

使用冷激光切割时 避免损坏材料的方法

Avoiding Material Damage with Cold Laser Cutting

一种使用水流引导激光的新技术可以实现精密微加工，而不会对易损金属材料造成损坏。

Delphine Perrottet, Roy Housh, and Bernold Richerzhagen

医疗设备产业需要使用敏感金属材料，因此对精密微加工提出了严格的要求。选择用于这些材料的技术必须基于精确的标准。在对这些材料进行微加工时，必须避免热效应、机械性损伤、颗粒分解和其它潜在的制造变形。加工易损金属时，对精度的要求一般也非常高。

要求严格的应用的一个典型例子是支架制造。为使支架能够完成精巧的操作，需要将金属板或金属管切割成具有复杂结构的管网。水流引导激光技术（或激光微射技术）能够高效地切割支架。切割时，材料既不会受热，也不会受到机械性损坏，并且微射水流可以防止支架温度升高，这一点非常关键。如头发丝一般细的水流在引导激光束时可以产生冷却效应。切割完成后，即使是由具有形状记忆特征的材料制成的支架也能保持整洁的结构，而利用传统激光技术则难以达到这一程度。形状记忆材料往往比其它材料（如不锈钢）更容易熔化，切割过程中会产生更多的毛刺。此外，激光微射技术还大幅减少了后处理步骤，因为在材料表面上不会产生毛刺或渣滓。另外，激光微射技术还减少了颗粒污染。

An English-language version of this article is available on the CMDM Web site, www.cmdm.com.

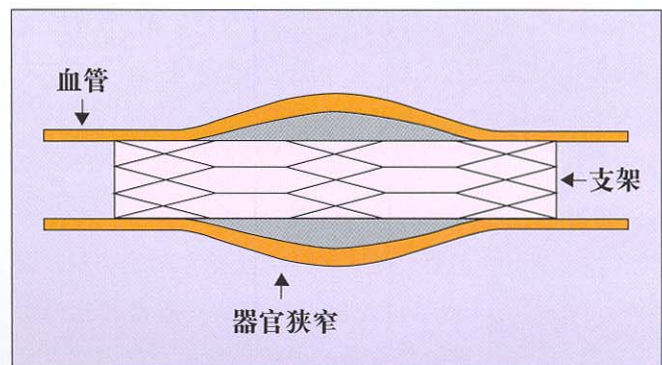


图1. 支架的作用相当于血管的内支撑架。

要求严格的应用

支架是能够改善并确保血管中血液流动的网状管，用来解决动脉硬化症或其它血管疾病引起的血管变窄问题。先将支架绑在气球导管上，然后将支架移入血管中。当气球充气后，支架就膨胀进入血管中。支架在血管中形成类似脚手架一样的物体将血管撑开（参见图1）。支架一般设计成永久性地保留在动脉中。制造支架的材料有很多种，其中不锈钢和镍钛诺（nitinol）是最常使用的材料，但是其它形状记忆合金和聚合物也是可行的。支架管的直径通常为约2mm，壁厚在100到200 μm 之间。

支架切割程序的要求很苛刻。因为支架将被放置在人

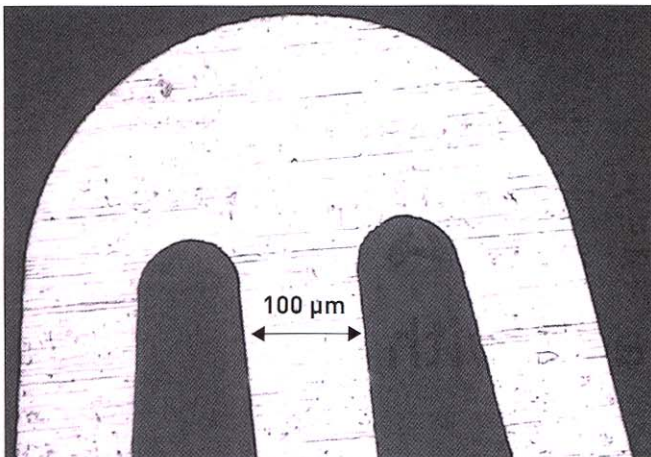


图2. 水流引导激光将不锈钢边缘切割得非常整洁。

体内，所以必须满足某些要求。首先，支架不得有裂纹。其次，边缘必须干净，没有渣滓或毛刺附着。另外，精度和一致性也很关键，因为切割曲线很精细，高度复杂。最后，热损伤必须最小化。某些材料，如形状记忆金属合金镍钛诺等对热很敏感，受热可能会破坏其形状记忆能力。不锈钢受热时，温度每升高 1°C ，其单位长度(1m)就伸长 $16\mu\text{m}$ 。例如，2cm长的不锈钢支架温度变化为 15°C 时，长度变化约为 $5\mu\text{m}$ 。由于排斥问题，生物适应性也很重要。当要在支架上涂一层含有防排斥药剂的涂层时，还需要进行很好的表面处理。

切割后，可以利用某些机械和化学方法消除渣滓并缓和热影响区。但是，更有效的方法是在初始切割步骤中获得要求的（或尽可能接近要求的）质量和几何形状。在工艺的早期阶段获得必要的质量后，就不必在后期进行喷砂。这样做还可以最大程度地减少电抛光需要（为了圆整边角并使表面光滑）。

水流引导激光

激光微射原理是将高能脉冲激光束与像头发丝般细的喷射水流结合在一起。首先由光纤将激光束载送到系统中心。然后，激光束穿过一个透明的窗口，进入充水室。一旦穿过窗口，激光束就聚焦于一个喷嘴中，与从充水室中射出来的水流结合在一起。从这时起，激光束就被引导沿圆柱形水流前进，在空气与水的界面处发生全反射。反射即为两者折射率的差。激光束到达工件后，通过热切割材料。

纯净、无离子的过滤水被加压到50至500巴

(bar)。然而，由于水流直径很小，耗水量将很低（约1升/小时）。喷嘴的直径可以小到只有 $25\mu\text{m}$ ，材料可为蓝宝石或钻石。激光源有很多种，但一般选用脉冲式Nd:YAG激光器，其波长可为 1064 nm （红外光）、 532 nm （绿光）或 355 nm （紫外光）。由于采用喷射水流引导激光，它将可以确保点直径一致，实现单一、厘米长度的焦距。喷射水流保持稳定的长度约为其直径的1000倍。例如， $50\mu\text{m}$ 直径的水流在5cm长度内可以保持稳定。除了引导激光束外，喷射水流还有其它功能。这些功能被证明对于精密切割很重要，特别是当切割要求和也对医疗设备制造的要求一样严格时。

最小受热影响区

在两个激光脉冲之间，水流会冷却切口边缘及其邻近区域，防止金属内发生热损伤。这对避免处理工件两侧由于激光烧蚀而受热是很有效的。由于具有冷却功能，水流引导激光也被称为冷激光。不会看到氧化发生。

清洁度

微射工艺不会产生细小颗粒，因此不会导致表面污染。喷射水流可以立即冷却被切掉的材料，这些材料不会附着在工件表面上。水流非常细，该应用中其直径通常在30到 $50\mu\text{m}$ 范围内。然而，其压力相对较高，大多数情况下超过300巴，用在颗粒去除上绰绰有余。对于平坦工件，可以在工件上增加一层薄水膜，这样可以防止颗粒附着在材料表面上。

机械限制条件可忽略

由于喷射水流直径很小，水压属中等水平，因此水流作用在工件上的力非常小。例如，直径 $35\mu\text{m}$ 、水压300巴的水流产生的力为 0.03N ，其中“力=压力 \times 表面积”。为了避免振动和移动，以免影响加工精度，支架的纤细、易损结构需要附着在工件上，附着力要求尽可能小，因此不存在机械限制条件是有利的。振动工件可能会导致支架结构的表面缺陷。

支架切割中的微射

由于不存在机械损伤或热损伤，因此材料不会发生

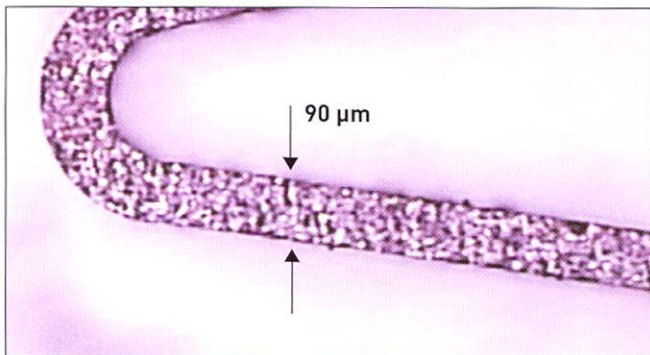


图3. 激光使得直径保持一致，这对于支架中使用的形状记忆材料镍钛诺 (nitinol) 而言很重要。

开裂或结构变化。轴的精确和切割机的视觉控制系统确保了加工精度和一致性。为了避免机械接触，可以将支架放在管状结构内，由气垫支撑。

支架的边缘可以切割得很整洁，因为切割期间喷射水流会去除熔化的材料。颗粒分解、毛刺和渣滓得以大幅减少，并且因为水流冷却效应，所以不会看到氧化发生。另外，由于支架制造商希望拥有良好的表面质量，因此在切割程序之后还会执行清洁操作。但利用水流引导激光则可以减少这些费时的步骤，从而提高生产率。

图2和图3分别显示利用水流引导激光对不锈钢和形状记忆镍钛诺进行处理后获得的质量。两个样本都是采用平均功率为45W的长脉冲激光和40μm的喷嘴来切割。形成形状的贯穿切口是一次切割而成的，速度为4mm/s。由于结构很复杂并且质量要求很高，因此该切割应用的速度有限。然而，有一个一般规则：工件越薄，切割速度越快。此外，这些切口的颗粒等级低于10μm。

支架任何一侧上都无可见的热效应。唯一的残留物是非附着性的渣滓。可以用水洗掉背面边缘上的渣滓。

管材处理

当激光微射开始用于支架切割时，只处理平面板材。使用平面板材使得支架的复杂结构能够被测试。但是，其目标是要能直接处理管材。为此，需要给专门用于支架切割的机器增加一根旋转轴。

难点在于，在处理外前侧的同时要避免损坏圆柱体的内后侧。如果没有阻挡物，激光束（仍然由水流引导）在切割完管材的第一道壁之后可能会损坏第二道壁。处理过程中，将几股铜丝放置在管内部可以解决这个问题。铜丝有效地保护了管内侧，并且由于铜的反射

系数很高，因此铜丝在红外激光产生的热作用下也不会熔化。激光烧蚀产生的熔化材料和切割过程中排出的熔化材料不会造成问题，因为水流会冷却这些颗粒，避免其损坏管内侧。

材料强度比较

由于支架要保留在血管内，因此支架必须不易断裂，这一点非常重要。因而，切割程序不应削弱支架的结构强度，不应损坏其边缘。而需要苛刻的后处理步骤的技术往往会进一步削弱支架易损结构的强度。

在对这些考虑进行探讨的过程中，一家支架制造商最近对采用不同切割工艺制造的形状记忆合金支架进行了伸长试验。伸长试验相当简单，只需将经过测量的力作用在支架部件的各个顶端上，直到支架断裂（参见图4）。折断样本所需的力说明了样本强度。折断支架所需的力与切割工艺所造成的损伤相关。这样，利用这些试验结果，制造商就可以根据加工引入的材料损伤大小来排定不同制造方法的优劣顺序。

对形状记忆合金支架分别进行了蚀刻、激光切割和微射切割试验。传统激光的结果最差，因为传统工艺产生的热效应区最显著。利用其它两种技术达到的强度相当。

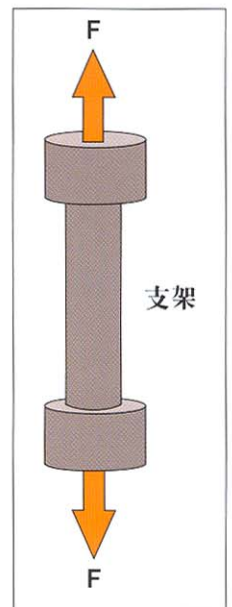


图4. 伸长断裂试验涉及在支架的两端上均施加力，看支架在何处断裂。

结论

医用支架制造是一个要求非常苛刻的工艺，涉及到切割金属以获得具有复杂结构的网状管。该项应用中一般会使用激光，但是由于热效应，激光会产生毛刺，造成实质性材料损伤。后处理步骤又非常耗时，并且可能会降低屈服强度。水流引导技术的优点包括颗粒分解很低、热影响区很小以及机械限制条件可忽略，可以大幅减少额外的后处理步骤。这项技术结合了激光束与水流处理的优势，可以很好地适应热敏感金属材料精密切割的需要。■