

17-4PH 不锈钢挤出成形制品的疲劳性能

姜世杰^{1,2*} 蔡尚港¹ 英洪玮¹ 陈佳琦¹

1. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳, 110819

2. 辽宁省机械装备动力学可靠性重点实验室, 沈阳, 110819

摘要: 随着金属材料挤出成形产品应用范围的扩大, 为确保可靠性和安全性, 须研究其疲劳性能。建立了考虑成形方向和填充角度的金属材料挤出成形烧结制品损伤疲劳寿命预测模型。制备了不同成形方向和填充角度的金属材料挤出成形烧结试件, 并对其完成了密度、收缩率、拉伸性能和疲劳性能的研究。结果表明: 疲劳寿命的理论值与实验值的误差为 1.50%~11.83%, 验证了所建模型的正确性; 试件烧结后的尺寸收缩率、拉伸性能和疲劳性能呈各向异性。

关键词: 金属材料挤出成形; 预测模型; 疲劳性能; 拉伸性能; 填充角度; 成形方向

中图分类号: TG142.71

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.07.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Fatigue Property of 17-4PH Products Fabricated via Metal Material Extrusion Technique

JIANG Shijie^{1,2*} CAI Shanggang¹ YING Hongwei¹ CHEN Jiaqi¹

1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang, 110819

2. Key Laboratory of Dynamics Reliability of Mechanical Equipment of Liaoning Province, Shenyang, 110819

Abstract: With the expansion of the application ranges of metal material extrusion products, it was urgent to investigate their fatigue property to ensure the reliability and safety. A damage fatigue life prediction model for metal material extrusion sintered products was established considering forming orientations and filling angles. Metal material extrusion sintered specimens with different forming orientations and filling angles were fabricated, and their density, shrinkage rate, tensile property and fatigue property were studied. The results show that the errors between predicted and measured fatigue life are as from 1.50% to 11.83%, which validates the correctness of the proposed model, while the shrinkage rate, tensile property, and fatigue property of the sintered specimens exhibit anisotropy.

Key words: metal material extrusion; prediction model; fatigue property; tensile property; filling angle; forming orientation

0 引言

金属材料挤出成形(metal material extrusion, MME)技术是以金属粉末/聚合物复合丝材为原料,先通过熔融沉积方式成形生坯,再经脱脂和烧结(shaping-debinding-sintering, S-D-S)工艺获得致密化纯金属零件的增材制造技术。该技术具有成本低、材料利用率高、设计自由度高、能耗低等诸多优势,在航空航天、医疗卫生和文化教育等领域具有巨大的应用和发展潜力^[1-2],受到越来越广泛的关注。

为进一步推动该技术的发展和應用,国内外研究人员对 MME 技术进行了大量深入的研究,并着重探究了过程参数对 MME 烧结制品的物理属性和静力学性能的影响^[3-6]。实际工况下,零部

件难免会承受周期性载荷或振动等动态载荷,因此研究 MME 零件的疲劳性能尤为重要。KED-ZIORA 等^[7]使用 MME 技术制备了 316L 和 17-4PH 不锈钢烧结试件,并进行了轴向疲劳试验、表面粗糙度及硬度的分析,发现疲劳强度随粗糙度的减小和硬度的增大而增大,且疲劳断口平坦,没有颈缩,为脆性断裂。SPILLER 等^[8]使用 MME 技术制备 316L 不锈钢烧结试件,拉伸疲劳试验结果表明,316L 不锈钢烧结制品的疲劳极限低于锻造制品,内部孔隙等缺陷对疲劳寿命产生负面影响。JIANG 等^[9]使用 MME 技术制备了 316L 不锈钢烧结试件,拉伸和弯曲疲劳试验结果显示,应力水平 120 MPa 下的拉伸疲劳试件循环周次为 10^5 ,应力水平 150 MPa 下的弯曲疲劳试件循环周次为 1.37×10^5 ;孔隙缺陷会加速拉伸疲劳裂纹扩展,但对弯曲疲劳载荷作用下伸疲劳裂纹扩展的影响较小。GHADIMI 等^[10]制备了不

收稿日期:2024-06-06

基金项目:国家自然科学基金(52475093);省部级基金项目(2023-MSBA-028)

同成形方向的 17-4PH 不锈钢烧结试件,并通过高周弯曲疲劳试验探究了成形方向对弯曲疲劳性能的影响,发现垂直方向试件的疲劳寿命低于水平方向试件。

综上所述,针对 MME 增材制造技术的研究集中在烧结件的致密度、拉伸性能、硬度等静力学性能,对其疲劳性能的研究尚不充分;现有研究以实验测试为主,缺乏理论基础。本文以 Ultrafuse 17-4PH 复合丝材为原料成形不同方向和填充角度的烧结试件,并对其物理属性(密度和收缩率)、拉伸及疲劳性能进行研究;创建了基于损伤演化的 MME 烧结制品疲劳寿命理论模型,以明确疲劳性能机理,进而提供准确的预测方法。

1 理论研究

首先基于复合材料力学的层板理论创建 17-4PH 不锈钢烧结试件的弹性模量预测模型。然后结合试件的疲劳损伤演化方程,建立 17-4PH 不锈钢烧结试件的疲劳寿命预测模型。之后对比分析理论结果与实验结果来验证理论模型的正确性。

1.1 弹性模量

MME 烧结制品为正交各向异性的层合板结构,如图 1 所示,图中,“1”表示材料的主方向,“2”表示材料主方向的法线方向,材料主方向与 X 轴之间的夹角用 θ 表示。

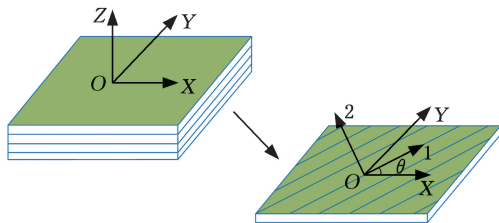


图 1 两种坐标系之间的关系

Fig.1 Relationship between two coordinate systems

MME 烧结制品的单层厚度远小于长度和宽度,符合平面应力状态的几何条件,因此厚度方向的应力分量即 Z 向的正应力 σ_z ,以及 1-Z 平面、2-Z 平面内的剪切应力 τ_{1z} 和 τ_{2z} 均为 0。这种情况下,MME 烧结制品薄层本构关系可表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q_{11} = E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$$

$$Q_{22} = E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad Q_{66} = G_{12}$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \nu_{12}E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}) = \nu_{21}E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21})$$

式中: σ_1 为材料沿 1 方向承受的正应力; σ_2 为材料沿 2 方向承受的正应力; τ_{12} 为作用于 O12 平面上的切应力; ϵ_1 为材料在 1 方向上的正应变; ϵ_2 为材料在 2 方向上的正应

变, γ_{12} 为材料在 O12 平面内的切应变; E_1 为水平方向(0° 填充)烧结试件平均弹性模量, $E_1 = 51.36$ GPa; E_2 为水平方向(90° 填充)烧结试件平均弹性模量, $E_2 = E_{90} = 40.73$ GPa; G_{12} 为剪切模量, $G_{12} = E_{45}/2 = 47.85/2 = 23.925$; ν_{12} 、 ν_{21} 分别为 O12 坐标系下的主泊松比和副泊松比, $\nu_{12} = 0.34$, $\nu_{21} = E_2\nu_{12}/E_1 = 40.73 \times 0.34/51.36 = 0.27$ 。

上述的薄层本构关系反映了 MME 烧结制品在薄层坐标系(O12 坐标系)下的特定应力-应变行为,考虑 MME 烧结制品的正交各向异性,需要推导 MME 烧结制品在任意方向上的应力-应变关系。材料主方向与载荷方向不一致时,OXY 坐标系下的应力-应变关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & 0 \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\bar{Q}_{11} = E_x / (1 - \nu_{xy}\nu_{yx})$$

$$\bar{Q}_{22} = E_y / (1 - \nu_{xy}\nu_{yx}) \quad \bar{Q}_{66} = G_{xy}$$

$$\bar{Q}_{12} = \bar{Q}_{21} = \nu_{xy}E_y / (1 - \nu_{xy}\nu_{yx}) = \nu_{yx}E_x / (1 - \nu_{xy}\nu_{yx})$$

式中: σ_x 为材料沿 X 方向承受的正应力; σ_y 为材料沿 Y 方向承受的正应力; τ_{xy} 为作用于 OXY 平面上的切应力; ϵ_x 为材料在 X 方向上的正应变; ϵ_y 为材料在 Y 方向上的正应变; γ_{xy} 为材料在 OXY 平面内的切应变; E_x 为材料在 X 方向的弹性模量; E_y 为材料在 Y 方向的弹性模量; G_{xy} 为偏轴剪切模量; ν_{xy} 、 ν_{yx} 分别为 OXY 坐标系下主泊松比和副泊松比, $\nu_{xy}\nu_{yx} = \nu_{12}\nu_{21}$ 。

两坐标系之间的应力关系为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \tau_{xy} \end{bmatrix}^T = \mathbf{S} \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \tau_{12} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -2\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 2\sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & -\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{S} 为应力坐标转换矩阵。

两坐标系之间的应变关系为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x & \epsilon_y & \gamma_{xy} \end{bmatrix}^T = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \epsilon_1 & \epsilon_2 & \gamma_{12} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ 2\sin \theta \cos \theta & -2\sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{C} 为应变坐标转换矩阵。

结合上述两坐标间的应力应变关系得到材料主方向与载荷方向不一致时 OXY 坐标系下的应力-应变关系:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \mathbf{C}^{-1} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于本文研究的拉伸模量为材料在 X 方向的弹性模量 E_x ,因此求解 \bar{Q}_{11} 即可得到 E_x 的表达式。联立式(2)、式(3)可得

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta = E_x / (1 - \nu_{xy} \nu_{yx}) = E_x / (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

$$Y = -\frac{\partial W}{\partial D} \tag{8}$$

由此求得

$$E_x = [Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta] (1 - \nu_{12} \nu_{21})$$

改写式(4) 可得用应力分量表示的应变分量:

$$\epsilon_{ij} = \frac{(1 + \nu)\sigma_{ij}}{(1 - D)E} - \frac{\nu}{1 - 2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} \epsilon_{kl}$$

将 ϵ_{ij} 代入式(7), 得到应变能密度的表达式:

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{2E(1 - D)} \sigma_{ij}^2$$

由此可得

$$Y = \frac{(1 + \nu)\sigma_{ij}^2}{2E(1 - D)^2}$$

利用损伤演化方程^[12] 表征 MME 制品在疲劳载荷加载过程中的损伤演化, 即

$$\frac{dD}{dN} = \frac{eY_{\max}^g}{(1 - D)^j}$$

式中: e, g, j 为材料参数(见表 1); Y_{\max} 为最大损伤驱动力。

表 1 疲劳损伤参数

Tab.1 Fatigue damage parameters

试件	e	g	j
F _H ⁰	1.36×10^{-10}	7.62	2.35
F _H ²³	1.92×10^{-6}	8.80	1.57
F _H ⁴⁵	1.12×10^{-4}	3.66	1.43
F _H ⁶⁸	6.28×10^{-3}	3.76	1.32
F _H ⁹⁰	1.06×10^{-3}	3.11	1.36
F _V ⁰	1.17×10^{-5}	3.46	1.62

注: F 表示疲劳试件, 上标数字为填充角度, 下标 H 表示水平方向成形, V 表示竖直方向成形。

单轴拉伸情况下, 以应力表示的损伤演化方程为

$$\frac{dD}{dN} = \frac{e}{(2E)^g} \frac{(1 + \nu)^g \sigma_{\max}^{2g}}{(1 - D)^{2g+j}}$$

式中: σ_{\max} 为最大拉伸疲劳应力。

分离变量可得

$$\frac{dD}{(1 - D)^{2g+j}} = \frac{e(1 + \nu)^g \sigma_{\max}^{2g}}{(2E)^g} dN$$

上式两边分别对 D 和 N 积分可得

$$\frac{D}{(1 - D)^{2g+j}} = \int_0^D \frac{dD}{(1 - D)^{2g+j}} = \int_0^N \frac{e(1 + \nu)^g \sigma_{\max}^{2g}}{(2E)^g} dN = \frac{e(1 + \nu)^g \sigma_{\max}^{2g}}{(2E)^g} N$$

化简上式可得和损伤相关的相应寿命演化方程:

$$\sigma_{\max}^{2g} N = \frac{(2E)^g}{e(2g + j + 1)(1 + \nu)^g} (1 - D)^{2g+j+1}$$

从而得到寿命和最大应力之间的关系:

$$N = \frac{(2E)^g}{e(2g + j + 1)(1 + \nu)^g \sigma_{\max}^{2g}} (1 - D)^{2g+j+1} \tag{9}$$

2 实验研究

制备了不同成形方向和填充角度的 17-4PH 不锈钢生坯试件, 通过 S-D-S 工艺获得最终烧结

1.2 疲劳寿命

未受损伤材料的线弹性本构方程为

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \lambda \delta_{kl} \epsilon_{kl} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad \delta_{kl} = \begin{cases} 1 & k = l \\ 0 & k \neq l \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

式中: $\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}$ 分别为应力分量和应变分量, i, j 用于标识 σ_{ij} 和 ϵ_{ij} , 二维平面内, $i = 1, 2, j = 1, 2$; σ_{11} 为材料沿 1 方向承受的正应力; σ_{22} 为材料沿 2 方向承受的正应力; σ_{12} 为作用于 O12 平面上的切应力; δ_{ij}, δ_{kl} 为克罗内克符号; k, l 为二阶张量指标, 用于确定克罗内克符号的值; λ, μ 为拉梅常数。

疲劳载荷作用下, MME 烧结制品内部会产生疲劳损伤。生坯制品逐层打印、层层堆积的制造工艺导致不同方向的疲劳损伤演化是不同的, 即疲劳损伤演化呈现各向异性。为表征 MME 烧结制品的疲劳损伤情况, 引入损伤度^[11]

$$D = 1 - E(n)/E$$

式中: $E(n)$ 为复合材料在应力循环次数为 n 时的弹性模量; E 为复合材料在无损伤情况下的弹性模量。

理想情况下, D 的值介于 0(未损伤) 和 1(完全损伤) 之间。由此得到考虑损伤的拉梅常数

$$\lambda_D = \frac{E\nu(1 - D)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \mu_D = G = \frac{E(1 - D)}{2(1 + \nu)}$$

进而得到含损伤材料的本构关系:

$$\sigma_{ij} = (1 - D)(\delta_{ij} \lambda \delta_{kl} \epsilon_{kl} + 2\mu \epsilon_{ij}) \tag{4}$$

疲劳损伤是能量耗散与熵增的不可逆过程^[12]。介质运动速度足够小时, 由热力学第一定律得到的能量守恒方程为

$$\left(\rho \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}^e} - \sigma_{ij}\right) \frac{d\epsilon_{ij}^e}{dt} + \left(\rho \frac{\partial f}{\partial T} + s\right) \frac{dT}{dt} + \left(\rho \frac{\partial f}{\partial D} + Y\right) \frac{dD}{dt} = 0 \tag{5}$$

式中: ϵ_{ij}^e 为弹性应变分量; ρ 为介质密度; f 为单位质量介质自由能; T 为热力学温度; Y 为损伤驱动力。

考虑到 $d\epsilon_{ij}^e/dt, dT/dt, dD/dt$ 的任意性, 由式(3) 可知

$$Y = -\rho \frac{\partial f}{\partial D} \tag{6}$$

等温过程中, 单位体积的自由能 ρf 等于单位体积的应变能 W , 即

$$\rho f = W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \tag{7}$$

联立式(6)、式(7) 可得

试件。对烧结件进行拉伸实验和疲劳实验,研究成形方向和填充角度对烧结试件的拉伸性能和疲劳性能的影响规律。

2.1 试件制备

2.1.1 生坯件制备

以 Ultrafuse 17-4PH 复合丝材为原材料,使用 Ender-3 S1 Pro 设备成形生坯件。拉伸试件和疲劳试件的尺寸设计参考 ISO 1099:2017 金属材料疲劳试验轴向力控制方法标准,如图 2a 所示。考虑到零件在烧结后的收缩,X、Y 及 Z 方向的生坯尺寸分别为设计尺寸的 119%、122.5% 及 123.5%,水平、竖直方向成形生坯件的尺寸如图 2b、图 2c 所示。

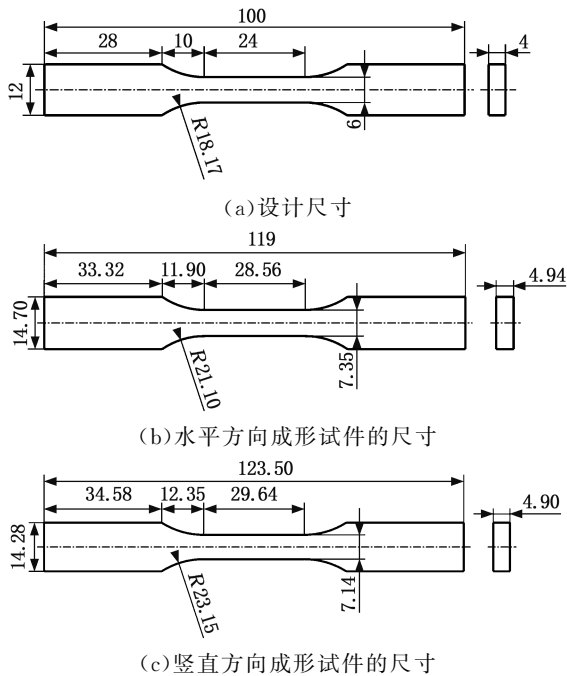


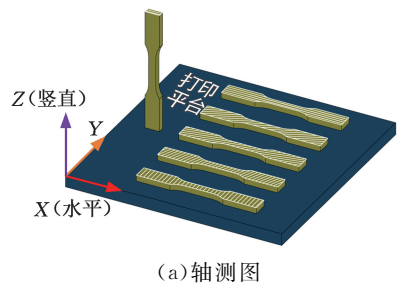
图 2 生坯件尺寸

Fig.2 The dimension of green specimens

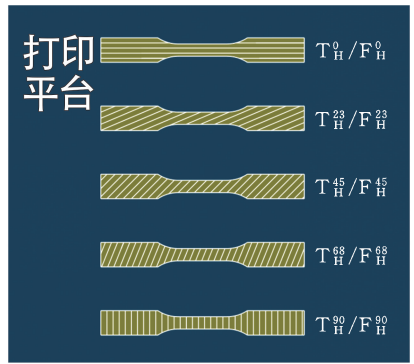
为充分研究烧结试件的拉伸性能和疲劳性能,仅考虑成形方向和填充角度的影响,其余参数保持一致,即层厚为 0.2 mm,线宽为 0.4 mm,喷嘴直径为 0.4 mm,成形速度为 15 mm/s,熔融温度为 250 °C,床温为 110 °C,挤出倍数为 1,填充率 100%,填充方式直线。制备了 6 组不同参数的生坯件,如图 3 所示,具体成形参数如表 2 所示,相同参数的拉伸试件和疲劳试件的结构和尺寸均一致。

2.1.2 烧结件制备

对于 Ultrafuse 17-4PH 复合丝材成形的生坯件,采用催化脱脂和热脱脂去除黏合剂后再进行烧结的工艺处理。首先利用催化脱脂炉 D200-E 进行催化脱脂,去除黏合剂中的主要成分聚甲醛。



(a)轴测图



(b)俯视图

图 3 生坯件示意图

Fig.3 The diagram of green specimens

表 2 生坯件成形参数

Tab.2 The processing parameters of green specimens

试件	填充角度
T_V^0 (5 个)、 F_V^0 (3 个)	0°
T_H^0 (3 个)、 F_H^0 (9 个)	0°
T_H^{23} (5 个)、 F_H^{23} (9 个)	23°
T_H^{45} (3 个)、 F_H^{45} (9 个)	45°
T_H^{68} (3 个)、 F_H^{68} (9 个)	68°
T_H^{90} (3 个)、 F_H^{90} (9 个)	90°

注:T 表示拉伸试件,F 表示疲劳试件;下标 V 表示竖直方向成形,H 表示水平方向成形。

整个催化脱脂过程中,持续向炉中同时通入流量不变的硝酸气体(30 mL/h)和氮气(180 L/h),并保温 105 °C,催化脱脂曲线如图 4 所示。然后使用真空烧结炉 S200-C 进行热脱脂与烧结,形成致密化纯金属零件。热脱脂与烧结过程中,升温过快,零件易出现鼓包、开裂等缺陷,因此需合理控制升温速率。热脱脂工艺采用 2 °C/min 的升温速率,真空烧结工艺采用 2.5 °C/min 的升温速率。

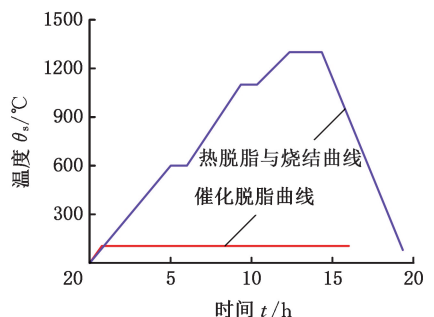


图 4 脱脂和烧结曲线

Fig.4 The debinding and sintering curve

率,分压烧结工艺采用 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率,热脱脂和烧结过程在惰性气体环境(氩气或干氢)中进行,以避免零件发生氧化。

2.2 试件性能测试

2.2.1 物理性能

使用固体密度计 SJ-600G 测量烧结试件的密度。利用游标卡尺分别测量生坯件和烧结件的三维尺寸,以分析确定各个方向的收缩率。

2.2.2 拉伸性能

根据 ISO 6892:2020 金属材料拉伸试验室温试验方法标准,利用电液伺服疲劳试验机(SHIMADZU EHF-EV101K1-040-1A)进行静态拉伸试验,确定不同成形参数下试件的极限拉伸应力,进而确定拉伸疲劳实验时的应力水平。拉伸试验采用位移控制方式,加载速率设置为 $2\text{ mm}/\text{min}$ 。为避免夹紧力过大导致试件在夹持处出现破损、断裂,将夹紧力设置为 1 kN 。为确保试验结果的准确性与可靠性,试件 T_V^0 、 T_H^0 、 T_H^{23} 、 T_H^{45} 和 T_H^{90} 均至少进行 3 次拉伸试验,拉伸试件共计 22 个。

使用电子显微镜 JT-H360-4K 观测试件断口形貌,通过断口形貌特征,进一步了解断裂机制。通常,脆性断裂的断口表面相对平滑,韧性断裂的断口出现韧窝、剪切唇等特征。

2.2.3 疲劳性能

根据 ISO 1099:2017 金属材料疲劳试验轴向力控制方法标准,利用同一电液伺服疲劳试验机进行试件的拉伸疲劳试验,采用轴向力控制方式(加载波形为正弦波)。为确保试件和夹具的充分接触,将应力比 R 设为 0.1 ;为防止疲劳试验机加载频率过高导致试件的温度变化超过阈值 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,加载频率 f 为 10 Hz 的恒定频率。

具体的疲劳试验过程如下:确定断裂周次在 $1000\sim 15\ 000$ 时的应力水平 σ_1 。 σ_1 根据极限抗拉强度 σ_b 确定,一般 $\sigma_1=0.5\sigma_b$ 。根据试件在应力水平 σ_1 的断裂周次 N 选取 σ_2 ,若 N 接近 1000 ,则令 $\sigma_2=\sigma_1+\alpha$, $\sigma_3=\sigma_1+2\alpha$;若 N 接近 $15\ 000$,则令 $\sigma_2=\sigma_1-\alpha$, $\sigma_3=\sigma_1-2\alpha$;若 N 接近 7000 ,则令 $\sigma_2=\sigma_1-\alpha$, $\sigma_3=\sigma_1+\alpha$,其中, $\alpha=20,10\text{ MPa}$ 。为确保试验结果的准确性与可靠性,试件 F_V^0 、 F_H^0 、 F_H^{23} 、 F_H^{45} 和 F_H^{90} 分别在应力水平 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 下各进行 3 次拉伸疲劳试验,记录每个应力水平下疲劳试件的寿命,疲劳试件共计 48 个。

3 结果与讨论

对 17-4PH 不锈钢烧结试件的成形质量进行了讨论,分析了不同成形方向和填充角度烧结试件的密度、收缩率等关键参数,探讨了成形方向和

填充角度对烧结试件拉伸性能和疲劳性能的影响。

3.1 成形质量

图 5 所示为不同成形方向和填充角度的生坯试件。成形后的生坯件没有出现明显的缺陷,表面平整,尺寸和形状均达到设计要求。

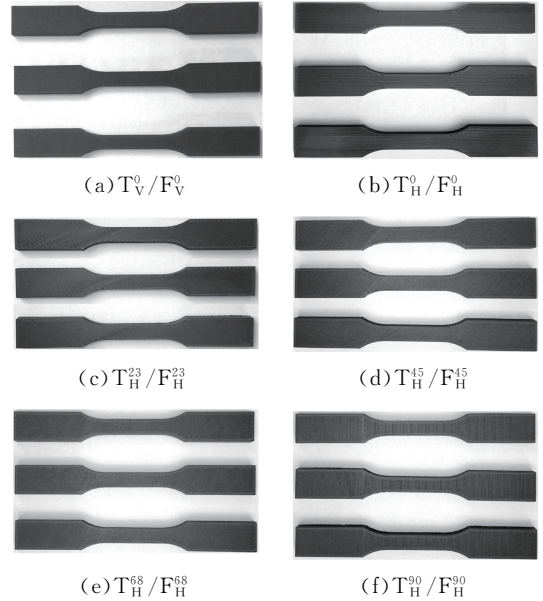


图 5 不同成形方向和填充角度的生坯件

Fig.5 The green specimens with different forming orientations and filling angles

图 6 所示为不同成形方向和填充角度的烧结试件。烧结后的试件未出现膨胀或裂纹等缺陷,形状保持较好,保留了生坯件成形时的填充纹理特征,这表明烧结工艺具备高度的可控性和稳定性。

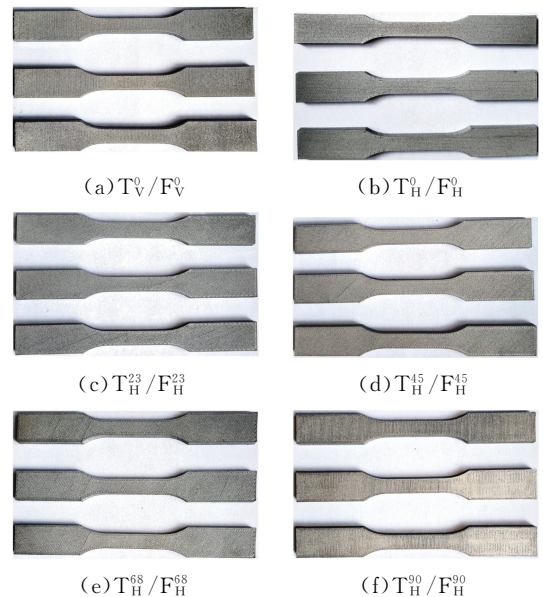


图 6 不同成形方向和填充角度的烧结件

Fig.6 The sintered specimens with different forming orientations and filling angles

3.2 物理属性参数

对比生坯试样,零件尺寸产生了明显的各向异性收缩,试件 T_H^0/F_H^0 的 X 向尺寸收缩 16.02%、Y 向尺寸收缩 19.05%、Z 向尺寸收缩 21.08%,可见沿纤维方向的收缩最小,垂直于纤维方向的收缩居中,竖直方向的收缩最大,与文献 [13] 结果一致,这是因为逐层累加的成形使生坯件相邻纤维之间存在孔隙。从表 3 中可以看出,不同成形参数试件烧结后的密度有明显差异, T_H^0/F_H^0 试件的平均密度最大,为 7.280 g/cm^3 ,平

表 3 不同成形方向和填充角度的烧结试件物理属性参数

Tab.3 The physical parameters of sintered specimens with different forming orientations and filling angles

试件	平均收缩率(%)			平均脱脂率/%	平均密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均致密度/%	最大密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最大致密度/%
	X 向	Y 向	Z 向					
T_V^0/F_V^0	16.17	18.03	18.89	12.76	7.112	91.41	7.171	92.17
T_H^0/F_H^0	16.02	19.05	21.08	13.15	7.280	93.57	7.421	95.39
T_H^{23}/F_H^{23}	15.33	17.43	19.37	12.01	7.197	92.61	7.212	92.70
T_H^{45}/F_H^{45}	16.58	18.21	20.30	12.50	7.204	92.60	7.310	93.96
T_H^{68}/F_H^{68}	17.08	16.78	19.04	12.58	7.136	91.72	7.164	92.08
T_H^{90}/F_H^{90}	17.29	16.50	18.63	12.59	7.123	91.56	7.208	92.65

3.3 拉伸性能

不同成形参数 17-4PH 不锈钢烧结试件的拉伸断口分别如图 7(宏观)、图 8(微观)所示。 T_H^0 试件纤维材料丝发生断裂,断口垂直于纤维材料丝方向,为不规则曲面,这是因为纤维材料丝具有一定的韧性和延展性,在轴向拉伸载荷作用下发生韧性断裂。水平方向其他填充角度的试件材料丝发生分离破坏,沿纤维方向断裂,断口平整,断裂形式为脆性断裂。 T_V^0 试件打印层之间发生分离破坏,断口平行于打印层,断口平整,断裂形式为脆性断裂。烧结试件内部排列着大小不一的孔隙,这是因为 ME 逐层累加时堆叠的材料丝不能完全融合,烧结后这些孔隙会减小但不会完全消失。 T_H^0 试件的孔隙延伸方向和断口截面垂直, T_H^0 和 T_V^0 试件的孔隙延伸方向与断口截面平行,其余填充角度试件孔隙的延伸方向与断口截面成 β 角($\beta=90^\circ-\theta$, θ 为填充角度)。

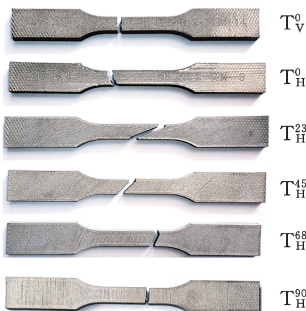


图 7 不同成形方向和填充角度的烧结试件拉伸断口
Fig.7 The tensile fracture of sintered specimens with different forming orientations and filling angles

均致密度为 93.57%,最大密度为 7.421 g/cm^3 ,最大致密度为 95.39%; T_V^0/F_V^0 试件平均密度最小,为 7.112 g/cm^3 ,平均致密度为 91.41%,最大密度为 7.171 g/cm^3 ,最大致密度为 92.17%。烧结后,不同成形参数参数试件沿 X、Y、Z 方向的收缩均不相同,这是由于试件孔隙延伸方向不同(与 X 轴的夹角分别为 0° 、 23° 、 45° 、 68° 和 90°)。烧结过程中,随着孔隙减小,相应的试件会产生不同程度的尺寸收缩。

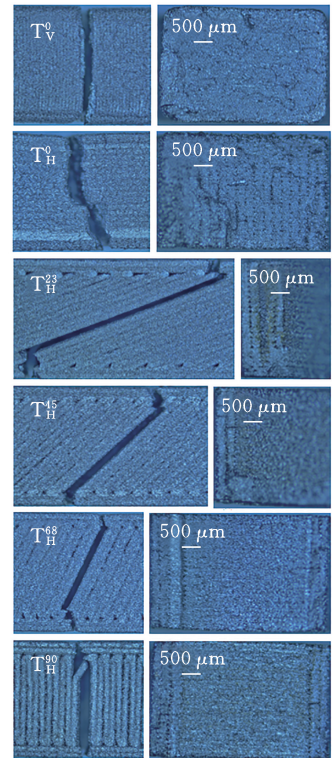


图 8 不同成形方向和填充角度的拉伸断口微观形貌
Fig.8 The microstructure of tensile fracture surfaces with different forming orientations and filling angles

图 9 为 17-4PH 不锈钢烧结试件的拉伸应力-应变关系曲线,同一颜色曲线表示试件在相同实验参数下进行了重复的拉伸试验。相同应变下, T_H^0 的拉伸应力比 T_V^0 大,且 T_H^0 的最大应力和最大应变均大于 T_V^0 。抗拉强度、弹性模量、断裂伸长率具体数值如表 4 所示。 T_H^0 的拉伸性能

(抗拉强度、弹性模量、断裂伸长率)优于 T_V^0 。 T_H^0 的极限抗拉强度为 721.96 MPa(与文献[14]的极限抗拉强度 760 MPa 接近,但低于文献[15]的极限抗拉强度 939.5 MPa),极限弹性模量为 52.05 GPa,极限断裂伸长率为 0.75%。 T_V^0 试件的极限抗拉强度为 623.94 MPa,极限弹性模量为 49.88 GPa,极限断裂伸长率为 0.69%。 T_H^0 受拉时的试件强度取决于纤维材料丝,而 T_V^0 受拉时的试件强度取决于打印层界面强度,因此在轴向载荷作用下,纤维材料丝抵抗破坏的能力强于纤维材料丝黏结界面。

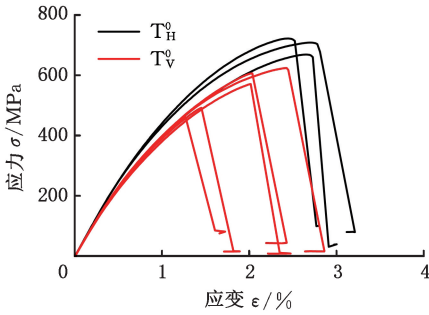


图 9 不同成形方向的烧结试件拉伸应力-应变曲线
Fig.9 The tensile stress-strain curve with different forming orientations

表 4 不同成形方向的烧结试件拉伸性能

Tab.4 The tensile performance of sintered specimens in different forming orientations

试件	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	断裂伸长率/%
T_H^0	708.61	52.05	0.75
	721.96	51.83	0.64
	668.71	50.20	0.72
T_V^0	491.58	49.06	0.45
	623.94	49.88	0.69
	460.38	48.47	0.42
T_V^0	570.74	48.78	0.65
	606.29	49.71	0.64

不同成形方向试件的拉伸性能呈各向异性,这是因为烧结后的试件内部仍存在孔隙,且孔隙方向和生坯成形方式密切相关,如图 10 所示。 T_H^0 的孔隙平行于拉伸载荷,这减小了孔隙对试件力学性能的影响。 T_V^0 的孔隙垂直于拉伸载荷,这使得裂纹更容易沿打印层扩展,从而显著降低试件的力学性能。

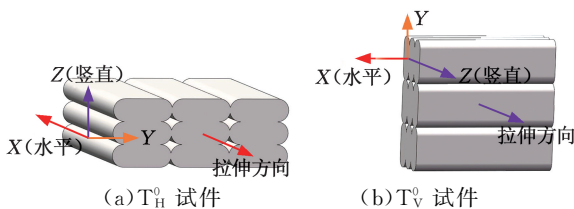


图 10 不同成形方向烧结试件内部孔隙示意图

Fig.10 The internal porosity schematic diagram of sintered specimens with different forming orientations

图 11 所示为 17-4PH 不锈钢烧结试件弹性模量的理论结果与实验结果,二者的误差为 6.58%~10.91%,在工程实践允许范围内^[16]。

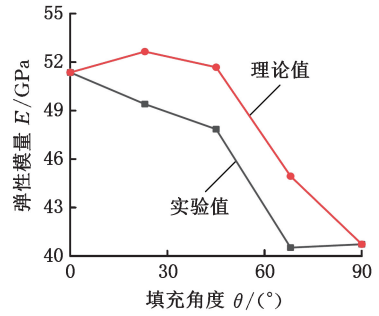


图 11 不同填充角度烧结试件弹性模量的理论结果与实验结果

Fig.11 Theoretical results and experimental results of elastic modulus on sintered specimens with different filling angles

拉伸应力-应变曲线见图 12,同一颜色曲线表示试件在相同实验参数下进行了重复的拉伸试验。相同应变条件下, T_H^0 的拉伸应力最大, T_H^{68} 的拉伸应力最小;填充角度由 0° 增大至 68° 时,试件的拉伸应力逐渐减小; T_H^{90} 的拉伸应力略大于 T_H^{68} ;试件在拉伸过程中,最大应力和最大应变随填充角度的变化与拉伸应力一致。

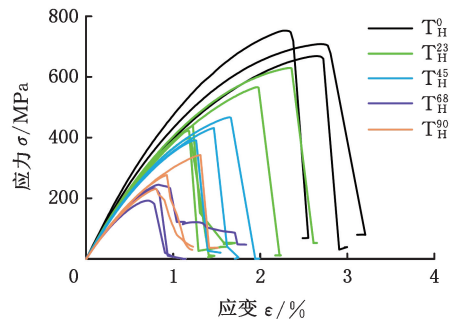


图 12 不同填充角度烧结试件的拉伸应力-应变曲线
Fig.12 The tensile stress-strain curve with different filling angles

17-4PH 不锈钢烧结试件的抗拉强度、弹性模量及断裂伸长率如表 5 所示。 T_H^0 的拉伸性能最好,极限抗拉强度为 721.96 MPa,极限弹性模量为 52.05 GPa,极限断裂伸长率为 0.75%; T_H^{68} 的拉伸性能最差,极限抗拉强度为 244.72 MPa,极限弹性模量为 41.22 GPa,极限断裂伸长率为 0.44%。填充角度从 0° 增大至 68° 时,试件拉伸性能逐渐变差。 T_H^{90} 的拉伸性能略好于 T_H^{68} 。 T_H^0 受拉时的试件强度取决于纤维材料丝,而其余填充角度试件的强度取决于纤维层之间的黏结强度,因此在轴向载荷作用下, T_H^0 性能更好。

不同填充角度试件的拉伸性能呈各向异性,这是因为不同填充角度试件内部孔隙的方向不

同。试件 T_H^0 、 T_H^{90} 内部孔隙和轴向拉伸载荷方向如图 13 所示。 T_H^0 孔隙平行于拉伸方向,试件力学性能受孔隙影响小。 T_H^{90} 孔隙垂直于拉伸方向,裂纹更易沿材料丝纤维层黏结界面萌生,孔隙使 T_H^{90} 的力学性能明显降低。

表 5 不同填充角度烧结试件的拉伸性能

Tab.5 Tensile performance of sintered specimens with different filling angles

试件	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	平均弹性模量/GPa	理论弹性模量/GPa	误差/%	断裂伸长率/%
T_H^0	708.61	52.05	51.36	51.36	0	0.75
	721.96	51.83				0.64
	668.71	50.20				0.72
T_H^{23}	629.71	50.36	49.40	52.65	6.58	0.64
	566.41	48.37				0.54
	399.77	47.25				0.35
	438.25	50.32				0.43
	422.19	50.68				0.41
T_H^{45}	431.38	47.71	47.85	51.68	8.00	0.42
	391.13	47.15				0.37
	466.96	48.70				0.48
T_H^{68}	244.72	41.22	40.52	44.94	10.91	0.44
	232.57	40.50				0.27
	192.12	39.85				0.24
T_H^{90}	342.52	40.91	40.73	40.73	0	0.36
	276.61	41.20				0.29
	230.42	40.09				0.29

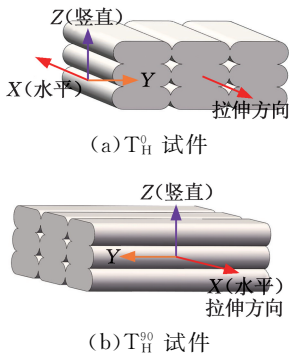


图 13 不同填充角度烧结试件内部孔隙示意图

Fig.13 The internal porosity schematic diagram of sintered specimens with different filling angles

3.4 疲劳性能

17-4PH 不锈钢烧结试件的疲劳断口如图 14 所示。断口形貌特征和拉伸断口一致是因为相同参数下制备的试件内部缺陷特征相同,即孔隙排列方式一致。拉伸载荷和疲劳载荷作用方向一致,均为垂直于试件断口截面方向的轴向载荷。

不同成形方向 17-4PH 不锈钢烧结试件疲劳寿命曲线见图 15。疲劳寿命的理论结果与试验结果偏差为 3.93%~11.83%,在工程实践允许范围内^[17]。应力水平为 400 MPa 时, F_V^0 试件的循环周次 N 为 676 ($\lg N = 2.83$),对应的疲劳寿命为 67.6 s; F_H^0 试件的循环周次为 8.71×10^5 ($\lg N =$

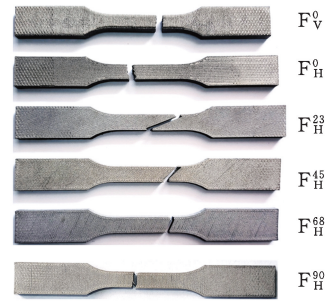


图 14 不同成形方向和填充角度的烧结试件疲劳断口

Fig.14 The fatigue fracture of sintered specimens with different forming orientations and filling angles

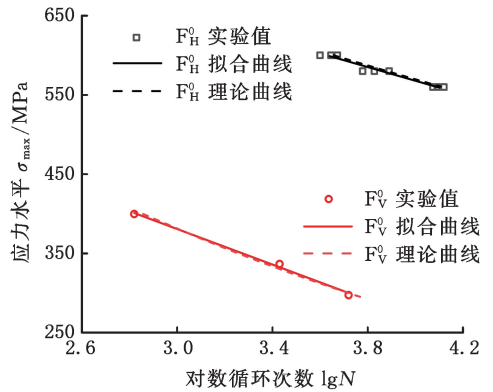


图 15 不同成形方向烧结试件的疲劳寿命曲线

Fig.15 The fatigue life curve of sintered specimens with different forming orientations

5.94),对应的疲劳寿命为 8.71×10^4 s。相同应力水平下, F_H^0 疲劳寿命远大于 F_V^0 即 F_H^0 的疲劳性能优于 F_V^0 ,如表 6 所示。不同成形方向试件疲劳性能呈各向异性的原因与拉伸性能呈各向异性的原因一致。

表 6 不同成形方向烧结试件的疲劳性能

Tab.6 The fatigue performance of sintered specimens with different forming orientations

试件	最大载荷/kN	应力水平 σ_{max} /MPa	疲劳寿命/s	平均疲劳寿命/s	$\lg N_{exp}$	理论疲劳寿命/s	$\lg N_{pre}$	误差/%
F_H^0	12.80	560	1238.3	1247.1	4.10	1301.5	4.11	4.36
	12.54		1317.2					
	12.83		1185.8					
	13.09	580	600.7	683.5	3.84	762.2	3.88	11.51
	13.22		673.3					
	13.02		776.5					
	13.58	600	398.3	437.4	3.64	454.6	3.66	3.93
	13.67		443.0					
	13.64		470.9					
F_V^0	7.5	297.34	525.4	437.4	3.72	558.3	3.75	6.26
	8.5	336.67	267.9		3.43	236.2	3.37	11.83
	10.0	399.68	65.6		2.82	72.0	2.86	9.76

注: N_{exp} 、 N_{pre} 分别为实验循环周次和理论循环周次。

图 16 为 17-4PH 不锈钢烧结试件的疲劳寿命曲线。理论结果与试验结果的相对误差为

1.50%~11.52%，在工程实践允许范围内^[17]。应力水平为 320 MPa 时， F_H^{23} 试件的循环周次为 4074 ($\lg N = 3.61$)，对应的疲劳寿命为 407.4 s； F_H^0 试件的循环周次为 7.41×10^6 ($\lg N = 6.87$)，对应的疲劳寿命 7.41×10^5 s。应力水平为 240 MPa 时， F_H^{45} 试件的循环周次为 3802 ($\lg N = 3.58$)， F_H^{23} 试件的循环周次为 3.89×10^5 ($\lg N = 5.59$)。如表 7 所示，不同实验的数据用分数线分隔。相同应力水平下， F_H^0 试件的疲劳寿命最长， F_H^{68} 试件的疲劳寿命最短， F_H^{90} 试件的疲劳寿命略长于 F_H^{68} 试件的疲劳寿命；填充角由 0° 增大至 68° 时，试件疲劳寿命逐渐缩短，这表明试件的疲劳性能逐渐变差， F_H^0 试件的疲劳寿命的疲劳性能最好， F_H^{68} 试件的疲劳性能最差， F_H^{90} 试件的疲劳性能略好于 F_H^{68} 试件的疲劳性能。

表 7 不同填充角度烧结试件疲劳性能

Tab.7 Fatigue performance of sintered specimens with different filling angles

试件	最大载荷/kN	应力水平 σ_{max}/MPa	疲劳寿命/s	平均疲劳寿命/s	$\lg N_{exp}$	理论疲劳寿命/s	$\lg N_{pre}$	误差/%
F_H^0	12.80/12.54/12.83	560	1238.3/1317.2/1185.8	1247.1	4.10	1301.5	4.11	4.36
	13.09/13.22/13.02	580	600.7/673.3/776.5	683.5	3.84	762.2	3.88	11.51
	13.58/13.67/13.64	600	398.3/443.0/470.9	437.4	3.64	454.6	3.66	3.93
F_H^{23}	7.01/6.98/7.03	300	1329.6/1361.6/1263.2	1318.1	4.12	1252.4	4.10	4.98
	7.34/7.17/7.19	310	774.5/622.6/629.6	675.6	3.83	7032.0	3.85	4.08
	7.51/7.48/7.56	320	473.2/426.9/391.1	430.4	3.63	402.1	3.60	6.58
F_H^{45}	4.52/4.51/4.54	200	1373.6/1236.2/1274.6	1294.8	4.11	1254.9	4.10	3.08
	4.98/4.82/4.89	210	648.2/630.2/567.1	615.2	3.79	624.4	3.80	1.50
	5.41/5.42/5.39	220	381.7/318.5/361.3	353.8	3.55	330.1	3.52	6.70
F_H^{68}	2.54/2.54/2.58	110	1323.0/1315.2/1248.5	1295.6	4.11	1245.8	4.10	3.84
	2.79/2.74/2.77	120	757.4/706.6/669.6	711.2	3.85	647.3	3.81	8.98
	3.00/3.01/3.00	130	337.3/431.6/365.1	378.0	3.58	354.4	3.55	6.24
F_H^{90}	2.81/2.79/2.82	120	1083.3/1046.1/1124.9	1084.8	4.04	1144.1	4.06	5.47
	3.03/3.07/3.00	130	680.1/624.3/566.2	623.5	3.79	695.3	3.84	11.52
	3.23/3.29/3.28	140	463.1/353.8/437.1	418.0	3.62	438.4	3.64	4.88

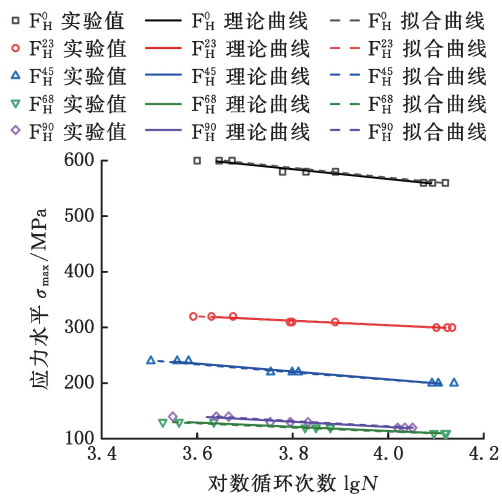


图 16 不同填充角度烧结试件的疲劳寿命曲线

Fig.16 The fatigue life curve of sintered specimens with different filling angles

4 结论

1) 烧结后试件的尺寸收缩呈各向异性，沿纤维方向的收缩最小，垂直于纤维方向的收缩较大，竖直方向的收缩最大。

2) 轴向拉伸载荷作用下，水平方向 (0° 填充) 成形试件为纤维材料丝断裂，断口垂直于材料丝纤维方向，断口表面为不规则曲面，属于韧性断裂；水平方向其他填充角度 (23° 、 45° 、 68° 、 90°) 成形试件为材料丝之间的分离破坏，试件沿纤维方向断裂，断口平整，属于脆性断裂；竖直方向 (0° 填充) 成形试件断裂为打印层之间的分离破坏，断口平行于打印层方向，断口平整，属于脆性断裂。

3) 弹性模量理论预测模型的相对误差为 6.58%~10.91%，疲劳寿命理论预测模型的相对误差为 1.50%~11.83%，均在工程实践允许范围

内。模型正确可靠，能准确分析预测 MME 烧结制品的拉伸性能和疲劳性能。

4) MME 烧结试件的拉伸性能和疲劳性能具有各向异性，水平方向 (0° 填充) 成形试件明显优于竖直方向 (0° 填充) 试件；水平方向 (0° 填充) 试件的拉伸性能和疲劳性能最好， 68° 填充的试件最差， 90° 填充的试件略好于 68° 填充的试件；填充角度由 0° 增大至 68° 时，试件的拉伸性能和疲劳性能逐渐变差。

参考文献:

[1] ROSHCHUPKIN S, KOLESOV A, TARAKHOVSKIY A, et al. A Brief Review of Main Ideas of Metal Fused Filament Fabrication[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 38:2063-2067.
 [2] BANKAPALLI N K, GUPTA V, SAXENA P, et

- al. Filament Fabrication and Subsequent Additive Manufacturing, Debinding, and Sintering for Extrusion-based Metal Additive Manufacturing and Their Applications; a Review[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 264:110915.
- [3] DAMON J, DIETRICH S, GORANTLA S, et al. Process Porosity and Mechanical Performance of Fused Filament Fabricated 316L Stainless Steel[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2019, 25(7):1319-1327.
- [4] CARMINATI M, QUARTO M, D'URSO G D, et al. A Comprehensive Analysis of AISI 316L Samples Printed via FDM: Structural and Mechanical Characterization [J]. *Key Engineering Materials*, 2022, 926:46-55.
- [5] 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.
- [6] CAMINERO M Á, ROMERO GUTIÉRREZ A, CHACÓN J M, et al. Effects of Fused Filament Fabrication Parameters on the Manufacturing of 316L Stainless-steel Components: Geometric and Mechanical Properties[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(10):2004-2026.
- [7] KEDZIORA S, DECKER T, MUSEYIBOV E, et al. Strength Properties of 316L and 17-4 PH Stainless Steel Produced with Additive Manufacturing [J]. *Materials*, 2022, 15(18):6278.
- [8] SPILLER S, OLSØYBAKK KOLSTAD S, RAZAVI N. Fatigue Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated via Material Extrusion Additive Manufacturing [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 291:109544.
- [9] JIANG Dayue, NING Fuda. Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel by a Printing-Debinding-Sintering Method: Effects of Microstructure on Fatigue Property[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(9):091007.
- [10] GHADIMI H, JIRANDEHI A P, NEMATI S, et al. Effects of Printing Layer Orientation on the High-frequency Bending-fatigue Life and Tensile Strength of Additively Manufactured 17-4 PH Stainless Steel[J]. *Materials*, 2023, 16(2):469.
- [11] 文磊, 罗周全, 杨仕教, 等. 岩体损伤度的点荷载强度计算及分析 [J]. *工程科学学报*, 2017, 39(2):175-181.
- WEN Lei, LUO Zhouquan, YANG Shijiao, et al. Analyses and Calculation of Point Load Strength on Rock Mass Damage Index[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(2):175-181.
- [12] JIANG Shijie, LI Shuo, CAI Shanggang, et al. Theoretical and Experimental Study on the Fatigue Property of Material Extrusion Products and Improvement by Using Vibration Machining during Manufacturing Process[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 182:108193.
- [13] LÉONARD F, TAMMAS-WILLIAMS S. Metal FFF Sintering Shrinkage Rate Measurements by X-ray Computed Tomography [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 37(5):631-644.
- [14] GONZALEZ-GUTIERREZ J, ARBEITER F, SCHLAUF T, et al. Tensile Properties of Sintered 17-4PH Stainless Steel Fabricated by Material Extrusion Additive Manufacturing[J]. *Materials Letters*, 2019, 248:165-168.
- [15] SINGH G, MISSIAEN J M, BOUVARD D, et al. Additive Manufacturing of 17-4 PH Steel Using Metal Injection Molding Feedstock: Analysis of 3D Extrusion Printing, Debinding and Sintering [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 47:102287.
- [16] 屈聪, 孟智娟, 赵亮, 等. 基于变弹性模量的 Ti-6Al-4V 板材五点弯曲回弹预测 [J]. *中国机械工程*, 2022, 33(16):1991-1999.
- QU Cong, MENG Zhijuan, ZHAO Liang, et al. Prediction of Five-point Bending Springback of Ti-6Al-4V Plates Based on Variable Elastic Modulus [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 33(16):1991-1999.
- [17] 王勇刚, 郭一冰, 董逸君, 等. 基于分形维数的预腐蚀铝合金疲劳寿命预测 [J]. *机械工程材料*, 2022, 46(12):79-84.
- WANG Yonggang, GUO Yibing, DONG Yijun, et al. Fatigue Life Prediction of Pre-corroded Aluminum Alloy Based on Fractal Dimension Method [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2022, 46(12):79-84.

(编辑 张 洋)

作者简介:姜世杰*,男,1985年生,副教授,博士。研究方向为熔丝成型增材制造技术。发表论文 50 余篇。E-mail:jiangsj@me.neu.edu.cn。

本文引用格式:

姜世杰,蔡尚港,英洪玮,等.17-4PH 不锈钢挤出成形制品的疲劳性能[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(7):1582-1591.

JIANG Shijie, CAI Shanggang, YING Hongwei, et al. Fatigue Property of 17-4PH Products Fabricated via Metal Material Extrusion Technique[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(7):1582-1591.