

文章编号: 1672-8785(2024)02-0018-10

3D 打印氧化锆材料在红外探测器中的应用探索

高依然 方志浩 王 冠 付志凯 刘亚泽 韩健睿 宁晋杰

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 杜瓦为红外焦平面探测器提供良好的低温工作环境以及光、机、电、热传输通道。其中冷台面支撑结构作为红外探测器的承载平台, 承受设备运输、振动、冲击等作用, 对支撑结构的强度提出了更高的要求。因此需要开发新型支撑结构以提高杜瓦的可靠性。根据红外探测器组件低传导漏热、高可靠性的需求, 从宏观和微观的角度对不同的支撑结构材料进行分析, 对比了两种成型工艺所制备的支撑结构对红外探测器设计制造的影响。与传统加工方式相比, 采用数字光处理(Digital Light Procession, DLP)技术成型的氧化锆精度可达到 ± 0.03 mm, 与 X 射线衍射仪(X-Ray Diffractometer, XRD)衍射峰标准卡片符合。这说明其纯度较高, 且该技术能缩短工艺时长, 优化封装流程。

关键词: 支撑结构; 氧化锆; 3D 打印; 红外探测器; 杜瓦

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.02.003

Exploration of the Application of 3D Printed Zirconia Materials in Infrared Detectors

GAO Yi-ran, FANG Zhi-hao, WANG Guan, FU Zhi-kai,

LIU Ya-ze, HAN Jian-rui, NING Jin-jie

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Dewar provides a good low-temperature working environment and light, mechanical, electrical, and thermal transmission channels for infrared focal plane detectors. The cold table support structure serves as the bearing platform of the infrared detector, bearing the effects of equipment transportation, vibration, impact, etc., which puts higher requirements on the strength of the support structure. Therefore, it is necessary to develop new support structures to improve the reliability of dewar. Based on the demand for low conduction heat leakage and high reliability of infrared detector components, different support structure materials were analyzed from both macroscopic and microscopic perspectives, and the influence of support structures prepared by two molding processes on the design and manufacturing of infrared detectors was compared. Compared with traditional processing methods, the accuracy of zirconia formed by digital light processing (DLP) technology can reach ± 0.03 mm, which is consistent with the standard card of XRD diffraction peak. This indicates that its

收稿日期: 2023-08-07

作者简介: 高依然(1997-), 女, 北京人, 助理工程师, 硕士, 主要从事红外探测器封装结构研究。

E-mail: gaoyiranxdf@163.com

purity is high, and this technology can shorten the processing time and optimize the packaging process.

Key words: support structure; zirconia; 3D printing; infrared detector; dewar

0 引言

红外焦平面探测技术在航空、航天等军用领域具有十分广泛的应用。红外探测器在运输和运行过程中, 组件会承受较大的振动、冲击等作用, 因此对杜瓦支撑结构的强度提出了较高的要求。要求适当的强度以适应组件的热力学及环境振动条件, 同时支撑结构的材料也必须要有较高的热阻, 以减少低温平台通过支撑结构时产生的传导漏热, 满足冷平台高温度均匀性要求。

常用的支撑结构材料在低温条件下的参数如表 1 所示。氧化锆陶瓷的热导率较低, 可以显著地减小漏热量, 解决微杜瓦支撑结构既要力学性能强, 又要传导漏热小的问题, 因此适用于不同类型的红外探测器的微杜瓦-冷指支撑结构。

由于氧化锆的材料脆性, 传统高温烧结工艺下的结构设计十分受限, 在红外探测器中应用的支撑结构大多采用划片工艺加工成单根的“杆状”简单结构, 通过胶粘实现多根装配。此方式所需工序多、周期长, 需要较高的工艺精度。因此, 需要开发采用新工艺的氧化锆陶瓷材料。

增材制造技术 (Additive Manufacturing, AM) 相对于常规技术, 能够通过用计算机将三维模型转变成多层二维模型来堆积成三维实体, 可精准控制尺寸, 从而得到结构复杂的零件。该技术已在多个领域得到广泛应用。红外

探测器微杜瓦用的支撑结构尺寸小, 精度要求高。根据这一特点, 可将支撑结构由传统制造工艺转变成增材制造工艺。本文针对上述问题, 对红外探测器微杜瓦支撑结构材料的制造工艺展开研究。对比传统工艺方式, 探究复杂形状支撑结构的 3D 打印成型工艺, 优化其形状受限、易产生装配误差、工艺周期长等问题。

1 氧化锆支撑结构在红外探测器中的应用

为了保证制冷型红外探测器的性能, 需要给它提供一个低温、高真空的工作环境, 所以通常把探测器封装在微型杜瓦结构中。图 1 所示为基于集成式斯特林制冷机的红外探测器杜瓦组件 (Integrated Detector Dewar Cooler Assembly, IDDCA)。

支撑结构的一端为 100 K 以下温度的冷台, 另一端为室温端。两端有较大温差, 会产生较大的传导漏热。因此在设计支撑结构时, 需同时考虑支撑强度和漏热量。传导热阻 R 可由支撑结构两端之间的距离 L 、横截面积 A 和材料导热系数 λ 确定:

$$R = \frac{L}{\lambda A} \quad (1)$$

可以看出, 支撑结构的热阻越大, 传导漏热量越小。因此, 为提高制冷效果, 一是可以增大支撑结构的传热路径 L 或是减小支撑结构的横截面积 A , 但是这会降低结构的支撑强度, 不

表 1 常用材料参数

材料	弹性模量/GPa	泊松比 ϵ	热膨胀系数/K	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)
TC4	113	0.36	7.89×10^{-6}	5.44	4.45
4J29	138	0.28	6.4×10^{-6}	20.6	8.25
4J36	144	0.31	1.5×10^{-6}	10.2	8.05
Al ₂ O ₃	370	0.28	7×10^{-6}	33	3.98
SiC	455	0.14	2.4×10^{-6}	160	3.2
ZrO ₂	355	0.3	10×10^{-6}	1.5	5.95

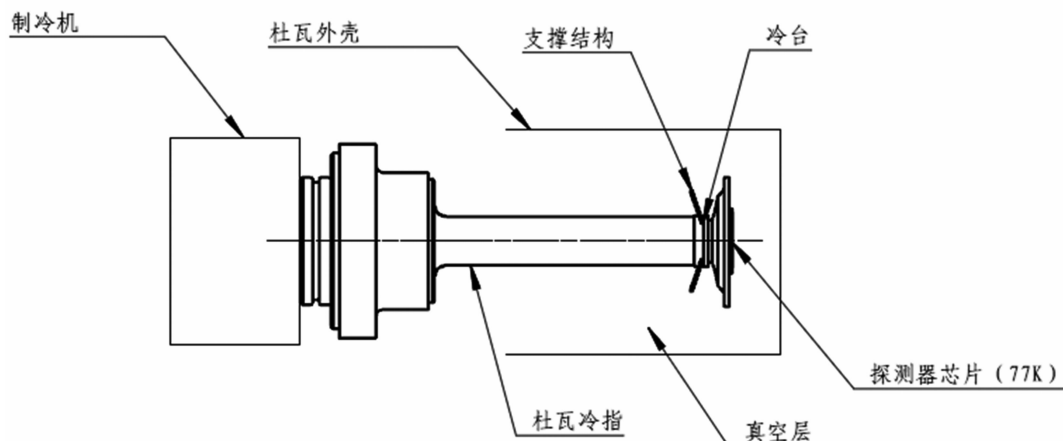


图 1 IDDCA 组件的结构示意图

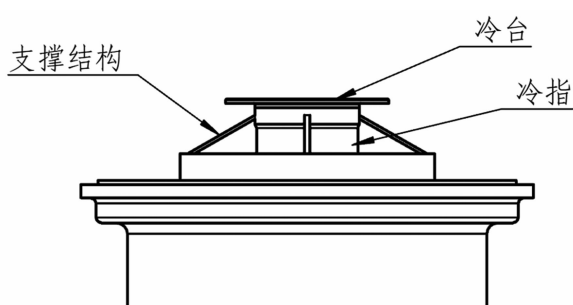


图 2 传统 IDDCA 组件支撑结构的示意图

利于组件的力学性能；二是可以选择低导热、高强度的材料作为支撑材料。因此，目前氧化锆支撑结构被广泛用于红外探测器组件。如图 2 所示，设计 4 根独立的斜拉式支撑杆，彼此呈 90° 夹角；通过胶粘工艺，一端支撑在外壳部件上，另一端支撑在冷台与冷指焊缝下端，以降低应力水平。

在实际装配过程中，由于加工周期和工艺复杂性，易造成装配误差，从而产生结构应力，降低杜瓦的可靠性。因此，如何通过结构设计和制造工艺共同实现支撑结构的优化，同时保证材料性能指标，是当前面对的重点问题。

2 氧化锆成型工艺对比

2.1 基于传统工艺的氧化锆支撑杆

在传统氧化锆支撑杆制造中，通常采用氧化锆粉末，由凝胶注模成型（工艺过程见图 3）。其原理是氧化锆粉末分散在有机溶液中，在催化剂作用下发生聚合反应，形成网状结

构；将陶瓷粉末包裹其中，形成坚硬的胚体；再进行高温烧结。所得的氧化锆片如图 4 所示，其表面平整光滑，光泽感强。

红外探测器微杜瓦所用的支撑杆尺寸较小，凝胶注模成型所得的氧化锆片需要进行二次加工。通常使用金刚石划片刀进行切割，将其加工成微杜瓦所需的“杆状”支撑结构。金刚石划片刀切割的示意图如图 5 所示。金刚石磨粒不断脱落，更新切割面，实现分离。但是氧化锆属于脆性材料，切割时会引入较大的应力，易出现崩边、裂纹等缺陷（见图 6）。这会降低支撑强度。

采用划片工艺加工的支撑结构形状单一，无法切割成复杂形状。因此在实际应用中，将氧化锆片划片成“杆状”，如图 7 所示。使用多根支撑杆进行分体装配。支撑杆与冷指、外壳部件之间通过胶粘固定。由装配误差带来的结构应力，会引起传导漏热增大或支撑力不足的问题。

2.2 氧化锆陶瓷 DLP 成型工艺

3D 打印技术又称增材制造技术。DLP 是在光固化成型（Stereolithography Apparatus, SLA）技术上发展而来的。其工作原理是根据模型切片的图案形成实际可执行的像素单元，将单元固化后逐层叠加；在完成所有打印工作之后，去掉零件周围的多余材料，就能得到所需的陶瓷生坯构件（流程见图 8）。以氧化钇作为稳定剂条件下制备的氧化锆粉末、光敏树脂

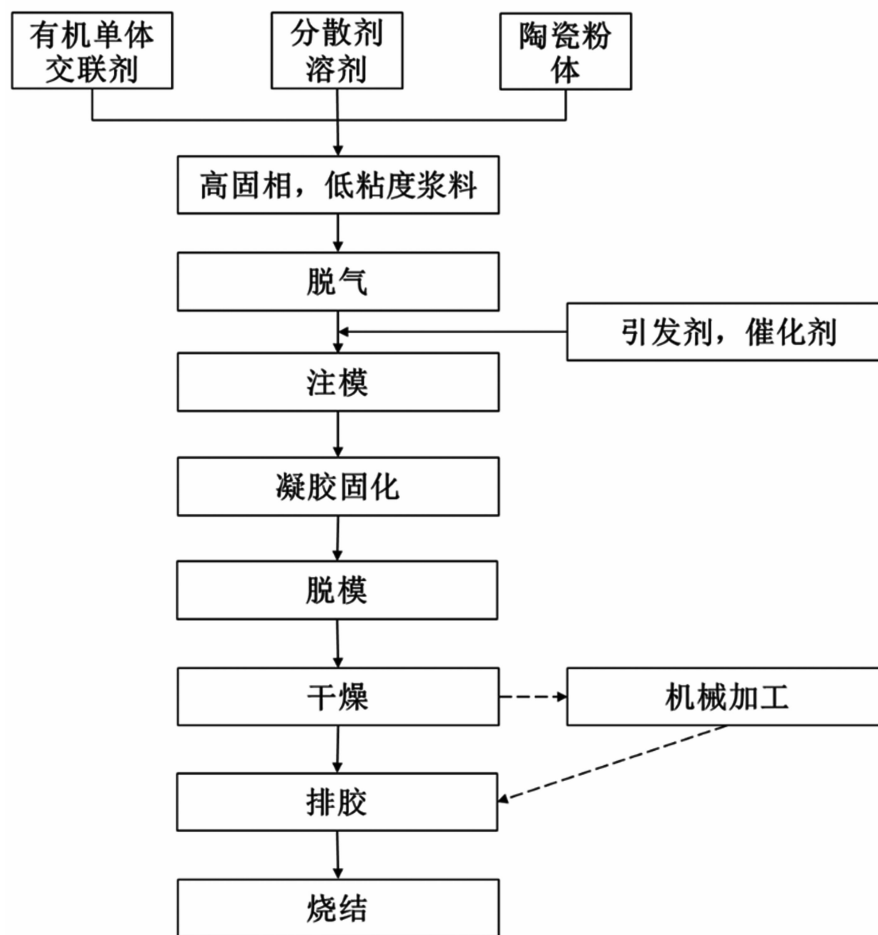


图 3 凝胶注模成型的工艺流程

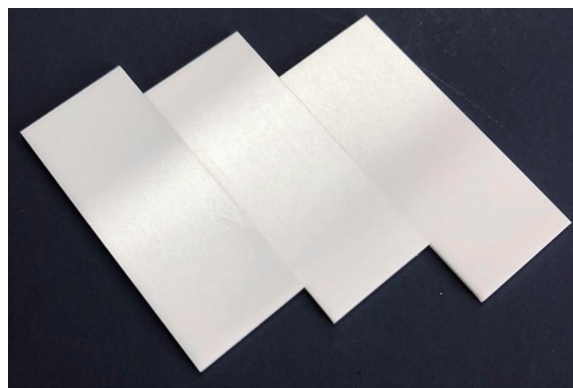


图 4 凝胶注模成型氧化锆片

等试剂为原料进行 DLP 成型。通过脱脂去除坯体中的有机物质, 然后高温烧结成所需零件。其尺寸加工精度可以达到 ± 0.03 mm, 且制造周期短, 能得到复杂结构的零件(见图 9)。该技术在医疗、航天、航空、大型火力发电、化工和冶金等领域得到了广泛应用。

上文提到氧化锆陶瓷的脆性使其难以切割

加工成复杂形状, 而 DLP 技术则很好地优化了这一点, 可以根据实际应用需求设计复杂结构的零件。将红外探测器微杜瓦支撑结构设计成一体式装配, 代替传统的多根支撑杆分体装配, 可减小误差带来的应力变形以及由冷热端温差带来的冷台变形。但是脱脂后是否存在有机物残留以及烧结后的力学性能需进一步分析验证。同时要保证打印样品具有高致密度、高力学性能和低收缩率, 需要陶瓷浆料的高固含量。

2.3 凝胶注模成型与 DLP 成型氧化锆材料的性能对比

2.3.1 表面形貌对比

为进一步验证使用 DLP 工艺制造的氧化锆材料作为红外探测器组件支撑结构使用的可靠性, 对两种制造工艺所加工的氧化锆进行形貌、材料性能、材料成分和微观分析。图 10

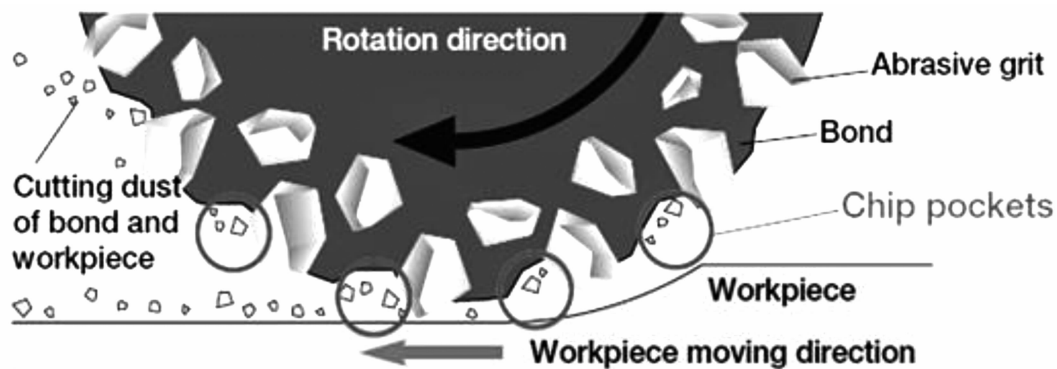


图 5 金刚石划片刀切割示意图

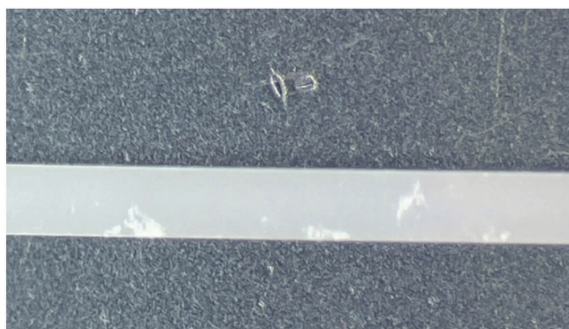


图 6 氧化锆划片后产生的缺陷

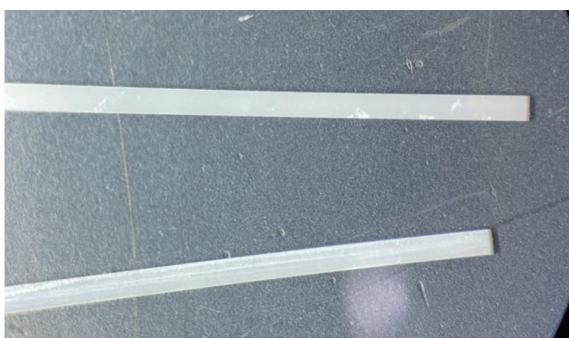


图 7 氧化锆支撑杆实物图

和图 11 所示为光学显微镜下两种氧化锆材料的颜色、形貌情况。可以看到，用 DLP 技术加工的氧化锆颜色更白；凝胶注模成型的氧化锆表面光亮，但由于材料特性使其容易磕碰缺角，影响结构的力学性能；DLP 成型的氧化锆表面哑光，其表面有“凸起”的颗粒状物质，需进一步分析其微观形貌。

2.3.2 材料性能对比

表 2 列出了采用凝胶注模法与 3D 打印法成型的氧化锆材料的参数对比情况。可以看出，两种氧化锆材料的差异主要体现在弹性模量和导热率上。

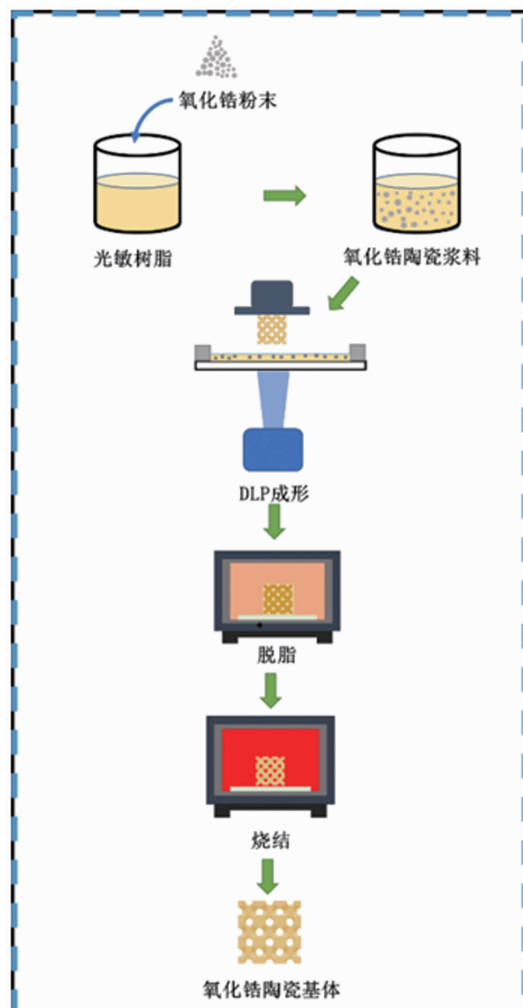


图 8 DLP 成型氧化锆陶瓷的制备流程

材料的弹性模量表征了其在应力条件下对弹性或非永久变形的抵抗能力。弹性模量越高，材料越硬，越难变形。在设备的运输、振动和冲击等外力作用下，支撑结构需具有良好的弹性模量，以抵抗冷指变形。采用传统方式成型的氧化锆的弹性模量是 3D 打印成型氧化



图 9 用 DLP 技术加工的复杂结构

表 2 采用凝胶注模法与 3D 打印法成型的氧化锆材料的参数对比

材料参数	凝胶注模成型氧化锆	3D 打印成型氧化锆
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	6	6.02
弹性模量/GPa	355	210
热膨胀系数/ K^{-1}	10×10^{-6}	10.5×10^{-6}
导热率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.5	2.3
维氏强度/HV30	2000	1950
抗压强度/MPa	2100	2200
抗弯强度/MPa	1100	980
泊松比 ϵ	0.3	0.3

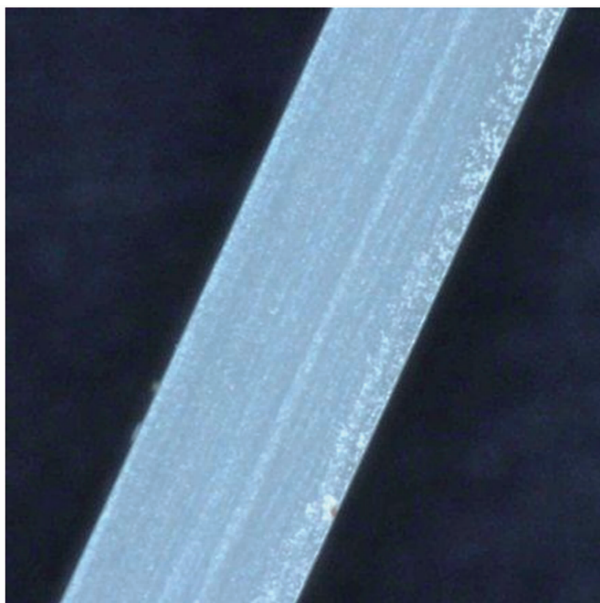


图 10 凝胶注模成型氧化锆



图 11 DLP 成型氧化锆

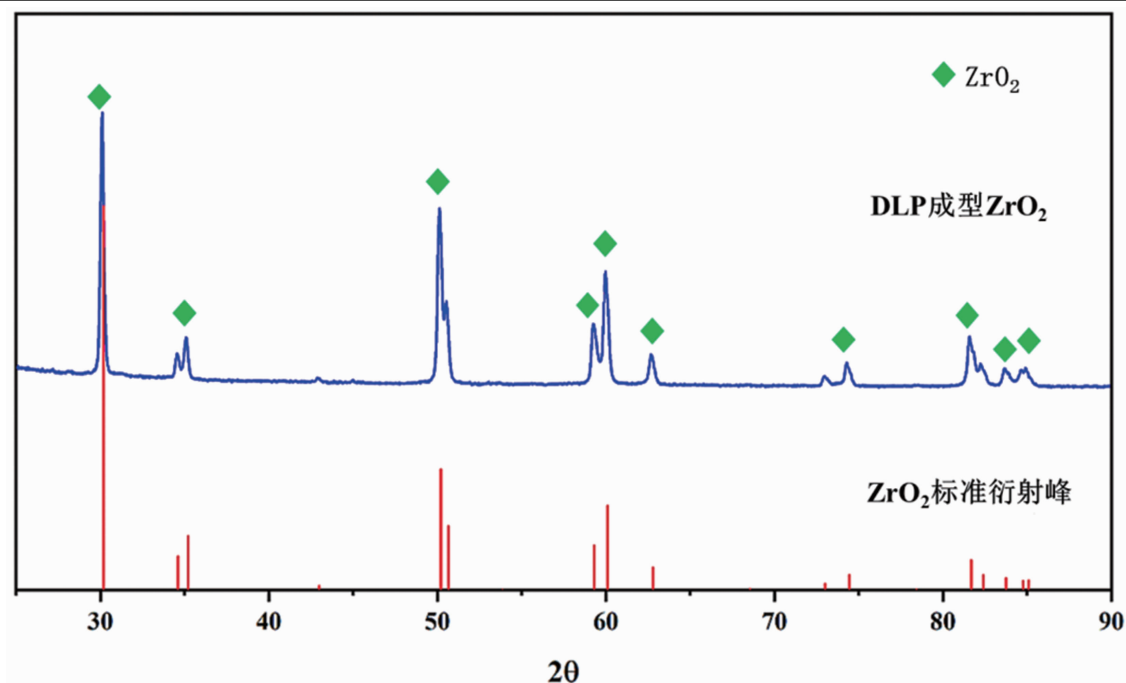


图 12 3D 打印氧化锆的 XRD 图

锆的 1.7 倍。因此需要进一步验证在探测器振动和冲击等试验条件下 3D 打印成型氧化锆的可靠性。对于热导率之间的差异,可通过结构设计对漏热量进行控制,以满足红外探测器组件低温和振动的条件。

除此之外,DLP 成型是逐层打印的,在每层氧化锆陶瓷快速固化的过程中,层叠之间容易产生气泡、裂纹等缺陷,导致应力集中,造成力学性能降低。要保证零件的高致密度,就需要保证陶瓷浆料的高固含量和适合的工艺参数。

2.3.3 成分对比分析

为验证 3D 打印氧化锆基体中是否残留其他杂质,借助 XRD 对氧化锆基体成分进行分析。图 12 为 3D 打印氧化锆的 XRD 图。通过将其与 3Y-TZP (95%氧化锆和 5%氧化钇)的氧化锆标准衍射峰对比,可以看出测得的衍射图谱中的衍射峰与标准 PDF 卡片中的衍射峰一一对应,只是在强度上略有区别。因此可以判断脱脂工艺使坯体中的树脂成分完全脱去,而烧结工艺也使脱脂后的样件有较好的结晶程度,最终获得纯度很高的氧化钇稳定氧化锆陶瓷基体。

2.3.4 微观形貌对比

为进一步分析两种工艺所得氧化锆陶瓷的性能,使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对其断面微观形貌进行观察,分析其表面的致密度。图 13 为传统氧化锆支撑杆和 3D 打印氧化锆支撑杆的断面 SEM 图。可以看出,两种成型工艺的致密度有差异。图 13(a)和图 13(b)为采用 DLP 法成型的氧化锆的 SEM 图,图 13(c)和图 13(d)为采用凝胶注模法成型的氧化锆的 SEM 图。从图中可知,用凝胶注模法得到的氧化锆陶瓷结构的致密性略高于用 DLP 法成型的氧化锆陶瓷结构,晶粒与晶粒之间紧密相连。对于红外探测器组件,支撑结构要确保足够大的强度,同时需要尽可能低的漏热量。氧化锆陶瓷结构致密度高,漏热量相比于疏松结构会有所提升。两种成型方法所得的氧化锆的致密度差异并非巨大,因此该差异对力学强度的影响较小,主要是成型工艺引起的缺陷会对材料性能有较大影响。在 DLP 成型可以满足红外探测器组件振动等力学条件的情况下,致密度小会降低红外探测器组件的传导漏热量。

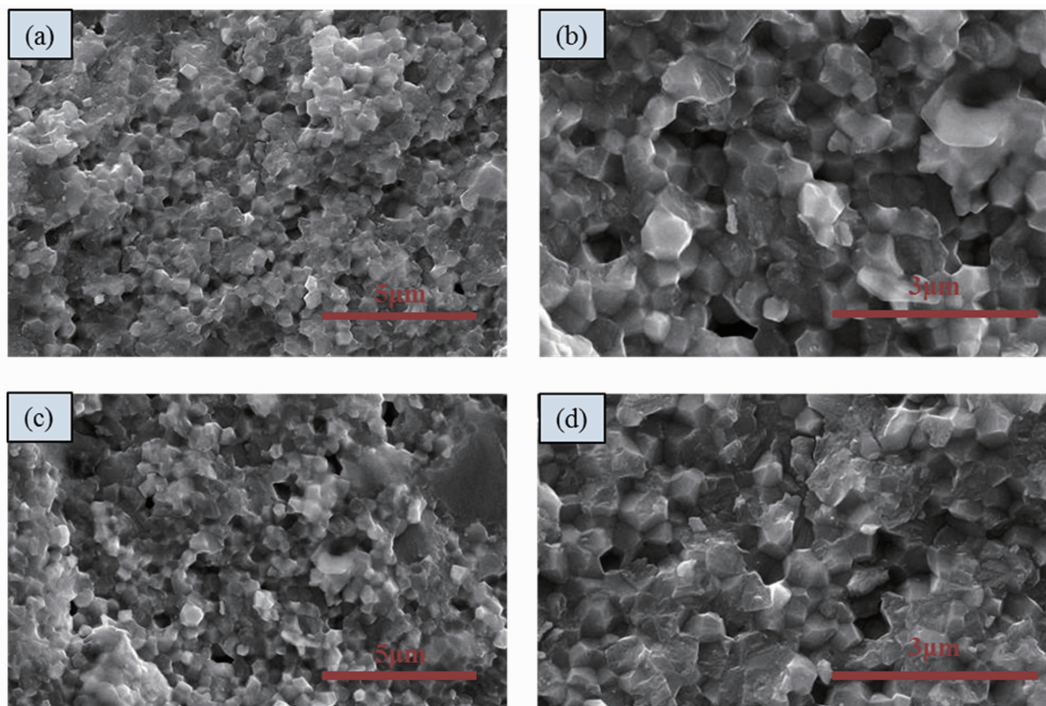


图 13 两种成型方法所得的氧化锆的断面 SEM 图: (a)、(b)用 DLP 法成型的氧化锆;
(c)、(d)用凝胶注模法成型的氧化锆

3 用两种成型工艺制备的支撑结构对红外探测器设计制造的影响对比

采用两种工艺制备的支撑结构对红外探测器设计与制造的影响是不同的。首先是在制造流程上的差异。如图 14 所示,通过凝胶注模成型工艺可以得到成品氧化锆片,根据探测器所需的尺寸设计简单“杆状”结构;使用金刚石划片刀将氧化锆片切割成微杜瓦支撑结构,多根支撑杆通过胶粘分体式装配。此种方法成型的氧化锆支撑杆形状单一,工艺流程复杂,在多个方向粘接时易产生装配误差,从而降低杜瓦的可靠性。

DLP 成型能够直接得到氧化锆支撑结构成品,无需额外的加工步骤即可进行装配。相比于传统方式, DLP 成型加工步骤简便、快捷,可以实现支撑结构的一体式粘接;装配精度高、误差小,可以大大缩短工艺周期;能实现对复杂支撑结构的设计和优化,更能承受设备运输、振动、冲击等作用力。

其次,两者成本上的差异是较大的。红外探测器组件目前正在广泛应用于尖端军工领

域,被安装在火箭、飞机、武器等装备上。对组件的可靠性要求非常严格。冷平台作为组件重要的承载平台,对支撑结构提出了更高的要求。两种成型方法虽然在制造成本上差异较大,但其对支撑结构设计、红外探测器杜瓦封装的装配流程和工艺周期的影响是不同的。DLP 成型工艺成本较高,但该工艺可以提高装配精度,缩短工艺周期,通过设计复杂结构提高产品的可靠性,未来会逐渐替代传统支撑结构应用。

DLP 技术为支撑结构的设计带来全新的思路,打破传统材料、工艺等方面的限制,将分体式装配逐渐转变到一体式装配。红外探测器组件型号繁杂,微杜瓦结构通常使用氧化锆材料作为支撑结构。对于不同的组件结构,均可根据其性能特点及尺寸对支撑结构力学计算、仿真分析等方面进行优化,得到可靠性更佳、适用性更强的支撑结构。

4 结束语

传统氧化锆支撑结构制造工艺复杂,更因其材料脆性使得结构设计受限。分体式装配易

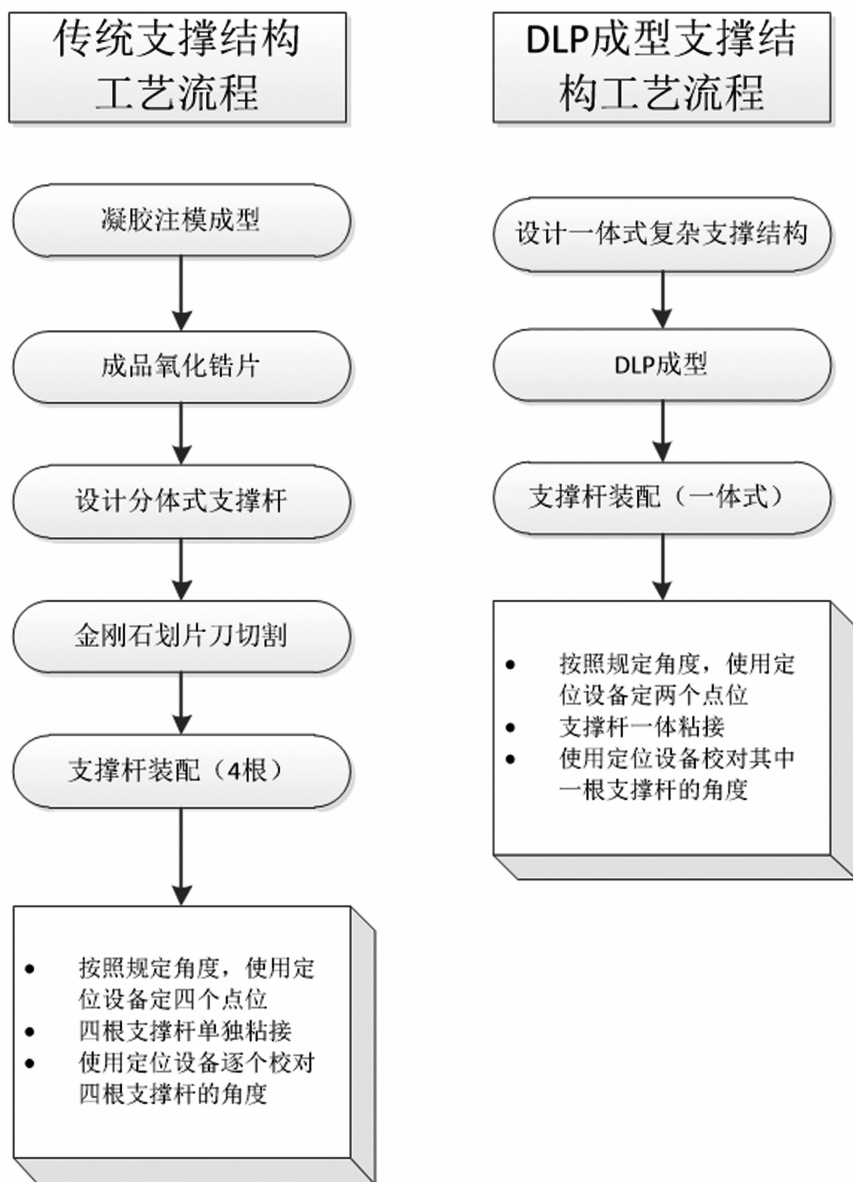


图 14 两种成型方式的工艺流程对比

产生结构应力,会降低杜瓦结构的可靠性。因此开发了一种采用新型工艺制备的氧化锆材料,即将 DLP 工艺与氧化锆支撑结构结合,可实现红外探测器用支撑结构的复杂化、精准化和定制化。通过研究得到下述结论:

(1)预期 DLP 成型氧化锆可以用来制备红外探测器微杜瓦的支撑结构。此技术将三维模型转换成三维实体,可以得到复杂支撑结构并成型,且尺寸精度可以达到 $\pm 0.03\text{ mm}$,实现精准控制。

(2)该工艺适用于薄壁结构。通过设计一体式支撑结构,使得杜瓦和支撑结构受力均

匀;对于稳定光学路径、提升杜瓦及红外探测器组件的可靠性,具有较高的使用价值。

(3)此方法可以提升装配效率,减少支撑杆的前道加工工序,缩短封装工艺周期,在未来红外探测器应用中有巨大潜力。

本文针对传统支撑结构存在的问题,从支撑结构的新制造方法入手,对支撑结构设计成型、红外探测器组件应用的情况展开探究。后续将对一体式支撑结构进行设计制造,并通过仿真分析、力学振动试验验证 3D 打印支撑结构应用在红外探测器组件中的可靠性。

参考文献

- [1] 张阳, 莫德锋, 范崔, 等. 超大面阵红外探测器冷平台支撑结构研究 [J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(2): 196–202.
- [2] 牛富荣, 张力, 郭金玉, 等. 熔融沉积法 3D 打印制备多孔氧化锆陶瓷 [J]. *耐火材料*, 2023, **57**(1): 20–26.
- [3] 黄燕, 陆永达, 张铠, 等. 大面阵红外探测器冷平台仿真设计与试验 [J]. *真空与低温*, 2021, **27**(4): 372–377.
- [4] Liu C L, Du Q P, Han Z, et al. 3D Printing of Lead Zirconate Titanate Piezoelectric Ceramics via Digital Light Processing (DLP) [J]. *Ceramics International*, 2023, **49**(17): 28492–28499.
- [5] 郭亮, 金而立, 苏嘉敏, 等. 氧化锆陶瓷 DLP 3D 打印技术研究 [J]. *应用激光*, 2020, **40**(6): 1040–1044.
- [6] 陈芳, 高超, 罗世魁. 大面阵红外焦平面杜瓦冷指支撑结构设计 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(8): 198–204.
- [7] 乌兰, 吴晓强. 基于 DLP 光固化 3D 打印技术的工艺分析及性能测试 [J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2022, **37**(3): 247–250.
- [8] 郭亮, 金而立, 苏嘉敏, 等. 氧化锆陶瓷 DLP 3D 打印技术研究 [J]. *应用激光*, 2020, **40**(6): 1040–1044.
- [9] 李俊, 王小坤, 孙闻, 等. 超长线列双波段红外焦平面探测器杜瓦封装技术研究 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(11): 173–179.
- [10] 王春生, 张磊, 东海杰. 基于 NESSUS 的杜瓦结构可靠性分析 [J]. *红外技术*, 2017, **39**(10): 903–907.
- [11] 盛敏健, 王成彬, 胡亭亮. 基于有限元方法的杜瓦辅助支撑方案设计 [J]. *科学技术与工程*, 2011, **11**(19): 4564–4567.