

激光选区熔化成形 Kanthal 涂层及其微波衰减特性研究

王博锋^{1,2}, 张永清¹, 张兆传¹, 王伟龙¹, 顾红红¹, 梁源¹, 刘颖琴^{1,2}, 高向阳¹

(1. 中国科学院电子学研究所 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用 2 种球形 Kanthal 合金粉末 (颗粒直径 45~60 μm 和 50~70 μm), 通过激光选区熔化(selective laser melting, SLM)技术制备 Kanthal 涂层。利用光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)和谐振腔特性测量系统对 Kanthal 粉末及涂层的表面形貌、显微组织、相结构和谐振腔品质因子进行检测分析。结果表明: SLM 成形 Kanthal 涂层具有表面粗糙、多孔结构、扁平化的特点, 与无氧铜基金属结合牢固, 形成了冶金结合界面。其中 45~60 μm 球形合金粉末 SLM 成形涂层加载谐振腔品质因子(quality factor) Q 值整体比 50~70 μm 粉末成形涂层的 Q 值低, 在频率 2985 MHz 下微波衰减特性更强。涂层成形过程中形成的 Al_2O_3 膜和微孔洞使得合金涂层能够散射微波, 减少了对微波的反射。涂层厚度对微波有干涉损耗, 厚度 0.55 mm 的 Kanthal 涂层加载谐振腔 Q 值最小, 达到 2280。Kanthal 涂层是以磁衰减为主的复合衰减材料。

关键词: 激光选区熔化成形; Kanthal 涂层; 微波衰减特性; Q 值

中图分类号: TG665; TM25

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3143-10

微波真空电子器件是当代国防装备和国民经济各部门都在使用的一类最重要的电子器件, 在信息系统和人民日常生活中也发挥着重要作用。在国防装备上, 真空电子器件是雷达、通信、电子对抗、遥测遥感和精密制导设备的核心; 在信息系统中, 作为广播电视台、电视台的放射源, 微波通信和卫星通信的转发器, 以及接收和显示图像的彩色电视机与各种显示器件已广泛应用于日常工作和生活中^[1]。为满足微波真空电子器件的设计指标要求, 经常对高频互作用区进行加载, 诸如谐振腔降低品质因子 Q , 耦合腔行波管返波振荡抑制, 返波振荡器或正交场放大器中模式竞争的消除等。微波衰减材料是指在微波真空电子器件中可使得微波信号有效衰减的一种特殊材料, 是微波吸收材料的一种特殊类型^[2]。吸波材料的种类很多, 应用很广, 但能满足微波真空电子器件超高真空环境使用要求的吸波材料非常少。Kanthal(康泰尔)合金主要成分是铁、铬、铝、钴, 是一种有磁性、高电阻率的物质, 出气率符合高真空要求^[3], 因此成为微波真空电子器件常用的衰减材料。通过无氧铜谐振腔内表面涂覆或热喷涂微波衰减材料降低其 Q 值是微波真空电子器件衰减加载普遍采用的方法, 但是在微波真空电子

器件研制过程中发现在无氧铜表面微小区域内制备衰减涂层不易控制其成形厚度和牢固度。原因是 Kanthal 合金与基底无氧铜金属由于异种金属的物理特性差异难以牢固的结合, 导致 Kanthal 微波衰减涂层的制备成为难点。3D 打印成形技术作为一种先进数字化增材制造技术, 以个性化、小批量、可快速制造复杂结构等优点, 为微小型金属件制造提供了新途径^[4]。

激光选区熔化成形技术是 3D 打印技术中金属精密成形技术, 成为国内外的研究热点。SLM 成形技术是基于分层制造、层层叠加的成形原理, 根据三维计算机辅助设计 (CAD) 数字模型, 高功率密度激光根据扫描路径对当前层粉末 (已铺在粉床上并被压实的粉末) 聚焦, 完全熔化被聚焦的粉末及已成形的金属实体的表层, 使其熔为一体而成形。SLM 成形金属层之间冶金结合, 金属层与基体金属及金属层与金属层之间牢固度高; 其最小成形厚度为 20 μm /层, 成形精度高。

随着微波真空电子器件对结构和性能要求的提高, 采用 SLM 技术精密成形 Kanthal 合金微波衰减涂层具有独特的优势。关于金属 SLM 成形技术的研究报道较多, 但是 Kanthal 涂层 SLM 成形技术及其微波吸收性能未见报道。多篇文献报道了 Kanthal 粉末的微波吸收

收稿日期: 2019-09-06

基金项目: 国家自然科学基金 (61771454)

作者简介: 王博锋, 男, 1988 年生, 博士, 中国科学院电子学研究所, 北京 100190, 电话: 010-56535231, E-mail: bfwang@mail.ie.ac.cn

性能。Liu 等人^[5]研究了 FeCrAl 合金球形粉末研磨成薄片状粉末显著提高其微波性能, 在 8.2~12.4 GHz 频带内反射率低于 -10 dB, 10.3 GHz 频率点的最小反射率为 -25.6 dB。FeCrAl 粉末中添加 Ti₃SiC₂ 的混合粉末的微波吸收性能提高, 在 8.4~12.1 GHz 频带内反射率小于 -10 dB^[6]。Zhou 等人报道了 Al₂O₃/FeCrAl 复合涂层的热喷涂工艺参数, 厚度 1.3 mm 的 Al₂O₃ 掺杂 41% (质量分数) FeCrAl 复合涂层反射率小于 -10 dB, 获得最优的微波吸收性能^[7]。因此, 本实验采用 SLM 技术开展微波衰减材料 Kanthal 涂层成形技术研究, 在微小尺寸金属表面实现厚度 0.1~1.06 mm 衰减涂层加载, 且针对微波真空电子器件进行衰减涂层的应用研究。

1 实验

Kanthal 合金涂层激光选区熔化 SLM 成形实验由江苏永年激光成形技术有限公司 YLM-120 型激光选区熔化成形系统完成, 如图 1 所示。SLM 成形系统包括真空系统、控制系统、脉冲固体激光器、刮刀铺粉系统、送粉缸、成型缸、收粉缸、惰性气体保护成型室和氧含量分析仪。实验材料选用无氧铜作为母材, Kanthal 合金球形粉末为涂层成形原材料, 平均粒径 45~60 μm 和 50~75 μm (见图 2), 其化学成分和热物性性能^[3,8,9]如表 1 和表 2 所示。在无氧铜基底限定区域内进行 SLM 单面/双面成形 Kanthal 涂层, 无氧铜的尺寸为 11.7 mm × 9 mm × 3 mm, Kanthal 涂层的尺寸为 11.6 × 9 × X (厚度 X 为 0.1~1.0 mm)。SLM 成形工艺参数为激光功率 175 W, 扫描速度 1300 mm/s, 分层厚度

20 μm/层, 光斑直径 60 μm, 氧含量 10%或 0.2%, 涂层 SLM 成形参数如表 3 所示。其中 KG1~KG8、KL1~KL7、KCG1~KCG9 和 KCL1~KCL7 为双面成形涂层, KG9 和 KCG9 为单面成形涂层。采用 Nikon MM-800L 光学显微镜和配备能谱仪的 JSM-6510 型扫描电镜对涂层的组织形貌和横截面进行观察和分析。采用布鲁克 D8 型 X 射线衍射仪对涂层进行物相分析。采用谐振腔特性测试系统对加载 Kanthal 涂层的谐振腔中心频率和品质因子 Q 值进行测试。

2 结果与分析

2.1 Kanthal 涂层激光选区熔化成形

SLM 技术参数与涂层成形密切相关, 研究涂层表面成形利于提高涂层成形质量及其与基金属结合的牢固性。无氧铜表面 SLM 成形 Kanthal 合金属于典型的异种金属连接, 成形质量直接关系着涂层性能的可靠性。因此, 对 Kanthal 涂层进行组织分析。

图 3 是激光选区熔化 SLM 成形 Kanthal 合金涂层表面形貌。从图中可以看出, SLM 成形 Kanthal 合金涂层表面粗糙, 呈多孔结构, 与基底无氧铜金属结合力好。与合金粉末本色相比, Kanthal 涂层颜色为灰黑色, 原因是 SLM 成形过程中合金元素与氧气发生反应而被氧化。

2.2 Kanthal 涂层显微组织

图 4 是 SLM 成形 Kanthal 涂层显微组织。随着 Kanthal 涂层厚度的增加, 涂层致密度增加, 内部孔隙率减少。当涂层厚度超过 0.6 mm, 粉末熔化更为充分,

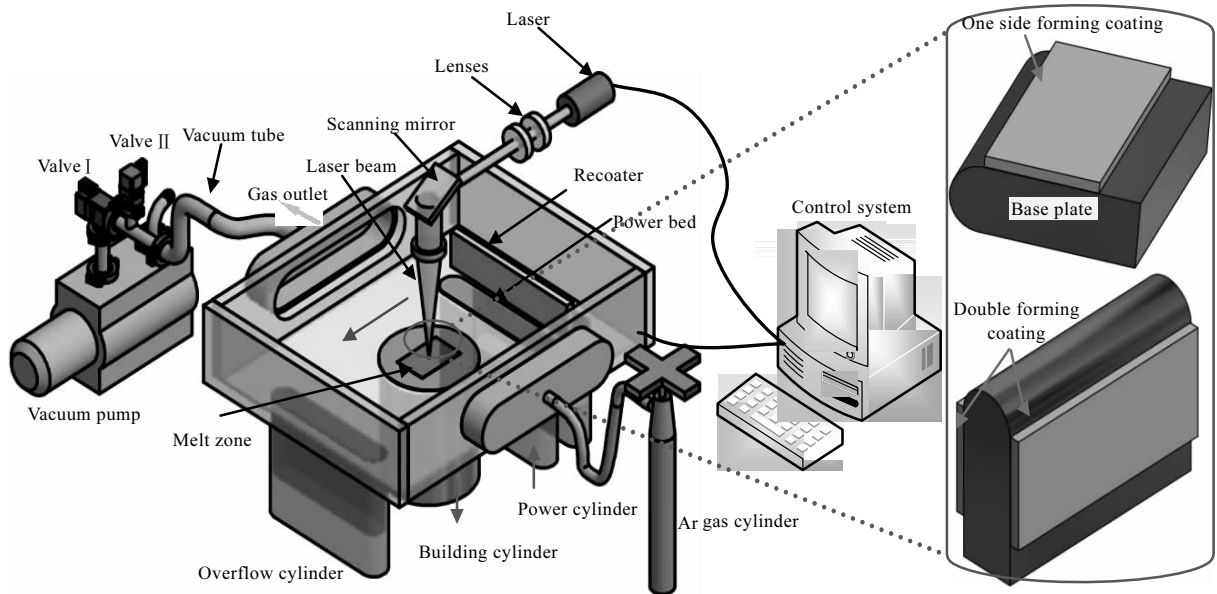


图 1 激光选区熔化 SLM 成形原理图

Fig.1 Schematic diagram of the selective laser melting (SLM) system

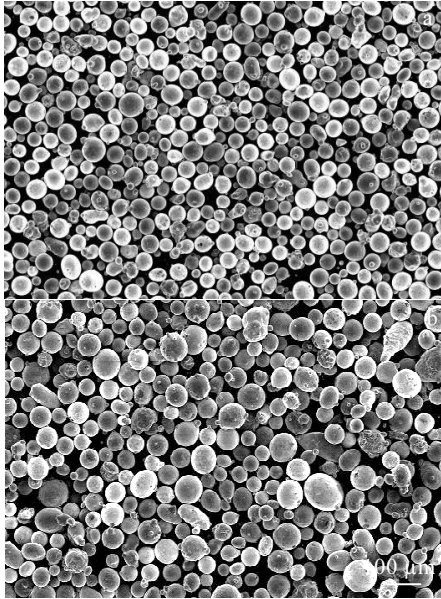


图 2 Kanthal 合金粉末形貌图

Fig.2 Morphologies of the Kanthal powder: (a) diameter of 45~60 μm and (b) diameter of 50~75 μm

合金涂层致密度显著增加(图 4c 和 4f)。原因可能是在涂层逐渐垒加的过程中，热量在涂层中积聚的越来越多，合金元素导热系数低，高温场利于粉末熔化形成高致密度表面。表 4 是 Kanthal 合金涂层主要元素含量。涂层中元素包括 Fe、Cr、Al 和 O，其中氧含量大于 10%，说明合金元素在激光选区熔化成形过程中

表 1 材料的化学组成

Table 1 Chemical compositions of the materials ($\omega/\%$)

Material	Cr	Al	Co	C	O	Fe	Cu
Kanthal alloy	22.1	5.12	0.5	0.02	0.04	Bal	-
Copper(T10150)	-	-	-	-	0.002	0.004	99.97

表 2 Kanthal 热物理性质

Table 2 Thermophysical properties of Kanthal used in this study

Property	Kanthal	Copper
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	7.1	8.92
Melting point/ $^{\circ}\text{C}$	1500	1083
Thermal conductivity/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	7.1	398
Coefficient of thermal expansion/ $\times 10^{-5} \text{K}^{-1}$	1.35	1.77
Specific heat/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	460	385
Electroconductivity/ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	8978	58×10^{-6}
Permeability/ $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$	2.58	0
Outgassing rate/ $\text{Pa}\cdot\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$	$<1\times 10^{-10}$	$<1\times 10^{-9}$

被氧化。EDS 能谱未见 Co 元素，原因是 Co 含量低(0.5%，质量分数)，超出能谱分析的范围。

图 5 是 Kanthal 涂层局部区域放大显微组织。由图可见，50~70 μm 粉末 SLM 成形涂层，多处存在块状析出相和灰色区域；45~60 μm 粉末 SLM 成形涂层只有局部区域存在少量白色颗粒析出相和灰色区域。通

表 3 Kanthal 涂层 SLM 成形参数

Table 3 SLM parameters of Kanthal coatings

Sample I	KG1	KG2	KG3	KG4	KG5	KG6	KG7	KG8	KG9
Thickness/mm	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.36	0.51	0.55	0.88
Oxygen content/%	10								
Powder diameter/ μm	50~70								
Sample II	KL1	KL2	KL3	KL4	KL5	KL6	KL7		
Thickness/mm	0.19	0.22	0.25	0.4	0.5	0.53	0.55		
Oxygen content/%	0.2								
Powder diameter/ μm	50~70								
Sample III	KCG1	KCG2	KCG3	KCG4	KCG5	KCG6	KCG7	KCG8	KCG9
Thickness/mm	0.27	0.33	0.39	0.40	0.49	0.50	0.52	0.58	0.78
Oxygen content/%	10								
Powder diameter/ μm	45~60								
Sample IV	KCL1	KCL2	KCL3	KCL4	KCL5	KCL6	KCL7		
Thickness/mm	0.10	0.15	0.18	0.35	0.40	0.46	0.55		
Oxygen content/%	0.2								
Powder diameter/ μm	45~60								



图 3 SLM 成形 Kanthal 涂层表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of Kanthal coatings by SLM technology: (a) KL7, (b) KG8, (c) KG9, (d) KCL7, (e) KCG8, and (f) KCG9

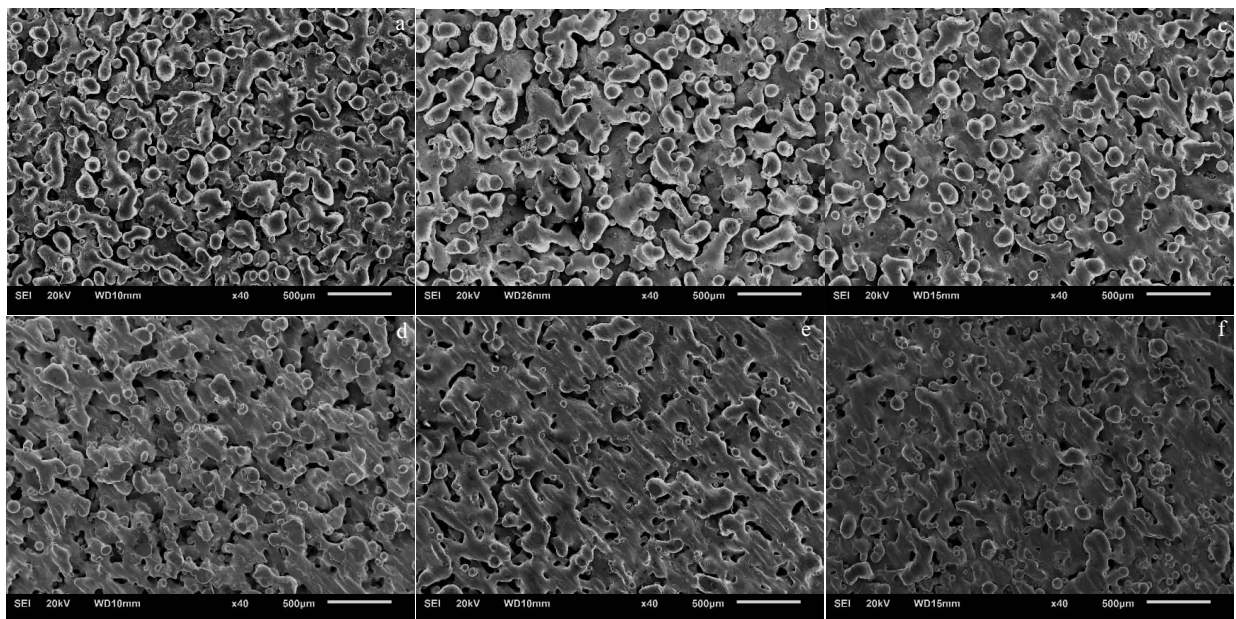


图 4 SLM 成形 Kanthal 合金涂层显微组织

Fig.4 Microstructure of Kanthal coatings by SLM technology: (a) KL7, (b) KG8, (c) KG9, (d) KCL7, (e) KCG8, and (f) KCG9

表 4 Kanthal 涂层主要元素含量

Table 4 Chemical composition of Kanthal coating (at%)

Element	KL7	KG8	KG9	KCG8	KCL7	KCG9
O	11.76	16.39	13.91	16.64	11.98	13.31
Al	20.81	20.45	17.89	19.69	17.55	17.58
Cr	18.06	16.89	18.24	16.88	18.92	18.40
Fe	49.37	46.27	49.95	46.80	51.55	50.71

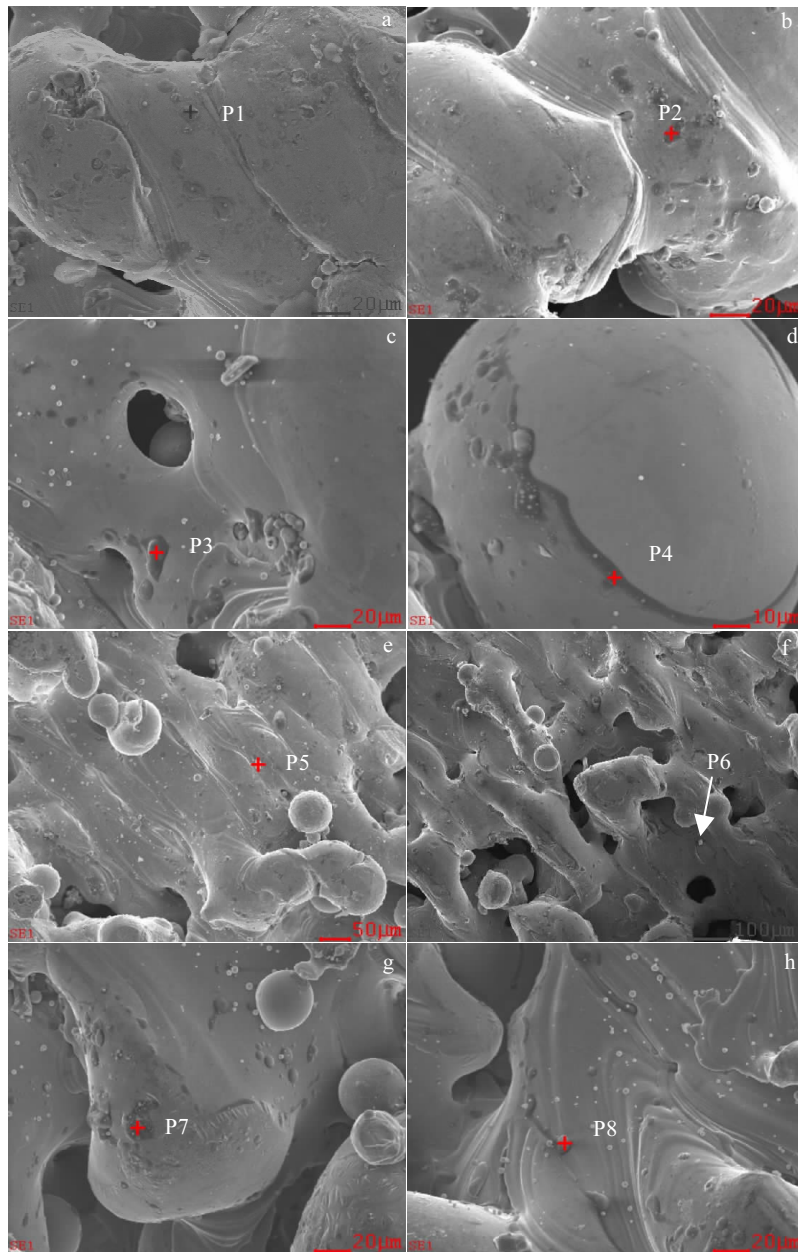


图 5 Kanthal 涂层局部区域放大显微组织

Fig.5 Enlarged microstructures of the Kanthal coatings: (a, b) KL7, (c) KG8, (d) KG9, (e) KCL7, (f) KCG8, and (g, h) KCG9

过 EDS 分析获得局部区域 (P1~P8) 不同元素的含量, 分析结果如表 5 所示。块状析出相(标记 P1, P3)和灰色区域(标记 P2, P4)富含 Al 和 O 元素, 贫 Fe 和 Cr 元素。而 50~70 μm 粉末 SLM 成形涂层, 富含 Fe 和 Cr 元素(P6), 仅有少量白色颗粒(标记 P5, P6 和 P8)或灰色区域(标记 P7)存在富含 Al 和 O 元素。根据 Al-O 相图和 Fe-Cr 相图, 可能生成的相为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{Al}+\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\alpha\text{Fe}(\text{CrAl})$ 。

图 6 是 KCG8 涂层横截面形貌及 EDS 线扫描结果。由图 6a 可见, 涂层横截面形貌为球形颗粒熔融后

凝固形成多孔结构, 铜/Kanthal 合金结合界面部分区域未充分熔合, 原因是球形颗粒熔化过程中形成了微孔洞导致涂层与铜基底之间局部区域未形成连续致密的界面。图 6b EDS 线扫描结果显示铜与涂层合金元素熔化区宽度为 5~8 μm, 表明 SLM 过程中激光对熔池具有高温搅拌作用, 并使界面处铜、铁、铬元素发生了相互扩散和迁移, 形成了 Cu-Kanthal 冶金结合界面^[10,11]。此外, 铝和氧元素曲线具有很好的对应关系, 说明涂层表面覆盖着 Al_2O_3 膜^[12]。

表 5 图 5 中不同区域的元素含量

Table 5 Chemical composition of each zone in Fig.5 (at%)

Zone	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
O	50.67	40.59	31.33	30.48	40.63	38.02	15.23	54.19
Al	46.11	53.65	66.51	56.02	49.36	33.30	65.22	44.35
Cr	01.42	02.30	00.87	04.43	03.99	08.23	05.74	00.61
Fe	01.80	03.46	01.28	09.06	06.14	20.45	13.80	00.84
Possible phases		α -Al ₂ O ₃			α Fe(CrAl)		Al+ α -Al ₂ O ₃	α -Al ₂ O ₃

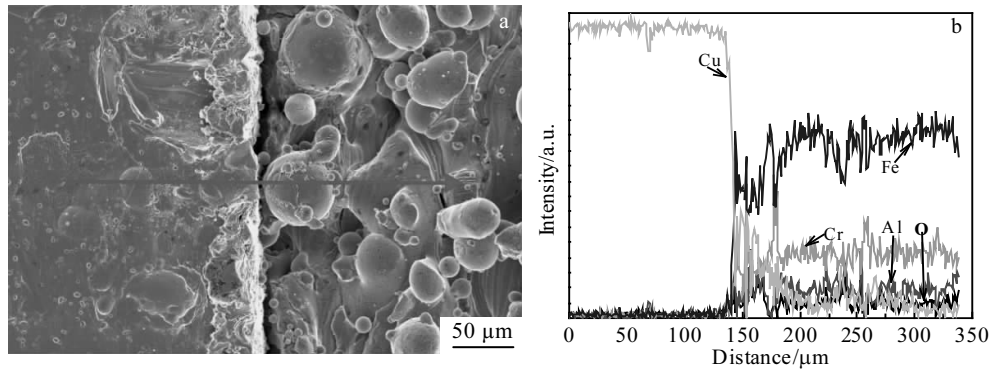


图 6 KCG8 涂层横截面形貌及 EDS 线扫描结果

Fig.6 Cross-sectional morphology (a) and EDS linear scanning results (b) of sample KCG8 coating

2.3 Kanthal 涂层相结构

图 7 是 Kanthal 合金粉末及涂层 XRD 图谱。从图中可以看出, Kanthal 粉末及涂层由 α -Fe、FeCr 和 Cr 元素组成, 而无 Al 和 Co 元素组成的化合物相, 原因是合金粉末在熔炼和真空雾化形成球形的过程中 Al 和 Co 元素固溶于 Fe 晶体中^[13]。与合金粉末相比, 合金涂层衍射峰宽化、向右侧偏移, 衍射峰强度降低, 原因是粉末在激光熔化和再次凝固过程中合金元素晶体结构发生变化, 晶间应力增大^[2,3]。Cu 元素衍射峰来自涂层基底无氧铜金属。另外, 无其他衍射峰出现, 表明激光选区熔化的过程中没有发生物相的转变和化学反应。

α Fe(CrAlCo)是由 Fe、Cr、Al 和 Co 原子随机占据晶格中的点阵位置, 形成晶体 bcc 点阵, 属于无序的 Im3m 空间点阵群。同理, FeCr 也属于无序的 Im3m 空间点阵群。Fe 原子的晶格常数是 0.2866 nm, 而 FeCrAl 合金涂层中 bcc 结构 α Fe 晶格常数为 0.2871 nm, FeCr 晶格常数为 0.2876 nm, 说明晶格常数变大, Cr 和 Al 进入 Fe 晶格引起晶格常数的变化。由于 Fe 原子半径 0.172 nm, Cr 原子半径 0.185 nm, Al 原子半径 0.182 nm, Co 原子半径是 0.167 nm, Cr、Al 或 Co 原子替换 Fe 原子后使得晶格常数变大。因此, 进

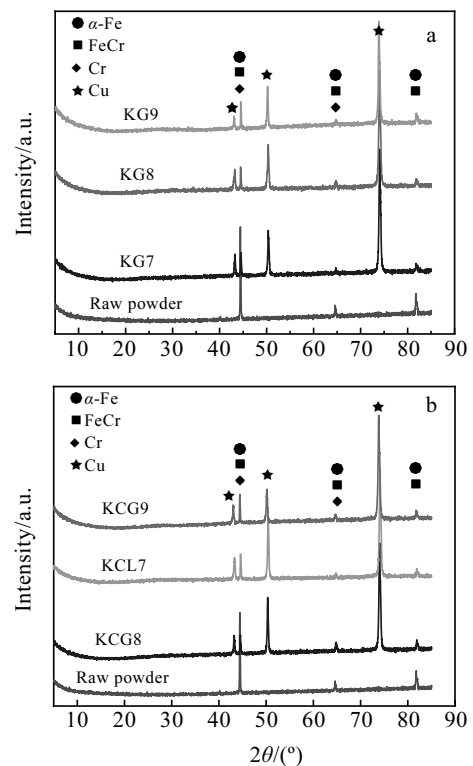


图 7 Kanthal 合金粉末及涂层相结构的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of Kanthal alloy powder (a) and coating (b)

一步印证了合金涂层中的物相为 $\alpha\text{Fe}(\text{CrAlCo})$ 固体和 FeCr 相，与 EDS 能谱结果一致。

2.4 Kanthal 涂层微波衰减性能测试

对加载微波衰减涂层的谐振腔进行电性能测试，获得谐振腔中心频率和品质因子 Q ，验证涂层的微波衰减性能。

图 8 为谐振腔特性探针法测试系统原理图。测试系统由扫频信号源、环流器、检波器、示波器、源探针、接收探针、同轴线内外导体、聚四氟乙烯和加载衰减涂层的谐振腔组成。由于谐振腔与外部无耦合，通过探针法测量谐振腔的特性。测量原理是由扫频信号源产生的扫频信号通过源探针在谐振腔间隙上激励起高频场，再通过接收探针，经检波器将谐振腔间隙电场的幅度随频率变化显示在示波器上。检波晶体的检波率与幅值成平方关系，示波器上表示的频率响应为谐振腔的功率-频率特性，则通过测量相应半功率点频率 f_1 和 f_2 ，求得谐振腔有载 Q_L 值^[14,15]，计算公式如下：

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \tag{1}$$

图 9 是频率 2985 MHz 下负载腔体 Q 值与加载涂层厚度的关系曲线。由图可见，随着 50~70 μm 球形粉末 SLM 成形涂层厚度的增加，负载腔体 Q 值呈现逐渐降低的趋势，如图 9a 和 9b 所示。铜基底上单面成形涂层的加载负载腔 Q 值(3598~4800)整体低于双面成形涂层对应的 Q 值(3685~5350)。原因是双面成形涂层的表面积增大，腔体的损耗性线性增加。涂层成形过程中的氧含量对其微波衰减性能有显著影响。Kanthal 合金涂层的成形氧含量由 10%降低至 0.2%，腔体 Q 值降低，表明涂层的衰减性能得到提高。当氧含量为 0.2%，KL7 涂层厚度为 0.55 mm 时，负载腔 Q 值最低为 3658。

随着加载涂层厚度(45~60 μm 球形粉末)的增加，负载腔 Q 值逐渐降低，涂层的微波衰减性能逐渐增强，如图 9c 和 9d 所示。单面成形涂层对应负载腔 Q 值整体(2500~4320)高于双面成形涂层对应的 Q 值(2280~5300)，原因是单面成形涂层表面积小。涂层的成形过程中低含氧量有利于提高其微波衰减性能，而当厚度超过 0.5 mm，氧含量对涂层的微波衰减性能影响较小。当 Kanthal 合金涂层的成形氧含量为 10%，厚度为 0.58 mm 涂层加载负载腔 Q 值达到最小值 2280，满足谐振腔的设计要求。

对比图 9a 和 9c，颗粒直径 45~60 μm 球形粉末 SLM 成形涂层的负载腔 Q 值(2280~5300)明显低于 50~70 μm 球形粉末成形涂层的负载腔 Q 值(3685~5350)，表明小颗粒直径球形粉末成形 SLM 涂层具有良好的微波衰减性能，使得负载腔获取低 Q 值。因此，Kanthal 涂层 SLM 成形表面积、氧环境、厚度及球形粉末粒度是影响谐振腔 Q 值的关键因素。

2.5 Kanthal 涂层微波衰减机理

微波衰减材料的衰减机理包括电损耗和磁损耗 2 种^[2,13]。Kanthal 合金材料是以磁损耗为主的复合衰减材料，其衰减量与流过衰减层的电流成比例^[15,16]。根据文献中 Kanthal 合金介电常数、电导率和磁导率等数据^[3,17,18]，利用三维电磁场软件(computer simulation technology, CST)模拟加载谐振腔的特性，其电磁场分布剖面图如图 10 所示。CST 计算负载谐振腔的谐振频率 2970.2 MHz，与其探针法测试获得的中心点频率值 2985.2~2986.9 MHz 基本吻合，相对误差较小(0.5%~0.6%)，说明谐振腔的电磁谐振是谐振腔 Q 值降低、加载涂层微波衰减性能增强的主要原因。Kanthal 涂层微波衰减性能的相关参数有表面电阻率和趋肤深度^[19,20]。其中涂层表面电阻率 R_s 计算公式如下：

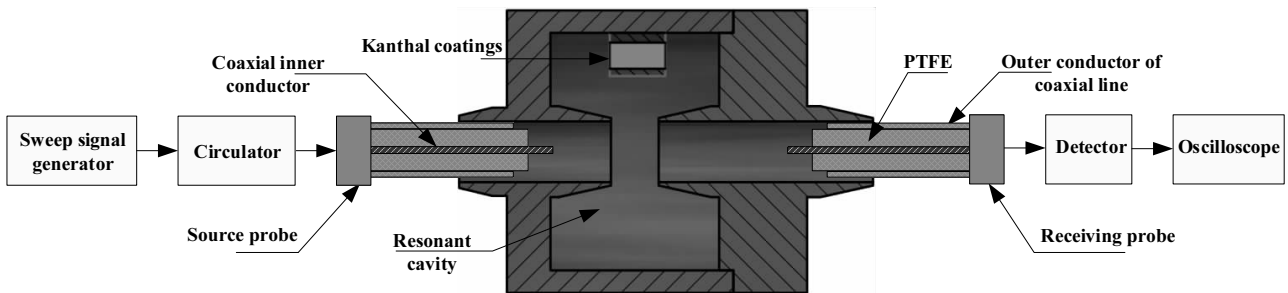


图 8 谐振腔特性探针法测试系统原理图

Fig.8 Principle diagram of the measurement system for cavity parameters

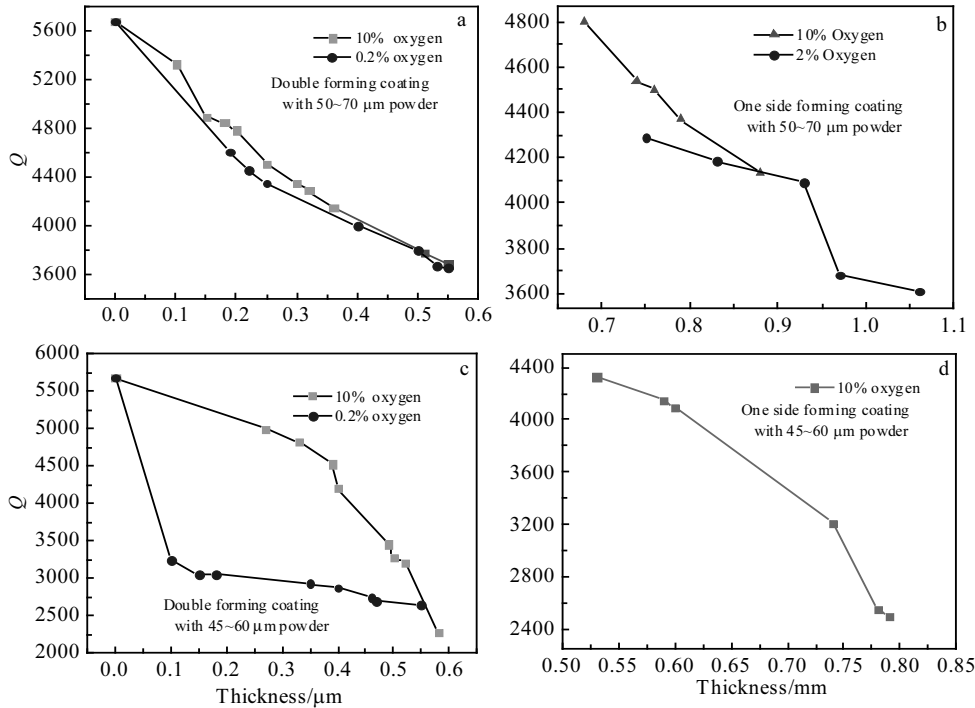


图 9 负载腔体 Q 值与加载涂层厚度的关系曲线

Fig.9 Quality factor Q vs coating thickness curves for cavity: (a, b) 50~70 μm , and (c, d) 45~60 μm

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}} \quad (2)$$

式中, f 为工作频率, μ 为磁导率, σ 为电导率。

高磁导率和低电导率可以形成较高的电阻率, 提高合金涂层表面电阻率可以加强其微波衰减性能。Kanthal 合金是高电阻材料(见表 2), SLM 成形 Kanthal 涂层是多孔结构, 且表面粗糙(见图 3), 导致表面电阻率增大; 微波传输过程中延长了垂直于磁场方向表面电流的运行路径, 缩短了平行方向的表面电流路径, 使涂层具有更好的损耗特性^[17-19](见图 10)。涂层趋肤深度计算公式如下:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

趋肤深度的定义为电磁场在传输一个趋肤深度的距离后, 其振幅就衰减为 $1/e$ 。因此微波衰减涂层中绝大部分电流都存在于接近表面的极薄区域内, 其厚度应大于材料的趋肤深度; Kanthal 涂层微波衰减性能示意图如图 11 所示。当涂层表面粗糙时, 平行于磁场方向的电流路径被缩短, 由 δ 减小为 δ_1 。

包裹在 Kanthal 涂层表面 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜及涂层微孔洞的隔离能够散射微波, 减少了对微波的反射, 导致微波能量的衰减。张永清和 Zhou 等人^[2,7]发现了类似的现象。50~70 μm 球形粉末成形涂层的微波吸收性能低

于 45~60 μm 粉末成形涂层, 即表现为谐振腔 Q 值相对较高。原因是包裹在 FeCrAl 合金表面的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 超过一定比例后使得微波吸收峰值向高频方向移动, 降低了对低频段微波的吸收^[7], 与 EDS 能谱分析结果一致。此外, 如图 4 所示 45~60 μm 粉末 SLM 成形涂层扁平化效果优于 50~70 μm 粉末成形涂层, 导致 45~60 μm 粉末成形涂层的微波衰减性能增强, Q 值降低(见图 9)。潘顺康等人发现 Al 元素加入到 $\text{Dy}_{12}\text{Fe}_{78}\text{Co}_{10}$ 合金微粉中使得合金粉末获得更好的扁平化效果, 有效改善了合金涂层的低频吸波特性^[13]。He 等人发现 FeCrAl 合金球形颗粒球磨成扁平化形状颗粒后能够在高频电磁场中抑制涡流, 且形成磁化平面^[9,14,15,21]。因此, 合金扁平化能够提高磁导率和微波吸收性能。

随着 Kanthal 涂层厚度的增加, 负载谐振腔 Q 值逐渐降低, 微波衰减性能大幅度提升。厚度 0.55 mm KCG8 涂层对应的腔体加载 Q 值最小, 达到 2280, 原因是涂层厚度对微波有干涉损耗。王振中等人发现 AlMnCe 粉体对电磁波的吸收机理是吸波涂层内粉体的电磁损耗和吸波涂层厚度对电磁波的干涉损耗, 选择适当厚度的涂层, 可使 AlMnCe 粉体对电磁波达到完全吸收^[22-24]。

根据上述分析, Kanthal 合金涂层的微波衰减机理是以磁衰减为主, 电损耗、磁滞损耗和干涉损耗并存。

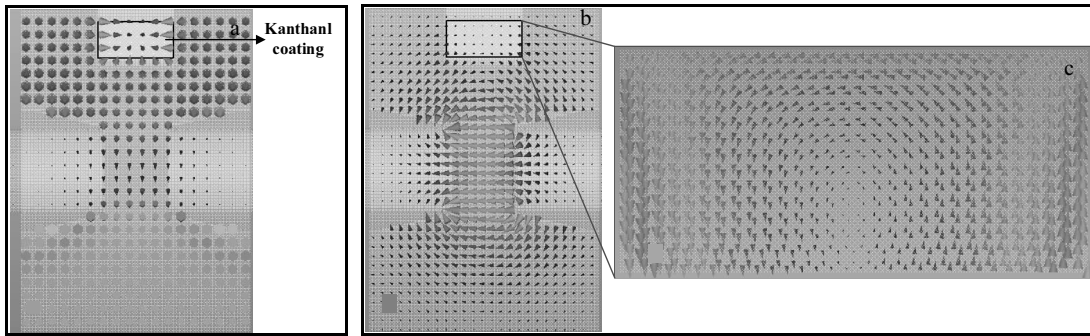


图 10 负载谐振腔电磁场强度分布剖面图

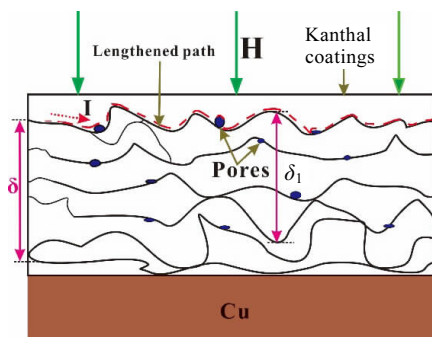
Fig.10 Sectional view of field distribution for loaded cavity: (a) magnetic field H distribution, (b) electric field E distribution, and (c) surface current density distribution

图 11 Kanthal 涂层微波衰减性能示意图

Fig.11 Schematic of microwave attenuation properties for Kanthal coatings

3 结论

1) SLM 成形 Kanthal 合金涂层, 具有表面粗糙、多孔结构、扁平化的特点, 与无氧铜基金属结合牢固, 形成了冶金结合界面。

2) Kanthal 涂层 SLM 成形表面形貌、表面积、氧环境、厚度及球形粉末粒度是影响谐振腔 Q 值的关键因素。45~60 μm 球形粉末 SLM 成形涂层加载谐振腔 Q 值比 50~70 μm 粉末成形涂层的 Q 值低, 其微波衰减特性更强。原因是 50~70 μm 球形合金粉末 SLM 成形涂层的过程中 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 相超过一定比例使得微波吸收峰值向高频方向移动, 降低了对低频段微波的吸收。

3) Kanthal 涂层表面粗糙, 在微波传输过程中延长了垂直于磁场方向表面电流的运行路径, 缩短了平行方向的表面电流路径, 使涂层具有更好的损耗特性。SLM 成形过程中形成的 Al_2O_3 膜和微孔洞使得合金涂层能够散射微波, 减少对微波的反射, 实现对谐振腔 Q 值的衰减。扁平化形状 Kanthal 涂层能够在高频电

磁场中抑制涡流, 形成磁化平面, 实现微波衰减特性。涂层厚度对微波有干涉损耗, 厚度 0.55 mm 合金涂层对应的腔体加载 Q 值最小, 达到 2280。

4) Kanthal 合金涂层的微波衰减机理是以磁衰减为主, 电损耗、磁滞损耗和干涉损耗并存。

参考文献 References

- [1] Liao Fujiang(廖复疆). *Vacuum Electron Technology*(真空电子技术)[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 5
- [2] Zhang Yongqing(张永清), Ding Yaogen(丁耀根). *Vacuum Electronics*(真空电子技术)[J], 2004(3): 20
- [3] He Xiaodong(何笑东), Wu Congfeng(吴从凤), Dong Sai(董赛) et al. *China Science and Technology Information* (中国科技信息)[J], 2012(10): 55
- [4] Jiang Xiaoshan(蒋小珊), Qi Yuehua(齐乐华). *China Printing and Packaging Study*(中国印刷与包装研究)[J], 2014, 6(5): 15
- [5] Liu Y, Li Y, Luo F et al. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*[J], 2017, 28(9): 6619
- [6] Liu Y, Si J, Li Y et al. *Journal of Electronic Materials*[J], 2017, 46(8): 4981
- [7] Zhou L, Zhou W, Su J et al. *Applied Surface Science*[J], 2012, 258(7): 2691
- [8] Shu Zhao(舒钊). *Thesis for Doctorate*(博士学位)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 96
- [9] He Xiaodong(何笑东). *Thesis for Doctorate*(博士学位)[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011: 136
- [10] Tan C, Zhou K, Ma W et al. *Materials & Design*[J], 2018, 155: 77
- [11] Wang Bofeng(王博锋), Zhang Zhaochuan(张兆传), Hu Xuhua(胡旭华) et al. *Welding Technology*(焊接学报)[J],

- 2018, 39(04): 11
- [12] Zhang Yongqing(张永清), Ding Yaogen(丁耀根), Zhao Ruiqing(赵瑞清) *et al. Vacuum Electronics Society of China Electronics Society-14th Annual Conference(中国电子学会真空电子学分会—第十四届年会)*[C]. Beijing: Vacuum Electronics Branch of Chinese Electronic Society, 2004: 199
- [13] Pan Shunkang(潘顺康), Wang Xiaokun(王啸坤), He Chongkang(何崇康) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(12): 2504
- [14] Sun J, Xu H, Shen Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2013, 548: 18
- [15] Ding Yaogen(丁耀根). *Design, Manufacture and Application of High Power Klystron(大功率速调管的设计制造和应用)*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010: 325
- [16] Zhang Yongqing(张永清), Yin Shenyi(阴生毅), Huang Yunping(黄云平). *Journal of Microwave Science(微波学报)*[J], 2010, S1: 690
- [17] Cao Lei(曹磊). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004: 2
- [18] Wang Xiucui(王秀翠). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010: 24
- [19] Bu Wenbo(步文博), Xu Jie(徐洁), Qiu Tai(丘泰). *Jiangsu Ceramics(江苏陶瓷)*[J], 2001, 34(2): 1
- [20] Pozar M D. *Microwave Engineering*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 50
- [21] KARP A. *1985 International Electron Devices Meeting*[C]. Washington, DC: IEEE, 1985: 354
- [22] Chuai D, Liu X, Yu R *et al. Composites Part A*[J], 2016, 89: 33
- [23] Deng Lianwen(邓联文), Feng Zechong(冯则冲), Jiang Jianjun(江建军) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2006, 43(3): 1
- [24] Wang Zhenzhong(王振中), Lin Peihao(林培豪), Pan Shunkang(潘顺康) *et al. Electronic Components and Materials(电子元件与材料)*[J], 2017, 36(1): 21

Microstructure and Microwave Attenuation Properties of Kanthal Coating Prepared by Selective Laser Melting

Wang Bofeng^{1,2}, Zhang Yongqing¹, Zhang Zhaochuan¹, Wang Weilong¹, Gu Honghong¹, Liang Yuan¹,
Liu Yingqin^{1,2}, Gao Xiangyang¹

(1. Key Laboratory of Science and Technology on High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Kanthal coatings were fabricated by selective laser melting (SLM) with two kinds of powder, 45~60 μm and 50~70 μm in diameter. The surface morphology, microstructure, element distribution, phase structure, and microwave attenuation properties of the coatings were studied by optical microscope, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, and cavity characteristic measurement system. The results indicate that Kanthal coatings have the characteristics of rough surface, porous and flaky structure. The quality factor Q of cavity loaded with coatings fabricated by 45~60 μm sphere powder is lower than that of coatings by 50~70 μm powder, showing better microwave attenuation properties under the frequency of 2985 MHz. Al_2O_3 thin films and micro void generated in the structure of coatings have the effect of scattering microwave and thus reduce microwave reflection. It is also shown that flattened shape of Kanthal coatings is a good way to suppress eddy currents in high-frequency electromagnetic field and leads to the formation of easy magnetization planes, which is helpful to enhance the microwave attenuation property. The coating thickness has profound effects on interference loss of microwave. Cavity Q with coating thickness of 0.55 mm reaches the minimum value of 2280. Kanthal coating is composite material whose main mechanism is attributed to magnetic loss.

Key words: selective laser melting; Kanthal coatings; microwave attenuation properties; quality factor

Corresponding author: Wang Bofeng, Ph. D., Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China, Tel: 0086-10-56535231, E-mail: bfwang@mail.ie.ac.cn