

# 3D 打印机及打印材料 (II)

如今,大量的打印技术和材料被用于修复体制作。对于牙医和技工室而言,主要的问题在于判断是否值得购买以及哪种设备可以满足自己的需求。本文介绍了各种打印技术以及它们的配套材料,并讨论了它们在临床上和技工室使用时的优缺点。本文分为两部分内容刊登:第一部分介绍用于牙科的3D打印技术(本刊第三期《CAD/CAM专刊》),本文为第二部分,介绍3D打印机特性,相关的3D打印材料,以及所有技术和材料应用的优缺点。

关键词: 增材制造, 3D 打印, 打印材料

Irfan Ahmad 博士  
私立口腔诊所  
Harrow / 英国  
iahmadbds@aol.com

Fahad Ahmed Al-Harbi 教授  
地址同上  
falharbi@iau.edu.sa

## 3D 打印机的特性

下面讨论在决定购买某特定3D打印机类型时应该考虑的一些因素。根据再现精度(分辨率和粗糙度)、CAD和几何形状、打印空间大小、支撑结构、打印速度、易用性、后处理和成本等几个主要方面,来评估和比较各种增材制造技术。

### 再现精度(分辨率和粗糙度)

3D打印要注意的一个主要问题是,CAD软件设计对象实现时的精度或分辨率<sup>27</sup>。分辨率和精度会受到初始扫描(口内/口外扫描或者数字体层扫描数据)、CAD设计(几何复杂度)、用于生成G代码的STL数据切片(分层处理)和3D打印机原始分辨率的影响。简而言之,打印机的分辨率是指层厚度,它以DPI(每英寸点数)标定。250dpi的标准分辨率对应于100 $\mu\text{m}$ 的精度,而1600dpi的打印机可获得16 $\mu\text{m}$ 的精度。当然,在3D打印中,必须考虑三个维度,即由x和y轴定义的二维平面,它与z轴共同构成一个三维对象。因此,除了z轴分辨率以外,打印分辨率还由x/y轴分辨率定义。大多数制造商通常提供给定的z轴或垂直分辨率(以 $\mu\text{m}$ 为单位),因为它表示层的厚度并且易于确定。因此,层厚度和垂直分辨率是可以互换的术语,并且表达的是同一个意思。x/y轴或水平分辨率同样重要。它必须在光学或扫描电子显微镜下确定,且通常在打印机规格中未指定(图11)。水平分辨率类似于2D激光打印机。激光3D打印机的水平分辨率受激光点直径的限制(在SLA打印机约为140 $\mu\text{m}$ )。此外,分辨率还取决于打印材料的特性(粉末颗粒的大小,如果使用BJ技术则取决于粘结剂)和物体的几何形状。在某些情况下,较低的垂直分辨率(较厚的层厚度)可以提高打印质量。例如,当打印对象的垂直边缘和对角线边缘比较锋利时,就不需要精细的垂直分辨率,而且这会减慢打印过程。相比之下,具有许多曲线、精细细节和倒凹的较小打印对象(小于200层)则需要更高的垂直分辨率,尽管打印时间更长<sup>38</sup>。

由于给出的值通常与垂直分辨率有关,因此以下提到的分辨率也指的是z轴分辨率。最流行的3D打印技术是SLA,它采用多光子光刻技术,可以达到低于1 $\mu\text{m}$ 的分辨率,展示极其精细的细节<sup>22</sup>。SLA的分辨率取决于激光光斑直径和光敏材料的光谱吸收。而在DLP技术中,分辨率则取决于投影图像的像素大小<sup>12</sup>。SLS技术的分辨率受粉末粒度的影响:粉

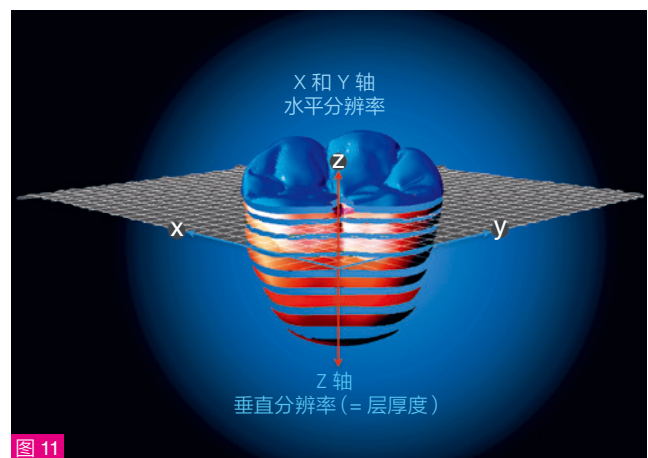


图 11

图 11: 一台 3D 打印机的分辨率, 可以区分为沿 x 和 y 轴的水平分辨率 (蓝色平面) 和沿 z 轴的垂直分辨率 (红色箭头), 后者与层厚度相同。

未越细，分辨率越高，表面越光滑。使用 SLS 可以打印分辨率为 1 至 150 $\mu\text{m}$  的物体，但是其表面看起来要比 SLA 物体粗糙一些。FDM 技术可提供 100 至 400 $\mu\text{m}$  的较低分辨率，但价格非常便宜。因此，从财务角度来看，它适合于制作用于演示和广告的一次性样品等。

物体显示的光滑程度取决于其表面的粗糙度 (Ra)。Ra 值小于 1 $\mu\text{m}$  时，表面会显得光滑。细菌粘附的极限值是 Ra 0.2 $\mu\text{m}$ ，而年轻恒牙的牙釉质 Ra 值则在 0.3 到 0.5 $\mu\text{m}$  范围内。材料喷射打印技术 [ MJ, 也称为 PolyJet Printing (PJ), 或 Multi-Jet Modeling (MJM) ] 可实现最小的 Ra 值或最佳的纹理，其粗糙度范围为 0.47 $\mu\text{m}$  或更小。光滑表面需要略低的分辨率，一般在 20 至 100 $\mu\text{m}$  范围内，尽管 SLA 的分辨率最高可达 1 $\mu\text{m}$  以下，但质地略显粗糙。BJ 技术的分辨率约为 170 $\mu\text{m}$ ，但这取决于打印材料的粉末粒度和粘合（粘结剂）材料<sup>29</sup>。一个 BJ 打印件初看会比较粗糙，但经过后期处理后可大大降低粗糙度<sup>9</sup>。当然，用于工业用途的所有 3D 打印机类型都比台式机具有更高的分辨率。表 1 比较了不同打印工艺的分辨率和粗糙度<sup>43</sup>。

### CAD 和几何形状

CAD 软件中的设计必须考虑到所采用的打印技术。不同的 3D 打印过程在可复制的几何复杂性方面会受到某些限制。因此，在设计过程中，必须根据打印机的功能来设计打印对象，以确保能够实现目标。此外，还要将特定的 CAD 数据转换为适合打印的 3D 文件格式及随后的 G-Code-Slice 设计细节，此过程中也许会造成相关数据的丢失或改变，而影响打印物体的真实再现。

一个 STL 文件基本上是以（众多）三角形来定义一个 3D 物体，非常适合 SLA 或 DLP 之类的技术，并能够再现精细的构造细节。但是，STL 数据并不是精确切片的良好起点，并且经常会在三角形的交点处产生“洞”，从而影响重现精度（reproduced accuracy）。为了解决这一问题，3D Systems 在 1994 年引入了单层单元（Single-Level-Cell, SLC）格式，该

格式“修复”了在三角形之间进行切片时出现的空白区域。尽管存在上述缺点，STL 格式本身比 SLC 更为精确，即使可以使用 SLC 格式打印结构，也必须将 SLC 数据转回 STL 以实现高分辨率和精细表面细节的再现。此过程由专用软件执行，该软件将 SLC 格式转换为 STL 文件，然后分层切片以进行打印。

### 打印空间大小

打印空间大小对应于打印对象的最大物理体积。打印空间的大小也会影响上文提到过的水平分辨率。不同的打印机其打印空间大小各不相同，但是大多数台式设备的空间均允许一次打印多个模型。

### 支撑结构

在需要支撑结构的打印技术（例如 SLA 或 DLP）中，打印对象的体积精度受支撑厚度和物体在打印空间内方位的影响（图 12 和 13）。这对于间接修复体，例如冠和桥特别重要。对于这些打印对象，结果显示，在 SLA 技术中以 120° 角度的理想定位和较薄的支撑，或者在 DLP 打印中以 135° 的理想取向可以达到最大的适合精度<sup>2,23</sup>。

### 打印速度

打印速度取决于打印技术和参数，例如分辨率、打印对象的大小和在打印空间内的物体方位及材料。例如，在打印空间内更水平的定向或者与支撑结构的接触面较小，会提高打印速度并改善表面情况<sup>18</sup>。由于依赖于多个变量，因此很难确定哪个 3D 打印技术最快，并且给出的速度通常会产生误导。如果要求高分辨率、大表面面积和低粗糙度、精细的细节或复杂的几何形状等，都会增加打印时间。另外，许多材料也需要额外的时间进行准备步骤，例如加热或分配，这会增加整个过程所需的时间。此外，每一个打印对象的运行时间还应包括处理 G 代码的时间和后续处理的时间。基本上，针对打印速度的时间分为（短于）半天、全天和 24 小时周期。

表 1: 不同 3D 打印技术的分辨率和粗糙度。

3D 打印技术	分辨率 (z 轴)	粗糙度 (Ra)
光固化立体成形 (SLA)	< 1 $\mu\text{m}$ (取决于激光斑大小—平均 25-300 $\mu\text{m}$ )	~ 2 $\mu\text{m}$
选择性激光烧结 (SLS)	1-150 $\mu\text{m}$	10-100 $\mu\text{m}$ (取决于材料粉末粒度)
数字光处理 (DLP)	10-100 $\mu\text{m}$ (取决于曝光图像的像素大小, 例如 1080.4 K 或者更高)	< 0.5 $\mu\text{m}$
材料喷射 (MJ, PolyJet 或者 Multi-Jet Modeling)	16-100 $\mu\text{m}$	< 1 $\mu\text{m}$
融沉积成型 (FDM)	100-400 $\mu\text{m}$	3-43 $\mu\text{m}$
熔粘合剂喷射成型 (BJ)	~ 170 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$ (后处理后 1.25 $\mu\text{m}$ )