

切削

五轴钛合金 整体叶盘的优化铣削策略

据说一种新的精加工策略使用专门设计的圆桶形切割工具，将五轴钛合金整体叶盘的加工时间缩短了 50%。

文 | Barbara Schulz



军用和民用涡轮发电机的很多新设计都使用整体叶盘转子代替单叶片转子结构，因为前者重量更轻、弹性更好且维护工作量较小。整体叶盘通常使用高硬度的特殊材料，如钛和镍基合金实心坯料加工，因此加工难度大、加工周期长。后来，这些部件的生产成本更高了。因此，需要制定有效的加工方法。

瑞士刀具制造商 Starrag（位于肯塔基希伯伦）针对整体叶盘的粗加工、半精加工和精加工提出了一种新的刀具概念和铣削策略。Starrag 公司表示，改进后铣削策略的核心是后整理工序，它可以将总加工时间缩短 50%（图 1）。

公司用于展示这项工艺的参考工件是一个钛合金 Ti6Al4V 材料的整体叶盘，它用于中压和高压压缩机及航空发动机。这种 48 叶片的整体叶盘直径、高度和长度分别为 520 mm、34 mm 和 35 mm。

Starrag 的铣削策略开始于三道余摆线铣削工序，它们向做圆周运动的端铣刀供料进行切槽加工。这种方法非常适合铣削整体叶盘槽，因为切削过程中齿载荷保持不变，可以提高金属切削速率，

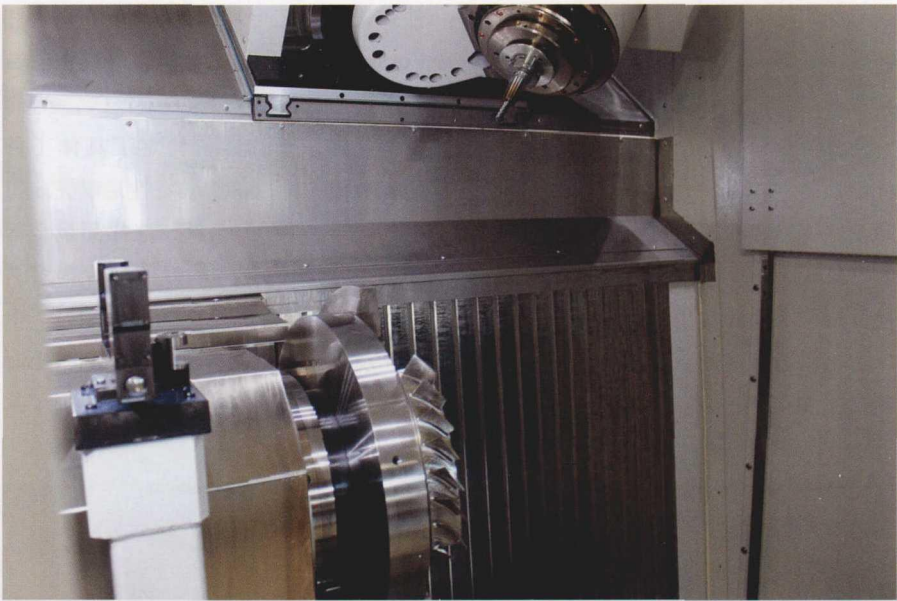


图 1 Starrag 针对整体叶盘（通常为钛或镍基合金）的粗加工、半精加工和精加工提出了新的刀具理念和切削策略。改进后铣削策略的核心是后整理工序，它可以将总加工时间缩短 50%

延长刀具寿命。

经过之后的半精加工，再进行叶片和轮毂的精加工。使用新款 Starrag 桶形切削工具进行叶片精加工时，切口深度达 4 mm（在这个具体零件的实例中切削深度为 3 mm）。与使用球头刀具的传统

策略相比，叶片精加工用时缩短了 75%（从 5' 17" 缩短到 1' 13"）。使用桶形切削工具还能减少工序数量，因为它的半径比球头端铣刀大。

为了精加工轮毂，公司使用了侧向切削深度可达到刀具直径的 Starrag 环面

铣刀。环面铣刀看上去就像普通的端铣刀，但端部半径更大。切削工艺在刀具的半径，而非轴/侧面完成。经过之后的叶片根部精加工操作，精加工工艺完成。

按照 Starrag 工程主管 Richard M. Bacon 的说法，秘诀在于桶形切削工具的设计，它是针对整体叶盘加工专门设计的。公司设计的刀具最适合叶片的形状。另外，清晰的倒角减小了各个方向上的切削力，而间距各不相同的齿减小了颤动。“通常对桶形切削工具的要求非常严格，因为它们接触面积大，更容易引发颤动。”Bacon 先生说，“这使得应用程序很难控制，使用现成的刀具时更是如此。”

新的六齿设计显著增加了切口的周向深度和进料速率。“传统的叶片加工工艺需要 100 道工序，”Bacon 先生说。“而现在，切口轴向深度达到 3 mm，而所需的工序减少为 10 道。”桶形切削工具的大半径有助于充分接触零件，从而增大切削深度，刀具的加工工序比球头端铣刀少并且周期时间更短（图 2）。与此同时，接触面更大导致受力显著增大，这样它们就更容易引发零件颤动。“使用我们的刀具设计可以消除这些影响。”他说。

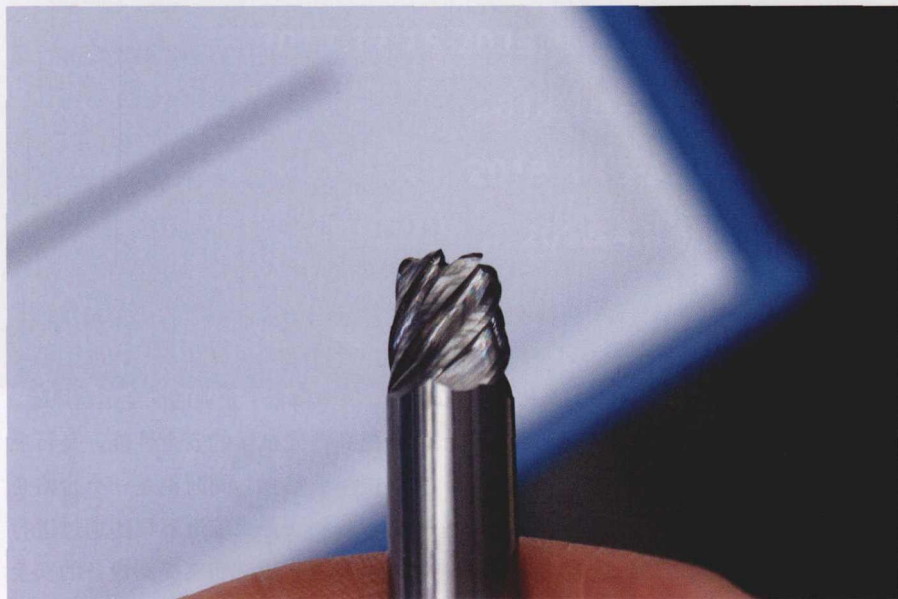


图 2 桶形切削工具的大半径有助于充分接触零件，从而增大了切削深度，刀具的加工工序比球头端铣刀要少

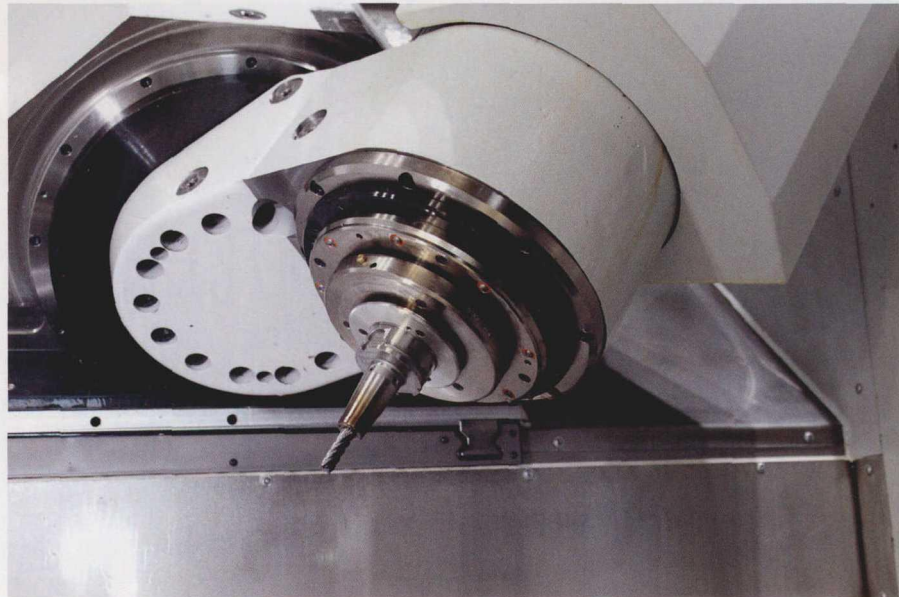


图 3 与带转盘的标准机床相比，NB 系列机床使用了成角 B 轴，刀具可以绕刀具中心点有效旋转

刀具路径由 Starrag 的 PSI+CAM 软件控制，这款软件专为多叶片型部件，如整体叶盘和叶轮而设计。

Starrag 成功应用新铣削策略的另一个例子是为加工 Ti6Al4V 合金压缩机整体叶盘（STC 800 整体叶盘）的客户开发了一种更有效的工艺。客户有 4 台 Starrag 机床，并找到公司，希望它能设计一个缩短加工时间的策略。

650 mm 直径的整体叶盘有 50 个叶

片。规定轮廓公差是 $80\text{ }\mu\text{m}$ ，而规定表面质量为 $Ra0.8\text{ }\mu\text{m}$ 。据 Starrag 显示，上面介绍的优化铣削策略将加工用时从原来的 300 h 缩短为 70 h，节省了 400% 的时间。

上述案例研究使用的机床为 Starrag NB 251 五轴机床，是专门针对整体叶盘的完整加工而制造的。它完成了生产工艺的每个步骤，从高效粗加工是新材料和自适应加工摩擦焊接整体叶盘到高动态精加工接触点处的流水面。

Bacon 先生表示，确保高动态生产加工的主要特点之一是移动质量较小。与带转盘的机床相比，NB 系列机床使用了成角 B 轴，刀具可以绕刀具中心点有效旋转（图 3）。刀具尖端距离旋转中心很近，轴的补偿运动比带转台的机床短 5 倍，所以加工时间得以缩短，Bacon 先生说。在转台上，线性轴必须完成补偿运动（移动距离为 200 mm），而刀具尖端在旋转中心时，只需要移动 50 mm。“这对精加工的影响很大，因为我们绕整体叶盘叶片的转速可以大大提高。距离变短后，还能提高刚度，所以你可以进行更快速的切削，而不用担心发生颤动或振动。”最终，客户的加工周期时间缩短了 25%。MM