

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.01.011

陶瓷吸波超材料结构光固化增材制造工艺研究

叶 昀¹, 谢德巧¹, 焦 晨¹, 陆 彬¹, 王雪孟², 田宗军¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106)

摘要: 陶瓷超材料吸波器具有耐高温、高强度、可完美吸波的特点, 其结构复杂且具有周期性, 是一种新兴的吸波器件。但传统成形方式在复杂结构制造上存在一定的局限性。本文提出一种基于光固化增材制造氧化铝陶瓷表面镀铁氧体的方法实现周期性复杂结构的陶瓷超材料吸波器。使用氧化铝粉末和光敏树脂, 配制出可供 3D 打印的氧化铝陶瓷浆料, 利用 3D 打印机成形氧化铝陶瓷坯体。根据 TG-DSC 热分析法, 确定了陶瓷坯体的脱脂工艺参数, 烧出氧化铝陶瓷样品。再利用浸渍法在氧化铝样品表面镀铁氧体膜, 并烧结使其致密化。使用 SEM 观察样品表面形貌, 通过 X 射线衍射分析物相组成, 利用划痕法测试镀层的结合力。结果表明, 本文提出的方法可以实现周期性复杂结构的陶瓷吸波器快速制造, 为新型超材料吸波器的设计与制造提供了新的思路。

关键词: 氧化铝; 增材制造; 铁氧体膜; 吸波结构; 工艺参数

中图分类号: TH162; TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)01-0095-08

Research on Light Curing Additive Manufacturing Technology of Ceramic Absorbing Metamaterial Structure

YE Yun¹, XIE Deqiao¹, JIAO Chen¹, LU Bin¹, WANG Xuemeng², TIAN Zongjun¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The ceramic-based metamaterial wave absorber is characterized by high temperature resistance, high strength and perfect wave absorption. Its structure is complex and periodic, which is a new kind of absorbing device. However, the traditional ceramic forming method has some limitations in complex structure manufacturing. A new method based on additive manufacturing to fabricate ferrite coating on alumina ceramic surface is presented to realize a periodic ceramic metamaterial absorber with complex structure. Using alumina powder and photosensitive resin, alumina ceramic paste for 3D printing is prepared to form alumina ceramic body. According to TG-DSC thermal analysis, the degreasing process parameters of ceramic billet are determined, and alumina ceramic samples are sintered. Then the surface of alumina sample is impregnated with ferrite film and densified by sintering. Scanning electron microscope (SEM) is used to observe the surface morphology of the sample, X-ray diffraction is used to analyze the phase composition of the sample, and scratch method is used to test the adhesion of the coating. The results show that the proposed method can realize the rapid manufacture of ceramic absorbers with periodic complex structure, which provides a new idea for the design and manufacture of new metamaterial absorbers.

基金项目: 国家自然科学基金(1537105); 国家重点研究开发项目(2018YFB1105400); 江苏省重点研究开发项目(2008YFB1105400)。

收稿日期: 2020-12-13; **修订日期:** 2021-03-26

通信作者: 田宗军, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: tianzj@nuaa.edu.cn。

引用格式: 叶昀, 谢德巧, 焦晨, 等. 陶瓷吸波超材料结构光固化增材制造工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(1): 95-102. YE Yun, XIE Deqiao, JIAO Chen, et al. Research on light curing additive manufacturing technology of ceramic absorbing metamaterial structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 95-102.

Key words: alumina; additive manufacturing; ferrite membrane; absorbing structure; process parameters

吸波器应用于微波暗室、飞机隐身等领域,然而传统吸波器存在的问题是重量较大、结构简单,难以满足实际应用的更高要求^[1-2]。如何有效地降低吸波器的尺寸,并尽量实现“薄、宽、轻、强”的完美吸波器,使得超材料吸波器正逐渐变为该领域的研究热点。超材料^[3-6]是一种具有周期性结构的人工材料,具有天然材料所不具备的材料属性和尺寸效应。由于超材料的结构特征为周期性的复杂结构,其制造方式一直是一个难题。

增材制造技术在航空航天^[7-9]、生物医学^[10-12]、电子通信等领域发挥着越来越重要的作用。它为设计者提供了一种加工方法,可实现复合结构快速制造,为设计人员打开创新设计空间。有研究人员利用熔融沉积^[13-17]的方法制造高分子材料的吸波结构,所用材料为掺杂吸波粉末的可熔融高分子材料。该方法的优点是成本较低,但是存在成形质量差、精度低、高分子材料的热稳定性差、吸波性能较差等缺点。陶瓷材料具有高的介电常数和可控的电磁损耗,因此陶瓷材料的3D打印得到了较多的关注。光固化(Digital light processing, DLP)是目前最常用的打印陶瓷材料的工艺方法,Mei等^[18]利用光固化技术打印氧化铝基体,然后采用化学蒸汽渗透的方式将SiC渗透到氧化铝基体中,制备出了具有一定吸波能力的陶瓷结构。

基于陶瓷3D打印的超材料吸波器有望成为新一代高性能吸波器件,本文拟采用光固化技术打印纯氧化铝陶瓷基体,再通过浸渍法在氧化铝基体表面覆涂YIG(钇铁石榴石)铁氧体吸波材料,然后烧结致密化,最终在复杂结构表面上制备出致密均匀的YIG铁氧体镀层。通过这种方式制造的陶瓷超材料吸波结构在小型无人机、微波暗室等结构上有良好的应用前景。

1 试验方法和材料

1.1 氧化铝浆料的配制

光固化打印及表面镀膜工艺流程图见图1。如图1(a)在光固化氧化铝浆料配制过程,氧化铝浆料由光敏树脂、氧化铝粉末、分散剂按照一定比例混合组成。光敏树脂主要成分为丙烯酸树脂,在一定波长内光照下产生交联反应,分子链由短链变为长链,由液体聚合成为固体。分散剂采用聚丙烯酸钠,从而提高浆料的稳定性,降低黏度。利用行星式球磨机将 $5\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \text{nm}$ 粒径的氧化铝粉末按照1:1的质量比均匀混合,提高浆料的固含量,可满足高质量打印要求^[19]。将氧化铝粉末和光敏树脂比例按照2:1的质量比均匀混合,分散剂质量占浆料质量的4%。利用数显黏度计测量浆料黏度,在常温下黏度为 $4\ 676\ \text{cP}$ 。

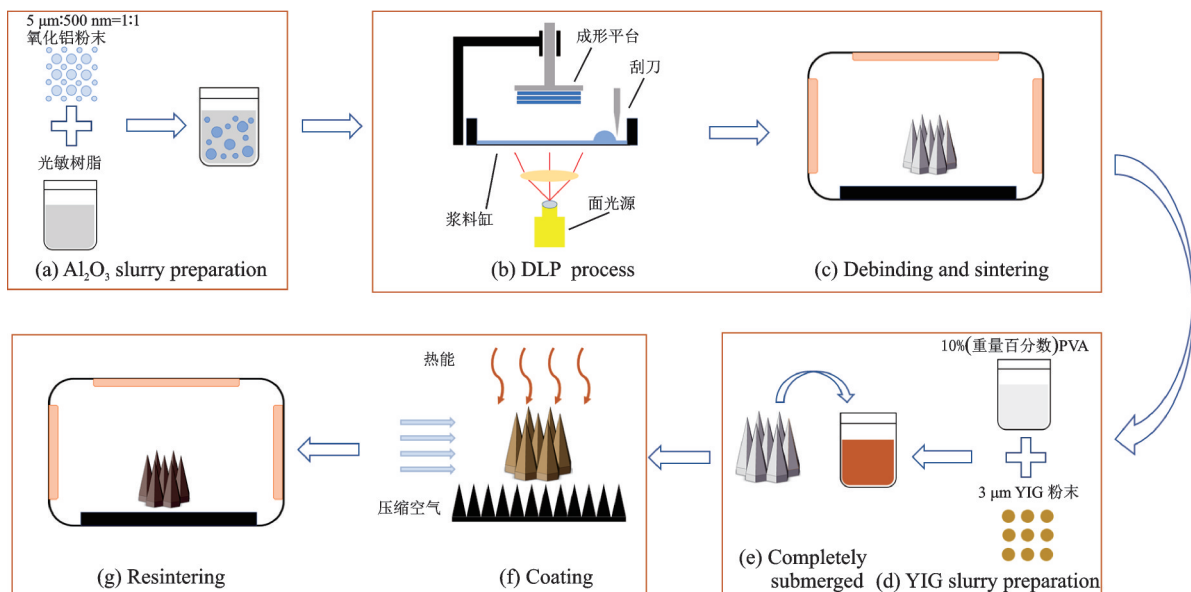


图1 光固化打印及表面镀膜工艺流程图

Fig.1 Flow chart of photocuring printing and surface coating process

1.2 坯体打印

打印机的结构如图1(b)所示。通过软件建模导入打印机后,将浆料倒入浆料缸,利用刮刀将氧化铝浆料刮平,然后用面光源照射,使光敏树脂固

化,再将基板抬起刮取下一层浆料。循环往复作用下,逐层堆积成形,打印出氧化铝坯体。所用光固化光源波长为 $405\ \text{nm}$,投影精度为 $100\ \text{nm}$,光强可调节范围为 $2\sim 25\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$,通过工艺优化得曝光

光强 $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 作为光固化参数。由于打印完成后的坯体与烧结后的样件存在收缩,因此在设计打印模型参数时,应当根据要求设置放缩比^[20]。根据经验,一般选择设计尺寸放大到原尺寸的 1.2 倍。在坯体的纵向和横向截面上,坯体的收缩率存在细微的差别,横向上的收缩率略大于纵向上的收缩率。经过多次测量发现,烧结后结构的尺寸和所要求的尺寸误差在 $\pm 0.7\%$ 之间(适用于线性尺寸在 100 mm 之间的陶瓷打印件)。为探究结构的成形质量和后续覆膜能力,选择蜂窝状(图 2(a))和六棱锥状(图 2(b))作为吸波器打印结构。

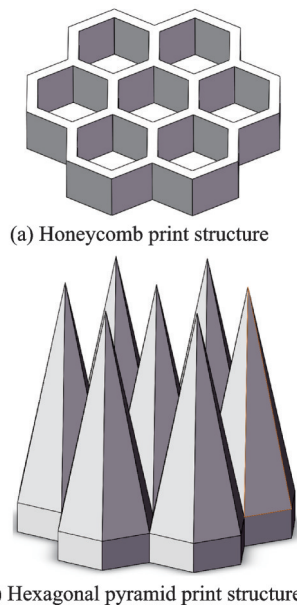


图 2 蜂窝状打印结构和六棱锥打印结构

Fig.2 Print structures of honeycomb and hexagonal pyramid

1.3 坯体的脱脂烧结

使用同步热分析仪(STA449F3,德国耐驰仪器制造有限公司)测量氧化铝坯体在高温下的热重曲线(TG)与差热曲线(DSC)。如图 1(c)所示,通过分析 TG-DSC 曲线,制定氧化铝坯体的脱脂烧结曲线。采用管式脱脂炉(TL1200)进行脱脂工艺,采用箱式烧结炉(AF1800-30)进行烧结工艺。

1.4 覆膜过程

图 1(d~g)为表面镀膜的工艺流程图。利用 YIG 作为吸波介质膜, YIG 粒径为 $3 \mu\text{m}$, YIG 具有立方晶体结构,化学表达式为 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, 常被用作表面镀膜和介质吸波^[21-22]。结构中有 3 种亚晶格: 十二面体、八面体和四面体, 3 个钇离子占据十二面体位置; 在 5 个铁离子(Fe^{3+})中, 两个占据八面体, 其余 3 个占据四面体的位置。位点上的两种金属阳离子(Y^{3+} 和 Fe^{3+})都是三价的, 这种阳离子排列使得石榴石具有优异的结构和化学稳定性。利用 PVA 溶液作为吸波覆膜浆料的有效溶剂, 将打

印好的氧化铝完全浸没在 YIG 铁氧体浆料中。当浆料的黏度合适时, 浆料本身具有流动性, 使得浆料附着在打印件的全表面上, 静置后取出, 利用压缩空气去除表面和内部多余的浆料。将镀膜烘干后烧结, 使 YIG 致密化, 并附着于氧化铝基体的表面上。

2 结果与讨论

2.1 坯体脱脂烧结曲线

利用热分析仪对氧化铝坯体的热重曲线和差热曲线进行分析^[23], 如图 3 所示。在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $320 \text{ }^\circ\text{C}$, 坯体的质量缓慢下降, 可以推测这一阶段主要变化为脱水(液态水和结晶水)。在 $320 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的区间内, 是脱脂主要的发生阶段, 树脂发生液化、汽化等物理反应和氧化化学反应。在 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 坯体质量下降、吸热, 因此此阶段主要为树脂的液化、汽化阶段。当温度高于 $430 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 树脂的氧化反应是坯体的主要失重原因。对比 DTG 的最大失重峰, 可以看到在 $430 \text{ }^\circ\text{C}$ 时质量损失速率最快, 这是 3 种反应共同作用的结果。当坯体温度高于 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 坯体质量和吸放热速率保持稳定, 说明此时脱脂过程已经完成。

根据坯体的 TG-DSC 制定脱脂烧结曲线, 如图 4(a, b)所示。脱脂曲线中, 从常温以 $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $90 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 1 h, 促进水分的加速蒸发; 根据氧化铝坯体的 TG-DSC 曲线, 以 $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $320 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h; 以 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $430 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h; 以 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $600 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h; 由于脱脂完成后的样件强度较低, 因此进一步预烧结, 以 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h 后炉冷降温, 完成脱脂步骤。随着烧结温度的逐渐升高, 光固化样品的相对密度越来越高, 在 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 达到最大值^[24]。在氧化铝坯体的烧结曲线中, 从常温以 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$; 再以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 4 h; 以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h; 以 $3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率降温至 $900 \text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h 后炉冷降温, 完成烧结步骤。

如图 5(a)所示是氧化铝基体 X 射线衍射图谱。在氧化铝基体的 X 射线衍射图谱中, 只有纯氧化铝相。在氧化铝基体的 SEM 图(图 5(b))中, 采用 $5 \mu\text{m}$ 、 500 nm 的氧化铝粉末按照 1:1 的质量比掺杂, 通过选择不同粒径的氧化铝陶瓷粉体, 可以减小粉体之间的间隙, 增加了粉体之间的有效粘接面积, 使得氧化铝粉体之间的粘接更加牢固, 陶瓷

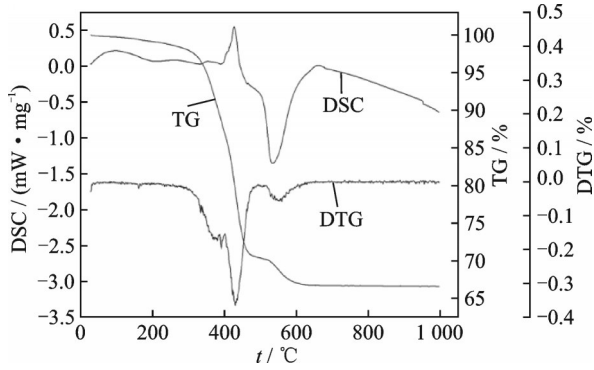
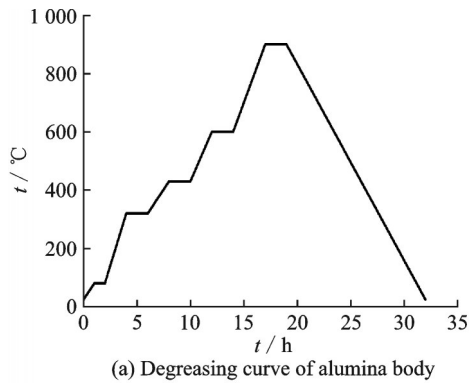
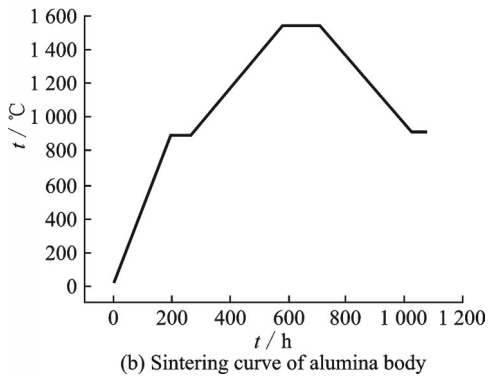


图3 氧化铝坯体的TG-DSC曲线

Fig.3 TG-DSC curves of alumina body



(a) Degreasing curve of alumina body



(b) Sintering curve of alumina body

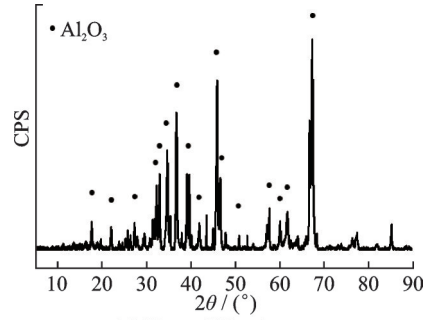
图4 氧化铝坯体脱脂曲线和烧结曲线

Fig.4 Degreasing curve and sintering curve of alumina body

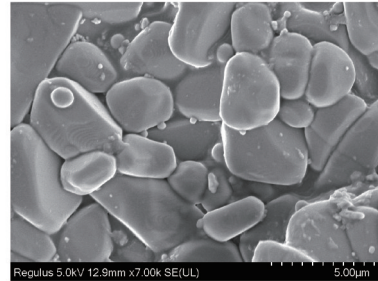
制件的致密度更高^[19]。从图5(b)中可以看出,氧化铝基板致密性较好,颗粒尺寸分布在5 μm和500 nm范围内。

2.2 镀层层厚及均匀性

镀层厚度直接影响到吸波介质的吸波性能,试验发现浆料的流变性能对镀层厚度有显著的影响。YIG浆料流变性能如图6所示,可以看出,随着YIG粉体质量比的增加,浆料黏度急剧增加。当质量比超过50%时,浆料黏度主要受YIG粉含量的影响,不同PVA含量的浆料黏度差开始逐渐缩小;当质量比达到80%时,不同PVA溶液的黏度基本接近。本文选取了9种不同比例的浆料在平面上进行涂层处理,并对涂层厚度和均匀性进行了表征。通过光学显微镜直接观察截面的涂层厚度,选



(a) X-ray diffraction pattern



(b) SEM microstructure

图5 氧化铝基底的X射线衍射图谱和SEM微观形貌

Fig.5 X-ray diffraction pattern and SEM microstructure of alumina substrate

择8个等距位置,计算涂层厚度的平均值和方差,如图7所示。可以看出,浆料黏度与涂层厚度之间存在正相关关系,随着浆料黏度的降低,涂层的均匀性增加。这是由于浆料流动性随着黏度的降低而上升,浆料更容易被压缩空气吹离氧化铝基板。

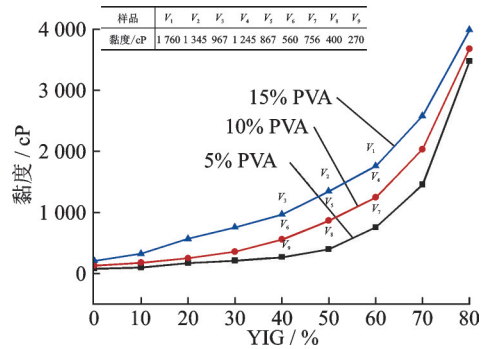


图6 YIG浆料的流变性能

Fig.6 Rheological properties of YIG slurry

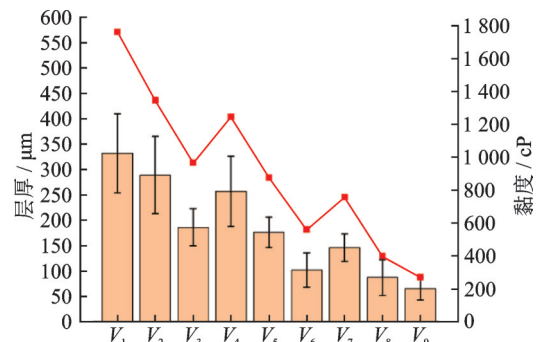


图7 层厚与不同比例粘度浆料的关系

Fig.7 Relationship between layer thickness and slurry with different proportional viscosities

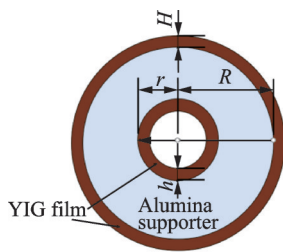
试验中还发现结构尺寸对镀层厚度和均匀性有影响,本文设计并制造了不同直径的空心圆柱,选择 V_5 作为复杂表面涂层的浆料参数,对涂层厚度和内外表面的均匀性进行了表征,结果如表 1 所示。可以看出,当内径小于 2 mm 时,平均厚度和方差均变大,其他尺寸的圆环的层厚均匀性均较好;此外还可以发现,层厚和均匀度与外径尺寸

无关,层厚和均匀性均较好。内径为 2 mm 的样件均匀性下降的主要原因是由于压缩空气的风压变化较大导致湍流的发生,影响了涂层的均匀性。因此,对于实际的镀层样件,工艺本身限制了更小尺寸的镀层制备,对于一些微小的内部尖角结构可能会存在浆料的聚集,导致涂层的均匀性受到影响。

表 1 复杂表面涂层的厚度和均匀性

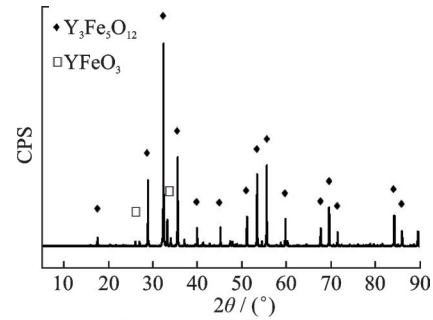
Table 1 Thickness and uniformity of coatings on complex surfaces

| 不同尺寸的圆环的内外径对镀层层厚和均匀性的影响 | | | | | | |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 外径 R/mm | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | |
| 平均层厚 $H/\mu\text{m}$ | 135 | 147 | 165 | 157 | 139 | |
| 方差/ μm | 29 | 25 | 9 | 30 | 28 | |
| 内径 r/mm | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 | |
| 平均层厚 $h/\mu\text{m}$ | 150 | 138 | 168 | 87 | 242 | |
| 方差/ μm | 34 | 45 | 47 | 51 | 183 | |

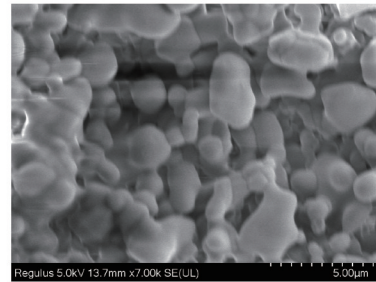


在选择膜的烧结温度时,需要考虑 YIG 和氧化铝基底的充分结合。Azis 等^[25]分析了 YIG 的烧结温度与电磁性能的关系,据此选择 YIG 膜的最高烧结温度为 1 200 °C。结合先前的脱脂经验,制定并优化烧结曲线。如图 8 所示,从常温以 1.8 °C/min 的升温速度升温至 247 °C,保温 1 h;以 1 °C/min 的升温速度升温至 300 °C,保温 2 h;以 3 °C/min 的升温速度升温至 900 °C,保温 2 h;以 2.5 °C/min 的升温速度升温至 1 200 °C,保温 2 h;以 2.5 °C/min 的速度降温至 900 °C,保温 2 h 后炉冷降温。如图 9(a) 所示,在 YIG 涂层的 X 射线衍射图谱中,结果显示主要是 YIG 相,存在少量的 YFeO_3 相。图 9(b) 是 YIG 表面层的 SEM 图,从图中可以看出,晶粒尺寸约为 3 μm ,相邻晶界开始融合。

如图 10(a) 所示为镀层的截面图,可以看出镀层的均匀性良好,镀层的厚度约为 150 μm 。图 10(b) 为镀层分界面的放大图,左上部是氧化铝基底,



(a) X-ray diffraction pattern



(b) SEM microstructure

图 9 YIG 膜的 X 射线衍射图谱和 SEM 微观形貌

Fig.9 X-ray diffraction pattern and SEM microstructure of YIG film

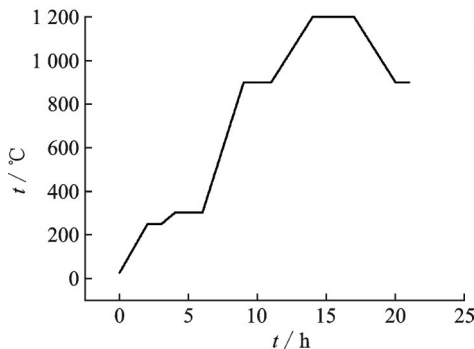
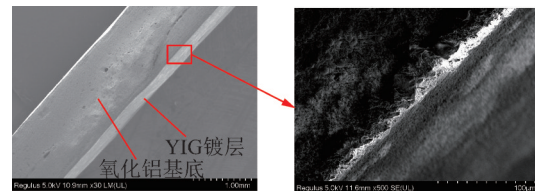


图 8 YIG 膜烧结曲线

Fig.8 Sintering curve of YIG film



(a) Coating morphology

(b) Coating microstructure

图 10 涂层断面的微观形貌

Fig.10 Micromorphology of cross section of coating

右下部是 YIG 镀层,中间的亮白色部分是由于在喷金过程表面不连续而引起局部电荷聚集。在镀

膜的过程中,分界面在微米级的尺度下是较为粗糙的,这有利于提高镀层之间的结合力。

2.3 镀层结合力

从宏观上看,氧化铝的表面粗糙度、基体与浆料热膨胀系数的差异、镀层厚度超过一定限度都会导致结合力的下降。同时,由于基体和镀层收缩率不一致,内应力会导致薄膜开裂。当复合表面曲率过大时,膜的底层和顶层的收缩率会不同,内应力会急剧增加,容易导致涂层的开裂。此外,料浆配比和烧结温度速率对膜的开裂也有影响。为检测涂层的附着力,采用划痕法测试涂层的附着力。

如图11所示,当动态负载达到27 N,摩擦曲线突然中断,然后在34 N恢复近似线性曲线,这是因为钇铁石榴石涂层在27 N开始被压溃,导致载荷减少和摩擦力降低。当动态载荷达到34 N时,所有YIG涂层均被粉碎,刮痕头直接作用在氧化铝基体上,曲线恢复稳定。因此,可以发现涂层表面的附着力在27~34 N之间,涂层与基体之间实现了良好的结合。

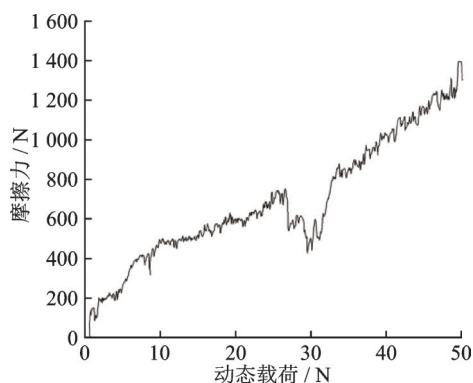
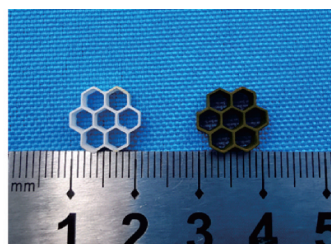


图11 划痕法测量镀层的附着力

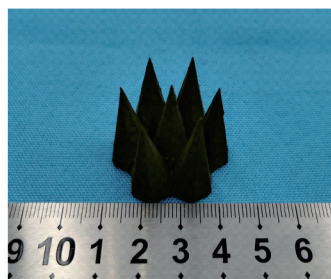
Fig.11 Adhesive force of coating measured by scratch method

2.4 超材料吸波结构样品制备

图12(a)所示为光固化增材制造的蜂窝状氧化铝基吸波结构样品,以及涂层制备后的结构样品。蜂窝结构是一种常见的吸波结构^[26-27],通过本文提出的工艺,可以制造出复杂的吸波器结构。此外还可以制造出如图12(b)所示的六棱锥陶瓷吸波结构,该种尖锥状的结构通过传统工艺难以制造,而本文提出的制造方式则显示出明显的低成本、快速制造的技术优势。



(a) Surface morphology of honeycomb photocurable print (left) and YIG coating (right)



(b) Hexagonal pyramid absorbing structure

图12 蜂窝状光固化打印(左)和YIG涂层的表面形貌以及六棱锥吸波结构

Fig.12 Surface morphology of honeycomb photocurable print (left) and YIG coating (right) and hexagonal pyramid absorbing structure

3 结 论

本文提出了一种在氧化铝光固化陶瓷表面镀YIG膜实现吸波性能的工艺方法,涂层厚度约为150 μm ,具有良好的附着力。利用增材制造技术可以制造复杂陶瓷结构的优势,通过该工艺,设计并制造了微波暗室的结构单元。该工艺结合了3D打印技术与表面涂层技术,拓宽了制造复杂、多层结构的能力,为超材料吸波结构的创新设计提供制造技术支持。

参考文献:

- [1] 王相元,朱航飞,钱鉴,等.微波暗室吸波材料的分析和设计[J].微波学报,2000,16(4):389-406.
WANG Xiangyuan, ZHU Hangfei, QIAN Jian, et al. Analysis and design for the absorbing materials used in microwave anechoic chamber[J]. Journal of Microwave, 2000, 16(4): 389-406.
- [2] 易鸣镝,王迪.微波暗室设计研究[J].通信电源技术,2012,29(5):128-130.
YI Mingdi, WANG Di. Study on microwave dark-room design[J]. Telecom Power Technology, 2012, 29(5): 128-130.
- [3] 吴雨明,丁霄,王任,等.基于等效介质原理的宽角超材料吸波体设计的理论分析[J].物理学报,2020,

- 69(5): 77-84.
- WU Yuming, DING Xiao, WANG Ren, et al. Theoretical analysis of wide-angle metamaterial absorbers based on equivalent medium theory[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(5): 77-84.
- [4] 礼嵩明, 吴思保, 王甲富, 等. 含超材料的新型蜂窝夹层结构吸波复合材料[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(3): 94-99.
- LI Songming, WU Sibao, WANG Jiafu, et al. Novel honeycomb sandwich structure wave-absorbing composites with metamaterials[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(3): 94-99.
- [5] 刘晓春, 张文武, 胡文秀, 等. 基于 2.5 维小型化设计的 UHF 频段高性能超材料吸波体[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(6): 864-869.
- LIU Xiaochun, ZHANG Wenwu, HU Wenxiu, et al. High-performance metamaterial microwave absorber based on 2.5-D miniaturization design in UHF band [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(6): 864-869.
- [6] 陈扬, 招启军, 蒋相闻, 等. 武装直升机雷达散射截面计算及雷达吸波材料影响分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(1): 75-82.
- CHEN Yang, ZHAO Qijun, JIANG Xiangwen, et al. Radar cross section calculation on armed helicopter and effect analyses of radar absorbing material[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2019, 51(1): 75-82.
- [7] JOSHI S, SHEIKH A. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2015, 10(4): 175-185.
- [8] NICKELS L. AM and aerospace: An ideal combination[J]. *Metal Powder Report*, 2015, 70(6): 300-303.
- [9] CHUNG K, SHU M, WANG Y, et al. 3D printing technologies applied to the manufacturing of aircraft components[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(1): 7-9.
- [10] PARK J, JANG J, LEE J, et al. Current advances in three-dimensional tissue/organ printing tissue[J]. *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*, 2016, 13(6): 612-621.
- [11] NORMAN J, MADURAWER, MOORE C, et al. A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D-printed drug product[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2017, 108: 39-50.
- [12] HALEEM A, JAVAID M, KHAN R, et al. 3D printing applications in bone tissue engineering[J]. *Journal of Orthopaedic Trauma*, 2020, 11(1): 118-124.
- [13] YIN L, TIAN X, SHANG Z, et al. Ultra-broadband metamaterial absorber with graphene composites fabricated by 3D printing[J]. *Materials Letters*, 2019, 239: 132-135.
- [14] LIU T, XU Y, ZHENG D, et al. Fabrication and absorbing property of the tower-like absorber based on 3D printing process [J]. *Physic B*, 2019, 553: 88-95.
- [15] QIAN Y, YAO Z, LIN H, et al. Mechanical and microwave absorption properties of 3D-printed Li_{0.44}Zn_{0.2}Fe_{2.36}O₄/polylactic acid composites using fused deposition modeling [J]. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 2018, 29(22): 19296-19307.
- [16] LAI W, WANG Y, HE J. Effects of carbonyl iron powder (CIP) content on the electromagnetic wave absorption and mechanical properties of CIP/ABS composites[J]. *Polymers*, 2020. DOI: 10.3390/polym12081694.
- [17] XU Y, YUAN L, LIANG Z, et al. A wide frequency absorbing material added CIPs using the fused deposition modeling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 704: 593-598.
- [18] MEI H, ZHAO X, ZHOU S, et al. 3D-printed oblique honeycomb Al₂O₃/SiC_w structure for electromagnetic wave absorption[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 372: 940-945.
- [19] 焦守政, 齐文, 陈松, 等. 分散剂及粉体粒径对光固化氧化铝陶瓷浆料粘度及制件性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1): 260-265.
- JIAO Shouzheng, QI Wen, CHEN Song, et al. Effect of dispersant and powder particle size on viscosity and samples properties of photocured alumina ceramic slurries[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1): 260-265.
- [20] 郭亮, 金而立, 苏嘉敏, 等. 氧化铝陶瓷 DLP 3D 打印技术研究[J]. *应用激光*, 2020, 40(6): 1040-1044.
- GUO Liang, JIN Erli, SU Jiamin, et al. Light curing 3D printing technology of zirconia ceramic[J]. *Applied Laser*, 2020, 40(6): 1040-1044.
- [21] CHIANG W, CHERN M, LIN J, et al. FMR studies of Y₃Fe₅O₁₂/Gd₃Ga₅O₁₂ (YIG/GGG) superlat-

- tices and YIG thin films[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 239(3): 332-334.
- [22] CHOUDHARY H, KUMAR R, PAWAR S, et al. Effect of coral-shaped yttrium iron garnet particles on the EMI shielding behaviour of yttrium iron garnet-polyaniline-wax composites[J]. *Chemistry Select*, 2018, 3(7): 2120-2130.
- [23] WANG K, QIU M, JIAO C, et al. Study on defect-free endebinding green body of ceramic formed by DLP technology[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(2): 2438-2446.
- [24] LIU Q, QIU M, SHEN L, et al. Additive manufacturing of monolithic microwave dielectric ceramic filters via digital light processing[J]. *Electronics*, 2019, 8: 1-14.
- [25] AZIS S, SYAZWAN M, SHAHRANI N, et al. Influence of sintering temperature on the structural, electrical and microwave properties of yttrium iron garnet (YIG) [J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 29(10): 8390-8401.
- [26] SUN M, CHEN L, GU Z. Characterization and design of honeycomb absorbing materials[J]. *Solid State Phenomena*, 2019, 294(1): 51-56.
- [27] LI W. Investigating the effect of honeycomb structure composite on microwave absorption properties[J]. *Composites Communications*, 2020, 19(1): 182-188.

(编辑: 胥橙庭)