

星载微波电路用高纯氧化铝基板的工艺适用性验证技术

王平¹ 曲媛¹ 高鸿² 贾旭洲¹ 何端鹏² 刘泊天²
于利夫² 文明²

(1 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

(2 中国空间技术研究院, 北京 100094)

文 摘 为了确保星载微波电路用高纯氧化铝基板的国产化可靠替代,本文通过全面分析星载产品用高纯氧化铝基板的工艺适用性验证需求,研究建立了星载微波电路用高纯氧化铝基板的工艺适用性验证指标体系,确定了验证试验项目,利用微波电路工艺件试验和组件产品环境适应性考核等试验验证手段,示范性地阐释了陶瓷基板类材料工艺适用性验证方法。研究表明,基于验证需求分析确定验证项目,通过试验与工艺实践获得各类验证数据进行多维度综合评价,可以给出客观完整、科学有效的工艺适用性验证结论。

关键词 微波电路,高纯氧化铝基板,工艺适用性验证

中图分类号:V19

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.024

Process Suitability Verification Technology of High-purity Alumina Substrates for Spaceborne Microwave Circuits

WANG Ping¹ QU Yuan¹ GAO Hong² JIA Xuzhou¹ HE Duanpeng²
LIU Botian² YU Lifu² WEN Ming²

(1 China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100)

(2 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

Abstract In order to ensure the domestic reliable replacement of high-purity alumina substrates for satellite microwave circuits, the requirements for process suitability verification of high-purity alumina substrates for spaceborne products are analyzed comprehensively, research has established a process suitability verification index system for high-purity alumina substrates used in spaceborne microwave circuits, verification test project is confirmed, experimental verification methods such as microwave circuit process component test and component product environmental adaptability assessment are utilized, the process suitability verification method of ceramic substrate materials is demonstrated. The study shows the verification project is identified based on verification requirement analysis, all kinds of verification data are obtained through experiment and process practice for multidimensional comprehensive evaluation, the objective, complete, scientific and effective process suitability verification conclusion is given.

Key words Microwave circuit for spacecraft, High purity alumina substrate, Process suitability validation

0 引言

高纯氧化铝陶瓷因其生产和加工技术成熟、成本低廉、耐热冲击和电绝缘性能好以及与金属附着性良好等优点,是目前应用较为广泛的基板材料^[1],也被广泛应用于星载微波信号传输通道、有源器件安装载体以及功率芯片的散热通道等电子载荷单机中。但由于

长期以来国产氧化铝基板存在电性能离散性大、基板致密性不足以及内部缺陷多等问题,卫星在轨不可维修性和高可靠性要求限制了其在星载微波组件中的应用。近年来,随着我国陶瓷材料研制技术水平的提升,国产高纯氧化铝陶瓷基板性能已达到或超越国际同类产品。

收稿日期:2022-08-02

第一作者简介:王平,1973年出生,硕士,高级工程师,主要从事微波基板薄膜专业工艺技术工作。E-mail:wpeter35@163.com

通信作者:高鸿,1980年出生,博士,研究员,主要从事航天器材料应用可靠性研究工作。E-mail:gaohong_cast@sina.com

作为组成航天器的最基本单元,航天器材料的性能水平将直接影响航天器在轨的可靠性^[2]。国产高纯氧化铝基板的制造水平虽明显提高,但其是否满足星载产品的高可靠应用需求,还有待大量试验的验证。本文结合国产材料研制状态,针对星载微波电路用高纯氧化铝基板的工艺工况,分别从验证需求、验证内容、验证指标体系、试验实施与综合评价等几个方面,对国产某氧化铝基板的工艺适用性验证技术进行研究。

1 验证需求分析

航天器除了精心设计和制造之外,还需要对材料、工艺等基础要素失效物理行为开展验证,以满足产品可靠性设计和制备要求^[3]。为满足星载微波电路产品的高可靠要求,国产氧化铝基板材料工艺适用性验证工作需结合材料、工艺样件两类验证样品状态,通过加载不同的环境验证考核条件,研究与工艺有关材料特性变化规律,以验证现有工艺工况在基板材料上的适用程度。航天器的一切试验,都是为保证航天器在发射、运行或返回的整个寿命内都能可靠地、不降低性能地工作^[4],工艺适用性验证试验是其中不可缺少的部分。基板材料特性指标一般依据成熟的测试和试验标准来验证,基板的应用可靠性验证也可依据相关标准开展环境试验来落实,含有氧化铝基板的组件其工作健壮性也有相对固定的流程来考核,而基板的工艺适用性验证则具有较大的不确定性和复杂性。因为,高纯氧化铝中的杂质种类和含量,会直接影响其物理和

化学性能^[5],这些影响往往会在电路加工工艺或组装应用的过程中出现,却很难具体和量化。因此,工艺适用性验证需求的确定具有相当难度。

高纯氧化铝陶瓷基板,需要通过钻孔、真空镀膜、图形转移、膜层加厚、成品外形切割、阻值调整等工艺流程才能制作成实际电路。任意环节出现基板裂纹、边缘崩裂等基板失效或膜层附着不牢、图形转移精度低、基板变色等质量问题,都说明了基板的工艺适用性不满足电路加工工艺要求。钻孔和局部外形切割等针对裸基板进行,而整体图形转移、膜层加厚、外形切割和阻值调整均是针对表面附有膜层的基板或基板上的金属化图形进行的,彼此不能相互替代。因此,电路加工工艺适用性验证需求,必须涵盖全部的工艺过程。

在微波产品的组装应用中,高纯氧化铝基板电路需进一步经历单点焊接、载体焊接、金丝超声键合、器件胶粘、烘烤等组装工艺条件。高纯氧化铝基板在上述组装工序均不出现基板开裂、膜层脱落、粘接层分离等现象,才能证实高纯氧化铝基板满足组装工艺适用性要求,可用于星载微波产品的研制。

高纯氧化铝基板在经历了各方面的工艺过程后没有出现基板开裂、膜层脱落、粘接层脱落等问题,基本说明基板排胶、烧结过程中没有卷曲、鼓包、开裂等缺陷,生瓷带之间界面结合得好,具有可靠应用的基础^[6]。因此,依据上述分析,确定了氧化铝陶瓷基板工艺适用性全面的验证需求,见表1。

表1 高纯氧化铝基板工艺适用性验证需求

Tab. 1 The process suitability validation requirements of high-purity alumina substrate

需求类别	验证样品状态	具体需求	对应材料的关键要素
电路加工工艺	工艺样件	镀层介质相容性(高的膜层附着界面)	表面缺陷分布
	材料	外形加工适用性	弯曲强度,基板致密度
	工艺样件	图形转移工艺适用性	翘曲度
	材料	基板化学稳定性	致密度
组装工艺	工艺样件	电阻制作工艺适用性	基板表面粗糙度
	工艺样件	粘接工艺适用性(良好的粘接界面,低的粘接孔洞率)	翘曲度、机械性能、热性能、表面缺陷、致密度
	工艺样件	焊接工艺适用性(良好的焊接界面)	基板表面膜层的附着力、可焊性等
	工艺样件	键合工艺适用性(良好的键合界面)	基板表面缺陷分布

2 验证内容的确定

从前面的验证需求分析可知,基板工艺适用性包含电路加工和组装工艺两大类,电路加工和组装过程的整体流程见图1。图中,调阻及之前的工序为微波电路制作过程,调阻之后为组装过程。

微波电路的制作是平面工艺过程,主要考察高纯氧化铝基板的机械强度、致密性、表面粗糙度、表面缺陷分布、平面度、晶粒大小等能否满足清洗、溅射、光刻、镀金等不同工艺方法的要求;组装工艺则

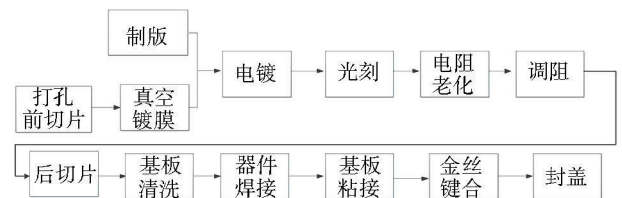


图1 基于高纯氧化铝基板的电路加工与组装流程

Fig. 1 Circuit process and assembly process based on high purity alumina substrate

主要验证的是基板与外部应力之间的界面适应性,考察基于陶瓷基板表面沉积、加厚的膜层与器件、芯

片表面镀层、焊料、金丝金带、超声能量和有机胶黏剂之间的界面兼容性,同时,也通过考察基板承受组装过程的烘烤、加热过程是否释放出超量气体影响组件内部气氛,来间接判断材料致密性是否合格。

两个验证途径中,高纯氧化铝基板承受的外界应力种类不同。电路加工过程涉及的外加应力包括机械抛擦力、有机溶剂超声清洗、酸碱液浸泡、热水煮沸、高温煅烧、200℃烘烤、激光热熔钻孔、激光切割、高速砂轮磨削等。而在产品的组装应用中,基板还将经历表面膜层雾化清洗、金丝超声键合、器件胶粘、焊料焊接、激光密封焊接等条件,需承受单点350℃焊接、210℃载体焊接的热作用。为确保陶瓷基板工艺适用性验证的有效性,验证项目内容的选择不仅需覆盖应用验证需求,也需要结合实际工艺流程和工艺参数。验证试验内容的选择,主要考虑如下几方面原则。

(1)不同工艺工况应力的差异

工艺过程中基板承受局部高温热应力,需要验证在局部高温作用下高纯氧化铝材料的气化、冷凝是否产生不必要的残留熔融层、挂渣、碎屑崩离、相变等现象^[7];砂轮划切工艺的划切原理是强力磨削,同样是外形加工,考察陶瓷颗粒在金刚石颗粒的撞击下产生断裂面的质量。陶瓷材料脆性大、硬度高,磨削过程中容易在陶瓷表面产生裂纹、粉碎层及塑性变形等^[8]。电路产品的实现过程激光加工和砂轮划切都是必不可少的,因此这两种工艺的验证都必须开展。

(2)不同工序验证的排他性

在溅射、光刻、镀金等工序,氧化铝基板会与丙酮、乙醇、氢氟酸、硫酸、硝酸、氨水等多种不同种类的有机溶剂及酸、碱性化学溶液,保持一定时间和时间的接触。不同工序使用不同的化学试剂,对于基板的影响自然不同,不能随意减少或替换某些工序的验证。又如,基板表面存在的微观缺陷,溅射成膜后难以显现,而电镀层加厚之后缺陷形貌更易于辨别;基板自身的局部翘曲不平在镀金工序难以显现,但通过图形转移工序的曝光得以充分暴露。所以不同工序的验证是排他的,不可互换的,全工序的验证才能保证验证的全面性。

(3)不同工艺工序验证目的不同

即便开展相同测试或环境模拟试验,因针对不同工艺环节,验证目的也不同。如界面验证项目中,电路加工工艺适用性验证主要验证基板自身耐受电路加工过程各种应力的程度,而组装工艺适用性验证针对的是镀金基板与所安装器件之间的界面。两类验证分别从基板内在和基板外部界面出发,完成对高纯氧化铝基板的工艺适用性验证。即便相同或类似试验,由于验证工艺样件不同,验证试验即便可

以互相辅证,也无法互相替代。

经分析后,最终确定了两个验证内容:其一,电路制作工艺适用性验证需借助真实的、完整的工艺过程来观测,发现基板自身与各工艺涉及的高温、高真空、荷能等离子体轰击、水分、酸碱及化学品、激光烧蚀能量、砂轮磨削作用等的兼容性;其二,使用成熟组装工艺,组装成合格电路实物产品。这期间,组装工艺涉及的烘烤温度、清洗过程的潮湿环境、金丝键合超声能量,同样在高纯氧化铝基板上——施加,基板对于这些外加应力的反应也将逐项得到验证。

3 验证项目的确定

基于上述分析,建立了高纯氧化铝陶瓷基板的工艺适用性验证项目清单,既全面覆盖工艺验证需求,又精准细化验证指标,科学分解试验项目,具体如下表2所示。

表2 高纯氧化铝基板工艺适用性验证项目
Tab. 2 High purity alumina substrate process suitability verification project

验证项目和需求	验证试验	验证指标
电路加工工艺——外形加工适用性	激光加工试验	激光加工外观
电路加工工艺——外形加工适用性	激光加工试验	激光切割精度
电路加工工艺——外形加工适用性	砂轮划切试验	砂轮划切外观
电路加工工艺——外形加工适用性	砂轮划切试验	砂轮划切精度
电路加工工艺——外形加工适用性	微孔制作工艺试验	微孔外观
电路加工工艺——镀层介质相容性验证	膜层厚度及均匀性	膜层厚度及均匀性
电路加工工艺——镀层介质相容性验证	膜层附着力	膜层附着力
电路加工工艺——化学稳定性	酸性试剂腐蚀性试验	耐酸性试剂腐蚀性
电路加工工艺——化学稳定性	碱性试剂腐蚀性试验	耐碱性试剂腐蚀性
电路加工工艺——图形转移工艺适用性	图形精度	图形精度
电路加工工艺——图形转移工艺适用性	孔电阻值制作	孔电阻值
电路工艺——电阻工艺适用性	薄膜电阻制作试验	薄膜电阻制作试验
组装工艺——焊接工艺适用性	芯片焊接剪切强度	芯片焊接剪切强度
组装工艺——键合工艺适用性	丝、带键合强度	丝、带键合强度
组装工艺——粘接工艺适用性	基板、芯片粘接强度	基板、芯片粘接强度

4 试验安排与样件准备

星载微波电路用高纯氧化铝基板的工艺适用性验证,按照图2所示的技术流程执行。流程中的温度循环试验和高温存储试验、耐高温性测试,是基于星载

应用需求,在验证项目实施前开展的环境考核试验,目的在于预先筛查基板与电路制作中可能的缺陷,确保验证过程试验数据的准确性。

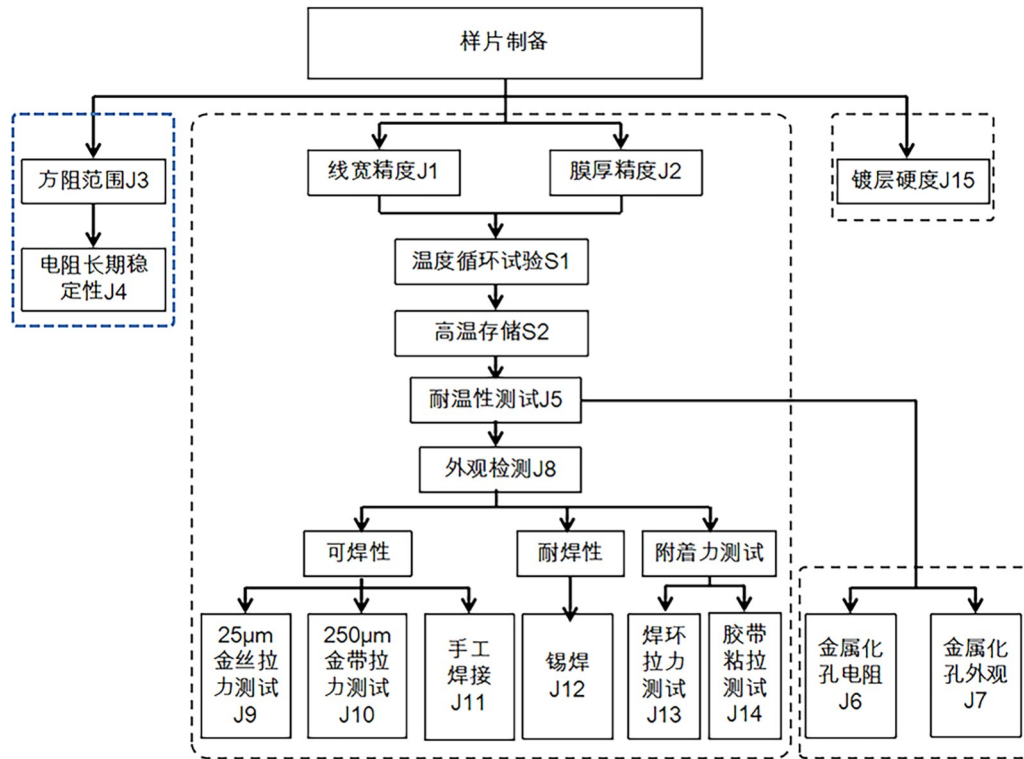


图2 高纯氧化铝基板电路验证流程

Fig. 2 Verification flow of high purity alumina substrate circuit

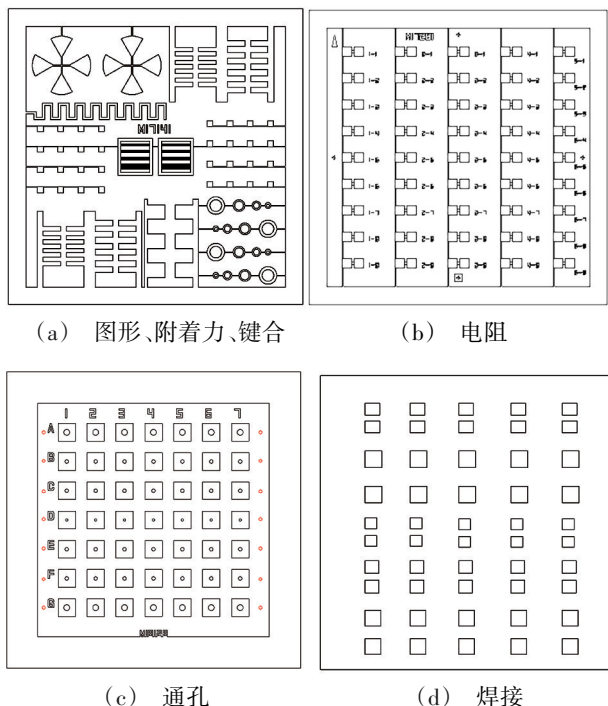


图3 高纯氧化铝基板工艺适用性验证版图

Fig. 3 Verification pattern of high purity alumina substrate process suitability

选取典型规格为 50.8 mm×50.8 mm×0.635 mm 的国产某高纯氧化铝基板,考虑到细线条、接地孔、电阻、孤立测试点、焊盘等常用微带电路加工图形,综合电路加工和组装工艺的实施便利性,设计了如图3(a)~图3(d)所示的验证版图。

根据上述版图完成了工艺适用性验证用电路样件的加工并适当裁切,作为电路加工工艺和组装工艺适用性各个项目的试验对象。完成材料、工艺件的工艺适用性验证试验后,以Ka频段射频链产品为应用背景,通过实际电路加工和组装,在各个工艺流程,开展考核试验,并对最终组件利用温循、恒定加速度、电老炼等环境考核验证和组件破坏性物理分析方法,综合确认每一项验证试验项目与工艺适用性验证指标符合程度。

5 验证结果与分析讨论

依据前面所述的验证流程,针对国产某氧化铝陶瓷基板实施了工艺适用性验证各项目,完成了指标检测。高纯氧化铝基板工艺适用性验证结果数据汇总如表3~表4所示。从验证结果可知,此高纯氧化铝基板的电路加工工艺适用性和组装工艺性,均满足应用要求。其中,膜层附着力、破坏性键合拉

表3 高纯氧化铝基板电路加工工艺性验证结果汇总

Tab. 3 Summary of circuit manufacturability verification results for high purity alumina substrates

序号	验证项目	验证结果	应用要求	是否符合应用要求
1	激光加工 试验	切割外观满足检验规范	切割外观满足检验规范	是
2		尺寸精度: -0.05~0.1 mm	尺寸精度: -0.05~0.1 mm	
3	砂轮划切 试验	划切外观满足检验规范	划切外观满足检验规范	是
4		尺寸精度: -0.05~0 mm	尺寸精度: -0.05~0 mm	
5	微孔制作工 艺试验	微孔外观满足检验要求	微孔外观满足检验要求	是
6		孤立孔接触电阻: 13.8~40.5 mΩ	孤立孔接触电阻: ≤50 mΩ	
7	膜层厚度及 均匀性	2.4~3.6 μm; 5.1~5.8 μm	20%	是
8	膜层附着力	4.87~5.89 kg/mm ²	±2 kg/mm ²	是
9	酸性试剂、碱 性试剂腐蚀 性试验	耐碱性: ≤0.019 mg/cm ²	耐碱性: ≤0.02 mg/cm ²	是
		耐酸性: ≤0.019 mg/cm ²	耐酸性: ≤0.02 mg/cm ²	
10	图形精度, 孔 电阻值制作 试验	-1.64~+4.41 μm	±8 μm	是
11	薄膜电阻制 作试验	38.19~43.78 Ω/□	(40±5) Ω/□	是

力、基板粘接强度等指标明显优于应用要求,说明了高纯氧化铝基板表面的粗糙度、平整度等外在质量和表面微观结构一致性与缺陷分布等内在质量,满足电路制作工艺和组装工艺对于基板的基本要求。

表4 高纯氧化铝基板组装工艺性验证结果汇总

Tab. 4 Summary of assembly process verification results for high purity alumina substrates

序号	验证项目	验证结果	应用要求	是否符合应用要求
1	芯片焊接剪 切强度	钽电容焊点剪切强度>74 N, 焊接总孔洞率<20%	钽电容焊点剪切强度≥50 N, 焊接总孔洞率<25%	是
2	金丝键合强 度	7.27~8.79 g	破坏性键合拉力≥4.5 g	是
3	基板、芯片 粘接强度	基板粘接剪切强度≥1016 N, 拉拔力≥80 N	基板粘接剪切强度≥50 N, 拉拔力≥72.75 N	是

而酸碱腐蚀性、图形精度、激光加工和砂轮划切后外观质量与精度均满足应用要求,说明了此基板的微观晶粒与结构致密性能够耐受外界激光烧蚀、

磨削、化学溶液侵蚀等作用。

为进一步确认工艺适用性验证结果与实际产品应用情况的符合性,对国产某高纯氧化铝基板加工成微带电路组装成的实际Ka频段射频链模块产品,按照某星用模块组件详细规范,执行表5所示的温度循环、恒定加速度、电老炼等各项试验。

表5 模块组件级验证试验项目

Tab. 5 Module component level verification test items

序号	试验项目	试验条件	组件数量	结果
1	工艺性验证(非破坏性键合拉力)	由承制方在生产过程中实施	5	满足
2	温度循环	-	3	满足
3	恒定加速度	按模块组件产品相关技术规范规定	3	满足
4	试验后电测试	-	3	满足
5	电老炼	执行电路最高工作温度	2	满足
6	终点电测试	-	2	满足
7	开盖后内部目检	按模块组件产品相关技术规范规定	3	满足
8	金丝破坏性拉力测试	条件D	3	满足
9	芯片剪切强度	按模块组件产品相关技术规范规定	3	满足

安装有国产高纯氧化铝基板的Ka频段射频链组件,经过上述环境考核试验后,整体电性能测试结果满足设计需求。开盖进行DPA(破坏性物理分析)试验后,也未发现基板裂纹、基板膜层脱落、焊点脱落等与基板自身质量有关联的问题。这进一步说明了此牌号的高纯氧化铝基板的内在特性与结构,适用于当前宇航微波模块应用。

6 结论

研究了星载微波电路用高纯氧化铝基板的工艺适用性验证技术,并通过工艺适用性验证的具体实施和组装实际产品后的环境考核结果确认,证实了工艺适用性验证技术的合理性与有效性。研究表明,基板类材料工艺适用性验证的实施,首先通过需求分析确定了100%覆盖工艺需求、包含电路制作和组装的两方面验证内容,在此基础上科学设计验证项目,开展工艺适用性验证,所有考核项目均满足指标体系要求。基板在单机组件的应用中,表现了良好的环境适应性,满足单机产品高可靠性设计和制作要求。依此建立的工艺适用性验证试验方法,

可快速有效地实施同类材料应用可靠性评价工作,为提升国产材料在航天领域应用质量和转化速度奠定必备的基础技术体系。

参考文献

[1] 郭燕龙. Al₂O₃陶瓷表面金属图形化制备及其应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2017:1-2.

GUO Y L. Research on fabrication of metallic pattern based on alumina ceramics surface and its application [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2017:1-2

[2] 李涛,易忠,高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程,2012,9(3):37-40

LI T, YI Z, GAO H. Spacecraft material space environment adaptability evaluation technology [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3):37-40

[3] 金恂叔. 航天器的环境试验及其发展趋势[J]. 航天器环境工程,2002,19(2):1-9.

JIN X S. Environmental testing of spacecraft and its development trend [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2002, 19(2):1-9

[4] 刘锋. 试论航天器环境可靠性试验[J]. 航天器环境工程,2002,19(4):1-5.

LIU F. discussion on spacecraft environmental reliability test [J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2002, 19(4):1-5

[5] 张宗娥. 高纯氧化铝中杂质元素的测定方法研究[J]. 世界有色金属,2021(5):101.

ZHANG Z E. Study on determination of impurity elements in high purity alumina [J]. World Non-Ferrous Metals, 2021 (5):101.

[6] 蓝海凤. 氧化物陶瓷基板的制备及其性能研究[D]. 汕头:汕头大学,2019:26-28.

LAN H F. Study on fabrication process and properties of oxide ceramic substrates [D]. Shantou: Shantou University, 2019:26-28.

[7] 罗永皓. 基于气熔比控制的氧化铝陶瓷薄板激光切割工艺基础[D]. 大连:大连理工大学,2018:17-25.

LUO Y L. Lasering cutting process of alumina ceramic sheet based on controlling of vapor-to-melt ratio [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018:17-25.

[8] 梁静静. 磨削加工对Al₂O₃陶瓷表面质量与力学性能的影响[J]. 材料导报,2020,34(8):16020-16024.

LIANG J J. Effect of grinding processing on the surface quality and mechanical properties of Al₂O₃ ceramics [J]. Materials Guide, 2020, 34(8):16020-16024.