

增材制造具有快速、精确制造复杂部件的能力，该技术正迅速获得广泛行业的认可。随着该技术工业应用的增加，原料所处的环境和贮存条件也更加丰富。这也明显影响工艺性能和产品质量。本研究^[1]考察了两批粒径不同的不锈钢粉体，其流动特性与制备工艺及随后贮存条件的关系。结果表明，不同的烘烤过程会影响流动特性，也会影响 AM 表现，同时揭示了不同粒径的粉体在相同制备和储存条件下的不同响应。

FT4 粉体流变仪



FT4 粉体流变仪™作为通用粉体测试仪，提供自动、可靠、全面的粉体性质表征。该信息可与加工经验进行关联，提高生产效率并有助于质量控制。FT4 专注于测量粉体的动态流动特性，还可提供剪切盒测试，具有密度、可压性和透气性等整体特性的测试能力，全面表征与工艺相关的粉体性能。

动态测试采用独特的测量技术来确定粉体的流动阻力。特殊形状的桨叶沿着既定的路径穿越精确体积的粉体。当桨叶轴向移动和旋转时，作用于其的阻力和扭矩，组合产生总流动能值^[2]。



材料与方 法

使用 FT4 粉体流变仪（英国富瑞曼科技）表征 12 种不锈钢粉。将两种粒度分布（PSDs）的样品，PSD1（ $d_{50}=12\mu\text{m}$ ）和 PSD2（ $d_{50}=15\mu\text{m}$ ）分成三个批次。其中一个批次保持原始状态，另两个批次在 200°C 空气或氮气（ N_2 ）气氛中烘烤 12 小时。之后将每一批分出一半贮存于室温条件，另一半使用干燥剂贮存（每 1600g 金属粉放置 16.5g 小袋氧化钙干燥剂）。

粒径	烘烤条件	贮存
PSD1	无(原始)	干燥剂
PSD1	无(原始)	室温
PSD1	空气烘烤	干燥剂
PSD1	空气烘烤	室温
PSD1	N_2 烘烤	干燥剂
PSD1	N_2 烘烤	室温
PSD2	无(原始)	干燥剂
PSD2	无(原始)	室温
PSD2	空气烘烤	干燥剂
PSD2	空气烘烤	室温
PSD2	N_2 烘烤	干燥剂
PSD2	N_2 烘烤	室温

表 1. 粉体流变学测试的样品信息汇总

烘烤条件的影响

比较不同烘烤工艺，室温贮存的样品流动特性（见图 1）的差异。

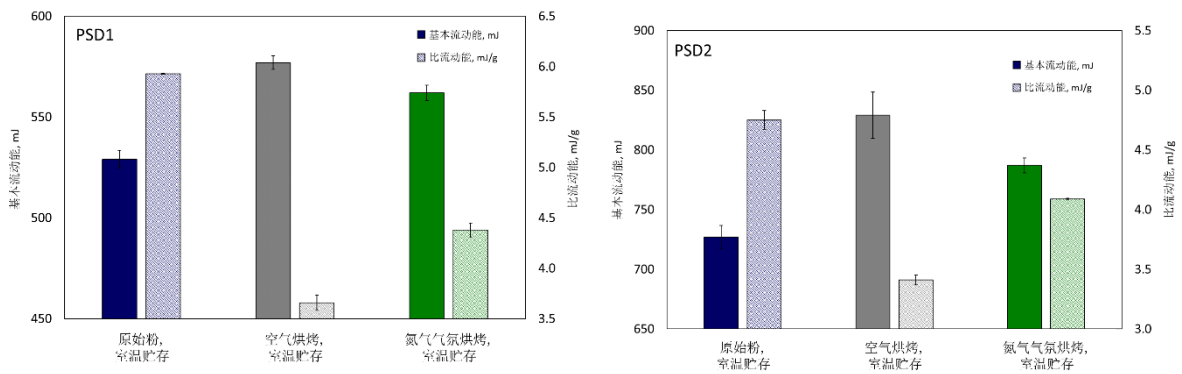


图1. 原始粉、空气烘烤和氮气气氛烘烤后室温贮存的样品 PSD1 (左) 和 PSD2 (右) 动态流动测试结果。

对于样品 PSD1 和 PSD2，空气和氮气气氛烘烤后，基本流动能（BFE）增加，比流动能（SE）降低。这说明烘烤原始粉能够减少颗粒间摩擦作用，从而获得更高效的堆积状态。空气烘烤后的变化最为明显。流动性的变化可能是由表面性能的变化所引发的。

贮存条件的影响

这一部分研究的重点是原始粉和烘烤粉在室温或使用干燥剂贮存后对于流动特性的影响。如图 2 所示，PSD1 和 PSD2 原始样品在室温贮存后相比干燥剂贮存产生的 BFE 和 SE 值更低。这表明留存的水分可能减少了浆叶穿过粉体时的阻力。

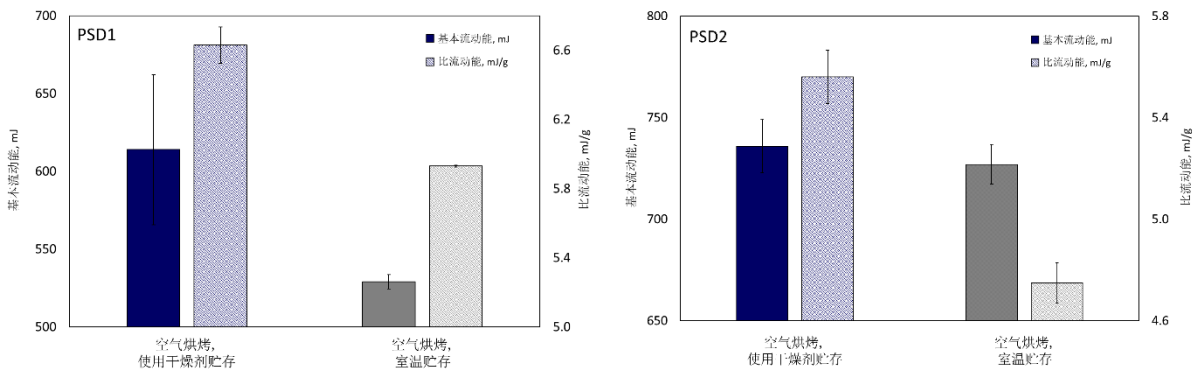


图2. 原始粉 PSD1 (左) 和 PSD2 (右) 室温或使用干燥剂贮存后的动态流动测试结果。

空气烘烤的 PSD1 样品与原始粉呈现相似的趋势，受到贮存条件的影响。使用干燥剂贮存的 PSD1 样品具有较大的 BFE 和 SE 值（图 3），说明这些材料对于贮存条件更敏感。与之相似，PSD2 样品使用干燥剂贮存时产生的 SE 值也增加。这说明粉体空气烘烤后室温贮存时低应力条件下的摩擦程度较低。室温条件下存在的水分可以充当润滑剂减少颗粒间摩擦作用。

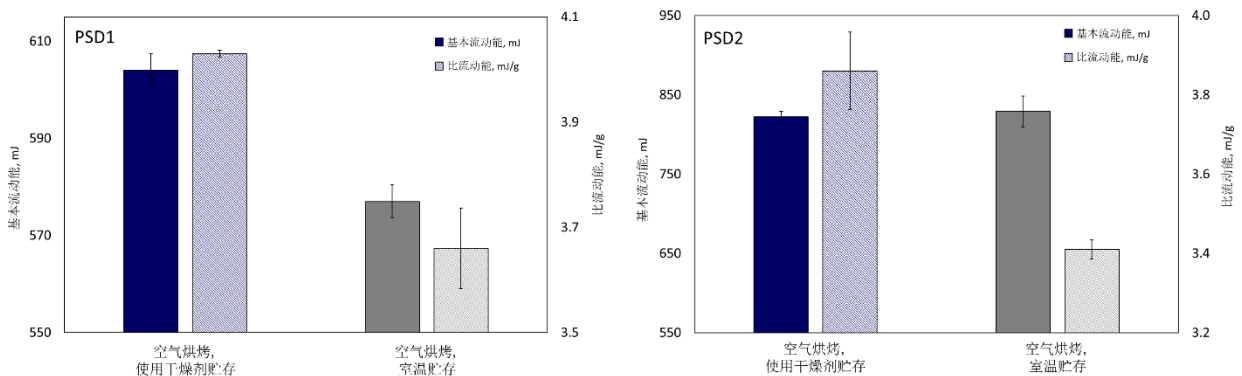


图3. 空气烘烤后室温或使用干燥剂贮存的 PSD1 (左) 和 PSD2 (右) 动态流动测试结果。

氮气气氛烘烤的 PSD1 样品室温贮存后也显示出较低的 BFE 和 SE 值。然而 PSD2 在相同的烘烤条件下室温贮存的 SE 值较低，BFE 值稍高。这表明，与空气烘烤的粉体一样，室温条件贮存会导致颗粒间摩擦和潜在机械互锁的程度降低。进一步说明存在的水分充当润滑剂的作用。

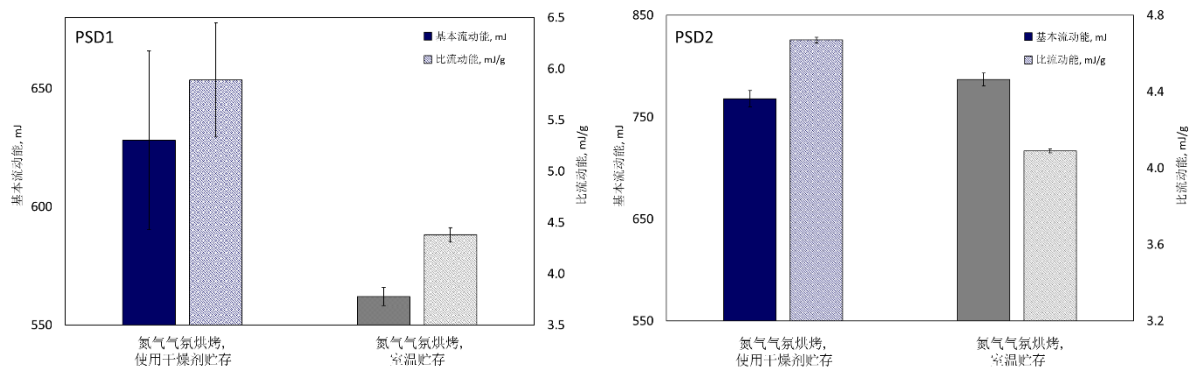


图4. 氮气气氛烘烤后室温或使用干燥剂贮存的 PSD1 (左) 和 PSD2 (右) 动态流动测试结果。

尽管不同烘烤条件导致 BFE 和 SE 存在较大的差异, 后续的贮存条件会对 PSD1 流动特性产生明显的影响, 甚至测试结果的次序也发生了变化。图 1 和图 5 说明室温条件和使用干燥剂贮存后, PSD2 结果的次序类似, 这表明贮存条件并未对该样品的粉体行为产生显著的影响。

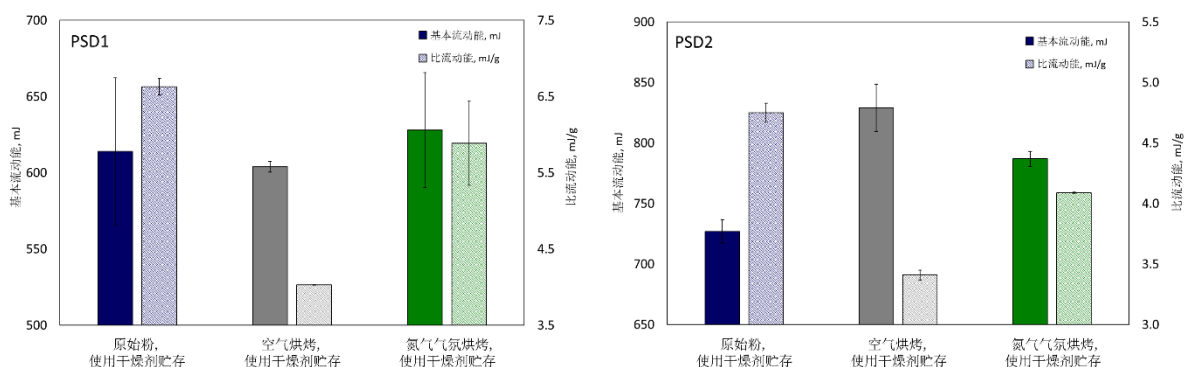


图5. 原始粉、空气烘烤和氮气气氛烘烤后使用干燥剂贮存的样品 PSD1 (左) 和 PSD2 (右) 动态流动测试结果。

然而, 对于 PSD1 样品相比室温贮存, 使用干燥剂贮存烘烤样品 BFE 并未出现明显的增加。这意味着需要另外考虑烘烤后的储存条件。如果不维持后续的贮存条件, 通过烘烤改善流动性可能也是无效的。

粒径的影响

考虑到两种不同的粒度分布, 能够区分出 PSD1 和 PSD2 之间的流动特性差异并不稀奇。通常 PSD2 所得 BFE 值较高, SE 值较低。PSD1 和 PSD2 对条件 (烘烤和贮存) 变化的响应也不同, 说明粒度分布对这些过程也有作用。

结论

大多数情况下, 烘烤粉体会使得材料在强制动态流动的过程中产生较大的阻力, 但在无约束流动条件下的阻力较小。这有可能是颗粒表面性质的改变, 从而降低了颗粒间摩擦程度。然而, 原始粉和使用干燥剂贮存的粉体在无约束流动过程中的阻力更大。室温条件下贮存粉体可以保留颗粒表面的水分并充当润滑剂的作用。

本研究展示了如何运用粉体流变学来确定并量化粉体的微小差异, 直接影响了 AM 加工的表现。即使是化学成分相同的粉体, 粒径分布的变化也会导致粉体对环境变量的响应不同。通过研究不同的粒度分布, 可以清楚地看出烘烤和贮存的影响取决于粒度分布, 并且无法单凭一组条件测试一个批次的产品来得出结论或预测。

粉体流动性不是材料的固有属性, 而是粉体在特定设备中以其所需要的方式流动的能力。成功的加工需要粉体与过程的完美匹配, 相同的粉体在一个加工过程中表现良好, 而在另一个过程中却不佳的情况并不罕见。多元特性表征为理解粉体的行为变化提供了必要的基础, 能够识别并量化任何单位操作中与加工性能最相关的粉体特性。

更多信息可拨打电话+44 (0) 1684 851 551 或通过电子邮箱 support@freemantech.co.uk 联系应用团队。

[1] Dattani R. et al., *The Effect of Preparation Techniques and Storage Conditions on the Flow Properties of Additive Manufacturing (AM) Feedstocks*. EuroPM Proceedings, 2019

[2] 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 Technology, 25-33, 174, 1-2, 2007