

# 3D 打印用 TC4 粉末的制备及其同步辐射 CT 技术表征

赵少阳, 汤慧萍, 陈刚, 殷京瓿, 王建, 葛渊, 李增峰, 谈萍

(西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 利用雾化技术制备球形 TC4 合金粉末, 利用 SEM、同步辐射 CT 扫描-三维重建等分析手段对异常颗粒粉体以及不同粒径的 TC4 合金粉末表面和内部的孔缺陷进行了表征。实验结果表明, 制备的 TC4 合金粉末随着粉末粒径减小, 粉体表面由凹凸不平的冷凝收缩痕迹渐变为光滑表面, 粉体内部的孔隙逐渐减少, 且孔隙尺寸也随之减小。由于雾化过程中凝固与球化时间的差异及飞行轨迹的不同等原因导致了包裹式、连体式、椭球形、卫星粉等异常粉末颗粒的生成; 同步辐射 CT 扫描-三维重建表明, 粉末内部的孔隙率和孔隙尺寸随着粉末粒度的增大而增大。

**关键词:** 雾化; TC4 合金粉末; 显微结构; 同步辐射 CT 扫描

**中图分类号:** TF122

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2018)12-3853-07

近年来, 伴随着 3D 打印快速成形技术的飞速发展, 球形钛及钛合金粉末因其流动性好、杂质含量低等优点已经成为 3D 打印技术重要的基础原料<sup>[1]</sup>, 其制品已广泛应用于航空、航天、船舶、能源、汽车及生物医用植入体等领域<sup>[2-10]</sup>。同时, 为了改善粉末品质, 并提高 3D 打印制品的性能, 对球形钛及钛合金粉末的性能表征研究显得尤为重要。

刘娜等人<sup>[2]</sup>对氩气雾化 Ti-6Al-4V 合金粉末的特性研究表明, 由于氩气不溶于金属, 氩气雾化金属粉末中存在的孔隙在热等静压过程中无法消除, 从而传递至其制品内部, 影响其最终制品的性能。大量孔隙的存在将有损合金的性能, 尤其将导致缺口持久寿命和疲劳强度的恶化<sup>[11,12]</sup>。汤慧萍等人<sup>[13]</sup>对电子束 3D 打印 (SEBM) 技术成形过程中缺陷形成与控制的研究发现, SEBM 成形过程中, 空心粉中含有的气体来不及逃逸, 从而在成形零件中残留形成气孔, 此类气孔主要分布在晶粒内部, 经热等静压处理后也难以消除, 进而影响制品的质量。因此, 原始粉末的性能在一定程度上影响或决定了其 3D 打印制品的最终性能。由此可见, 研究原始粉末性能, 对优化 3D 打印技术工艺以及提高 3D 打印制品的质量而言意义重大。但是, 目前国内外对球形钛合金粉末的研究主要集中于粉末的制备过程及工艺、粒径对显微组织与杂质含量的影响、粉末的形貌及相组成等等。相对应的检测表

征手段则主要包括扫描电子显微镜 (SEM)、光学显微镜 (OM)、差热分析 (DSC)、X 射线衍射 (XRD) 以及透射电子显微镜 (TEM) 等, 其中 OM、SEM 是用来表征粉末表面及内部形貌和显微组织的主要方法。但是, 需要指出的是, 这 2 种手段都具有一定的局限性, 即只能表征粉末表面或某个方位横截面的显微形貌及组织, 不能全方位地分析粉末的整体性能。然而, 通过同步辐射 X 射线照相术可以对粉末样品显微形貌及组织进行逐层分析, 最终通过软件进行三维重建还原粉末的整体信息, 从而克服上述难题。此外, 国外已经利用同步辐射 X 射线照相术研究了球形铝基合金粉末的三维微观组织<sup>[14]</sup>, 并观察到了其形核凝固组织的三维分布, 这对研究制粉过程中合金液滴凝固过程的内在机理同样具有重要价值。

因此, 本研究提出利用同步辐射 X 射线照相技术全方位地分析球形钛合金粉末的孔隙缺陷, 并分析了粉末粒径对孔隙尺寸、孔隙率的影响, 同时还分析了异常颗粒粉体以及不同粒径粉末的表面和截面缺陷, 这将对优化后续的制粉工艺具有很好的指导意义。

## 1 实验

本实验以 TC4 棒材为原料, 采用水冷铜坩埚雾化制粉设备经过抽真空、水冷铜坩埚熔炼、氩气雾化等工艺步骤成功制备出球形 TC4 合金粉末。将制备的

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51604228); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2016KTZDCY-02-01)

作者简介: 赵少阳, 男, 1987 年生, 工程师, 西北有色金属研究院金属多孔材料国家重点实验室, 陕西 西安 710016, 电话: 029-86231095, E-mail: zhaosy1987@163.com

TC4 粉末装进内径为 1 mm 的毛细玻璃管中，再将针管中吸入的不显影胶水注入至毛细玻璃管内，用来固定粉末颗粒的位置。通过同步辐射照相机分层切片扫描，获得平面分辨率为 0.65 μm 的灰度图像，再利用软件经过三维重建技术还原粉末真实的内部形貌，误差为 0.01%。

采用振动筛分法对制备的粉末进行粒度分级；采用 JSM-6700 扫描电子显微镜 (SEM) 观察不同粒径粉末的表面及截面显微形貌；采用上海光源 BL13W1 线站的 X 射线同步辐射照相机对制备的粉末进行切片照相；采用 VG Studio MAX 2.2 软件对照片进行三维重建处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 异常形状粉体

气体雾化制备金属粉末过程中，利用雾化气体的冲击力作用于熔融液流，使气体的动能转换为熔体的表面能，熔融液滴在表面能的驱动下，最终冷却形成粉末颗粒。Dombrowski 等人<sup>[15]</sup>通过模拟实验提出了液流破碎模型，金属液流首先发展成膜，而膜是极不稳定的，它继续发展成波状，随后成半波状破碎成带状，最终破碎成液滴。金属液滴的冷却及凝固过程遵循基本的金属凝固机理，See 和 Johnson 在 Niciporenko 和 Naida 的研究基础之上<sup>[16]</sup>，加上释放潜热所需时间，得到了总的凝固时间  $t_{sol}$ <sup>[17]</sup>：

$$t_{sol} = \frac{d\rho_1}{6h_c} \left[ c_p \ln \left( \frac{T_1 - T_g}{T_m - T_g} \right) + \frac{\Delta H}{T_m - T_g} \right] \quad (1)$$

式中， $d$  为液滴直径， $\rho_1$  为液滴密度， $h_c$  为传热系数， $c_p$  为液体金属的比热， $T_1$ 、 $T_g$ 、 $T_m$  分别为液体的过热温度、气体温度和液体金属熔点， $\Delta H$  为焓变。变形液滴恢复至球形所需时间是决定粉末形状的一个重要参数，随后，Niciporenko 和 Naida 又得出液滴所需的球化时间  $t_{sph}$ <sup>[16]</sup>：

$$t_{sph} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\pi^2 \mu_1}{V\sigma} \cdot (R^4 - r^4) \quad (2)$$

式中， $V$  为液滴的体积； $\mu_1$  为液滴粘度， $\sigma$  为表面张力， $R$ 、 $r$  分别为液滴球化之后和之前的半径。如果液滴在表面张力发生作用之前凝固（即  $t_{sol} \leq t_{sph}$ ），粉末为球形，否则粉末将呈不规则形状（即  $t_{sol} \geq t_{sph}$ ）。为了表征粉末形状的规则程度，Kuhn 经过大量实验和理论研究，进一步发展了粉末形状控制方程<sup>[18]</sup>：

$$L/D = 1 + (L_o/D_o - 1) \exp \left[ -\frac{t}{t_c} \cdot \left( \frac{\sigma}{m} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中， $t$  为总凝固时间， $m$  为粉末颗粒的质量， $t_c$  为金属从熔化温度冷却至熔点的时间， $L/D$  为有效长度和直径比（即形状系数）， $L_o/D_o$  为线性颗粒的最初形状系数。令式中  $t$  等于式中的  $t_{sol}$ ，从而计算出凝固粉末的形状系数  $L/D$ ，形状系数是一个重要的表征粉末形状的参数。

雾化制粉过程中，熔融金属液滴受机械、气流、冷却速率等多重因素的影响，液滴的破碎方式也各不相同，因而会产生一些形状异常的粉末颗粒，如包裹式、孪生式、椭球形、卫星粉等。图 1 为氩气雾化制备的形状异常 TC4 合金粉末的表面形貌。由图 1a 可见，球状粉末外包着一层金属薄膜，粉末球体上的树枝晶组织清晰可见。这种包裹式粉末是雾化过程中被高压氩气击碎的熔融金属小液滴还未来得及球化，在离心力作用下被甩到已经结晶凝固的粉末上形成的，从而导致球状粉末外包着一层金属薄膜，形成整体包裹或者部分包裹。外面的金属膜由于凝固时冷却速度快，树枝晶来不及析出长大，所以在扫描电镜下难以观察到树枝晶形貌。液滴在已凝固的粉体上铺开的程度与液滴的质量和离心力大小有关。由图 1b 可见，2 个粉末体连接在一起形成孪生状，粉体上可以看到清晰的细针状组织。这是因为在雾化过程中，受韦伯参数 ( $We$ ) 的影响，该种液滴的破碎方式属于气雾化过程中液滴连体式破碎中的一种<sup>[19-22]</sup>，当液滴还未被进一步击碎前，便已经开始凝固，从而形成孪生状。因液滴体积小，冷却速度快的原因，粉体上的细针状组织判定为针状马氏体相<sup>[23]</sup>。某些粉末还会呈现椭球状，由图 1c 所示，这种椭球状粉末是雾化过程中尚未凝固的金属熔滴受到气流的冲刷作用大于熔滴的表面张力，表面张力形成圆球体的趋势减弱，尚未球化前便凝固，即  $t_{sol} \geq t_{sph}$ ，从而形成椭球状粉体，同时粉末的长径比  $L/D$  大于 1。另外，大颗粒粉末周围伴有小颗粒粉末（见图 1d），这种卫星粉是雾化过程中 2 个粉体在未完全凝固的状态下在复杂的气流中相互碰撞接触到，从而粘结在一起所形成的。熔滴在凝固过程中其飞行速度和轨迹受到重力和气流冲刷的双重作用，容易与已经凝固的小尺寸颗粒发生碰撞，形成粘结或焊接现象<sup>[24-30]</sup>。

这些形状异常的粉末数量虽少，但是它们的存在严重降低了粉末的松装密度和流动性，并且在 3D 打印成形过程中易产生熔合不良的现象。为了减少粉末制备过程中形状异常粉末，作者认为提高金属熔液的过热度、增加熔滴表面张力、降低熔融液流的粘度、增加雾化气体压力、减小雾化距离等措施以促使粉末细化，因为颗粒细小粉末在短时间内能够冷却凝固前

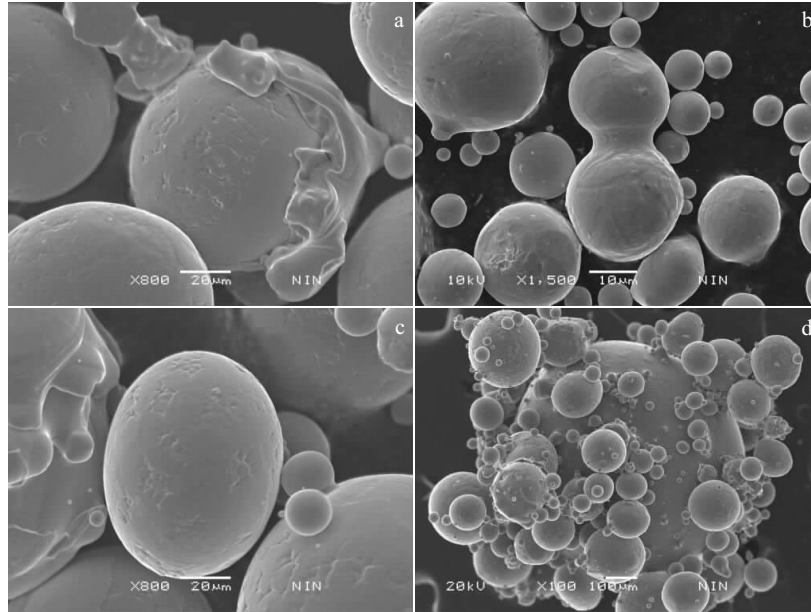


图 1 气雾化 TC4 粉末的异常颗粒形貌

Fig.1 Morphologies of abnormal gas atomized TC4 powders: (a) wrapped, (b) twins, (c) ellipsoids, and (d) satellite powders

快速球化，从而形成球形度高、卫星粉少的粉末颗粒，这将是有效的解决途径。

### 2.2 不同粒径粉末的显微组织、孔缺陷

图 2 为不同粒径粉末的表面显微形貌表征。由图 2a 可见，粒径较大 TC4 粉末表面表现为发达的呈近似等轴花瓣状的胞状枝晶组织，粉末表面凹凸不平且有

一定量的微小缩孔存在（图 2b 中箭头所指）。这是因为，在气雾化过程中，不同粒径粉末的冷却速率存在差异，大尺寸熔滴因体积大，冷却速度较慢，同时凝固收缩现象较严重，从而使得大尺寸熔滴凝固后在表面遗留下明显的凹凸不平的凝固收缩痕迹<sup>[25-27]</sup>，晶粒间凝固速率不同步，造成收缩不均匀，导致微小孔隙

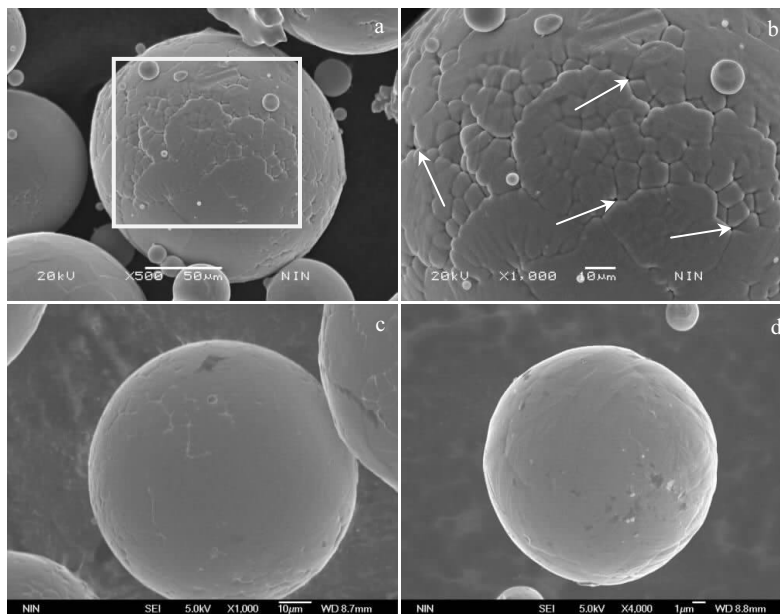


图 2 不同粒径粉末的表面显微表征

Fig.2 Surface micrographs of powders with different particle sizes: (a, b) 170 μm, (c) 85 μm, and (d) 38 μm

的生成。TC4 合金粉末快速冷却时，体心立方的  $\beta$  相通过无扩散相变过程转变为密排六方结构的  $\alpha$  相，因而表面呈现近似等轴花瓣状的胞状枝晶组织<sup>[23,24]</sup>。随着粉末粒径的减小，粉末表面则越光滑，并且其组织越细化，见图 2c。小尺寸熔滴因其体积小，冷却速率快，当冷却速率极高时，就会造成结晶过程的抑制，形成无结晶组织的光滑表面，如图 2d 所示。

金属液滴在雾化过程中由于雾化气体陷入等原因可能会形成一定量的空心粉末颗粒<sup>[13]</sup>，图 3 是不同粒径的气雾化粉末截面显微形貌图。从图中可见，大颗粒尺寸粉末内部孔隙较多，且孔尺寸较大，随着粉末粒径的减小，粉末中的孔隙也减少且孔尺寸明显减小。如图 3d 所示，粒径  $>250 \mu\text{m}$  的粉末颗粒内部形成了近球形孔隙，孔隙直径为  $60 \mu\text{m}$  左右。如图 3e 所示，粒径约为  $110 \mu\text{m}$  的粉末颗粒内部也形成了近球形孔隙，孔隙直径则约为  $25 \mu\text{m}$ 。这是因为在气雾化过程中，高压气体对熔融金属的破碎作用与其快速冷却同时进行，鉴于“布袋式”液滴破碎机理<sup>[5]</sup>，当气体陷入熔滴时，液滴的快速冷却可能会导致气体不能进一步破碎液滴，等液滴凝固后，无法进一步逸出，从而导致气体陷入凝固后的粉末形成气孔。大尺寸熔滴的破碎，需要大量气体的冲刷和陷入，相应地形成孔隙尺寸也较大。随着雾化气体进一步破碎液滴，液滴粒径减小，气体则很难融入细小液滴，陷入到细小熔滴的气体则相对较少，因而孔尺寸也相对变小，相应的形成内部孔隙的几率也随之降低。如图 3f 所示，粒径

约为  $40 \mu\text{m}$  小尺寸粉末颗粒，因其雾化破碎过程先于冷却凝固过程结束，所以在其截面未观察到气孔。

金属粉末中的这种孔隙缺陷对粉末性能影响极大，在热等静压成形以及 3D 打印快速成形中都无法彻底消除，但当其制品在随后的热处理或高温环境下使用时仍极易发生热诱导孔隙长大，形成了冶金缺陷，使其力学性能下降，严重影响制件的疲劳寿命和强度<sup>[13]</sup>。

### 2.3 粉末显微 CT-三维重建及孔隙表征

粉末的孔缺陷分析研究对于提高粉末质量，减少空心粉，以及优化制粉工艺而言尤为重要。传统的显微镜观察金属粉末截面缺陷形貌，单独的截面观察是难以反映缺陷的真实形貌，该方法也无法实现无损探测，同时破坏或剖开粉末时可能造成截面结构的改变，难以进行精确的定量研究。利用同步辐射 X 射线照相术 (CT 扫描) 和三维重建技术可弥补截面缺陷分析的不足，通过 CT 扫描可以对粉末样品进行逐层分析，将显微 CT 扫描的图像数据导入到 VG Studio Max 2.2 软件进行三维重建及可视化处理，并通过计算分析还原粉末的整体信息<sup>[31]</sup>。如图 4a 所示，粒径为  $200 \mu\text{m}$  的粉末经显微 CT 扫描和三维重建，将粉末内部的显微形貌以三视图形式清晰且直观地反映出来。三维形貌图有助于精确地表示出缺陷的位置、大小，并可以统计出体积、表面积、孔隙率等信息。

图 4 为不同粒径粉末显微 CT 扫描-三维重建形貌图。由图 4b 可见，粉末粒径为  $210 \mu\text{m}$  的颗粒，其显微 CT 扫描-三维重建形貌图中有 1 个明显的大尺寸孔

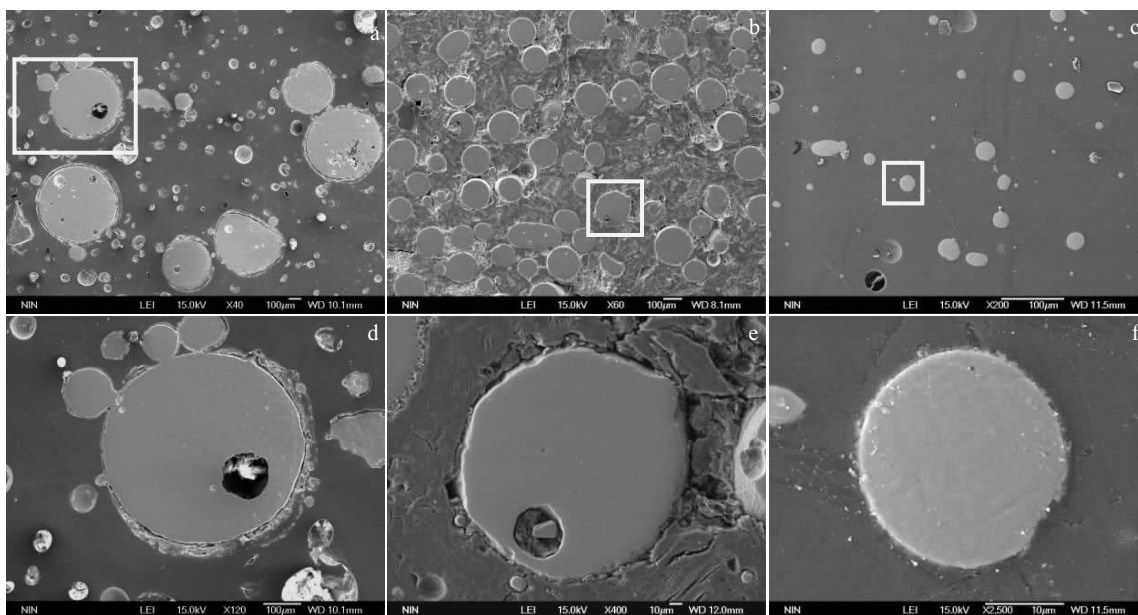


图 3 不同粒径粉末的截面显微表征

Fig.3 Microstructure characteristics of particles with different particle sizes: (a, d)  $\geq 250 \mu\text{m}$ , (b, e)  $74\sim 150 \mu\text{m}$ , and (c, f)  $\leq 47 \mu\text{m}$

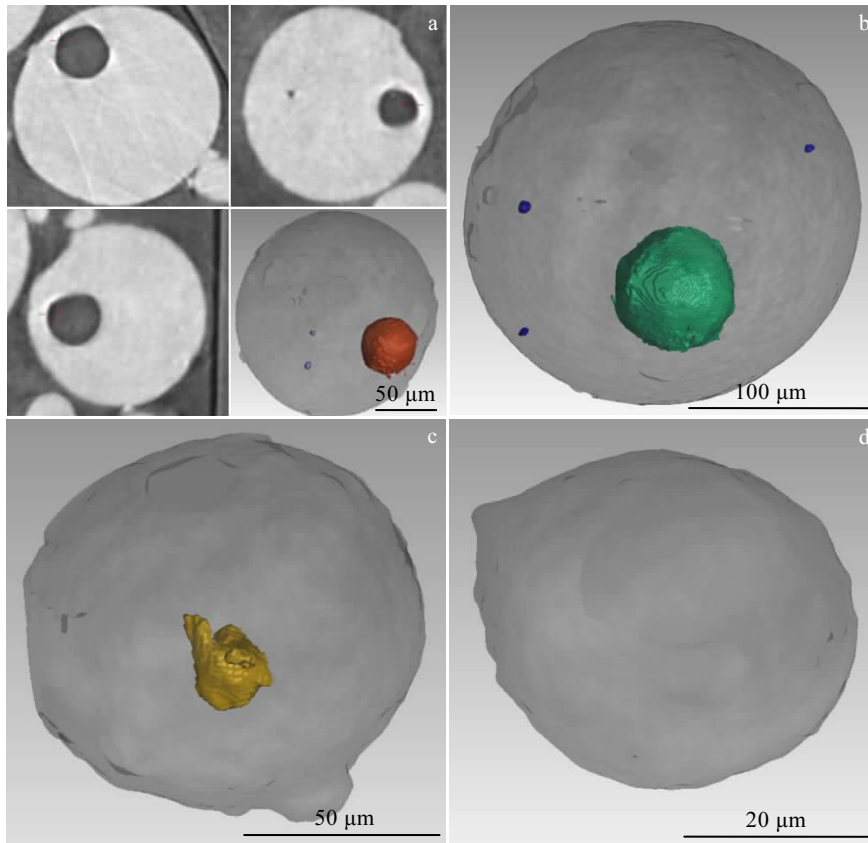


图 4 不同粒径粉末 CT 扫描-三维重建形貌图

Fig.4 CT scan and three-dimensional reconstructed topography of powders with different particle sizes:  
(a) 200 μm, (b) 210 μm, (c) 95 μm, and (d) 40 μm

隙及 3 个小尺寸孔隙，孔隙率为 2.2%，大尺寸孔隙直径约为 60 μm。这可能由于，在气雾化过程中，高压氩气陷入到熔融金属液滴里面，还未将熔融液滴彻底破碎，熔融液滴在快速冷却的作用下已经凝固，从而将气体“困”在粉末内部<sup>[13]</sup>。同时，因为熔融金属液滴在快速冷却时，陷入到熔滴的气体在表面能最小化的作用下具有形成球状的趋势，因而金属粉末内部的孔隙缺陷形貌为类球形。我们发现，随着粉末粒径的减小，粉末颗粒内部孔隙缺陷也随之减少。由图 4c 可见，粒径为 95 μm 的粉末颗粒内部孔隙直径约为 10 μm，孔隙率降至 0.4%。由图 4d 可见，粉末粒径为 40 μm 的颗粒，其显微 CT 扫描-三维重建缺陷图中无明显的孔隙。这是由于，细小颗粒主要是通过大液滴完全破碎而来，此

时雾化气体鲜有陷入到细小金属熔融液滴里，从而凝固后的小尺寸粉末颗粒内无明显的孔隙缺陷存在。

表 1 为根据三维重建数据所统计的不同粒径粉末的孔隙率，从表 1 可见，当粉末粒度为  $44.3 \pm 6.0 \mu\text{m}$  时，粉末内部的孔隙率很低，只有  $(0.1 \pm 0.1)\%$  左右；然而，随着粉末粒径的增大，粉末内部的孔隙率也在增大。当粉末粒径在 40~170 μm 之间时，粉末孔隙率由  $(0.1 \pm 0.1)\%$  缓慢增加到  $(0.6 \pm 0.1)\%$ ；而当粉末粒径增至  $228.2 \pm 11.8 \mu\text{m}$  时，粉末内部的孔隙率急剧增加至  $(2.5 \pm 0.3)\%$  左右。气雾化过程中，高压气体对熔融金属的破碎作用与快速凝固同时进行，作者认为通过调整雾化工艺，使金属熔滴在未开始冷却凝固前，就已彻底雾化破碎，以制取更多的细颗粒粉末，从而有

表 1 基于三维重建数据统计出的不同粒径 TC4 粉末的孔隙率

Table 1 Porosities of TC4 powders as a function of particle size based on the three-dimensional reconstructed data				
Particle size/μm	228.2±11.8	171.7±7.6	99.7±5.5	44.3±6.0
Porosity/%	2.5±0.3	0.6±0.1	0.4±0.1	0.1±0.1

效解决气体陷入的问题,这也是本研究细颗粒粉末内部孔隙率低的主要原因。

### 3 结 论

1) 本研究制备的 TC4 合金粉末由于雾化过程中凝固与球化时间的差异及飞行轨迹的不同等原因产生了椭圆状、连体式、包裹式、卫星粉等异常粉末颗粒。

2) 随着粉末粒径减小,粉体表面由凸凹不平的冷凝收缩痕迹渐变为光滑表面,粉体内部的孔隙逐渐减少且孔隙尺寸也随之减小。

3) 同步辐射 CT 扫描-三维重建结果表明,粉末内部的孔隙率和孔尺寸随着粉末粒度的增大而增大。

#### 参考文献 References

- [1] Zhang Ning(张宁), Chen Suiyuan(陈岁元), Yu Xiao(于笑) *et al. Journal of Materials and Metallurgy*(材料与冶金学报)[J], 2016, 15(4): 277
- [2] Liu Na(刘娜), Li Zhou(李周), Yuan Hua(袁华) *et al. Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2010(S1): 307
- [3] Zhang Yanhong(张艳红), Dong Bingbin(董兵斌). *Mechanical Research & Application*(机械研究与应用)[J], 2016, 29(2): 203
- [4] Zou Haiping(邹海平), Li Shangkui(李上奎), Li Bo(李博) *et al. China Metal Bulletin*(中国金属通报)[J], 2016, 8: 88
- [5] Tan Sisi(覃思思), Yu Yong(余勇), Zeng Guiyu(曾归余) *et al. Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2016, 26(5): 21
- [6] Wang Jianjun(王建军). *Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2016, 26(5): 1
- [7] Liang Yongren(梁永仁), Wu Yinjiang(吴引江). *World Non-ferrous Metals*(世界有色金属)[J], 2016, 12: 150
- [8] Mao Xinhua(毛新华), Liu Xin(刘辛), Xie Huanwen(谢焕文) *et al. Materials Research and Application*(材料研究与应用)[J], 2017, 11(1): 13
- [9] Zou Liming(邹黎明), Xie Huanwen(谢焕文), Liu Xin(刘辛) *et al. Materials Research and Application*(材料研究与应用)[J], 2015, 9(4): 222
- [10] Yuan Guang(原光). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015
- [11] Dreshfield R L, Jr Miner R V. *Powder Metallurgy International*[J], 1980, 12: 83
- [12] Miner R V, Dreshfield R L. *Met Trans A*[J], 1981, 12: 261
- [13] Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jian(王建), Lu Shenglu(逯圣路) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2015, 34(3): 225
- [14] Ilbagi A, Henein H. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2014, 45(4): 2152
- [15] Dombrowski N, Johns W R. *Chem Eng Sci*[J], 1963, 18: 203
- [16] Nichiporenko O S, Naida Y I. *Soviet Powder Metallurgy Metal Ceramic*[J], 1968, 7(7): 509
- [17] See J B, Johnson G H. *Powder Technology*[J], 1978, 21(1): 119
- [18] Kuhn H A, Rowley A. *New Technology and Analysis of Powder Metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982: 17
- [19] Rabin B H, Smolik G R, Korth G E. *Materials Science and Engineering A*[J], 1990, 124(1): 1
- [20] Markus S, Fritsching U, Bauckhage K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2002, 326: 122
- [21] Mi J, Grant P S, Fritsching U *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 477(1-2): 2
- [22] Antipas G S E. *Powder Metallurgy*[J], 2013, 56(4): 317
- [23] Zhao Shaoyang(赵少阳), Chen Gang(陈刚), Tan Pin(谈萍) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(5): 980
- [24] Gao Zhenjiang(高正江), Zang Guoqing(张国庆), Li Zhou(李周) *et al. Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2011, 29(2): 93
- [25] Liu Na(刘娜), Li Zhou(李周), Yuan Hua(袁华) *et al. Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2011, 23(2): 537
- [26] Hu Wenbo(胡文波), Jia Chengchang(贾成厂), Hu Benfu(胡本芙) *et al. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*(粉末冶金材料科学与工程)[J], 2011, 16(5): 671
- [27] Li Zhou(李周), Zhang Guoqing(张国庆), Zhang Yifei(张翼飞). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2005, 15(2): 335
- [28] Sun Jianfei(孙剑飞), Cao Fuyang(曹福洋), Shen Jun(沈军) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2002(3): 1
- [29] Xu Rui(徐瑞), Cui Yuyou(崔玉友), Li Dong(李东) *et al. Chinese Journal of Materials Research*(材料研究学报)[J], 1995, 9(3): 228
- [30] Lin Xin(刘辛), Luo Jiewen(骆接文), Xie Huanwen(谢焕文) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(S1): 253
- [31] He Zihua(何子华), Dao Li(刀力), Jian Yutao(简裕涛) *et al. Chinese Journal of Stomatological Research*(中华口腔医学研究杂志)[J], 2016, 10(3): 172

## Preparation of TC4 Powder for 3D Printing and Characterization of Synchrotron Radiation CT

Zhao Shaoyang, Tang Huiping, Chen Gang, Yin Jing'ou, Wang Jian, Ge Yuan, Li Zengfeng, Tan Ping  
(State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The spherical TC4 alloy powders were prepared by gas atomization. The surface and internal pore defects of TC4 alloy powders with different particle sizes were characterized by SEM, synchrotron radiation CT scanning and three-dimensional reconstruction. The experimental results show that the surface of the powder gradually changes from the condensed shrinkage trace to smooth surface with the decrease of particle size. The number and size of pores in powders also gradually decrease with the decrease of particle size. The formation of anomalous powders with the morphologies of wrapping, conjoined, ellipsoid and satellite is resulted from the difference of coagulation and spheroidization time and the different flight trajectories during the atomization process. The results of three-dimensional reconstruction by synchrotron radiation CT scanning show that the porosity and pore size of the powder increase with the increase of particle size.

**Key words:** gas atomization; TC4 alloy powder; microstructure; synchrotron radiation CT scan

---

Corresponding author: Chen Gang, Ph. D., Engineer, State Key Laboratory of Porous Metal Materials, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, Tel: 0086-29-86231095, E-mail: mychgsu@163.com