



Research  
Additive Manufacturing—Article

## 用于粉末床增材制造的铬镍铁合金粉末特征研究

Quy Bau Nguyen<sup>a,\*</sup>, Mui Ling Sharon Nai<sup>a,\*</sup>, Zhiguang Zhu<sup>a</sup>, Chen-Nan Sun<sup>a</sup>, Jun Wei<sup>a,\*</sup>, Wei Zhou<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Singapore Institute of Manufacturing Technology, Singapore 637662, Singapore

<sup>b</sup> School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 16 April 2017

Revised 16 June 2017

Accepted 4 September 2017

Available online 21 September 2017

#### 关键词

增材制造  
粉末特征  
气体雾化  
微观结构  
铬镍铁合金

### 摘要

本研究中使用不同的粉末表征技术对铬镍铁合金的原始粉末和回收粉末在粉末床增材制造 (AM) 上的流动特性、行为特征进行研究。结果发现, 选择性激光熔化 (SLM) 工艺的粒径分布 (PSD) 范围通常在 15 ~ 63  $\mu\text{m}$  之间。原始的铬镍铁合金粉末的流量约为  $28 \text{ s} \cdot (50 \text{ g})^{-1}$ , 组装密度是 60%。流变测试结果表明, 原始粉末与回收粉末相比具有更好的流动性。讨论了两种粉末之间的相互关系。运用铬镍铁合金粉末已经成功打印出了螺旋桨。实验结果表明铬镍铁合金粉末适用于增材制造 (AM), 本研究为生产增材制造粉末提供参考。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

铬镍铁合金 718 (IN718) 是一种重要的镍基超合金, 因其优良的力学性能、耐疲劳性和耐腐蚀性[1–4], 被广泛用于高附加值的工程应用, 如航空航天领域的喷气发动机和核电厂的蒸汽发生器, 同时也被应用于国防和海洋等领域。此合金具有适中的硬度, 当其服役时硬度会增加。传统的制造方法是通过真空电磁感应进行熔炼和高精度加工[5]。然而, 因为铬镍铁合金去除几层材料之后会硬化, 即产生加工硬化效应, 刀具磨损很快, 这使铬镍铁合金的加工成为一个重大的挑战。

增材制造 (AM) 又称三维 (3D) 打印, 通过逐层堆积的方式实现铬镍铁合金的近净成形, 即用最小

的后处理或不需要后加工的铬镍铁合金原料制造一个近净成形的组件[6–8]。一方面, 打印过程参数, 如激光功率、扫描速度、粉层厚度和扫描间距, 对合金的制备起着至关重要的作用[9–12]。另一方面, 铬镍铁粉原材料对打印过程和部件的质量也有一定的影响。文献检索显示, 到目前为止, 在成功地优化铬镍铁合金粉工艺方面已经有一定数量的研究。然而, 在研究粉末特性, 特别是用于 AM 的铬镍铁合金的粉末特性相关的研究十分有限[13,14]。本文的研究对 IN718 粉末的特性和行为提出了前瞻性见解, 并且对于铬镍铁合金粉的颗粒形状、粒径分布 (PSD)、表面结构、流变或流动特性以及组装行为给予了特别的关注。

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [nguyenqb@simtech.a-star.edu.sg](mailto:nguyenqb@simtech.a-star.edu.sg); [mlnai@simtech.a-star.edu.sg](mailto:mlnai@simtech.a-star.edu.sg); [jwei@simtech.a-star.edu.sg](mailto:jwei@simtech.a-star.edu.sg)

## 2. 实验步骤

本研究使用的原始IN718粉末的化学成分如表1所示。经过10次重复打印，对回收的粉末进行取样，与原始粉末进行对比以观察其变化。使用不同的粉末表征技术和设备进行对比，如激光粒度分析仪HORIBA LA-960、霍尔流量计、标称密度杯、攻丝装置、FT4粉末流变仪和场发射扫描电子显微镜（FESEM）。另外还用EOS-M400选择性激光熔化（SLM）系统进行样品制备。

### 2.1. 粒度分析仪

HORIBA LA-960激光粒度分析仪的工作原理是根据ISO 13320-1标准，使用激光散射技术来量化粒度、

粒径分布以及特定粒度下的颗粒分布。将少量折射率为1.958的IN718粉末样品，倒入折射率为1.333的去离子水中。在测量前，将粉末进行机械和超声波搅拌、循环和脱气。通过连续五次读取自动模式和五次手动模式测量以确认结果的一致性。结果如表2所示。

### 2.2. 显微镜分析

用FESEM观察IN718粉末的形状、粒径分布、表面形态、表面结构和卫星效应。另外，用光学显微镜观察粉末的内部孔隙率、缺陷和横截面，结果如图1和图2所示。

### 2.3. 霍尔流量计测量流量

采用ASTM B213标准对原始粉末和回收粉末的霍

表1 IN718原始粉末与回收粉末的化学组成

Material	Ni	Ti	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Mn	Si	Al	Co	Cu
Virgin (wt%)	52.35	0.85	20.12	3.04	5.10	Balance	0.013	0.09	0.08	0.60	0.16	0.012
Recycled (wt%)	52.32	0.83	20.15	2.96	5.05	Balance	0.019	0.08	0.08	0.55	0.15	0.011

表2 原始和回收的IN718粉末的粒径分布及霍尔流量

Material	$D_{10}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{90}$ ( $\mu\text{m}$ )	Hall flow rate ( $\text{s} \cdot (50 \text{ g})^{-1}$ )
Virgin	$21.37 \pm 0.43$	$31.24 \pm 0.97$	$49.52 \pm 0.76$	$28.35 \pm 0.32$
Recycled	$21.92 \pm 0.54$	$32.35 \pm 0.78$	$50.71 \pm 0.85$	$29.47 \pm 0.42$

" $D_{10}$ ", " $D_{50}$ ", and " $D_{90}$ " mean the particle sizes at 10 vol%, 50 vol%, and 90 vol%, respectively.

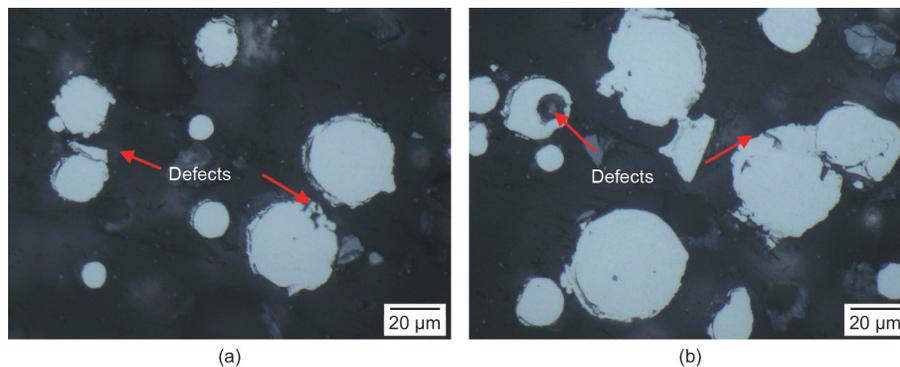


图1. 原始粉末(a)和回收粉末(b)的横截面。

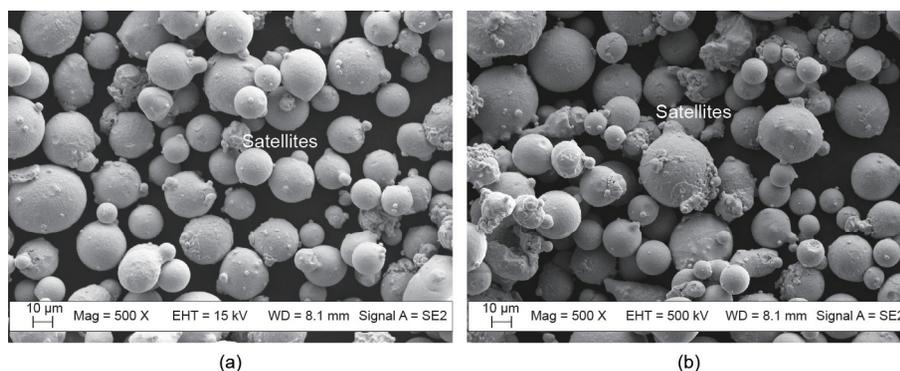


图2. 原始粉末(a)和回收粉末(b)的粒径分布及表面形态。

尔流量进行测试。每种粉末称量50 g，精度为0.0001 g，并轻轻地倒入霍尔流量计漏斗中。然后将漏斗底部的排放口打开，使粉末自然流动。同时启动计时装置，来记录流量的持续时间。使用原始粉末进行五次测量；将这些值取平均值，结果如表2所示。

#### 2.4. 流变测量

到目前为止，FT4粉末流变仪是最强大的通用粉末测试仪，可以定量测量粉末在运动中的流动阻力。可以在不同的条件，如稳定性、可变量率、堆积状态、可压缩性（CPS）、充气、渗透性和壁摩擦下运行。在本研究中，进行了稳定性和变流量测试，得到了基本流动能（BFE）、稳定性指数（SI）、流速指数（FRI）、

比能（SE）和体积密度（CBD）等参数，如表3和图3所示。

#### 2.5. 表观密度、堆积密度和实际密度

表观密度根据ASTM B212标准进行测量。在霍尔流量计漏斗下放置25 cm<sup>3</sup>的标称密度杯。随后将粉末倒入漏斗中，使其流下并完全填满杯子。使用非磁性刀片来平整杯子顶部的粉末。杯子内部粉末的重量除以标称体积（25 cm<sup>3</sup>）表示粉末表观密度。重复五次实验以确保数据一致性。

根据ASTM B527标准，使用攻丝装置来测量堆积密度。将粉末称重并倒入量筒中。频率为300 tap·min<sup>-1</sup>，共进行了3000次。将量筒上最高和最低读数之间的平均

表3 原始和回收的IN718粉末的流变测试结果

Material	BFE (mJ)	SI	FRI	SE (mJ·g <sup>-1</sup> )	CBD (g·mL <sup>-1</sup> )	CPS (% at 15 kPa)
Virgin	1032 ± 11	1.03 ± 0.04	1.09 ± 0.03	3.32 ± 0.06	4.63 ± 0.05	2.8 ± 0.2
Recycled	1091 ± 13	1.07 ± 0.07	1.15 ± 0.06	3.75 ± 0.09	4.37 ± 0.07	4.3 ± 0.3

Material	Cohesion (kPa)	UYS (kPa)	MPS (kPa)	FF	AIF (°)	WFA (°)
Virgin	0.3 ± 0.1	0.9 ± 0.1	12.5 ± 0.6	15.1 ± 0.3	23.4 ± 0.2	15.1 ± 0.4
Recycled	0.5 ± 0.1	1.5 ± 0.2	13.1 ± 0.8	8.8 ± 0.5	23.7 ± 0.2	17.4 ± 0.4

CPS: compressibility; UYS: unconfined yield strength; MPS: major principle stress; FF: flow function; AIF: angle of internal friction; WFA: wall friction angle.

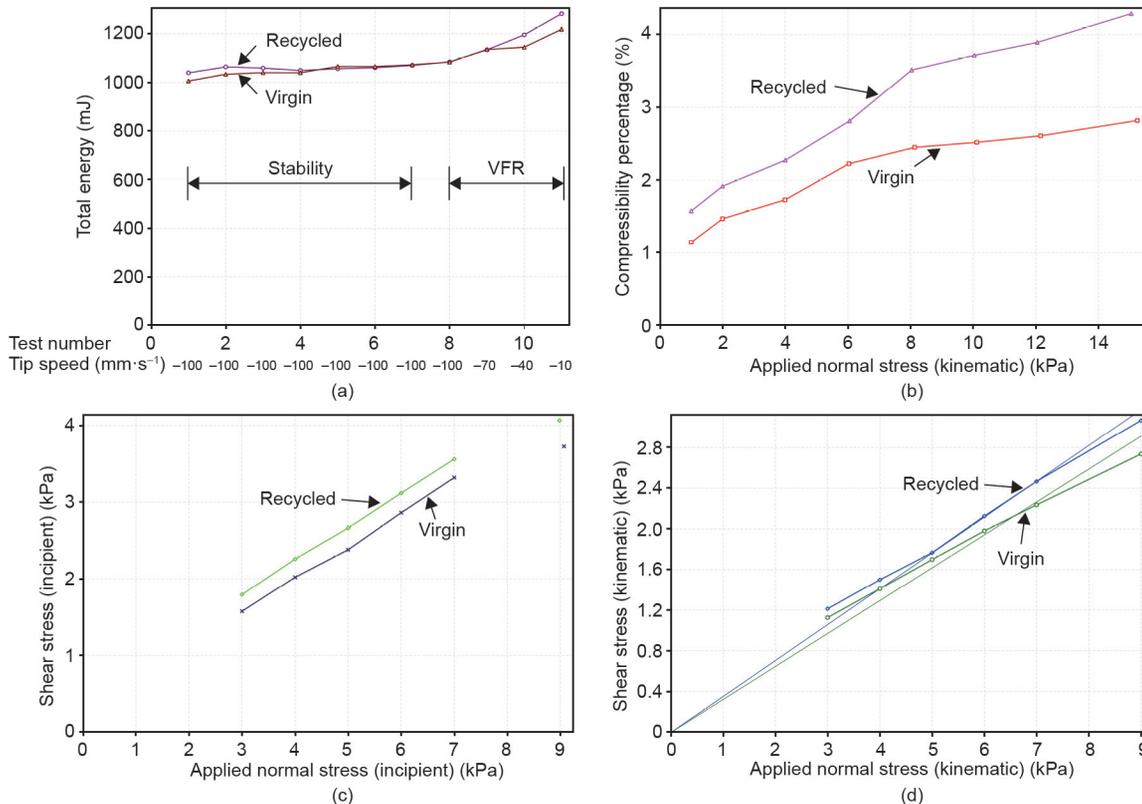


图3. 原始和回收的IN718粉末的流变测试结果。(a) 稳定性和变流量（VFR）测试；(b) CPS测试；(c) 剪切试验；(d) 壁摩擦测试。

体积作为粉末的堆积体积。用原始粉末进行五次测量，并取平均值。

根据ASTM B923标准，使用AccuPyc II 1340气体置换比重测量系统测量粉末的实际密度。将粉末称重并倒入校准过的铝圆筒（10 cm<sup>3</sup>）中。因为氦气能够穿透粉末颗粒之间的非常小的间隙，所以用它测定介质的位移。用测量的气体膨胀之前和之后的压力差来计算粉末的体积。为了确保测量的准确性，每个粉末样品测量20次，结果列于表4。

## 2.6. 选择性激光熔融装置（EOS-M400）

使用尺寸为400 mm×400 mm×400 mm且激光功率为1 kW的EOS-M400 SLM设备进行拉伸试样和螺旋桨样品制备。工艺参数：激光功率为300 W，扫描速度为1500 mm·s<sup>-1</sup>，激光扫描间距为55 μm和层厚40 μm。图4展示了制备的螺旋桨的图像，图5显示了拉伸性能和典型的显微结构。

## 2.7. 拉伸测试

根据AMS 5664标准对拉伸样品先进行标准热处理，再进行固溶热处理（即在1040℃加热2 h，然后在空气中冷却），然后进行沉淀硬化处理（即在720℃保温8 h，然后冷却到620℃再保温8 h）[15]，最后，根据ASTM E8标准，使用配备有自动视频引伸计的Instron 592测试机，在应变速率10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>下进行拉伸测试。

# 3. 结果与讨论

## 3.1. 粒径分布

了解粒径分布至关重要，因为不同的3D打印技术对粉末粒径的要求相同，如SLM目前使用的颗粒大小为15 ~ 63 μm，而电子束熔化（EBM）技术，由于电火花效应等技术挑战[7,9]，粒径分布范围从45 μm到105 μm不等。

表2给出了根据ISO 13320-1标准，使用HORIBA LA-960激光粒度分析仪，分析不同镍铬铁合金粉末样品的粒径分布结果。另外，图1和图2分别显示了粉末

的内部缺陷和形态。在实践中，气体雾化后，粉末将被筛选至不同尺寸，应用多样各异，如微型金属注射成型（micro-MIM）、热喷焊和3D打印[16]。

如表2所示，SLM应用的平均粒径( $D_{50}$ )约为31 μm。粒径分布对3D打印部件，特别是对打印部件表面质量有直接影响。较低的平均粒度会使打印部件有较好的表面粗糙度。图4显示了采用SLM设备制造的IN718合金螺旋桨。SLM制造的零件精加工表面非常光滑，表面粗糙度值为(7.447±1.683) μm。平均粒径 $D_{50}$ 不是影响部件质量的唯一因素，粒径的范围也会有所影响。较宽的粒径分布范围易导致不均匀铺展层的出现，且使打印部分的表面十分粗糙。Spierings等[17]用较窄的粒径分布范围(7.12 ~ 24.17 μm、19.84 ~ 41.13 μm和15.26 ~ 55.54 μm)进行实验，观察到具有最低粒径分布的样品在力学性能和表面质量等方面都有显著改善。

通过观察打印过程可以发现，如果粒径分布范围太大，激光功率不能完全熔化最大的颗粒，或者会使小颗粒过度熔化，导致飞溅/未熔化的颗粒/孔，且出现球化/膨胀效应。另外，实验表明，在SLM打印过程中，由于惰性气体流动，太小的粉末颗粒（即小于几微米）会沿着涡流湍流飞散[8]。因此建议在使用SLM技术制备样品时，粉末的粒径分布范围应至少在15 μm至63 μm之间。

## 3.2. 3D 打印技术粉末的流动性

流动性是增材制造中粉末的重要参数，因为它可以模拟粉末刮削过程中发生的情况。在各种形状的粉末颗粒（不规则、角形和球形）中，只有球形颗粒可以提供最高的流动性，因为这种粉末的颗粒与相邻粉末颗粒的接触面积最小，因而产生较小的内部摩擦力，可以在最小的刮削动力下驱使流动[18]。

表2给出了根据ASTM B213标准测出的原始粉末和回收粉末的霍尔流量。与原始IN718粉末的流量28.35 s·(50 g)<sup>-1</sup>相比，回收粉末的流量略低，为29.47 s·(50 g)<sup>-1</sup>。这是由回收粉末颗粒的球形度下降导致，且回收粉末也易于相互黏着（图2）。此外，回收粉末在回收过程中，如在爆破、筛分、储存和重新加载过程中可能与水分接

表4 原始和回收的IN718粉末的表观密度、堆积密度和实际密度及其密实度

Material	Apparent density (g·cm <sup>-3</sup> )	Tapped density <sup>a</sup> (g·cm <sup>-3</sup> )	True density (g·cm <sup>-3</sup> )	Packing at apparent density (%)	Packing at tapped density (%)
Virgin	3.8780 ± 0.0172	4.9123 ± 0.0153	8.1794 ± 0.0059	47.4 ± 0.3	60.0 ± 0.2
Recycled	3.7875 ± 0.0191	4.8755 ± 0.0165	8.1803 ± 0.0035	46.3 ± 0.5	59.2 ± 0.6

<sup>a</sup> This result was calculated after 3000 taps.

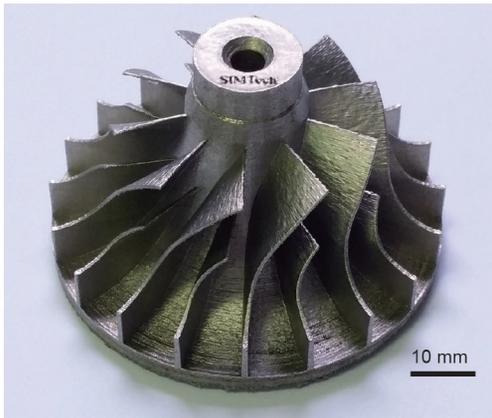


图4. 使用EOS-M400机器打印的螺旋桨。

触，如在热带环境中，空气湿度能达90%，极大地影响粉末在刮削过程中的流动性能，从而对打印部件产生负面影响。在本研究中，粉末总是储存在湿度均衡的干燥箱中，湿度恒定保持在23%。此外，在进行测试之前，在真空烘箱进行粉末祛湿十分重要[8]。

通过流变试验获得的原始粉末和回收粉末的稳定性和可变速率、可压缩性、剪切和壁摩擦的数据如表3和图3所示[19]。一般来说，在4种不同的测试（即稳定性和可变速率、可压缩性、剪切和壁摩擦测试）中，原始粉末具有比回收粉末更好的流变性质（流动特性）。图3（a）中的稳定区域表明，原始粉末和回收粉末在第七次循环测试中很稳定，并且稳定性指数接近于1，如表3所示。

此外，基本流动能和（或）比能测试的结果显示，移动原始粉末和回收粉末（分别为1032 mJ和1091 mJ）需要更高的能量。较轻的粉末如铝合金粉末比这些较重的粉末需要的能量更少（约150 mJ）。而且，可变量模拟了当刮削速度发生变化时，刮削过程中发生的情况。FRI的结果表明，当刮削速度较低时，移动粉末需要更多的能量。

表3和图3还显示回收的IN718粉末的压缩比（4.3%）比原始粉末的压缩比（2.8%）高得多。这表明在打印过程中，与熔体相邻的一些原始粉末易发生熔化和变形（图2）。较高的压缩百分比会影响部件密度和质量。这一结果在剪切和壁摩擦试验中得到了进一步证实，因为变形粉末需要更多能量相互移动，并且会对叶片造成更大摩擦[19]。

### 3.3. 粉末密度和密实度性能

3D打印中的一些粉末容易流动，而另一些则不容

易流动。在粉末刮削过程中粉末颗粒紧密堆积的方式对于3D打印制备致密部件非常重要。有几种方法可以测量粉末的密度；这些方法包括测量表观密度、堆积密度、实际密度和粉末床密度。表观密度模拟粉末的疏松组装状态，并根据ASTM B212标准进行测量。堆积密度表明自粉末应力组装状态，它是根据ASTM B527标准进行测量的。真实密度表示粉末的体积密度，并且根据ASTM B923标准使用比重瓶测量。测量增材制造中金属粉末密度最实用的方法是粉末床密度。尽管一些研究人员试图研究粉末床密度，但目前还没有相关的测量标准[20,21]，面临的挑战主要有：①确定打印过程中的实际层密度；②确定如何优化相关的增材制造加工参数，以达到最高的粉末填充率，并获得更高质量的成型件。

表4给出了原始和回收IN718粉末的密度结果。可以观察到原始粉末的表观密度和堆积密度比回收10次的粉末的密度高，这可能是由于回收后的球形粉末发生变形导致。然而，由于具有孔隙缺陷的颗粒已经被重新熔化，且包埋的气体随后被去除，所以回收粉末的实际密度略高于原始粉末密度。与其他形状的颗粒相比，球形颗粒具有最高的组装密度[22]。由于重力的影响，较大的粉末比小粉末具有更高的填充容量。粒径分布更宽的粉末比稍窄的粉末具有更好的组装能力。

文献检索表明，不同的设备，如Arcam、EOS、Concept Laser和3D Systems使用不同的粉末扩散技术，会导致不同的粉末床密度。目前使用软或硬涂层的粉末组装密度为47%~55%，与表观密度下的填充容量相似（表4）[4,7]。其他3D打印机使用滚筒技术来散布和压缩粉末，据称这样可以获得更好的粉末床密度和更高质量的内置组件。如果粉末床密度提高（堆积密度从47%~55%增加到60%~65%，增加了20%~30%），打印时间将会大大缩短。

### 3.4. 拉伸性能

打印出拉伸试样，并使用通用的Instron 5982试验机对经过热处理的拉伸试样进行试验。表5显示了使用原始粉末和回收粉末打印的部件的力学性能，以及使用原始粉末制造零件的平均显微硬度为325 HV、屈服强度（YTS）为1210 MPa、极限强度（UTS）为1404 MPa、延伸率为18.5%。很显然，增材制造所产生的力

学性能超过了传统方法所产生的力学性能[5]。这是因为增材制造过程中熔池的凝固速度快（约 $10^7\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ），材料具有致密微观组织（图5）。同样值得注意的是，当分析回收粉末的化学成分时，发现原始粉末和回收粉末之间的变化可以忽略不计（表1）。当原始粉末回收多次后，只要回收的粉末经过充分筛分并储存在湿度可控的环境中[8]，力学性能的微小变动就可以忽略不计。

## 4. 结论

增材制造是一项新兴的技术，将挑战目前构件制备的设计局限性，并开创一种制造具有复杂特征组件的新方法。粉末输入必须通过严格的标准，以满足打印质量、尺寸精度和表面质量要求，特别是在化学成分和粉末粒径分布、形状、流动特性和组装能力等方面。目前IN718粉末可以用于3D打印。研究表明，粉末通过适当的处理、筛分和储存后可以被重复使用。然而，为了获得更多球形颗粒和更少的卫星粉末来促进颗粒更好的流动性和组装能力，进一步优化气体雾化过程是必不可少的。

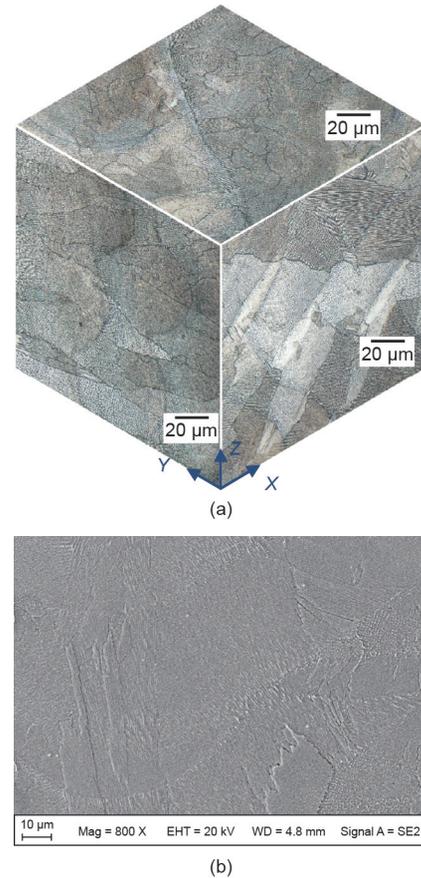


图5. IN718的典型显微结构。(a) 3D视图；(b) 放大倍数更高，显示XZ平面的柱状结构。

表5 原始和回收的IN718粉末印刷部件的力学性能

Material	Microhardness (HV)	0.2YTS (MPa)	UTS (MPa)	Elongation (%)
Virgin	325 ± 12	1210 ± 25	1404 ± 32	18.5 ± 1.6
Recycled	321 ± 17	1178 ± 31	1369 ± 35	17.4 ± 1.7

## Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support provided by A\*STAR Additive Manufacturing Centre (AMC) Initiative: Work package 1—High temperature materials development for 3D additive manufacturing (142680088).

## Compliance with ethics guidelines

Quy Bau Nguyen, Mui Ling Sharon Nai, Zhiguang Zhu, Chen-Nan Sun, Jun Wei, and Wei Zhou declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## References

- [1] Kulawik K, Buffat PA, Kruk A, Wusatowska-Sarnek AM, Czyska-Filemonowicz A. Imaging and characterization of  $\gamma'$  and  $\gamma''$  nanoparticles in Inconel 718 by EDX elemental mapping and FIB-SEM tomography. *Mater Charact* 2015;100:74–80.
- [2] Chlebus E, Gruber K, Kuźnicka B, Kurzac J, Kurzynowski T. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting. *Mater Sci Eng A* 2015;639:647–55.
- [3] Lundström E, Simonsson K, Gustafsson D, Månsson T. A load history dependent model for fatigue crack propagation in Inconel 718 under hold time conditions. *Eng Fract Mech* 2014;118:17–30.
- [4] Jia QB, Gu DD. Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. *J Alloys Compd* 2014;585:713–21.
- [5] Trosch T, Strößner J, Vökl R, Glatzel U. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Mater Lett* 2016;164:428–31.
- [6] Thompson MK, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell RI, Gibson I, et al. Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Ann—Manuf Techn* 2016;65(2):737–60.
- [7] Sadowski M, Ladani L, Brindley W, Romano J. Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process. *Addit Manuf* 2016;11:60–70.
- [8] Herzog D, Seyda V, Wycisk E, Emmelmann C. Additive manufacturing of metals. *Acta Mater* 2016;117:371–92.
- [9] Helmer H, Bauereiß A, Singer RF, Körner C. Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting. *Mater Sci Eng A* 2016;668:180–7.
- [10] Fox JC, Moylan SP, Lane BM. Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Procedia CIRP* 2016;45:131–4.
- [11] Strößner J, Terock M, Glatzel U. Mechanical and microstructural investigation of nickel-based superalloy IN718 manufactured by selective laser melting (SLM). *Adv Eng Mater* 2015;17(8):1099–105.
- [12] Carter LN, Martin C, Withers PJ, Attallah MM. The influence of the laser scan

- strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *J Alloys Compd* 2014;615:338–47.
- [13] Appleyard D. Powering up on powder technology. *Met Powder Rep* 2015; 70(6):285–9.
- [14] Frazier WE. Metal additive manufacturing: A review. *J Mater Eng Perform* 2014; 23(6):1917–28.
- [15] Raghavan S, Zhang BC, Wang P, Sun CN, Nai MLS, Li T, et al. Effect of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties in selective laser melted INCONEL 718 alloy. *Mater Manuf Processes* 2017;32(14):1588–95.
- [16] Dawes J, Bowerman R, Trepleton R. Introduction to the additive manufacturing powder metallurgy supply chain. *Johnson Matthey Technol Rev* 2015;59(3):243–56.
- [17] Spierings AB, Herres N, Levy G. Influence of the particle size distribution on surface quality and mechanical properties in AM steel parts. *Rapid Prototyping J* 2011;17(3):195–202.
- [18] Clayton J. Optimising metal powders for additive manufacturing. *Met Powder Rep* 2014;69(5):14–7.
- [19] Freeman R. Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders—A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell. *Powder Technol* 2007;174(1–2):25–33.
- [20] Strondl A, Lyckfeldt O, Brodin H, Ackelid U. Characterization and control of powder properties for additive manufacturing. *JOM* 2015;67(3):549–54.
- [21] Karapatis NP, Egger G, Gygax PE, Glardon R. Optimization of powder layer density in selective laser sintering. In: *Proceedings of 10th Solid Freeform Fabrication Symposium*; 1999 Aug 9–11; Austin, USA; 1999. p. 255–63.
- [22] German RM. *Particle packing characteristics*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, Princeton; 1989.