

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230263

## 金属材料挤出成型生坯试件的静力学性能

姜世杰<sup>1,2</sup>, 李曙光<sup>1</sup>, 许子沼<sup>1</sup>, 王菲<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 辽宁省机械装备动力学可靠性重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对金属材料挤出成型(metal material extrusion, MME)增材制品静力学性能研究不足的问题, 首先制备了3种不同配比的17-4PH不锈钢粉末/聚合物复合丝材; 然后利用普通材料挤出成型设备完成了静力学性能实验生坯试件的准备工作, 以确定自制丝材的可成型性; 最后通过拉伸、压缩及弯曲性能实验, 分析其静力学性能并探究不同金属粉末填充率的影响. 结果发现: 自制的复合丝材能够成型质量稳定的生坯制品; 当17-4PH不锈钢粉末填充率由40%提高至50%时, 试件的拉伸强度降低约7.8%, 压缩强度降低约39.2%, 弯曲强度降低约30%.

**关键词:** 金属材料挤出成型; 17-4PH不锈钢粉末; 聚合物复合丝材; 静力学性能

中图分类号: TH 164

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)09-0095-07

## Static Mechanical Properties of Green Compact Specimens Fabricated by Metal Material Extrusion

JIANG Shi-jie<sup>1,2</sup>, LI Shu-guang<sup>1</sup>, XU Zi-zhao<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Dynamics Reliability of Mechanical Equipment, Liaoning Province, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Shu-guang, E-mail: lishuguang334@163.com)

**Abstract:** There is a lack of systematic research on the static mechanical properties of products fabricated via metal material extrusion (MME) additive manufacturing. Three types of 17-4PH stainless steel powder/polymer composite filament were firstly studied. Then, the formability of the filament was verified by forming green compact specimens using ordinary material extrusion manufacturing equipment through the preparation work for static mechanical properties. The tensile, compressive and flexural properties were tested to analyze their static mechanical properties and explore the influence of different metal powder filling content. The results show that the self-made composite filament can produce green compact products of good quality. When the filling content of 17-4PH stainless steel powder increases from 40% to 50%, the tensile strength of the specimens is decreased by about 7.8%, compressive strength is decreased by 39.2% and flexural strength is reduced by about 30%.

**Key words:** metal material extrusion; 17-4PH stainless steel powder; polymer composite filament; static mechanical property

金属材料挤出成型(metal material extrusion, MME)技术,以金属粉末/聚合物复合丝材为原料,通过生坯成型-脱脂-烧结工艺完成纯金属制品的制造,是一项材料挤出式的增材制造技术<sup>[1-2]</sup>.该技术理论上能成型任意复杂几何形状的结构件,其工艺过程为:首先将金属粉末和聚合

物黏结剂在略低于黏结剂熔融温度下混合均匀;冷却后,将物料破碎成颗粒,再经挤出机获得丝材;然后通过传统的熔丝成型(fused filament fabrication, FFF)增材制造方法完成生坯实体的成型;通过脱脂工艺(热脱脂、溶剂脱脂或催化脱脂等)去除生坯中的聚合物黏结剂主要成分,形

收稿日期: 2023-09-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2303019).

作者简介: 姜世杰(1985—),男,辽宁营口人,东北大学副教授,博士.

成脱脂体;最后通过高温烧结工艺消除脱脂体中金属粉末颗粒之间的孔隙,逐渐致密化得到最终所需的纯金属成品<sup>[3-5]</sup>.相较于其他金属增材制造技术,如选择性激光熔化(SLM)、选择性激光烧结(SLS)、电子束熔化(EBM)等,MME技术具有设备简单、成型过程绿色环保、原材料利用率高、成本低廉等优势,具有广阔的发展应用前景<sup>[6-10]</sup>.

近年来,国内外学者对MME生坯试件的静力学性能进行了一系列研究.Godec等<sup>[11]</sup>研究了17-4PH不锈钢生坯试件的拉伸性能,并利用中心复合设计法优化了层厚、打印温度等工艺参数,获得了拉伸强度为9.95 MPa、拉伸模量为275.14 MPa的生坯试件.Masood等<sup>[12]</sup>将铁和尼龙混合成丝并对其拉伸性能进行分析,制备出拉伸强度为2.76 MPa的生坯试件,并发现其拉伸性能随着金属粉末粒径的减小而降低.Ren等<sup>[13]</sup>利用石蜡-低密度聚乙烯-硬脂酸黏结剂系统自制了铜金属复合丝材,并制备了MME生坯试件.利用正交拉伸实验对光栅角、层厚、填充率等工艺参数进行了优化,生坯试件的最大拉伸强度可达6.73 MPa.冯建等<sup>[14]</sup>利用不同金属粉末填充率的复合丝材制备了生坯试件,并完成了正交拉伸实验研究.结果表明,随着金属粉末填充率的提高,生坯试件的弹性模量显著增大,但拉伸强度有所降低.胡祥芬等<sup>[15]</sup>针对MME碳化硅生坯制品的弯曲性能进行了研究,发现其界面结合紧密、无明显间隙,生坯的弯曲强度达到3.9 MPa.张力等<sup>[16]</sup>以聚乙烯-乙烯-乙酸乙烯酯共聚物-石蜡-硬脂酸作为黏结剂体系,研究了氧化铝生坯试件的弯曲性能,并通过优化填充模式获得密度为3.3 g/cm<sup>3</sup>、弯曲强度达15.5 MPa的生坯试件.Suwanprecha等<sup>[17]</sup>对17-4PH不锈钢生坯试件的弯曲性能进行了分析,通过改变成型方向,获得了弯曲强度为13 MPa、弯曲应变为1.5%的最优生坯试件.

学者对MME生坯试件的研究主要集中在通过优化工艺参数以获得最大静力学性能方面,且对静力学性能的研究主要集中在拉伸性能方面,而在金属粉末填充率影响方面的研究却鲜有涉及.为解决此问题,本文首先创新性地研制了40%、45%及50% 3种17-4PH不锈钢粉末体积填充率的丝材,并完成了丝材属性的分析;然后以复合丝材为原材料制备了静力学实验试件,以确定丝材的成型可行性;最后,利用材料试验机分别对拉伸、压缩及弯曲试件进行了实验研究,并分析了17-4PH不锈钢粉末填充率的影响规律.本文

的研究为后续开展材料-工艺-性能之间相互关系的研究提供了基础.

## 1 实验材料及方法

### 1.1 材料选择

复合丝材由17-4PH不锈钢粉末(河北华钻合金焊接材料有限公司提供)和聚合物黏结剂系统组成.17-4PH粉末粒度分布在10~50 μm之间,最大体积百分比出现在30.663 μm处,具体如图1及表1所示.聚合物黏结剂系统包括高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)、乙烯-乙酸乙烯共聚物(ethylene vinyl acetate, EVA)及聚乳酸(poly(lactic acid), PLA).其中,PLA为主干材料,具有高熔点、高弹性模量以及低热膨胀系数等特点,用以保持成型和脱脂阶段试件的形状;EVA和HDPE为辅助材料,用于保证丝材的均匀性、柔韧性和组分相容性.

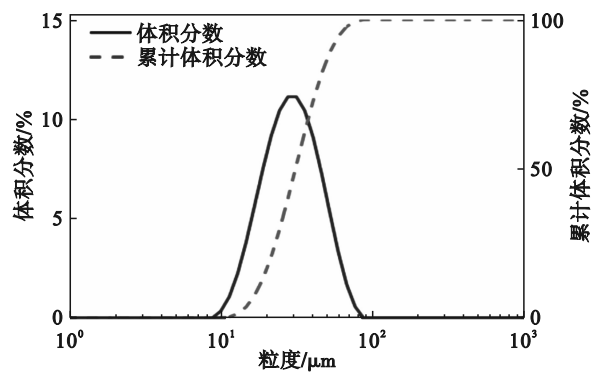


图1 17-4PH不锈钢粉末粒度分布

Fig. 1 Distribution of 17-4PH stainless steel powder particle size

表1 17-4PH不锈钢粉末颗粒属性

Table 1 Properties of 17-4PH stainless steel powder particles

$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$
17.417	30.663	52.869

注: $D_{10}$ 、 $D_{50}$ 和 $D_{90}$ 表示粒径小于17.417、30.663及52.869 μm的17-4PH不锈钢粉末颗粒占比分别为10%、50%及90%.

对金属粉末粒径进行分析,粒径分布斜率参数( $S_w$ )通过式(1)计算所得<sup>[18]</sup>

$$S_w = \frac{2.56}{\lg\left(\frac{D_{90}}{D_{10}}\right)} \quad (1)$$

对数正态累积分布的斜率参数 $S_w$ 值越大,表示金属粉末粒径分布范围越窄,一般 $2 < S_w < 7$ .较

窄的粒径分布有利于成型高密度的试件,但是过窄的粒径分布则会导致原料黏度过高,不利于挤出成型.本研究中的 $S_w$ 值为 5.3,表明该不锈钢粉末具有良好的适用性.

### 1.2 丝材制备

均匀混合金属粉末及黏结剂组分等物料是制备高填充率金属粉末/聚合物复合丝材的必要保证,直接影响后续生坯制品的成型质量.本文利用不锈钢捏合机(1L-真空型)混合 17-4PH 不锈钢粉末和聚合物黏结剂组分,两个反向旋转的搅拌桨转速分别为 48 和 26 r/min,温度设定为 200 °C,混合时长达 3 h 以确保复合材料的充分均匀混合;之后,将混合物料取出,静置冷却至室温,置入破碎机(BP-180)中破碎成颗粒物料.

将颗粒物料置入挤出机(Well zoom)中,其螺杆挤出转速为 30 r/min,混合段和挤出段温度分别设定为 165 和 170 °C;挤出的丝材经过水冷机冷却,再通过在线辅助直径测量装置逐步调整挤出和牵引速度,保证复合丝材的成型精度( $1.75 \pm 0.02$ ) mm,同时利用卷丝机完成丝材的收卷和储存.

### 1.3 试件成型

本文以 3 种不同体积填充率(40%, 45% 及 50%)的 17-4PH 不锈钢粉末复合丝材为原材料,利用 FLSUN QQ 型快速成型设备制备了 45 个 MME 生坯试件,其中拉伸、压缩及弯曲性能实验试件各 15 个,即每种自制复合丝材成型的试件各 5 个.

图 2 为 ISO-527-4—1997 标准拉伸试件示意图,其长度为 158 mm,宽度为 10 mm,厚度为 4 mm. 40%, 45% 及 50% 填充率丝材成型的试件分别表示为  $T_{40_i}$ ,  $T_{45_i}$  和  $T_{50_i}$ ,  $i=1\sim 5$ .

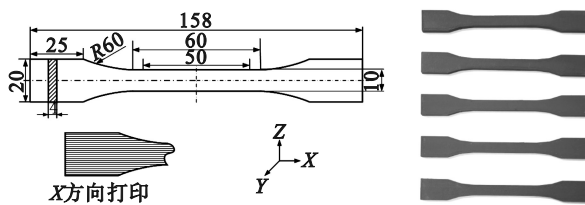


图 2 拉伸试件(单位:mm)

Fig. 2 Tensile specimen(unit:mm)

相应地,根据 ASTM-695 标准制备的 15 个压缩试件中,40%, 45% 及 50% 不锈钢粉末填充率的丝材成型试件各 5 个,分别表示为  $C_{40_i}$ ,  $C_{45_i}$  和  $C_{50_i}$ ,  $i=1\sim 5$ ,试件直径为 12.7 mm,高度为 25.4 mm,具体细节如图 3 所示.

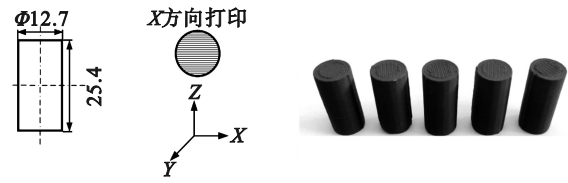


图 3 压缩试件(单位:mm)

Fig. 3 Compressive specimen(unit:mm)

类似地,根据 ISO 178:2001 标准制备了 15 个弯曲试件,其中 40%, 45% 及 50% 不锈钢粉末填充率的丝材成型试件各 5 个,分别表示为  $F_{40_i}$ ,  $F_{45_i}$  和  $F_{50_i}$ ,  $i=1\sim 5$ ,尺寸如图 4 所示.

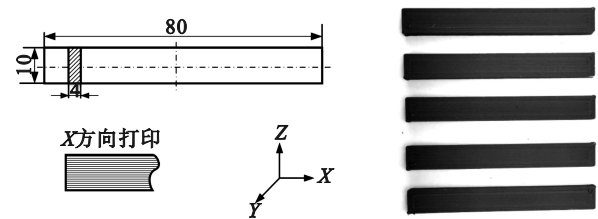


图 4 弯曲试件(单位:mm)

Fig. 4 Flexural specimen(unit:mm)

需要注意的是,除复合丝材配比不同外,其他过程参数的设置均相同,如成型温度、成型速度、层厚等.具体的过程参数设置如表 2 所示.

表 2 过程参数设置  
Table 2 Processing parameter setting

过程参数	设置
填充比例/%	100
填充方式	直线填充
成型速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	10
平台温度/°C	90
喷嘴直径/mm	0.6
成型温度/°C	240
层厚/mm	0.25

### 1.4 拉伸试验

利用材料试验机(Shimadzu EHF-EV101K1-040-1A,如图 5 所示)对不同类别自制复合丝材成型的试件( $T_{40_i}$ ,  $T_{45_i}$  和  $T_{50_i}$ ,  $i=1\sim 5$ )分别进行拉伸实验研究,该设备的测量精度为  $\pm 0.5\%$ ,最大负载为 200 kN.实验过程中设置试件两端的夹持力为 2 MPa,加载速度为 5 mm/min,直至试件拉伸失效.

### 1.5 压缩试验

利用材料试验机(Shimadzu EHF-EV101K1-040-1A)对不同类别自制复合丝材成型的试件( $C_{40_i}$ ,  $C_{45_i}$  和  $C_{50_i}$ ,  $i=1\sim 5$ )进行压缩实验,如图 5 所

示.实验过程中设置加载速度为 1 mm/min,直至试件压溃失效.

### 1.6 弯曲试验

利用材料试验机(SHIMADZU EHF-EV101K 1-040-1A)对不同类别自制复合丝材成型的试件( $F_{40_i}$ 、 $F_{45_i}$ 和 $F_{50_i}$ , $i=1\sim 5$ )进行弯曲实验,如图 5 所示.实验过程中设置加载速度为 2 mm/min,直至试件断裂失效.



图 5 弯曲实验过程

Fig. 5 Flexural test process

## 2 结果与讨论

### 2.1 原材料确定

图 6a 为收卷状态下自制的 3 种不同配比的复合丝材,可见丝材尺寸均匀、柔韧性好,可以进行批量制备及储存.图 6b 为对应丝材的横截面形貌,由图可知 17-4PH 不锈钢粉末与聚合物黏结剂混合均匀,无团聚或不均匀现象等缺陷,降低了因复合丝材缺陷导致熔融材料流动性差而引起成型困难甚至无法成型的可能性.

### 2.2 拉伸试验

图 7 是拉伸实验后试件的状态图.由断裂结果可知,所有试件均从中间部分断裂,表明实验结果准确可靠.

为减小误差影响,对每种试件的数据进行了

平均处理,获得的应力-应变曲线如图 8 所示.可见,丝材的金属粉末填充率对生坯试件的拉伸性能有显著影响,填充率越低,试件的拉伸性能越好.这是因为在拉伸过程中,破坏的主要是黏结剂各组分分子链之间的作用力,当金属粉末填充率逐渐增大时,黏结剂组分占比减少,分子链减少,裂纹在试件内部进一步扩展时受到的阻力也减小,使得试件更容易被破坏;另一方面,金属粉末在生坯试件中以颗粒状态均匀分布,随着填充率的增加,粉末颗粒之间更易产生团聚缺陷,进而导致试件的性能降低.因此,40%体积分数的丝材成型试件中黏结剂更多,相较于另外两种丝材成型的试件表现出更好的拉伸强度.例如,当填充率由 40% 增加到 50% 时,试件的拉伸强度由 9.0 MPa 降低至 8.3 MPa,降幅约 7.8%;拉伸模量由 530.3 MPa 增大至 751.1 MPa,增幅约 41.6%;应变呈现逐渐减小的趋势(由 4.01% 降至 2.16%,降幅达 46.1%),具体数值如表 3 所示.结果表明,丝材中金属粉末填充率越高,MME 生坯试件的韧性越差,拉伸性能也越差.

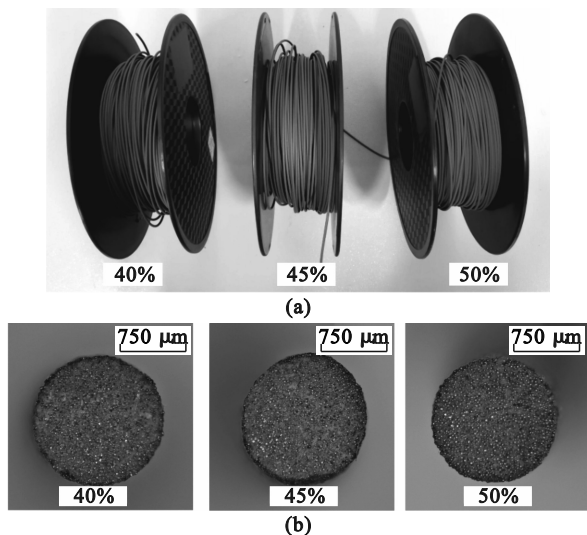


图 6 自制的不同材料配比的复合丝材

Fig. 6 Self-made composite filament with different filling contents

(a)—收卷状态的复合丝材;(b)—复合丝材的横截面形貌.

表 3 不同自制复合丝材成型生坯试件的拉伸实验结果

试件	平均最大拉伸力/N	平均拉伸强度/MPa	平均拉伸模量/MPa	平均断裂应变/%
$T_{40}$	359.5	9.0	530.3	4.01
$T_{45}$	351.9	8.8	615.2	3.30
$T_{50}$	332.8	8.3	751.1	2.16
FFF PLA 试件 <sup>[19-21]</sup>	—	30~70	1 890~3 900	2~5

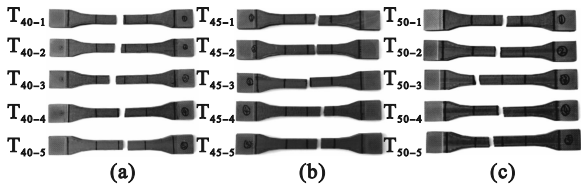


图 7 拉伸实验后的不同 17-4PH 不锈钢粉末填充率生坯试件

Fig. 7 Green compact specimens with different 17-4PH stainless steel powder filling rates after tensile test  
(a)—40%; (b)—45%; (c)—50%.

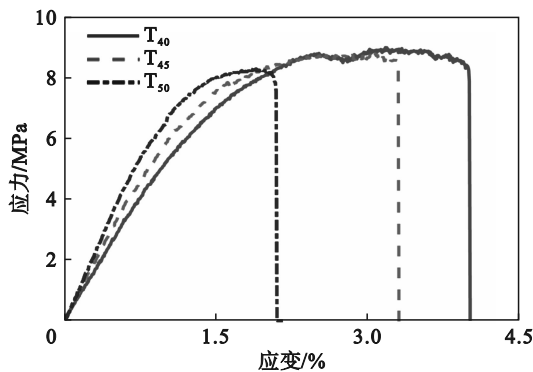


图 8 拉伸实验应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of tensile test

此外,与 FFF PLA 试件的拉伸性能(30~70 MPa)相比,上述生坯试件的拉伸强度明显不足(8.3~9.0 MPa),这是因为本文所用复合丝材中 17-4PH 不锈钢粉末体积占比较高,在生坯试件成型过程中均匀分布其中.对于聚合物黏结剂组分,这些均匀分布的金属粉末颗粒相当于杂质,降低了试件内部连续相的面积,进而导致其性能变差.

### 2.3 压缩试验

压缩试件均在压缩力作用下达到初始设置的变形量,实验结果准确、可靠,试件变化过程如图 9 所示.可见,生坯试件在压缩过程中依次经历了弹性变形、塑性变形及压实化 3 个阶段.

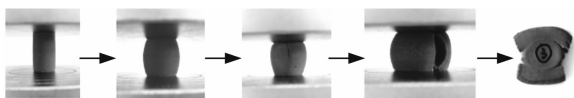


图 9 生坯试件压缩变形过程

Fig. 9 Compression and deformation process of green compact specimens

图 10 为压缩实验后不同填充率的 17-4PH 不锈钢粉末试件的形态.可见,随着金属粉末填充率的提高,试件被压溃的程度越来越严重,即生坯试件的柔韧性和耐环境应力开裂性能随金属

粉末填充率的增加而降低.

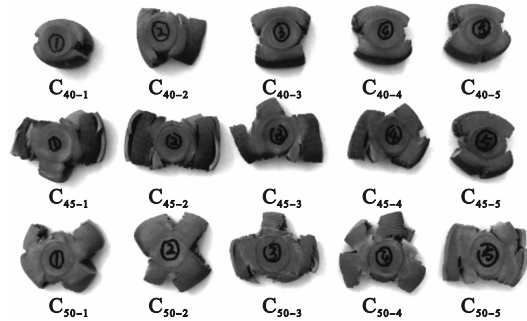


图 10 压缩实验后的生坯试件

Fig. 10 Green compact specimens after compression test

为减小误差影响,对压缩实验后每种试件的数据进行平均处理,相应的应力-应变关系曲线如图 11 所示.通过分析可知,在压缩过程的 3 个阶段中,弹性变形过程由原材料本身属性所决定,随着 17-4PH 不锈钢粉末填充率的增加,试件的杨氏模量逐渐增大.这是因为复合材料的杨氏模量与材料中各组分的杨氏模量及其在复合材料中的占比有关<sup>[22]</sup>.17-4PH 不锈钢粉末具有较大的杨氏模量,随着填充率的增加,生坯试件的杨氏模量也随之增大;在塑性变形初始阶段,应变显著增大,而应力变化不大,即试件通过产生形变将压缩能量吸收;当压缩载荷的进一步增大,形变达到临界值时,试件开始产生裂纹;随着裂纹的扩展,裂纹区域逐步失去抵抗压缩的能力,由于此时试件抵抗变形的区域逐渐减小,其整体承载能力下降;当试件在压缩载荷进一步作用下被完全压扁后,即进入压实化阶段,在此阶段中,应力急剧增大,但应变的增量有限.对比分析不同试件在相同压缩量时可知,其压缩性能随金属粉末填充率的增加而降低.例如,当压缩量为 65% 时,随着 17-4PH 不锈钢粉末填充率由 40% 增至 50%,试件的压缩强度由 54.1 MPa 降至 32.9 MPa,降幅 39.2%;压缩模量则由 533.8 MPa 增至 725.4 MPa,增幅 35.9%,具体数据如表 4 所示.

此外,由表 4 可知,试件的压缩强度介于 32.9~54.1 MPa 之间,是其拉伸强度的 4~6 倍.原因可以解释为:生坯试件的成型过程是一种逐层累加的制造工艺,层与层之间紧密黏结在一起,在进行压缩实验时,其压缩方向与成型时的逐层堆积方向一致,层与层之间在压缩力的作用下被逐渐压实;而拉伸测试方向与逐层堆积方向垂

直,在拉伸过程中,层与层之间被逐渐拉开,黏结力降低,试件抵抗变形的能力变差,从而使压缩强度与拉伸强度之间产生较大差距.

表 4 不同自制复合丝材成型生坯试件的压缩实验结果  
Table 4 Compression test results of green compact specimens fabricated from different self-made composite filaments

试件	平均最大压缩力/N	平均压缩强度/MPa	平均压缩模量/MPa
C <sub>40</sub>	6 853.3	54.1	533.8
C <sub>45</sub>	5 421.1	42.8	628.7
C <sub>50</sub>	4 171.6	32.9	725.4

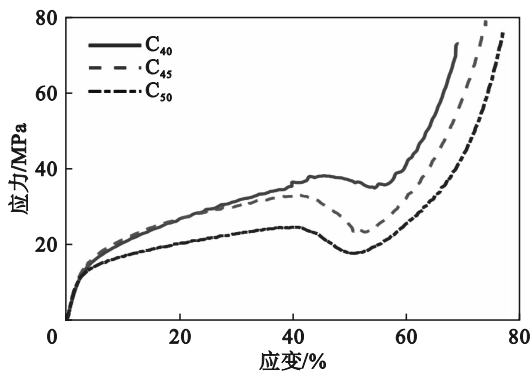


图 11 压缩实验应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of compression test

### 2.4 弯曲试验

弯曲实验后不同 17-4PH 不锈钢粉末填充率的弯曲试件及其裂纹微观形貌如图 12 和图 13 所示.生坯试件在弯曲过程中受载荷作用逐渐产生变形,随着载荷增大,生坯试件中性层以下部分逐渐超过其承载能力,进而产生裂纹直至试件完全断裂.由断裂结果可知,所有试件均从中间部位断裂,实验结果准确可靠.

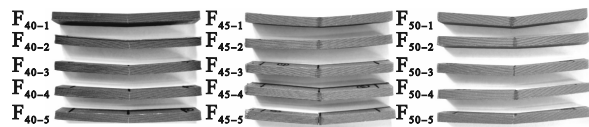


图 12 弯曲实验后的生坯试件

Fig. 12 Green compact specimens after flexural test

图 14 为不同 17-4PH 不锈钢粉末填充率生坯试件的弯曲应力-应变关系曲线.可见,与拉伸及压缩性能相类似,随着金属粉末填充率的提高,生坯试件的弯曲性能逐渐降低.当填充率由 40% 增至 50% 时,生坯试件的弯曲强度由 17.6 MPa 降至 12.3 MPa,降幅约 30%;最大应变由 2.81% 降至 1.48%,降幅达 47.3%.进一步说明随着金属粉末填充率的提高,试件韧性逐渐变差,抵抗变形能

力逐渐降低,具体数值如表 5 所示.

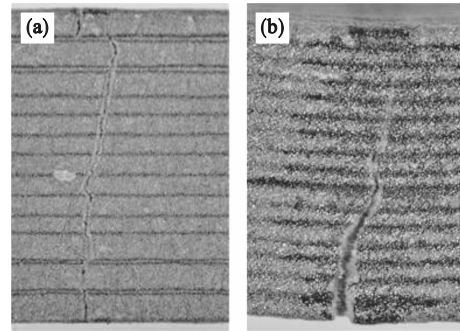


图 13 弯曲实验后生坯试件裂纹微观形貌

Fig. 13 Crack microstructure of green compact specimens after flexural test

(a)—裂纹正视图; (b)—裂纹俯视图.

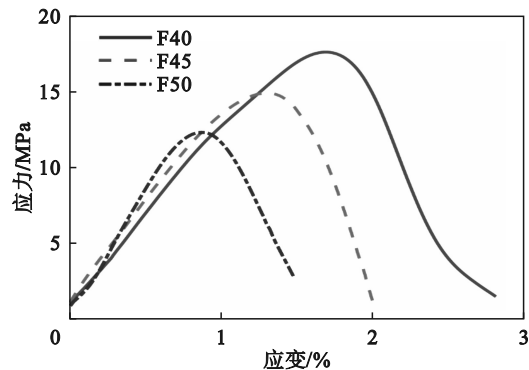


图 14 弯曲实验应力-应变曲线

Fig. 14 Stress-strain curves of flexural test

表 5 不同自制复合丝材成型生坯试件的弯曲实验结果  
Table 5 Flexural test results of green compact specimens fabricated from different self-made composite filaments

试件	最大弯曲力/N	平均弯曲强度/MPa	平均弯曲模量/MPa	平均断裂应变/%
F <sub>40</sub>	29.4	17.6	1092.6	2.81
F <sub>45</sub>	24.9	14.9	1366.7	2.00
F <sub>50</sub>	20.6	12.3	1582.9	1.48

## 3 结 论

1) 自制的 17-4PH 不锈钢粉末/聚合物复合丝材直径均匀、柔韧性好,可进行批量生产并缠绕储存,且所制备的复合丝材均能成型质量稳定的 MME 生坯试件.

2) MME 生坯试件的拉伸性能随着复合丝材中金属粉末填充率的提高而逐渐降低.当填充率由 40% 增至 50% 时,试件的拉伸强度由 9.0 MPa 降低至 8.3 MPa,降幅约为 7.8%.

3) 随着金属粉末填充率的提高,生坯试件的柔韧性和耐环境应力开裂性逐渐降低,压缩性能逐渐变差.由于生坯试件采用逐层叠加的成型,其压缩强度明显优于拉伸强度(达4~6倍).

4) 当金属粉末填充率提高时(由40%增至50%),生坯试件的弯曲性能逐渐降低,弯曲强度由17.6 MPa降至12.3 MPa,降幅达30%.

5) 研究成果为后续MME烧结试件的成型以及不同材料配比丝材对其力学性能影响的研究提供了基础.

#### 参考文献:

- [1] Thompson Y, Gonzalez-Gutierrez J, Kukla C, et al. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100861.
- [2] Suwanpreecha C, Manonukul A. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding[J]. *Metals*, 2022, 12(3): 429.
- [3] Gloeckle C, Konkol T, Jacobs O, et al. Processing of highly filled polymer-metal feedstocks for fused filament fabrication and the production of metallic implants[J]. *Materials*, 2020, 13(19): 4413.
- [4] Shaikh M Q, Nath S D, Akilan A A, et al. Investigation of patient-specific maxillofacial implant prototype development by metal fused filament fabrication (MF<sup>3</sup>) of Ti-6Al-4V[J]. *Dentistry Journal*, 2021, 9(10): 109.
- [5] Sargini M I M, Masood S H, Palanisamy S, et al. Additive manufacturing of an automotive brake pedal by metal fused deposition modelling[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 45: 4601-4605.
- [6] 果春焕, 严家印, 王泽昌, 等. 金属激光熔丝增材制造工艺的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(16): 5-10. (Guo Chun-huan, Yan Jia-yin, Wang Ze-chang, et al. Research progress on metal laser fuse additive manufacturing process[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(16): 5-10.)
- [7] Zhao C, Parab N D, Li X X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. *Science*, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [8] 张云舒, 吴斌涛, 赵响, 等. 电弧熔丝增材制造传热传质数值模拟研究现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(8): 65-80. (Zhang Yun-shu, Wu Bin-tao, Zhao Yun, et al. Research progress in the numerical simulation of heat and mass transfer during wire arc additive manufacturing[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(8): 65-80.)
- [9] 刘伟, 李素丽, 寇丹阳, 等. 不同扫描速度下金属熔丝增材制造应力应变场分析[J]. *焊接技术*, 2023, 52(7): 1-5. (Liu Wei, Li Su-li, Kou Dan-yang, et al. Analysis of stress-strain field in metal melt additive manufacturing by different scanning speeds[J]. *Welding Technology*, 2023, 52(7): 1-5.)
- [10] 赵沧, 杨源祺, 师博, 等. 金属激光增材制造微观结构和缺陷原位实时监测[J]. *科学通报*, 2022, 67(25): 3036-3053. (Zhao Cang, Yang Yuan-qi, Shi Bo, et al. Operando monitoring microstructures and defects in laser fusion additive manufacturing of metals[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(25): 3036-3053.)
- [11] Godec D, Cano S, Holzer C, et al. Optimization of the 3D printing parameters for tensile properties of specimens produced by fused filament fabrication of 17-4PH stainless steel[J]. *Materials*, 2020, 13(3): 774.
- [12] Masood S H, Song W Q. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling[J]. *Materials & Design*, 2004, 25(7): 587-594.
- [13] Ren L Q, Zhou X L, Song Z Y, et al. Process parameter optimization of extrusion-based 3D metal printing utilizing PW-LDPE-SA binder system[J]. *Materials*, 2017, 10(3): 305.
- [14] 冯建, 张静, 李邦悻, 等. FDM用93W-Ni-Cu/ABS复合丝材的制备及表征[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2019, 47(5): 19-24, 28. (Feng Jian, Zhang Jing, Li Bang-yi, et al. Preparation and characterization of 93W-Ni-Cu/ABS composite filaments for FDM process[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2019, 47(5): 19-24, 28.)
- [15] 胡祥芬, 牛富荣, 周哲, 等. 熔融沉积(FDM)工艺参数对SiC陶瓷微观结构和力学性能影响[J]. *硬质合金*, 2021, 38(3): 201-210. (Hu Xiang-fen, Niu Fu-rong, Zhou Zhe, et al. Effect of fused deposition modeling (FDM) process parameters on microstructure and mechanical properties of SiC ceramics[J]. *Cemented Carbide*, 2021, 38(3): 201-210.)
- [16] 张力, 杨现锋, 徐协文, 等. 熔融沉积法3D打印制备氧化锆陶瓷及其力学性能研究[J]. *无机材料学报*, 2021, 36(4): 436. (Zhang Li, Yang Xian-feng, Xu Xie-wen, et al. 3D printed zirconia ceramics via fused deposit modeling and its mechanical properties[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2021, 36(4): 436.)
- [17] Suwanpreecha C, Manonukul A. On the build orientation effect in as-printed and as-sintered bending properties of 17-4PH alloy fabricated by metal fused filament fabrication[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(6): 1076-1085.
- [18] Sotomayor M E, Várez A, Levenfeld B. Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316L powder injection moulding feedstocks[J]. *Powder Technology*, 2010, 200(1/2): 30-36.
- [19] Fayazbakhsh K, Movahedi M, Kalman J. The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication[J]. *Materials Today Communications*, 2019, 18: 140-148.
- [20] Medibew T M. A comprehensive review on the optimization of the fused deposition modeling process parameter for better tensile strength of PLA printed parts[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 5490831.
- [21] Cojocar V, Frunzaverde D, Miclosina C O, et al. The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication: a review[J]. *Polymers*, 2022, 14(5): 886.
- [22] Houshyar S, Shanks R A, Hodzic A. The effect of fiber concentration on mechanical and thermal properties of fiber-reinforced polypropylene composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 96(6): 2260-2272.