

3D 打印结构参数对角锥结构吸波性能的影响

宋翔¹ 朱晴² 马峰³ 刘文言³

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

(2 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院, 北京 100191)

[3 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083]

文 摘 利用熔融沉积型 3D 打印技术打印角锥结构, 打印材料为 PLA(热塑性塑料), 制备角锥结构的复合吸波材料。制备的角锥样品为空心结构, 单个角锥壁厚 1 mm, 高度 ≤ 20 mm, 底座总面积 200 mm \times 200 mm。研究角锥角度和角锥高度的变化对吸波性能的影响, 用弓形法测试 4~18 GHz 波段范围的反射率。因为角锥结构吸波材料具有梯度渐变结构, 同时具有介质损耗和干涉相消等多种吸波机理。结果发现角锥结构具有优异的吸波性能, 角锥结构吸波性能随角锥角度(33°~73°范围之间)减小而增大, 不同的角锥结构参数在 C、X、Ku 波段对吸波性能有不同的影响。

关键词 3D 打印, 吸波材料, 角锥角度, 角锥高度

中图分类号: TB34

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2024.05.013

Effect of 3D Printed Structural Parameters on Wave Absorbing Performance of Pyramid Structures

SONG Xiang¹ ZHU Qing² MA Feng³ LIU Wenyan³

(1 School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

(2 Frontier Science and Technology Innovation Research Institute, Beihang University, Beijing 100191)

[3 School of Mechatronics and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083]

Abstract The fused deposition 3D printing technology was used to print the pyramid structure. The printing material was PLA (thermoplastic plastic), and the composite absorbing material of pyramid structure was prepared. The prepared pyramid samples were hollow structures, with a single pyramid wall thickness of 1 mm, a height of 20 mm, and a total base area of 200 mm \times 200 mm. The influence of the angle and height of the pyramid on the absorption performance was studied. The reflectance of the 4~18 GHz band range was measured by the bow method. Because the angular pyramid absorbing material had gradient structure, it also had many absorbing mechanisms such as dielectric loss and interference cancellation. The results show that the angular pyramid structure has excellent absorbing performance. The absorbing performance of the angular pyramid structure increases with the decrease of the angular cone angle (33°~73°). Different angular pyramid structure parameters have different effects on the absorbing performance at C, X and Ku bands.

Key words 3D printing, Absorbing material, Pyramid angle, Pyramid height

0 引言

随着现代科技的快速发展, 军事领域发明了各种新的技术和武器, 出现了各种新型雷达、先进探测器等^[1-5]。国内外隐身技术中雷达隐身技术是比较重要的技术之一, 已经得到了广泛的应用^[6-15]。其中雷达角

锥吸波材料通常应用在微波暗室当中, 主要以聚氨酯海绵作为角锥形基材来吸收杂波, 制造出一个纯净的电磁环境^[16-20], 但力学性能较弱。角锥吸波材料的吸波机理主要是将电磁波能量转化为其他形式的能量消耗和电磁波产生 1/4 波长干涉相消等, 角锥吸波材料同

收稿日期: 2022-11-16

第一作者简介: 宋翔, 2000 年出生, 硕士研究生, 主要从事航空材料研究工作。E-mail: songxiang13579@163.com

通信作者: 刘文言, 1967 年出生, 博士, 教授, 主要从事雷达吸波的研究工作。E-mail: liuwenyan@139.com

时具有电磁损耗吸收和结构谐振吸收^[21-23]。传统制造工艺时间长,本文主要研究3D打印角锥结构,3D打印技术具有易成型、打印不规则形状、成本低、制造材料多样性、制造周期短,制造流程简单等优点,大大提高了设计优化自由度。3D打印角锥结构同时具有吸波性能和力学性能^[24-31]。本文主要研究不同角锥角度和高度对其吸波性能的影响和规律,为后续的3D打印角锥吸波材料研究打下基础。

1 实验

1.1 实验材料

3D打印耗材选用PLA,选用的PLA为直径1.75 mm,打印温度在190°~220°,打印平台温度60°C,河南铸麒智能科技有限公司制造。实验选用的是卡博特CSX926导电炭黑,东莞博瑞达新材料有限公司制造。使用的3D打印机为熔融沉积型(FDM),打印机的型号为Hand2型,如图1所示。

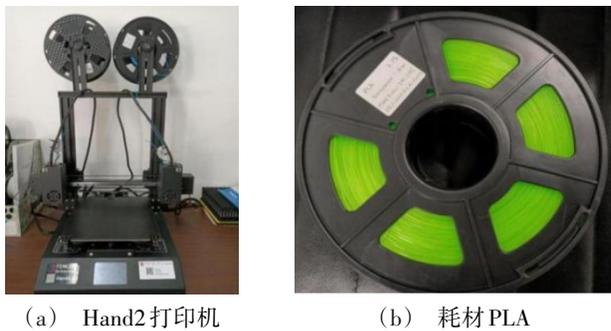


图1 打印机及耗材
Fig. 1 Printer and consumables

1.2 模型设计

利用AutoCAD2021进行3D建立角锥模型,如图2所示,模型单元为空心角锥,底面去除,基于结构的稳定性和重量的最小化,单个角锥设置参数如下,壁

厚均为1 mm,角锥高度均 ≤ 20 mm,角锥角度 θ 和单个角锥底边长 d 是变化的。得到单个角锥模型后将其复制平铺满底面积200 mm \times 200 mm。

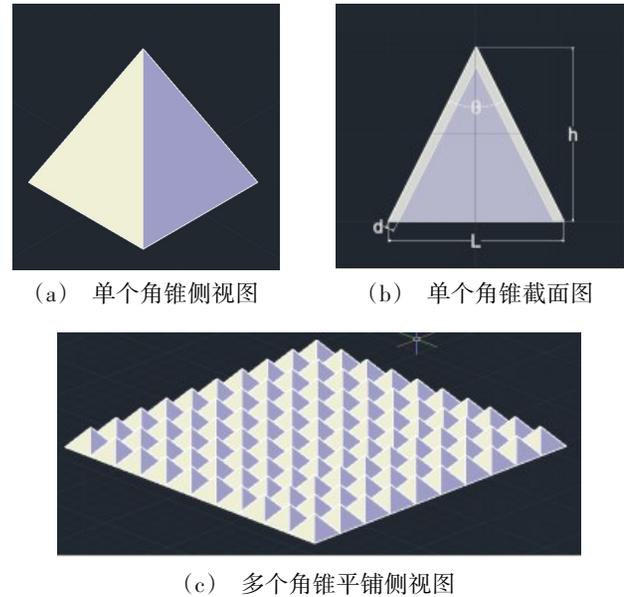
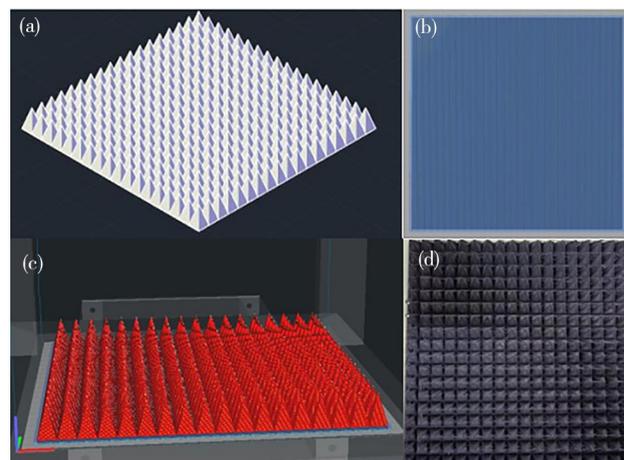


图2 3D角锥模型
Fig. 2 3D Cone Model

1.3 试样制备

利用AutoCAD2021进行3D建模如图3(a),导出文件为.stl格式导入切片软件。使用的切片软件为cura4.10.0,在软件里设置打印参数。根据耗材和打印的结构进行设置打印参数,打印附着为raft类型如图3(b),打印参数设置层高0.4 mm,打印温度220°,平台温度60°(平台温度是为了防止打印翘边,使模型能够在平台上附着),打印速度为140 mm/s,打印平台附着类型为Raft,其他打印参数为初始打印参数,切片示意图3(c)所示。



注:(a)CAD模型;(b)打印附着raft类型;(c)切片稳定示意图;(d)测试样品实体。
图3 3D建模及打印

Fig. 3 3D modeling and printing

制备两组角锥样品,建好的模型进行3D打印,将打出来的样品进行表面浸涂,浸在炭黑中10~15 s,进行

自然风干,操作两遍,如图3(d)。总体底面积200 mm \times 200 mm,但由于不同角度角锥其边长不一样,为了保证

角锥个数为整数个,底边长在200 mm左右。相同高度不同角锥角度样品具体参数如表1所示。相同角锥角度53°不同的角锥高度样品具体参数如表2所示。

表1 高度20 mm不同角锥角度样品数据

Tab. 1 The data of 20 mm height samples with different angle cones

Pyramid angle/°	Side length of a single pyramid/mm	Total number of pyramid	Sample base area/mm ²	Weight gain/g
33	11.12	324	200.16×200.16	13.24
43	15.62	169	203.60×203.60	16.13
53	20.00	100	200.00×200.00	10.14
63	24.57	64	196.56×196.56	7.9
73	28.35	49	198.45×198.45	6.5

表2 角锥角度53°不同角锥高度样品数据

Tab. 2 The data of 53° cone angle samples with different angle height

Pyramid height/mm	Side length of a single pyramid/mm	Total number of pyramid	Sample base area/mm ²	Weight gain/g
12	12.00	256	192.00×192.00	8.82
14	14.00	196	196.00×196.00	12.08
16	16.00	144	192.00×192.00	12.33
18	18.00	121	198.00×198.00	15.84
20	20.00	100	200.00×200.00	10.14

1.4 试样测试

用弓形法测样品的反射率,实验装置如图4所示,先进行校准清零,再将制备好的试样放在200 mm×200 mm的测试铝板上,对试样进行4~18 GHz波段反射率测试。用网络矢量分析仪对数据进行统计,样品测试一次后水平旋转90°再测试一次,最后实验结果取两次测试的平均值。



(a) 网络矢量分析仪



(b) 弓形法测试装配图

图4 吸波性能测试仪

Fig. 4 Assembly drawing of absorbing performance tester

2 试验结果与分析

测试不同角度的角锥吸波材料在4~18 GHz的反射率的结果如图5所示,角锥角度在33°和43°时结果曲线变化趋势相同,曲线有明显的下凹,出现反射率最小值。

随角锥角度的增大,角锥角度增加到53°反射率在4~18 GHz波段结果相对平稳,极值相差不大。角锥角度增加到63°和73°时曲线出现明显上凸,出现反射率最大值。由测试结果曲线可知角锥吸波材料在频率范围4~18 GHz时,角锥角度在63°、53°、43°、33°反射率均达到了-10 dB以下,吸收率达到90%以上,具有良好的吸波效果。角锥角度在53°、43°、33°在4~18 GHz波段范围内反射率小于-15 dB占比95%以上,吸收率达到99%以上,达到了优异的吸波性能。整体观察曲线的变化,同时会发现曲线中整体变化趋势是角锥角度为33°和43°时是先减少(出现最小值)后增大,53°整体曲线比较稳定,63°和73°是先增大(出现最大值)后减小。角锥角度越小,角锥吸波材料的吸波性能越好。

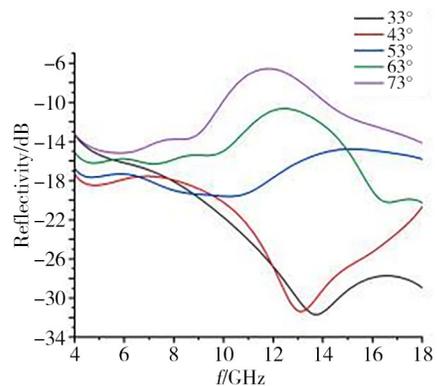


图5 不同角锥角度在4~18 GHz波段反射率

Fig. 5 Reflectance of different pyramid angles in the band of 4~18 GHz

计算不同角锥角度的不同波段反射率平均值,分别为C波段(频率范围在4~8 GHz)、X波段(频率范围在8~12.5 GHz)和Ku波段(频率范围在12.5~18.0 GHz),如表3所示。由结果可知在C波段反射率均值相差不大,角锥角度的变化对C波段的吸收率影响较小。在X波段反射率均值随角锥角度的减小而减小。在Ku波段反射率均值整体随角锥角度的减小而减小,吸波性能提高,但角锥角度之间差值变大。角锥角度对C波段的影响较小,对X和Ku波段的影响是随角锥角度的减小,反射率减小。整体变化趋势是随角锥角度的减小,吸波性能增加。

由结果曲线图6可知,相同角锥角度(53°)不同角

表3 各样品在不同波段的反射率均值

Tab. 3 Mean reflectance of each sample in different bands

Pyramid angle/(°)	C-band mean/dB	X-band mean/dB	Ku-band mean/dB
33	-16.07	-22.63	-29.22
43	-17.93	-21.77	-26.56
53	-17.75	-18.98	-15.31
63	-15.99	-14.05	-15.48
73	-14.54	-9.69	-11.19

锥高度在4~18 GHz波段99%以上波段反射率小于-10 dB,可到达吸收率90%以上;在4~18 GHz波段反射率小于-15 dB达到90%波段以上,可到达吸收率99%以上。角锥高度为12、14、16、18、20 mm时,在4~18 GHz波段均有优异的吸波性能。由图6和表4分析可得随角锥高度的增加,C波段整体反射率随频率的增大而减小。在X波段不同角锥高度整体曲线呈平稳,且不同角锥高度的结果曲线相近,由此可以得出在角锥角度为53°时,角锥高度对X波段影响较小。在Ku波段根据整体结果曲线可知,整体曲线变化趋势是随角锥高度的增加吸波性能减小。

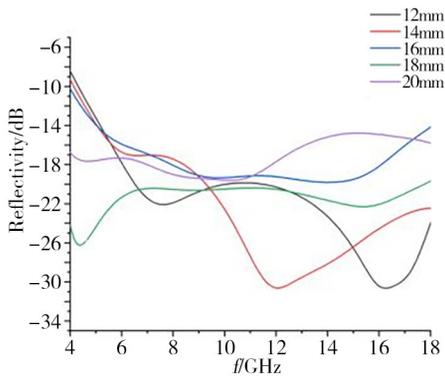


图6 不同角锥高度在4~18 GHz波段反射率

Fig. 6 Reflectance of different pyramid heights in the band of 4~18 GHz

表4 各样品在不同波段的反射率均值

Tab. 4 Mean reflectance of each sample with different bands

Pyramid height/ mm	C-band mean/ dB	X-band mean/ dB	Ku-band mean/ dB
12	-16.98	-20.40	-26.13
14	-15.28	-24.16	-25.98
16	-15.25	-19.11	-18.21
18	-22.35	-20.51	-21.41
20	-17.75	-18.98	-15.31

当吸波材料厚度与入射电磁波的波长比值为某个定值时可达到干涉相消,入射电磁波的波长连续变化,因为角锥结构的梯度渐变电磁波进入吸波材料的厚度也不断变化,所以可以达到在较宽的波段达到干涉相消,达到吸波的效果。角锥角度越小,其渐变梯度越大,在较宽的波段范围达到良好吸波效果。电磁波与吸波材料不能完全达到阻抗匹配,所以不能完全进入吸波材料,会形成部分内反射,当反射次数越多,进入和损耗的电磁波也就越多。角锥角度越小其反射次数也就越多,反射次数越多吸波效果就越好^[32]。

由于角锥结构表面浸涂是人工操作,不能做到表面浸涂得绝对均匀,会存在一定的误差。在正置自然晾干过程中也会存在炭黑从角锥向下流动,使得根部的炭黑厚度增大,进一步增大梯度渐变,更有利于吸收电磁波。

3 结论

(1)在4~18 GHz波段范围内,两组样品有90%以上波段能够达到吸收率99%以上。3D打印角锥结构具有优异的吸波性能。

(2)在角锥角度33°~73°之间,角锥角度越小,角锥吸波材料的吸波性能整体在4~18 GHz波段越好。角锥角度对分波段的影响是C波段影响较小,对X和Ku波段影响较大。

(3)角锥高度对X波段影响较小,对C波段和Ku波段的影响呈相反的效果。在C波段角锥高度越高吸波性能越好,在Ku波段角锥高度越低吸波性能越好。

参考文献

- [1] 张衡. 宽频带微波隐身材料的吸波性能研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
ZHANG H. Study on Absorptive Performance of Broadband Microwave Stealth Materials [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [2] 张鹏飞. 隐身技术中的雷达截面预估与控制[D]. 西安:西安电子科技大学,2008.
ZHANG P F. Radar Cross Section Prediction and Control in Stealth Technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [3] 张琤. 基于超材料的隐身技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
ZHANG Z. Research on Metamaterial Stealth Technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [4] 白天,王秀兰. 隐身材料的现状及发展趋势[J]. 宇航材料工艺,2015,45(06):8-10,16.
BAI T, WANG X L. Status and development trend of stealth materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2015, 45(06): 8-10, 16.
- [5] 周明理. 雷达隐身技术在水面舰艇中的应用[J]. 无线互联科技,2019,16(03):1-2.
ZHOU M L. Application of radar stealth technology in surface ships [J]. Wireless Internet Technology, 2019, 16(03): 1-2.
- [6] 师俊朋,胡国平,王金龙,等. 雷达隐身技术分析及其进展[J]. 飞航导弹,2014(02):81-84.
SHI J P, HU G P, WANG J L, et al. Analysis and progress of radar stealth technology [J]. Journal of Airborne Missiles, 2014 (02):81-84.
- [7] 曾强,王荣超,张小兰,等. 电磁吸波材料研究进展[J]. 江西化工,2021,37(06):100-103.
ZENG Q, WANG R C, ZHANG X L, et al. Research progress of electromagnetic absorbing materials [J]. Jiangxi Chemical Industry, 2021, 37(06): 100-103.
- [8] 来侃,陈美玉,孙润军,等. 吸波材料在雷达隐身领域的应用[J]. 西安工程大学学报,2015,29(06):655-665.
LAI K, CHEN M Y, SUN R J, et al. Application of absorbing material in radar stealth field [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2015, 29(06): 655-665.
- [9] 穆武第,许永平,盛德军. 尖锥型结构宽频吸波材料设计[J]. 材料导报,2021,35(S2):115-117.
MU W D, XU Y P, SHENG D J. Design of wide-band 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2024年 第5期

absorbing materials with taper structure [J]. *Materials Review*, 2021, 35(S2): 115–117.

[10] DU Y C. Advances in carbon-based microwave absorbing materials[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1359.

[11] 陈敏. 柔性吸波材料的结构与性能研究[D]. 西安:西安工程大学, 2021.

CHEN M. Study on the Structure and Properties of Flexible Absorbing Materials [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2021.

[12] 赵灵智, 胡社军, 李伟善, 等. 吸波材料的吸波原理及其研究进展[J]. *现代防御技术*, 2007(01): 27–31, 48.

ZHAO L Z, HU S J, LI W S, et al. Absorbing mechanism and progress of wave-absorbing materials [J]. *Modern Defense Technology*, 2007(01): 27–31, 48.

[13] G S BAE, C Y KIM. Broadband multilayer radar absorbing coating for RCS reduction [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(8): 1907–1910.

[14] 班国东, 刘朝辉, 叶圣天, 等. 新型涂覆型雷达吸波材料的研究进展[J]. *表面技术*, 2016, 45(06): 140–146.

BAN G D, LIU Z H, YE S T, et al. Research progress of new coated radar absorbing materials [J]. *Surface Technology*, 2016, 45(06): 140–146.

[15] 刘国权, 罗文, 赵莉, 等. 新型碳纳米复合吸波材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2021, 49(09): 1–4, 10.

LIU G Q, LUO W, ZHAO L, et al. Research progress of new carbon nanocomposite absorbing materials [J]. *New Chemical Materials*, 2021, 49(09): 1–4, 10.

[16] 刘十一, 卢安平, 李渊. 尖劈吸波体的研究和微波暗室的模拟[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(14): 122–133.

LIU S Y, LU A P, LI Y. Research on wedge absorber and simulation of microwave anechoic chamber [J]. *Mathematics in Practice and Understanding*, 2012, 42(14): 122–133.

[17] GUO S C. Research on design of electromagnetic compatibility shielded anechoic chamber [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 474(7): 072062.

[18] SIMMONS A J, EMERSON W H. An anechoic chamber marking use of a new broadband material [C]//Conv. Rec. IRE 1953 Nat. Conv. : Part 2—Antennas Com-mun. : 34–41.

[19] RONGEN E V, SAUNDERS R D, DEVENTER I E T V, et al. Static fields: Biological effects and mechanisms relevant to exposure limits [J]. *Health. Phys.*, 2007, 92(6): 584–590.

[20] 李彬, 李仁林, 冀志江, 等. 角锥结构炭黑/水泥基复合材料的吸波性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(06): 1–5, 18.

LI B, LI R L, JI Z J, et al. Study on absorbing properties of carbon black/cement matrix composites with angular cone-structure [J]. *New Building Materials*, 2020, 47(06): 1–5, 18.

[21] 党柯. 多孔碳纤维的吸波性能及吸波机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.

DANG K. Study on Absorbing Properties and Absorbing Mechanism of Porous Carbon Fiber [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.

[22] 吴昊哲. P波段雷达吸波材料反射率弓形法测试系统

技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

WU H Z. Research on Reflectivity Bow Test System of P-band Radar Absorbing Material [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

[23] 陈培鸿, 刘志挺, 方淡俏, 等. 3D打印在药物递送领域的应用进展[J]. *中国药房*, 2021, 32(13): 1657–1664.

CHEN P H, LIU Z T, FANG D K, et al. Application progress of 3D printing in drug delivery [J]. *Chinese Pharmacy*, 2021, 32(13): 1657–1664.

[24] 王超, 陈继飞, 冯韬, 等. 3D打印技术发展及其耗材应用进展[J]. *中国铸造装备与技术*, 2021, 56(06): 38–44.

WANG C, CHEN J F, FENG T, et al. Development of 3D printing technology and its consumable application [J]. *China Foundry Equipment and Technology*, 2021, 56(06): 38–44.

[25] DUAN Y B, LIANG Q X, YANG Z, et al. A wide-angle broadband electromagnetic absorbing metastructure using 3D printing technology [J]. *Materials & Design*, 2021, 208: 109900.

[26] 王新艳, 沈芳. 3D打印技术综述[J]. *江西化工*, 2019(03): 242–243.

WANG X Y, SHEN F. Overview of 3D printing technology [J]. *Jiangxi Chemical Industry*, 2019(03): 242–243.

[27] 吴赛, 张有为, 陈猛, 等. 3D打印微波吸收材料研究进展[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(06): 13–22.

WU S, ZHANG Y W, CHEN M, et al. Research progress of 3D printing microwave absorption materials [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(06): 13–22.

[28] 杨钦杰, 李佳汶, 李明, 等. 熔融沉积3D打印设备研究进展[J]. *中国塑料*, 2022, 36(02): 157–171.

YANG Q J, LI J W, LI M, et al. Research progress of melting deposition 3D printing equipment [J]. *China Plastics*, 2022, 36(02): 157–171.

[29] 唐通鸣, 张政, 邓佳文, 等. 基于FDM的3D打印技术研究现状与发展趋势[J]. *化工新型材料*, 2015, 43(06): 228–230, 234.

TANG T M, ZHANG Z, DENG J W, et al. Research status and development trend of 3D printing technology based on FDM [J]. *New Chemical Materials*, 2015, 43(06): 228–230, 234.

[30] B N TURNER, S A GOLD. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2015, 21(3): 192–204.

[31] 郑小军. FDM 3D打印制件性能的影响因素分析与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.

ZHENG X J. Analysis and Experimental Study on Influencing Factors of FDM 3D Printing Performance [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2019.

[32] 吕述平, 刘顺华. 微波暗室用角锥吸波材料外形的设计和分析[J]. *材料科学与工艺*, 2007(04): 572–574, 578.

LYU S P, LIU S H. Design and analysis of angular cone absorbing material for microwave anechoic chamber [J]. *Materials Science and Technology*, 2007(04): 572–574, 578.