

# SLM 金属粉末的特性与加工

选择性激光熔化 (SLM) 技术在牙科修复体制作领域已应用了 20 多年。SLM 加工的修复体在强度和腐蚀性方面至少与铸造合金相当。本文将介绍应用于该技术的金属粉末的加工过程和所面临的挑战，以及粉末特性对牙科技工所和口腔临床的影响。

关键词: CAD/CAM, SLM, 3D 打印, 金属粉末, 强度, 腐蚀, 拉伸强度

Roland Strietzel 博士 (德)  
编外讲师 (教授)  
BEGO 公司  
roland.strietzel@bego.com

## 引言

SLM (Selective Laser Melting, 选择性激光熔化) 技术早已应用于各个制造领域。它源自快速成型 (Rapid Prototyping) 工艺系列, 属于增材 (additive) CAD/CAM 制造方法类别, 现如今又被归入 3D 打印类。

在工具或机器开发时, 人们就在寻找各种快速生产原型的方法, 以取代以往的手动且繁琐的模型加工方式。因此, 人们开始尝试并开发出了新的生产技术, 例如立体光刻 (Stereolithography) 技术。SLM 技术就是利用激光束来逐层固化粉末<sup>1</sup>。

德国贝格 (BEGO) 公司是第一家开发牙科合金 SLM 工艺并进行批量生产的公司<sup>3</sup>。2002 年, 该公司开始批量生产三种合金或者金属, 并推向德国市场。这三种合金分别是 Wirobond C+ (一种可熔融钴铬合金)、BioPonto Star++ (一种可熔融金铂合金) 以及 BEGO Titan+ (一种纯钛金属)。这是 SLM 技术被首次用于批量生产。这种生产工艺现在已经在全球范围内的牙科领域得以确立, 并被视为一种先进的工艺技术。

本文将介绍这种技术所需的粉末加工过程及粉末相关特性, 此外, 还介绍了如何在牙科技工所进一步操作, 以及口腔临床医生应该关注的问题。

## SLM 合金粉末

### 粉末的加工

用于 SLM 技术的金属粉末可以以不同的方式加工。用于牙科领域 SLM 的粉末, 通常采用的加工工艺是液态金属雾化 (图 1)。



图 1: 金属粉末加工方式的示意图。

雾化发生在不同的步骤中：

- 熔合金：熔化通常在有保护气体或真空下的感应炉内进行。初始材料可以是单独的合金元素或者含有中间合金（母合金）的单独合金或已制成的（棒状、片状或者锭状）合金材料。
- 雾化过程：初始原材料完全熔融和混合后，熔体通过特制喷嘴从坩埚中流出。通过输入的气体，液体射流（liquid jet）被分解成单独的液滴（雾化）。这些液滴落在坩埚下方的冷却器中，冷却并形成粉末，然后被收集在冷却器的底部。
- 过筛和筛分：粉末冷却后过筛，分离出粗颗粒（粗粒部分）。在某些情况下，制造商还希望从粉末中去除非常细的颗粒（细粉），为此采用的则是筛分方法。
- 最终检验：检查粉末的粒度、粒度分布和其它粉末特性，以及化学成分。

加工 SLM 粉末的合金通常是在感应加热炉内，在有保护气体（氩气或氮气）或者真空的条件下熔化。初始材料可以元素形式添加到坩埚中。通过供给能量，各个元素熔化，相互溶解混合，从而形成合金。如果低熔点元素与极高熔点的元素形成合金，则可能需要将熔体加热到非常高的温度并持续很长时间。尽管使用惰性气体保护，仍有可能出现合金氧化或与坩埚材料发生反应的情况。为了防止这种情况的发生，可以使用中间合金。这里，高熔点或极低熔点组分先在外部分与其他组分进行合金化，然后再与剩余的合金组分一起熔化。对于仅极少量合金化的合金成分也可以应用中间合金。如果 SLM 粉末的成分已用于其他领域（例如铣削技术），则也可以将这种市售的合金添加到坩埚内并进行熔化。

在大多数的雾化装置中，坩埚最低点有一个开口，这个开口可用拉杆封闭。一旦初始材料完全熔化并混合，拉杆就会被拉起，熔体会以射流的形式从坩埚内喷出。通过一个特殊的喷嘴，将气体以与熔体射流成一定角度的方式吹入射流中。喷嘴的特殊设计和适当的压力确保熔体射流被分离成微小的液滴（雾化）。这些液滴落在一个降液管（冷却器）中，在那里冷却并以固体粉末颗粒的形式沉降在底部。喷嘴的设计和所供应气体的参数设置会影响液滴的尺寸以及粉末颗粒的尺寸。

### 粉末颗粒的粒径和形状

从技术上来讲，只加工出一种粒径的粉末，是不可能实现的。实践中，总是会得到不同大小的液滴或粉末颗粒的混合物。当产生的液滴落下并冷却时，各种颗粒会结块，这是不希望发生的，因为之后会形成大的附聚物。个别的小颗粒也会粘在较大的颗粒上，称为卫星化，也是不希望看到的。另外的一个问题可能是固化颗粒的形状。理想形状是球形。然而，如果液滴凝固得太慢，它们就会偏离理想的形状而变

成泪滴状，这也是不可取的。

当粉末冷却后，将其从降液管中取出。通常，会获得单峰分布（monomodal distribution）的粉末。这是指图中的曲线大多对应于钟形（高斯分布、正态分布）的粒度分布。

粉末由不同尺寸的颗粒组成。如果在图表中绘制颗粒大小与频率的关系，可以发现粉末中很少有非常小的颗粒和非常大的颗粒。钟形曲线的最大值表示最常出现的颗粒直径。该值表征的是平均粒径，用  $d_{50}$  表示，单位为  $\mu\text{m}$ 。它表明的是，目前粉末中所有颗粒的 50% 小于该值，50% 大于该值。类似地，也可以定义  $d_{10}$  或  $d_{90}$  的值，这些值可用于描述粉末的粒度分布。

除了单峰粒度分布之外，还可以存在其他的分布形式，例如有两个最大值的形式。在这种情况下，将其称之为双峰分布。然而，单峰粉末通常被用于牙科领域的 SLM 技术中。

如果仔细观察 SLM 粉末，就会发现，过小和过大的颗粒都会干扰 SLM 过程，因此需要将它们分离出来。也就是，通过筛分分离出粒径高于所需平均粒度的颗粒。过大的颗粒被称为超大颗粒。这些超大颗粒通常还可以在粉末加工中回收利用。

在很多情况下，还希望分离出非常小的颗粒（粒径过小的颗粒），对此需要进行筛分。其中的一种方法是风筛。也就是，将粉末放置在具有从下到上流动的特定气流的管中。重的（即大的）颗粒下落，而轻的（即小的）颗粒随气流被携带到上方。

因此，过筛和筛分可以控制粒度和粒度分布。

一般来说，粉末越细、粒度范围（晶粒分数）越小，产量越低，粉末也越贵。

然后将成品 SLM 粉末包装并出售。在牙科领域，SLM 粉末通常作为医疗产品出售。在这种情况下，必须对其进行相应分类并符合适用的规范要求。这不仅包括材料属性，还包括标签（Labeling）（图 2）。

### 对 SLM 粉末的要求

MDR（Medical Device Regulation，医疗器械法规）通过 13 项基本安全和性能要求（GruSuLa）给医疗器械规定了一般监管要求，这些可以通过产品相关标准的应用来验证。对于牙科金属材料来说，以下标准适用于对机械、化学和生物性能的测定：

- DIN EN ISO 22674: 牙科合金、机械性能方向的分类（mechanical typing）和化学成分、腐蚀的要求
- DIN EN ISO 9333: 焊料、机械尺寸和化学成分、腐蚀的要求
- DIN EN ISO 28319: 焊丝、机械尺寸和化学成分、腐蚀的要求