

# 粉末粒形对钨粉末注射成形喂料流变性能的影响

胡 可<sup>1,2</sup>, 杨世松<sup>1,3</sup>, 邹黎明<sup>1,2</sup>, 韩胜利<sup>1,2</sup>, 崔利群<sup>1,2</sup>, 刘 辛<sup>1,2</sup>

(1. 广东省科学院 广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650)

(2. 国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心, 广东 广州 510650)

(3. 南昌航空大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘 要:** 采用图像法定量表征了钨粉的粒形与粒度, 研究了粉末粒形对钨粉末注射成形喂料流变性能的影响。结果表明: 窄粒径钨粉 (NPW) 与球形钨粉 (SW) 粒度基本一致; SW 比 NPW 具有更好的球形度、表面光滑度以及分散度。采用相同的有机粘结剂, SW 的粉末装载量为 64%, 高于 NPW 的 59%。与 NPW 相比, SW 喂料表现出更优异的流动性能, 具有更低的流动行为指数和粘流激活能, 更适合注射成形。粉末粒形影响钨粉 MIM 喂料的流变性能主要源于粘结剂与粉末颗粒以及颗粒与颗粒之间的相互作用特性。

**关键词:** 图像分析技术; 粉末注射成形; 钨; 粉末粒形; 流变性能

**中图分类号:** TG146.4<sup>+</sup>11; TF12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)10-3472-07

钨具有高熔点、高密度、导热和导电性好等一系列的优异性能, 被广泛应用于航空航天、军事工业、核工业、电子电工等行业<sup>[1,2]</sup>。在电子电工领域, 钨作为骨架基体浸渗氧化物 (铝酸盐或钨酸盐) 制成钨钨阴极, 应用在大功率真空电子器件中, 如速调管、磁控管和行波管等<sup>[3]</sup>; 或者熔渗铜制成钨铜合金, 应用于电子封装、中高压真空开关、电加工电极、发汗材料中<sup>[4]</sup>。多孔钨骨架的组织结构 (如孔隙度、孔隙分布、孔隙尺寸和孔隙结构等) 对钨钨阴极和钨铜合金的性能起决定性作用, 例如: 针对钨钨阴极, 多孔钨骨架的组织结构, 决定钨原子由阴极内部向发射表面的扩散速率以及表面钨原子的吸附速率; 高性能钨钨阴极要求多孔钨骨架开孔率高 (20%~25%), 以保证足够多的钨盐填充于其中; 且孔隙均匀, 孔径分布窄, 孔隙连通性好, 以便于钨盐均匀扩散与迁移<sup>[5,6]</sup>。粉末粒形与粒度直接影响多孔钨骨架的组织结构<sup>[7,8]</sup>。工业钨粉呈不规则状, 不可避免地会导致多孔钨骨架的部分孔隙通道被阻隔, 影响后续的骨架浸渗效果<sup>[7]</sup>。而钨粉粒度分布不均匀将导致多孔钨骨架的闭孔率高、孔隙大小不一且分布不均匀。球形钨粉流动性好, 分散度高, 松装密度高。采用粒度均匀的球形钨粉制备多孔钨, 多孔钨骨架有望获得高开孔率和均匀的连通孔结构。

多孔钨骨架的常用制备方法是粉末冶金法, 如模压-烧结, 热压或热等静压。上述方法在制备具有复杂三维结构的多孔钨骨架方面存在明显不足。金属注射成形 (metal powder injection molding, MIM) 是将塑料注射成型技术引入粉末冶金, 集塑料成型工艺学、高分子化学、粉末冶金工艺学和金属材料学等多学科渗透与交叉而形成的一种新型粉末冶金近净成形技术, 其最大特点是可直接制造出具有最终形状的零部件, 最大限度地减少机加工量, 节省原材料, 解决了多年来一直困扰粉末冶金领域的复杂形状制品成型难的问题<sup>[9]</sup>。全球知名管理咨询公司麦肯锡在 2018 年先进制造与装备调查报告中将 MIM 技术排在十大先进制造技术中第二位。近年, 李睿等<sup>[8]</sup>和 Hong 等<sup>[6]</sup>采用 MIM 技术探索了钨钨阴极多孔钨骨架的制备工艺。MIM 技术的基本流程是金属粉末与有机粘结剂均匀密炼制成喂料, 再在加热塑化状态下通过注射机注入模腔内固化成形, 然后用化学或热分解的方法将成形坯中的粘结剂脱除, 最后经烧结致密化得到最终产品<sup>[9]</sup>。喂料是 MIM 中最重要的关键步骤之一, 喂料的流变性能直接影响其注射充模效果以及注射生坯的品质 (如密度分布、两相分离、缺陷等)。喂料的流变性能与粘结剂的组成和含量以及粉末特性 (如粒度、粒形和分

收稿日期: 2019-10-26

基金项目: 广东省国际合作专项 (2018A050506010); 广东省重大科技专项 (2018B090904004); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项 (2018GDASCX-0963); 广州市国际合作专项 (201907010030); 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目 (2019GDASYL-0105077); 广州市科技项目 (201906040007)

作者简介: 胡 可, 男, 1985 年生, 博士, 副研究员, 广东省科学院广东省材料与加工研究所, 广东 广州 510650, 电话: 020-61086627, E-mail: mshuke@aliyun.com

散度等)和粉末装载量有关<sup>[10]</sup>。

本研究选用 2 种不同粒形的钨粉为原料, 采用 Chio 图像分析技术表征钨粉的粒度分布、粒形和分散度; 同时以固体石蜡、聚丙烯等为有机粘结剂, 经混炼制成喂料, 采用旋转流变仪测试喂料的流变性能, 重点研究粉末粒形对钨粉 MIM 喂料流变性能的影响。

## 1 实验

实验用的 2 种原料钨粉分别为有研工程技术研究院有限公司生产的窄粒度钨粉 (NPW) 和广东银纳科技有限公司生产的球形钨粉 (SW)。粉末纯度均大于 99.9%, 氧含量低于 1000  $\mu\text{g/g}$ 。NPW 和 SW 钨粉的振实密度分别为 9.0 和 11.6  $\text{g/cm}^3$ 。采用 JSM-7401F 扫描电镜 (日本 JEOL) 观察钨粉的微观形貌。采用 500nano XY 彩色粒度和形貌分析仪 (比利时 Occhio) 对钨粉的粒度和粒形进行干法测量。将样品颗粒通过干法分散器分散在样品测试平台的载玻片上, 采用倍率自动变焦照相系统对颗粒进行拍照, 计数量为  $1 \times 10^5$  颗粒粉末。采用 callisto 3D (骄子) 粒形分析软件对获取的粉末照片进行图像分析, 获得粉末的粒度、球形度、粗糙度、赘生物指数等参数。采用对数正态分布斜率 (log-normal slope parameter,  $S_w$ ) 表征钨粉的粒度分布宽度<sup>[11]</sup>, 如式 (1) 所示:

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

式中,  $D_{90}$  和  $D_{10}$  分别为累计粒度分布数达到 90% 和 10% 时所对应的粉末粒径。

粘结剂体系为石蜡基多组元粘结剂, 其中主要组元为低熔点、低粘度、流动性好的固体石蜡 (PW), 其质量分数为 65%, 同时添加熔点较高的质量分数分别为 20% 和 10% 的聚丙烯 (PP) 和 乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA) 作为骨架组元, 以及少量的表面活性剂硬脂酸 (SA) (质量分数为 5%)。2 种钨粉的粉末装载量 (体积分数) 分别为 59% 和 64%, 将钨粉和粘结剂在密炼机中 160~170  $^{\circ}\text{C}$  下进行混炼 1 h, 冷却后于挤出机中进行挤出, 冷却破碎后得到钨粉 MIM 喂料。采用 ZRZ1452 熔体流动速率试验机 (中国 MTS) 测试喂料的熔融指数 (melt flow index, MFI), 模口为  $\Phi 2.095 \text{ mm} \times 8.0 \text{ mm}$ , 加载重量为 21.6 kg。采用 DHR-1 旋转流变仪 (美国 TA) 测试钨粉 MIM 喂料的流变性能, 剪切速率为 2~200  $\text{s}^{-1}$ , 测试温度分别为 160、170 和 180  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钨粉的粒度与粒形

图像法粒度粒形分析技术是利用显微镜原理对大

量被测颗粒进行成像, 然后通过计算机图像处理技术完成颗粒粒度的测定和形貌的定量分析。Occhio 粒度粒形分析仪的颗粒识别度为 0.2~3000  $\mu\text{m}$ 。该技术将观察测量法与统计学相结合, 可准确得到粉末颗粒的粒径和形貌统计信息, 覆盖了筛分法、显微镜法、电域敏感法和激光衍射法的特点, 具有随机性、统计性和直观性, 是目前公认的测定结果与实际粒度分布吻合最好的测试技术。图 1 为 NPW 和 SW 钨粉通过成像技术所获得的粉末颗粒轮廓二维投影形貌。根据粉末颗粒的二维投影灰度差异采用系统软件重建粉末颗粒的三维形状, 然后计算并统计得到粉末颗粒的粒度与粒形参数。图 2 为 NPW 和 SW 2 种钨粉的粒度分布曲线。由图可知, 2 种钨粉的粒径与粒度分布基本一致。表 1 详细列出了钨粉的粒径和粒度分布斜率。NPW 和 SW 钨粉的  $D_{10}$ 、 $D_{50}$  和  $D_{90}$  相差无几, 粒度分布宽度  $S_w$  也基本一致。因此, 可以在忽略不计粉末粒度对钨粉 MIM 喂料流变性能影响的提前下, 详细研究钨粉粒形对喂料流变性能的影响规律。

图 3 为 NPW 和 SW 粉末的微观形貌。从图中可以看到, NPW 呈不规则多角状, 颗粒间存在轻微的团

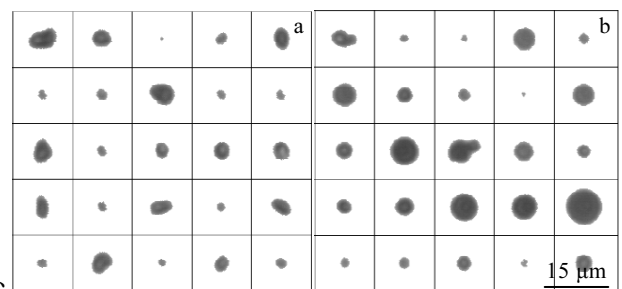


图 1 钨粉的颗粒轮廓二维投影

Fig.1 Two-dimensional projection morphologies of tungsten powders: (a) NPW and (b) SW

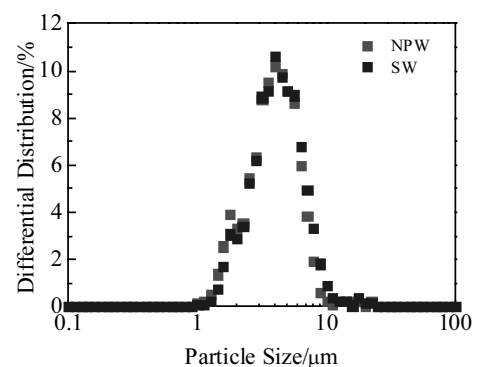


图 2 钨粉的粒度分布曲线

Fig.2 Particle size distribution of the selected tungsten powders

表 1 钨粉的粒径与粒度分布斜率

Table 1 Particle size and distribution slope parameter of the selected tungsten powders

Powder	Particle size/ $\mu\text{m}$			Slope parameter, $S_w$
	$D_{10}$	$D_{50}$	$D_{90}$	
NPW	2.11	5.35	7.10	4.86
SW	2.25	4.80	7.49	4.90

聚现象；而 SW 则呈规则球状，分散度很好。为进一步定量表征钨粉的粒形，引入瓦德尔球形度 (Wadell's sphericity)、形状因子 (Form factor) 和圆润度 (Roundness)。其中，瓦德尔球形度的定义为与给定

颗粒体积相同的球表面积与颗粒的表面积之比；形状因子是等面积圆周长与颗粒投影面积的比值；圆润度则是最大内切圆 (内径) 与最小外接圆直径的比率<sup>[12]</sup>。3 个参数的数值越接近 1，表明粉末颗粒越接近球形。图 4 为 NPW 和 SW 的粒形参数 (平均值)。与 SEM 照片结果相一致，SW 的球形度明显高于 NPW，数值上体现为 SW 的球形度比 NPW 高约 10%。

颗粒的微观结构形态和分散度 (或者团聚度) 对粉末的流动性、填充性、附着力、化学活性都有很大影响。例如，李睿等人<sup>[8]</sup>研究发现，混炼过程中剪切力对于粉末团聚的消除作用有限，团聚严重的粉末制

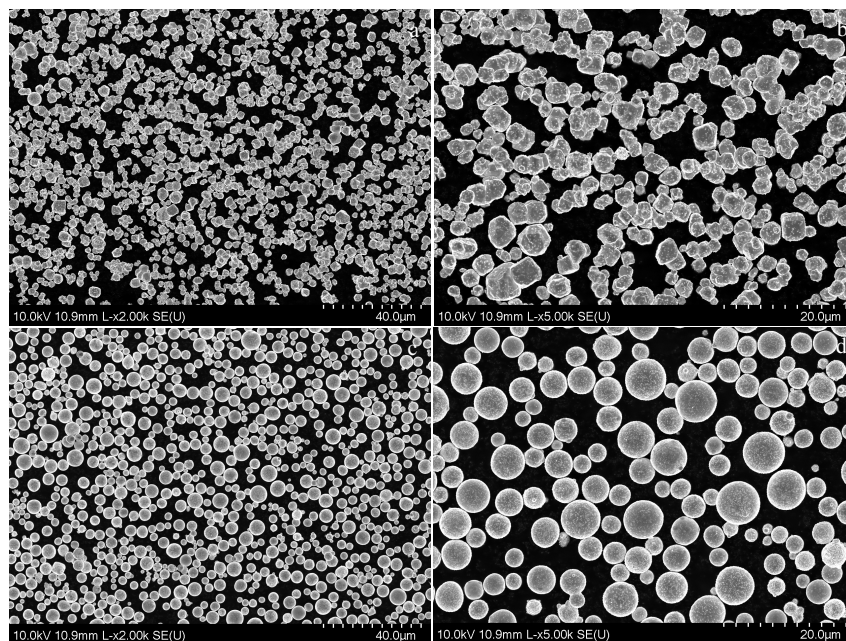


图 3 钨粉的微观形貌

Fig.3 SEM images of the tungsten powder: (a, b) NPW and (c, d) SW

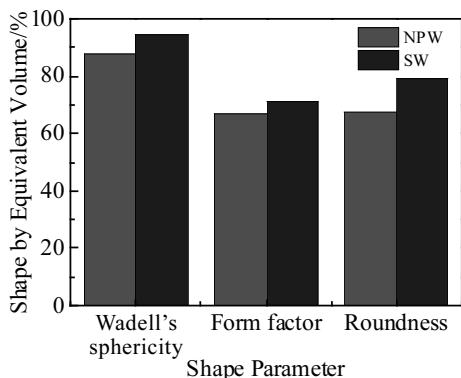


图 4 钨粉的粒形参数

Fig.4 Shape parameters of the selected tungsten powders

备的喂料微观上仍然存在不均匀现象。本研究采用粗糙度 (Roughness)、赘生物指数 (Outgrow) 和凹度 (Concavity) 表征钨粉颗粒的微观形态和分散程度。图 5 为 NPW 和 SW 钨粉的微观粒形参数 (平均值)。粗糙度 (Roughness) 是由为获得光滑表面从颗粒形状中去除的材料量来定义的。Occhio callisto 3D 采用 80% 平滑参照物，其定义是内切于颗粒投影轮廓上任意点、半径大于最大内切圆 80% 的所有圆所覆盖的区域<sup>[12]</sup>：

$$R_g^\gamma = \frac{A - A(O^\gamma)}{A} \tag{2}$$

式中， $A$  为颗粒的投影面积， $A(O^\gamma)$  为平滑参照物面积。从图 5 可知，球形钨粉 (SW) 的平均粗糙度明显低于

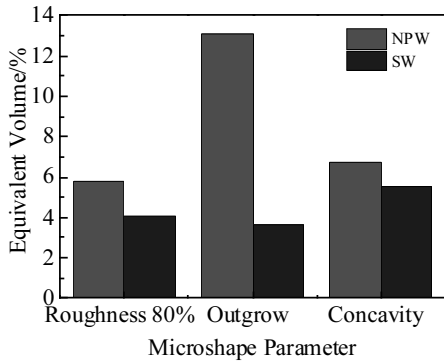


图 5 钨粉的微观粒形参数

Fig.5 Microshape parameter of the selected tungsten powders

窄粒度钨粉 (NPW)。粉末颗粒的粗糙度与两个因素有关, 一是粉末表面的凹凸度, 二是粉末表面粘连颗粒的数量。赘生物指数是衡量粉末表面粘附颗粒数量的一个重要指标<sup>[12]</sup>。赘生物指数定义为:  $outgrow = n \times 10\%$ ,  $n$  = 附着的颗粒数。凹度是指粉末颗粒的微观凹凸程度, 通常用于度量粉末颗粒的团聚程度, 其定义是:  $concavity = 1 - \text{由实际周长界定的面积} / \text{由凸包周长界定的面积}$ 。NPW 颗粒表面附着颗粒数量明显高于 SW, 其粉末颗粒的团聚程度亦是如此。因此, 结合 SEM, NPW 在微观结构上的不规则度、表面光滑程度以及分散程度均不及 SW。

综上, 图像法定量分析结果显示 SW 具有更好的球形度、表面光滑度以及分散度, 因此其粉末流动性更好(其振实密度  $11.6 \text{ g/cm}^3$  明显高于 NPW 的  $9.0 \text{ g/cm}^3$ )。因此在粒度几乎相同的情况下, 采用相同的有机粘结剂, SW 的粉末装载量为 64%, 高于 NPW 的 59%。

### 2.2 钨粉 MIM 喂料的流变性能

熔融指数 (MFI) 是测量喂料熔体流动性能的重要指标。表 2 为 NPW 和 SW 2 种钨粉 MIM 喂料不同温度下的熔融指数 (MFI)。在相同温度下, 与 NPW 相比, SW 的粉末装载量更高, 但其喂料的熔融指数反而更高。这说明粉末粒形对喂料的流动性能影响很大。由于 MIM 喂料是粘结剂与金属粉末的共混物, 其中粉末颗粒分布状况复杂, 粉末颗粒与粘结剂的结

表 2 2 种钨粉 MIM 喂料不同温度下的熔融指数 (MFI)  
Table 2 Melt flow index (MFI) of the NPW and SW feedstocks at different testing temperatures

Feedstock	MFI at different temperatures/ $\text{g} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$		
	160 °C	170 °C	180 °C
NPW	1265.2	1414.8	2700.0
SW	2016.3	2562.9	3390.4

合方式、喂料混炼技术等均会影响喂料的流动性能<sup>[13]</sup>。因此, 熔融指数只能粗略地判断 SW 喂料的流动性能优于 NPW 喂料。

图 6 为不同温度下钨粉 MIM 喂料粘度随剪切速率的变化曲线。显而易见, 2 种钨粉 MIM 喂料的粘度均随剪切速率的增加而降低, 具体表现为在低剪切速率范围内, 粘度随剪切速率增加而急剧下降; 在高剪切速率范围内, 喂料粘度随剪切速率变化趋缓直至不再发生变化, 属于典型的非牛顿流体行为, 也称为剪切变稀(假塑性)。剪切变稀行为表明增加剪切速率可促进粉末颗粒的均匀分布并使小颗粒填充到大颗粒之间的间隙中<sup>[14]</sup>。此外, 随着温度的升高, 喂料的粘度迅速下降。

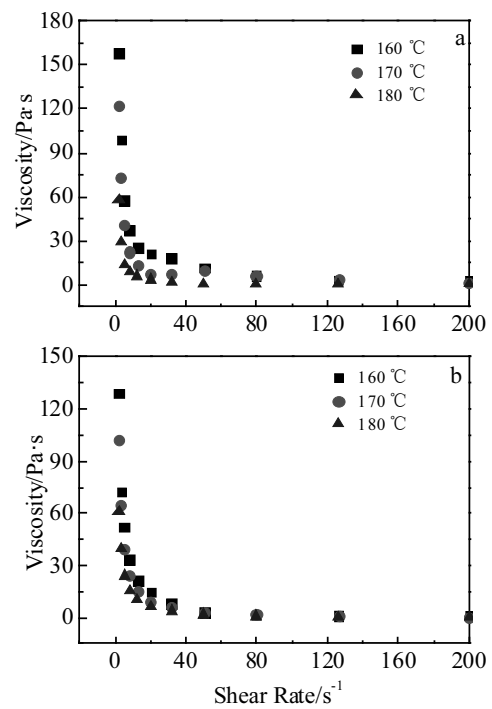


图 6 不同温度下钨粉 MIM 喂料粘度随剪切速率的变化

Fig.6 Variation of viscosity of the tungsten powder MIM feedstocks with the increasing of shear rates at different temperatures: (a) NPW and (b) SW

MIM 喂料的粘度与剪切速率符合幂律流体规律, 满足以下关系:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{3}$$

式中,  $\eta$  为表观粘度值,  $K$  为常数,  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $n$  为流动行为指数。MIM 喂料产生剪切变稀的原因是粉末颗粒的有序化和粘结剂分子的平直化<sup>[10]</sup>。 $n$  值表示喂料熔体对剪切速率的敏感性。 $n$  值过小, 喂料对剪切速率的变化过于敏感, 喂料的流变稳定性差, 不利于后续注射成形制品的保证;  $n$  值过大, 喂料的流变

稳定性变得更好，但改变剪切速率对调整喂料的流动性不起作用<sup>[10]</sup>。对式(3)两边取对数，做  $\log \eta$  与  $\log \dot{\gamma}$  的关系图(如图 7 所示)，线性拟合计算出不同温度下钨粉 MIM 喂料的流动行为指数  $n$  值，如表 3 所示。SW 喂料具有较低的流动行为指数，即 SW 喂料的剪切稀化作用明显优于 NPW 喂料。这也说明在粘结剂配方相同的情况下，球形钨粉在剪切力作用下更容易随着粘结剂分子链沿流动方向转动并有序化。

相关研究表明<sup>[15]</sup>，MIM 喂料的流动性(或者粘度)与包覆在粉末颗粒表面的粘结剂厚度有关。假设喂料中的粉末装载量为  $\Phi$ ，那么粘结剂所占体积分数实际上可划分为两部分：其中一部分粘结剂(B1)占据粉末颗粒间隙，含量为  $\Phi_{B1}$ ；而另一部分粘结剂(B2)则包裹在粉末颗粒表面，含量为  $\Phi_{B2}$ ，如图 8 的示意图所示。很显然， $\Phi + \Phi_{B1} + \Phi_{B2} = 1$ 。当粉末装载量达到最大值  $\Phi_m$  时，喂料已不具备流动性，此时包覆在颗粒表

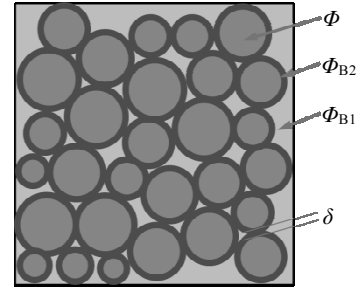


图 8 MIM 喂料的组分示意图

Fig.8 Schematic of the components (including metal powders  $\Phi$ , binder occupying the interstitial spaces  $\Phi_{B1}$  and binder coating on the powder surfaces  $\Phi_{B2}$ ) in the MIM feedstock

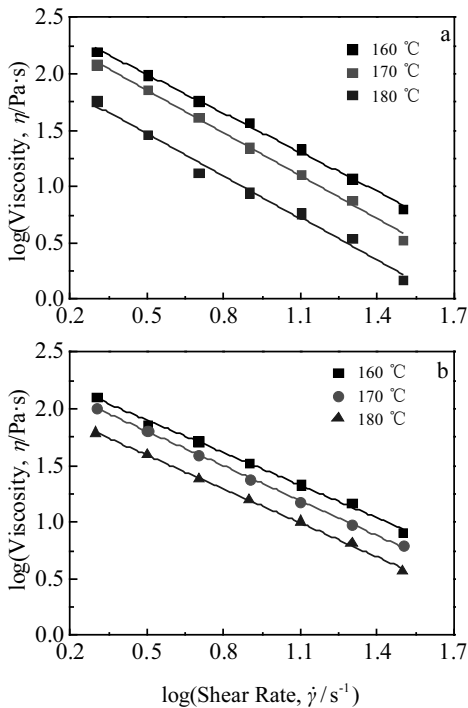


图 7 钨粉 MIM 喂料粘度与剪切速率的对数关系

Fig.7 Logarithmic correlation between viscosity and shear rate of feedstocks of NPW (a) and SW (b)

表 3 不同温度下钨粉 MIM 喂料的流动行为指数  $n$   
Table 3 Flow behavior index ( $n$ ) of the NPW and SW feedstocks at different testing temperatures

Feedstock	Flow behavior index, $n$		
	160 °C	170 °C	180 °C
NPW	0.153	0.277	0.245
SW	0.096	0.102	0.100

面的粘结相体积分数  $\Phi_{B2}$  趋于 0，也即图 8 中的粉末颗粒间距  $\delta$  等于 0。因此，通过计算喂料中粉末颗粒间距  $\delta$  可粗略判断喂料的流动性能。假设粘结剂均匀地包覆在单一粒径的球形颗粒表面，Shivashankar 等<sup>[15]</sup>推导得到 MIM 喂料中粉末颗粒间距  $\delta$  计算公式：

$$\delta = D \left[ \left( 1 + \frac{1}{\Phi} - \frac{1}{\Phi_m} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (4)$$

式中， $D$  为粉末颗粒平均粒径。通过转矩流变仪测定 NPW 和 SW 2 种钨粉的最大粉末装载量  $\Phi_m$  分别为 62% 和 67%。代入相关数据，得到 NPW 和 SW 喂料的粉末颗粒间距  $\delta$  值分别为 0.142 和 0.109  $\mu\text{m}$ 。NPW 喂料的粉末颗粒间距略大于 SW 喂料的颗粒间距。尽管计算模型是基于各种假设，但从包覆在粉末颗粒表面的粘结相厚度来看，NPW 喂料的流动性应优于 SW 喂料。然而，实验结果却恰恰相反。因此，分析认为，粉末颗粒粒形对喂料流变性能的影响应考虑粘结剂-粉末颗粒和颗粒-颗粒之间的相互作用特性：1) 不规则粉末颗粒(尤其是针状和片状颗粒)具有方向性，因此其对喂料流变性能的影响取决于它们相对于粘结剂的流动方向；2) 不规则度增强了粉末颗粒之间的相互作用，因为与球形颗粒相比，不规则颗粒间相互作用获得更大的体积势能才能保证颗粒在剪切作用下转动。

除剪切速率外，另一个影响喂料粘度的重要因素是温度。热塑性的粘结剂具有随温度升高体系粘度降低的特征。温度升高，有机分子运动加剧，金属粉末的加入导致分子运动空间减小，进而降低喂料粘度随温度增加而降低的程度。喂料粘度与温度的依存关系可用 Arrhenius 方程来描述：

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5)$$

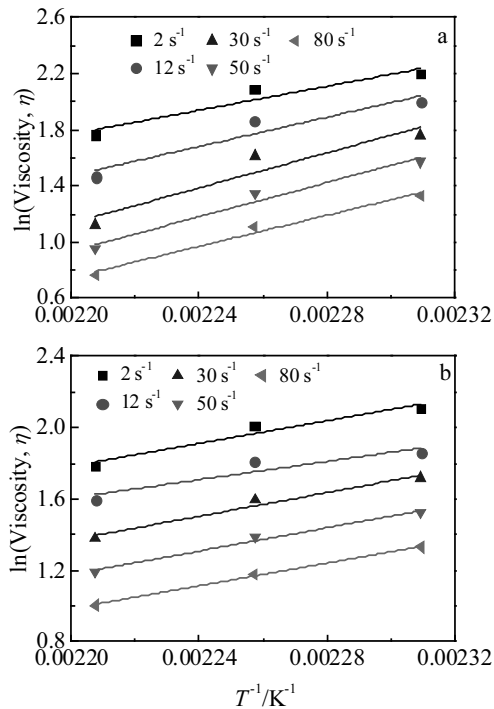


图 9 钨粉 MIM 喂料粘度与温度的关系

Fig.9 Correlation between viscosity and temperature of feedstocks of NPW (a) and SW (b)

表 4 钨粉 MIM 喂料的粘流激活能

Table 4 Flow activation energy of the NPW and SW feedstocks (kJ/mol)

Feedstock	Shear rate/s <sup>-1</sup>				
	2	12	30	50	80
NPW	35.38	43.19	51.86	50.54	45.83
SW	26.38	21.23	27.53	27.18	26.47

式 (5) 两边取自然对数, 有:

$$\ln \eta = \ln \eta_0 + \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6)$$

以  $\ln \eta$  对  $1/T$  做图 (如图 9 所示), 线性拟合求得钨粉 MIM 喂料的粘流激活能  $E_a$ , 列于表 4。 $E_a$  值表征喂料粘度对温度的敏感性, 其值越小, 表明粘度对温度的变化越不敏感。表 4 中, NPW 喂料的激活能值均大于 SW 喂料的激活能值, 且其值随剪切速率变化波动大。其原因可能是不规则的 NPW 颗粒相对于球形 SW 颗粒而言, 颗粒之间摩擦力大, 容易在剪切力的作用下发生堆积、团聚, 颗粒间碰撞加剧, 从而使得喂料体系能态升高, 导致喂料对温度的敏感性增加。

### 3 结 论

1) 球形钨粉 SW 具有更好的球形度、表面光滑度

以及分散度。在粒度基本一致的情况下, 采用相同的有机粘结剂, SW 的粉末装载量高于窄粒径钨粉 NPW。

2) 与 NPW 相比, 具有更高装载量的 SW 喂料反而表现出更优异的流动性能, 其流动行为指数和粘流激活能更低。SW 喂料更适合注射成型。

3) 粉末粒形影响钨粉 MIM 喂料的流变性能主要源于粘结剂与粉末颗粒以及颗粒与颗粒之间的相互作用特性。不规则颗粒具有方向性, 其对喂料流变性能的影响取决于它们相对于粘结剂的流动方向; 颗粒不规则度增强了粉末颗粒之间的相互作用 (如摩擦力等), 不规则颗粒间相互作用获得更大的体积势能才能保证颗粒在剪切作用下发生转动。

### 参考文献 References

[1] Zhang Menghan(张梦晗), Jiang Guosheng(姜国圣), Wang Pengwei(王鹏为) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(5): 1645

[2] Xie Yanjun(谢琰军). *Study on the Formation Mechanism of Pure Tungsten Materials Manufactured by Selective Laser Melting*(选择性激光熔化制备纯钨材料的成形机理研究)[D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2018: 21

[3] Zhou Zenglin(周增林), He Xueliang(何学良), Li Yan(李艳) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(7): 2386

[4] Zou Juntao(邹军涛), Wang Yuanyuan(王媛媛), Yang Xiaohong(杨晓红) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(7): 2661

[5] Chubun N N, Sudakova L N. *Applied Surface Science*[J], 1997, 111: 81

[6] Hong Y, Lee S, Shin J W et al. *Current Applied Physics*[J], 2016, 16: 1431

[7] Melnikova I P, Vorozheikin V G, Usanov D A. *Applied Surface Science*[J], 2003, 215: 59

[8] Li Rui(李睿), Qin Mingli(秦明礼), Chen Pengqi(陈鹏起) et al. *Vacuum Electronics*(真空电子技术)[J], 2016(5): 45

[9] Heaney D F. *Handbook of Metal Injection Molding*[M]. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012

[10] Liang Shuquan(梁叔全), Huang Baiyun(黄伯云). *Rheology for Powder Injection Molding*(粉末注射成形流变学)[M]. Changsha: Central South University Press, 2000

[11] German R M, Park S J. *Handbook of Mathematical Relations in Particulate Materials Processing: Ceramics, Powder Metals, Cermets, Carbides, Hard Materials, and Minerals*[M]. Hoboken: Wiley & Sons, Inc Publication, 2008

[12] Yang Lin(杨林). *Study on Particle Size and Shape Mea-*

- suring System Based on Dynamic Image Technique*(动态图像颗粒粒度粒形测量系统研究)[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2017: 34
- [13] Pan Chaomei(潘超梅). *Study on Simulation and Experiment of Powder Injection Molding of 316L Stainless Steel* (316L 不锈钢粉末注射成形模拟及实验研究)[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016: 22
- [14] Thavanayagama G, Pickering K L, Swan J E *et al.* *Powder Technology*[J], 2015, 269: 227
- [15] Shivashankar T S, Enneti R K, Park S J *et al.* *Powder Technology*[J], 2013, 243: 79

## Effect of Powder Shape on Rheological Properties of Tungsten Feedstocks for Metal Powder Injection Molding

Hu Ke<sup>1,2</sup>, Yang Shisong<sup>1,3</sup>, Zou Liming<sup>1,2</sup>, Han Shengli<sup>1,2</sup>, Cui Liqun<sup>1,2</sup>, Liu Xin<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

(2. National Engineering Research Center of Powder Metallurgy of Titanium & Rare Metals, Guangzhou 510650, China)

(3. School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** The particle shape and size of tungsten powders were quantitatively analyzed by image analysis technology, and the effect of particle shape on the rheological properties of tungsten feedstocks for metal powder injection molding (MIM) was also investigated. The results show that the particle size of narrow particle-sized tungsten (NPW) powder is almost the same as that of spherical tungsten (SW) powder. Compared with NPW powders, the SW powders exhibit better sphericity, surface smoothness and dispersion. When both of the powders are mixed with the same binder, SW powders show a solid loading of 64%, which is higher than 59% of the NPW powders. The SW feedstocks show better flow performance, i.e., lower flow behavior index and flow activation energy, and it thus is more suitable for injection molding. Particle shape affects the rheology of tungsten powder MIM feedstocks by changing the nature of organic binder-particle and particle-particle interactions.

**Key words:** image analysis method; powder injection molding; tungsten; particle shape; rheological property

---

Corresponding author: Liu Xin, Ph. D., Professor, Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, P. R. China, Tel: 0086-20-61086128, E-mail: shaneliu118@163.com