衬板翘曲的关系，并提供了包括延长冷却时间、降低峰值温度、调整铜体积比在内的减小翘曲度的改善方案，使衬板与SiC模块匹配性得到提升，从而提升了模块可靠性。

关键词：SiC模块；陶瓷覆铜衬板；应力；翘曲度；可靠性
中图分类号：TM304.2+4　　**文献标识码：**A

A study on matching of Si_3N_4 substrate for SiC module based on stress difference improvement

HUANG Shidong[1], WANG Gufeng[1], SHEN Yicong[1], CHANG Guiqin[2], LIU Chengchen[2]

(1. Zhejiang TC Ceramic Electronic Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314000, China;
2. Zhuzhou CRRC Time Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The rapid development of power semiconductor devices, especially the widespread application of SiC power modules, has put forward higher requirements for ceramic copper-coated substrate in modules, and the warpage of the substrate in module packaging will affect its reliability. The article studied the stress state of the substrate and the relationship between the stress and the warpage, and provided improvement plans to reduce the warpage, including extending cooling time, reducing peak temperature, and adjusting copper volume ratio to improve the matching between the substrate and SiC module, thereby enhancing module reliability.

Keywords: SiC power module; ceramic copper-coated substrate; stress; warpage; reliability

0　引言

目前，陶瓷覆铜衬板的制作工艺主要有直接覆铜（Direct Bond Copper, DBC）和活性铜钎焊（Active Metal Brazing, AMB）2种。DBC工艺是指将铜（Cu）基材氧化使其表面生长一层Cu_2O，并将氧化后的Cu基材贴附于陶瓷基材上，在1 080 ℃的高温下烧结，使铜和陶瓷接触面形成共晶层。AMB工艺是利用钎焊料中所含有的少量活性元素钛（Ti）与陶瓷反应，在900 ℃的高温下烧结，生成能被液态钎焊料润湿的反应层，从而在铜与陶瓷接触面形成钎焊层，目前该工艺大多数使用Ag-Cu-Ti或Cu-Ti钎焊料体系[1]。DBC工艺和AMB工艺的烧结温度均高于800 ℃，在高温阶段，铜材处于软化但未熔融状态，铜材、中间层（DBC共晶层、AMB钎焊层）、陶瓷的热膨胀系数不一致，导致

基金项目：湖南省科技重大项目（2021GK1180）
通信作者：黄世东（1986—），男，硕士，主要从事陶瓷覆铜基板方面的研究；E-mail: shidong.huang@tceratronix.com
引用格式：黄世东, 王顾峰, 沈轶聪, 等. 基于应力差改善的SiC模块用氮化硅衬板匹配性研究[J]. 机车电传动, 2023(5): 107-112.
Citation: HUANG Shidong, WANG Gufeng, SHEN Yicong, et al. A study on matching of Si_3N_4 substrate for SiC module based on stress difference improvement[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 107-112.

在降温过程中由于材料收缩差异而产生热应力，最终产生应力、造成翘曲。

功率模块发展至今，SiC芯片及器件的快速发展对陶瓷覆铜衬板提出新的要求：机械强度增加以提升模块寿命，整体尺寸缩小以减小模块热阻。因此，由前期的氮化铝陶瓷覆铜板、氧化铝陶瓷覆铜板，逐渐演变成氮化硅陶瓷覆铜板、氧化锆陶瓷覆铜板。由于陶瓷种类变更、整体厚度减小，使得陶瓷基板的厚度也进一步减小，这导致在陶瓷覆铜衬板制作及模块封装时，衬板更易发生翘曲，影响模块封装可靠性和寿命[2-9]。

本文针对氮化硅陶瓷覆铜板的AMB工艺，对内应力形成机理、检测方式、常规表征手段及改善方案进行研究，从而提升模块性能。

1 应力产生机理

本文应力主要是指在温度变化时，由于材料之间相互约束而不能完全自由膨胀或收缩所产生的应力。材料中的应力大多数是指经过热处理后的内应力，内应力很大程度上会影响材料的形状、尺寸和性能。同时，应力随着约束的增加而增大，由于材料本身的热膨胀系数、弹性模量和泊松比随温度的变化而变化，因此应力不但和温度变化量相关，而且和其初始温度有密切的关系。当应力值超过材料屈服强度时，会造成工件变形；当应力值超过材料强度极限时，可能导致开裂。这是极其有害的，应尽可能减少或消除[10-11]。

陶瓷覆铜衬板在工艺制程中需要经过高温烧结工序。高温阶段各材料热膨胀系数不一致，具体如表1所示，这导致了降温过程中材料的收缩差异，最终产生内应力[11-13]，这是SiC陶瓷覆铜衬板翘曲的主要原因。

2 应力与翘曲度的测量与分析

2.1 内应力的测量

通过X射线衍射法测量内应力的基本原理是：首先测得衍射峰的位移作为其原始数据，然后通过试验测量衍射角度变化，最后基于胡克定律通过计算得出内应力的值。由于材料存在内应力，其晶面间距会发生变化，当布拉格衍射产生时，衍射峰也会移动，移动的距离与应力的大小有关[14]。

采用波长为λ的X射线以不同入射角对工件进行多次照射，检测出相应的衍射角2θ，并通过式(1)求出内应力σ。

$$\sigma=-\frac{E}{2(1+v)}\cot\theta_0\frac{\pi}{180}\frac{\partial(2\theta)}{\partial(\sin^2\psi)} \tag{1}$$

式中：σ为试样的内应力；E为试样的弹性模量；v为泊松比；θ_0为晶面无内应力时的衍射角；2θ为存在应力时测得的衍射角；ψ为试样表面法线与所测晶面法线的夹角。

X射线衍射法对材料没有损伤，测量结果也较为精确，并且可以进行多次测试，但也存在以下不足：①测量深度有限，只能测微米级深度的表面应力；②当衍射峰不够明锐时，测量精度不高，当衍射峰明锐时，测量误差为± 20 MPa；③不适宜单晶材料的内应力测量，要求试样为多晶体物质，且晶粒尺寸太大时可能检测不到其衍射峰，晶粒太小又会导致衍射峰宽化而降低明锐度，这均会显著降低测量精度[15-17]。

2.2 翘曲度的测量

本文的翘曲度测量通过3D扫描仪开展，测量时先基于激光三角测量原理扫描衬板的表面轮廓，由软件自动运算得出三维模型，从而计算得到翘曲度。

翘曲度（弓曲）的计算公式为

$$q=(d_1\div d_2)\times100\%$$

式中：q为翘曲度；d_1为衬板翘曲最大垂直距离；d_2为最大弯曲边长度。

2.3 应力差值与翘曲度的关系

在室温状态下，针对不同翘曲度的陶瓷覆铜衬板的TOP/BOTTOM面进行铜面应力测试[18]，计算TOP面与BOTTOM面的应力差值。结果显示，翘曲度与应力差值呈现一定的拟合关系，整体表现为翘曲度越大、应力差值越高，两者近似成正比例关系，具体如图1所示。

在陶瓷覆铜衬板工艺制程中，翘曲度为常见的参数。考虑到翘曲度数据较为直观且易检测，后续研究将作为主要中间表征手段。

2.4 温度-翘曲度分析

使用端的衬板结构如图2所示，其结构从上到下依次是：芯片-近端焊接层-陶瓷基板-远端焊接层-底板。定义陶瓷覆铜衬板与芯片的焊接面为A面（或TOP面），陶瓷覆铜衬板与底板的焊接面为B面（或BOTTOM面）。

表1 材料的热膨胀系数参数

Table 1 Parameters for thermal expansion coefficient

材质	铜99.99%	氧化铝Al_2O_3	氧化锆ZTA	氮化铝AlN	氮化硅Si_3N_4	衬板焊料层	焊接层
热膨胀系数/(m·℃$^{-1}$)	17.20×10^{-6}	7.80 ×10^{-6}	8.00 ×10^{-6}	5.20 ×10^{-6}	3.10×10^{-6}	9.35 ×10^{-6}	24.50 ×10^{-6}

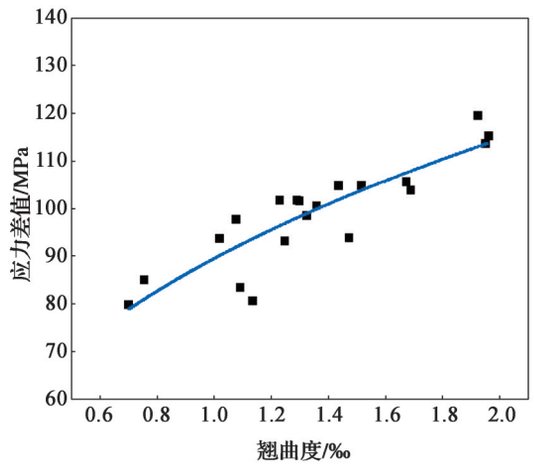

图1　翘曲度与应力差值的拟合曲线

Fig. 1　Fitted curve of warpage and stress difference value

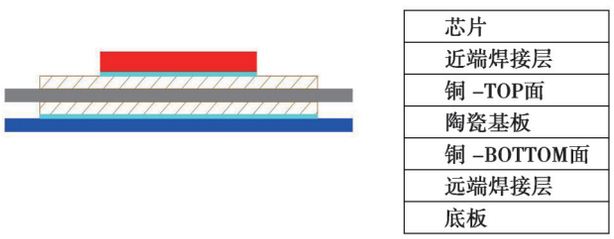

图2　功率模块结构图

Fig. 2　Structural diagram of power module

对于模块封装，因工艺需求衬板要经过2次焊接，理想的衬板翘曲度随温度变化曲线如图3所示。

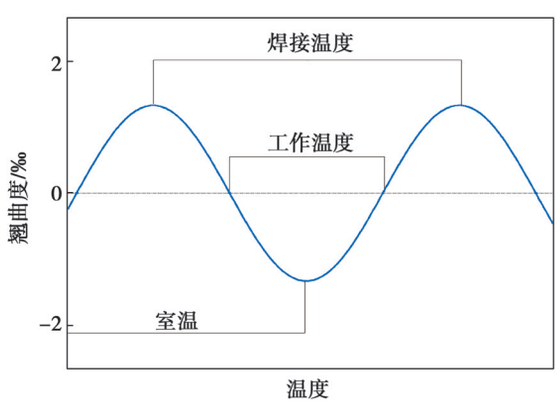

图3　翘曲度理想状态

Fig. 3　Ideal warpage

在模块工作过程中，由于铜层、陶瓷基板、衬板钎焊层热膨胀系数不一致，且历经多次冷热循环，因此材料容易疲劳、产生塑性变形，这将引起基板与铜层分离、陶瓷覆铜衬板分离失效，最终将会导致模块失效[19]。

2.5　铜体积比-翘曲度分析

理论上，TOP面和BOTTOM面之间的铜体积比[即（TOP面铜层面积×铜层厚度）/（BOTTOM面铜层面积×铜层厚度）]接近于100%，陶瓷基板两侧铜层在加热冷却过程中所产生的应力差值相对较小，翘曲度较小；但在线路设计时TOP面多为线路面，TOP面和BOTTOM面存在铜层尺寸的不一致，这会导致最终成品的翘曲度差异[20]。

针对不同铜体积比的线路设计进行了翘曲度的测试，其结果如图4所示。

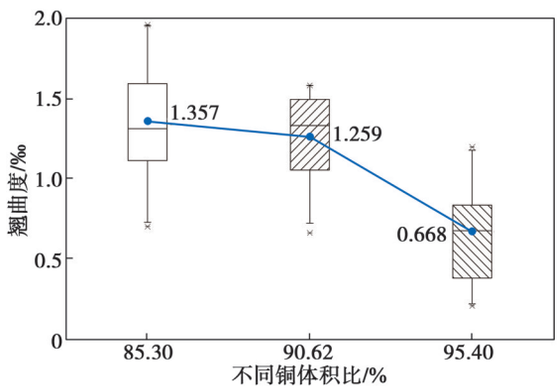

图4　不同铜体积比对应的翘曲度

Fig. 4　Warpage corresponding to different copper volume ratios

在相同的工艺条件下，当采用相同的物料组合和不同的TOP/BOTTOM面线路设计方案时，随两面之间铜体积比的增大，翘曲度整体呈减小趋势；比值越趋近于100%，翘曲度越低，陶瓷衬板越平整。在铜体积阶梯测试中，当铜体积比为85%、90%、95%时，翘曲度逐渐减小，特别是95%的体积比时翘曲度出现了明显减小。

3　翘曲度的改善与验证

3.1　工艺条件改进

在陶瓷覆铜衬板的工艺制程中，烧结工序存在高温加热与冷却过程，考虑到应力产生机理，为改善翘曲度，本文的研究对烧结工序参数进行了调整：降低峰值温度，使回温温度梯度更小；延长冷却时间，使应力缓慢释放。工艺条件变更后的情况如图5所示，由图5可知，延长冷却时间和降低峰值温度后，陶瓷覆铜衬板的翘曲度有了明显降低[21]。

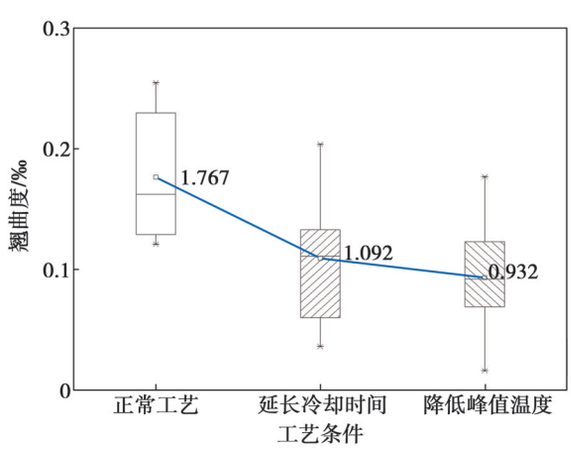

图5　变更工艺条件后的翘曲度

Fig. 5　Warpage after changing process conditions

3.2 铜体积比优化

为进一步控制翘曲度，本文的研究对铜体积比进行了优化，在满足性能与客户要求的前提下，使理论上 TOP/BOTTOM 面之间的铜体积比更趋近于 100%，尽可能减小翘曲度的数值，优化结果如图 6 所示。在实际测试中，通过对覆铜衬板 TOP 面与 BOTTOM 面铜层的铜进行微蚀以减小厚度。可通过对 BOTTOM 面铜层进行微蚀而 TOP 面铜层不变，或者在条件相同的情况下对两面均进行微蚀的方式，使两面之间的铜体积比更加趋近于 100%，有效降低翘曲度。

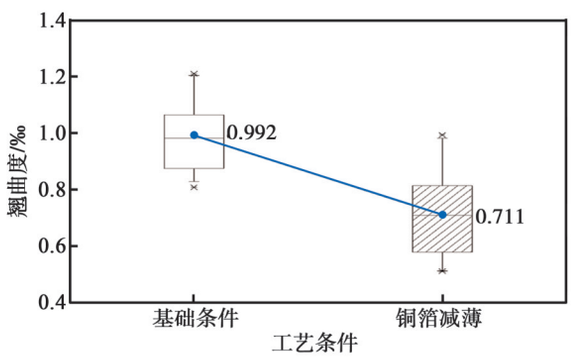

图 6 优化铜体积比后翘曲度变化

Fig. 6 Variation of warpage after the copper volume ratio optimization

3.3 温度冲击试验验证

针对上述改善翘曲度的方案，对不同的覆铜衬板进行了温度冲击试验[22]。

试验方法为：将衬板放置在 300 ℃的加热平台上，持续时间 5 min；然后取出衬板直接放入 25 ℃的水浴锅中，持续时间 2 min；依次循环，直至铜层与陶瓷层分离即视为衬板失效[18, 23]。

不同优化条件下衬板温度冲击试验数据如图 7 所示，试验结果显示，工艺制程条件改进及铜体积比调整均能不同程度地优化衬板性能。

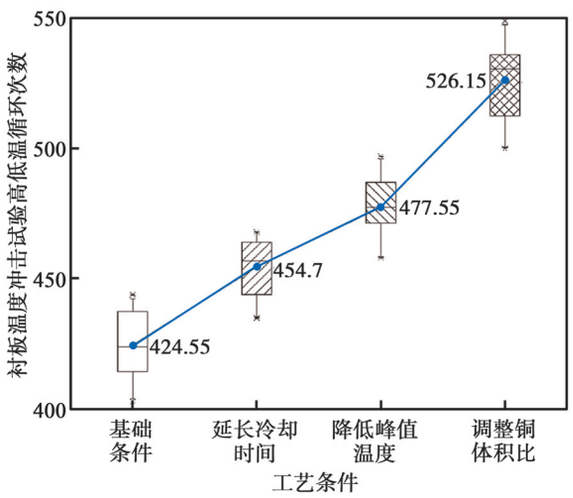

图 7 变更条件后衬板 TST 变化

Fig. 7 Variation of substrate TST after conditional change

3.4 二次焊接模拟翘曲试验验证

针对改变 TOP/BOTTOM 面铜体积比、优化工艺制程条件后的衬板，采用带加热功能的 3D 扫描仪进行检测。所测覆铜衬板经历了从室温状态到一次焊接状态，进而冷却至室温，再从室温状态到二次焊接状态，再次冷却至室温的变化，整体测试结果如图 8 所示。

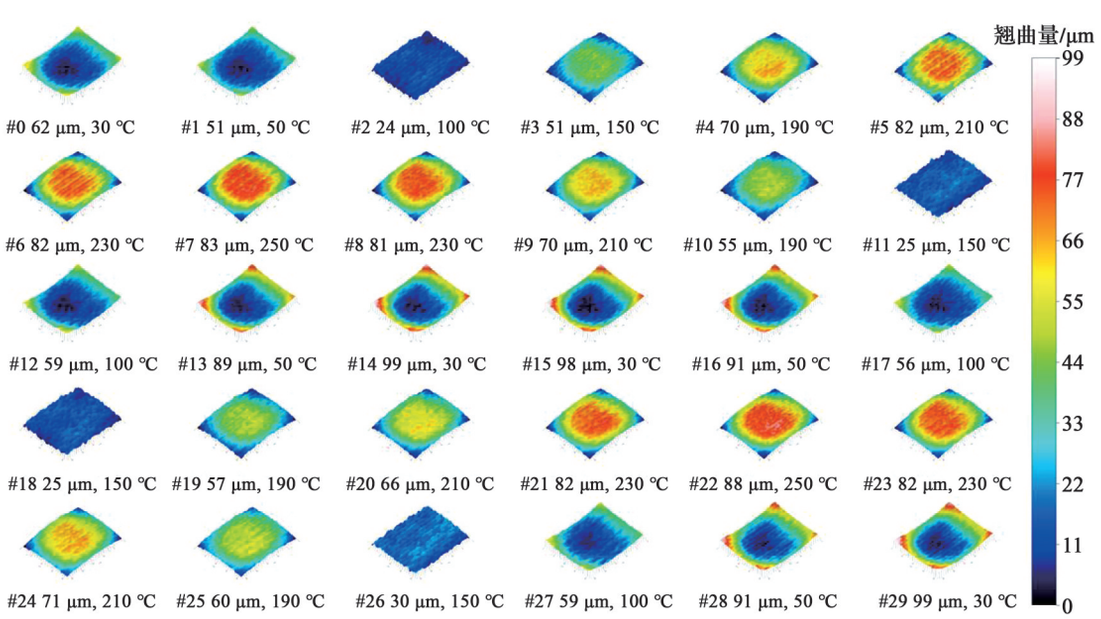

图 8 陶瓷衬板在无外力作用下不同温度下衬板的 3D 轮廓及对应翘曲量

Fig. 8 The 3D profile and corresponding warpage of substrate at different temperatures without external force

因材料热膨胀系数与应力差的变化，衬板随温度的改变在不同的温度阶段呈现不同的应力差状态及翘曲状态。在多次加热、冷却的条件下，应力得到释放，衬板翘曲度、应力差趋于稳定。在 150 ℃左右，衬板的翘曲度最小，此温度为 SiC 功率模块的工作温度，与模块的正常工作状态匹配[20]。因此，通过改变 TOP/

BOTTOM面铜体积比和优化工艺制程条件，可以得到比较理想的符合模块要求的衬板。

4　结束语

本文对氮化硅陶瓷覆铜衬板在AMB工艺下的内应力产生机理和改善方案进行研究，其研究成果对DBC工艺也有一定参考。经过优化工艺制程条件和优化TOP/BOTTOM面铜体积比的氮化硅陶瓷覆铜衬板能有效改善应力差值，从而减小翘曲度，最终使衬板能在SiC功率模块正常工况下达到较为平整的状态，提升模块循环性能，进一步匹配了SiC功率模块性能要求。

参考文献：

[1] 钱建波, 黄世东. IGBT用氮化铝覆铜衬板可靠性研究[J]. 大功率变流技术, 2017(5): 55-59.
QIAN Jianbo, HUANG Shidong. Research on the reliability of aluminum nitride ceramic substrate for IGBT[J]. High power converter technology, 2017(5): 55-59.

[2] 魏晓光, 吴智慰, 唐新灵, 等. 国产 6.5 kV/400 A SiC MOSFET模块研制及电气特性研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-16 [2023-05-12]. https://doi. org/10.13334/j. 0258-8013.pcsee.230626.
WEI Xiaoguang, WU Zhiwei, TANG Xinling, et al. Fabrication and electrical characterisitics research of domestic 6.5 kV/400 A silicon carbide MOSFET module[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-16 [2023-05-12]. https://doi. org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230626.

[3] 柯攀, 黄蕾, 杜隆纯, 等. 全银烧结双面散热SiC模块的工艺设计[J]. 机车电传动, 2021(5): 93-98.
KE Pan, HUANG Lei, DU Longchun, et al. Development of full Ag sintering double side cooling SiC power module[J]. Electric drive for locomotives, 2021(5): 93-98.

[4] 戴小平, 吴义伯, 赵义敏, 等. 全烧结型SiC功率模块封装设计与研制[J]. 大功率变流技术, 2016(5): 36-40.
DAI Xiaoping, WU Yibo, ZHAO Yimin, et al. Packaging consideration and development for fully sintered SiC power module[J]. High power converter technology, 2016(5): 36-40.

[5] 盛永和, 科利诺. 电力电子模块设计与制造[M]. 梅云辉, 宁圃奇, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
SHENG W W, COLINO R P. Power electronic modules design and manufacture[M]. translated by MEI Yonghui, NING Puqi. Beijing: China Machine Press, 2016.

[6] 盛况, 任娜, 徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1752.
SHENG Kuang, REN Na, XU Hongyi. A recent review on silicon carbide power devices technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1741-1752.

[7] 盛况, 董泽政, 吴新科. 碳化硅功率器件封装关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5576-5584.
SHENG Kuang, DONG Zezheng, WU Xinke. Review and prospect of key packaging technologies for silicon carbide power devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5576-5584.

[8] 王来利, 赵成, 张彤宇, 等. 碳化硅功率模块封装技术综述[J/OL]. 电工技术学报: 1-16 [2023-05-12]. https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221214.
WANG Laili, ZHAO Cheng, ZHANG Tongyu, et al. Review of packaging and integration technology in silicon carbide power modules[J/OL]. Transactions of China electrotechnical society: 1-16 [2023-05-12]. https://doi. org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.221214.

[9] 丁荣军, 刘国友. 轨道交通用高压IGBT技术特点及其发展趋势[J]. 机车电传动, 2014(1): 1-6.
DING Rongjun, LIU Guoyou. Technical features and development trend of high-voltage IGBT for rail transit traction application[J]. Electric drive for locomotives, 2014(1): 1-6.

[10] 姜传海, 王德尊, 吴建生. 晶须取向对SiCw/Al复合材料力学性能的影响[J]. 理化检验(物理分册), 2001, 37(9): 373-375.
JIANG Chuanhai, WANG Dezun, WU Jiansheng. Influence of whisker orientation on the tensile properties of the SiCw/Al composites[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: physical testing), 2001, 37(9): 373-375.

[11] 刘虹志, 彭家根, 肖坤祥. 陶瓷/金属钎焊体系反应润湿及残余热应力缓解的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 53-57.
LIU Hongzhi, PENG Jiagen, XIAO Kunxiang. Reactive wetting and thermal residual stress releasing of ceramic/metal brazed joints: a review[J]. Materials review, 2017, 31(5): 53-57.

[12] 刘忠军, 奚正平, 汤慧萍, 等. 烧结应力研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 1687-1692.
LIU Zhongjun, XI Zhengping, TANG Huiping, et al. Research progress of sintering stress[J]. Rare metal materials and engineering, 2010, 39(9): 1687-1692.

[13] 姜传海, 吴建生, 王德尊. SiCw/Al复合材料高温再结晶行为的X射线衍射分析[J]. 金属学报, 2004, 40(10): 1023-1026.
JIANG Chuanhai, WU Jiansheng, WANG Dezun. X-ray diffraction analysis for the recrystal-lization behavior of SiCw/Al composite at high temperature[J]. Acta metallurgica sinica, 2004, 40(10): 1023-1026.

[14] 李向东, 涂春磊, 伍昊, 等. 材料内应力的检测方法[J]. 理化检验(物理分册), 2020, 56(6): 15-20.
LI Xiangdong, TU Chunlei, WU Hao, et al. Testing method for internal stress of materials[J]. Physical testing and chemical analysis (part A: physical testing), 2020, 56(6): 15-20.

[15] 罗玉梅, 任凤章, 张伟, 等. X射线法测量多晶材料残余应力[J]. 材料导报, 2014, 28(11): 112-114.

LUO Yumei, REN Fengzhang, ZHANG Wei, et al. Measuring of residual stress of polycrystalline materials by XRD method[J]. Materials reports, 2014, 28(11): 112-114.

[16] 张定铨, 何家文. 材料中残余应力的X射线衍射分析和作用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
ZHANG Dingquan, HE Jiawen. X-ray diffraction analysis and action of residual stresses in materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999.

[17] 马昌训, 吴运新, 郭俊康. X射线衍射法测量铝合金残余应力及误差分析[J]. 热加工工艺, 2010, 39(24): 5-8.
MA Changxun, WU Yunxin, GUO Junkang. Residual stress in aluminum alloy measured by x-ray diffraction and error analysis[J]. Hot working technology, 2010, 39(24): 5-8.

[18] MIYAZAKI H, IWAKIRI S, HIROTSURU H, et al. Effect of mechanical properties of the ceramic substrate on the thermal fatigue of Cu metallized ceramic substrates[C]// IEEE. 2016 IEEE 18th Electronics Packaging Technology Conference. Singapore: IEEE, 2016: 268-270.

[19] MIRONE G, SITTA A, D'ARRIGO G, et al. Material characterization and warpage modeling for power devices active metal brazed substrates[J]. IEEE transactions on device and materials reliability, 2019, 19(3): 537-542.

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

[21] SITTA A, CALABRETTA M, RENNA M, et al. Solder joint reliability: thermo-mechanical analysis on power flat packages[M]//EYNARD B, NIGRELLI V, OLIVERI S M, et al. Advances on mechanics, design engineering and manufacturing. Cham: Springer, 2017: 709-716.

[22] 谢鑫鹏. 功率器件封装的可靠性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
XIE Xinpeng. The reliability research in power device packaging[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[23] 吴顶和. 功率器件封装的失效分析技术及技术应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.
WU Dinghe. Research on failure analysis technology and technology application of power device packaging[D]. Shanghai: Fudan University, 2008.

收稿日期：2023-07-06
修回日期：2023-08-14