

精益加工

成功加工钛金属的关键

采用一种使刀具负荷保持恒定的刀具路径策略，是 ADEX 公司在钛金属加工方法中取得成功的一个重要组成部分。另一个重要因素是：该公司掌握了有效加工这种金属的方法，并将其应用到生产实践之中。

文 | Peter Zelinski

事实证明，钛金属并不完全是那么难以加工的材料，至少从 ADEX 公司（位于美国南加利福尼亚州的 Greenville 镇）的角度来看，是可以这样认为的。ADEX 公司是一家专业金属加工

车间，其加工的主要材料包括镍基合金、雷内合金和瓦斯帕洛伊变形镍基耐热合金等。在过去的一年中，当 6-4 号钛金属工件开始成为该车间重要的一部分加工业务时，它应用了与其他航空航

天合金材料相同的加工方法。因此，对其而言，钛金属算是一种相对比较容易加工的材料。

许多加工车间将钛金属看作是他们面临的更具有挑战性的材料之一。ADEX 公司的工作人员说，这是因为这些车间将其与易于加工的铝金属和钢材等一类材料相比较的结果。而由这些材料制成的工件，只要注意其切削加工的条件就可以了，航空航天工业中应用的超级合金，也需要小心谨慎地切削加工——这就是为什么 ADEX 公司不习惯采用其他加工工艺的原因。正因为如此，该车间发现了一些关于钛金属加工的重要意义：到目前为止，专门为这种金属设计的切削刀具，具有一定的先进性，采用有规律的方式使用这些刀具加工这一金属材料，可以获得比其他许多车间所期望的高得多的生产效率。

精益加工

Jason Premo 先生是 ADEX 公司的共同合伙人并兼首席执行官。ADEX 公司采用现代化加工设备，其工作重点是不断地改进生产工艺，提高加工竞争能力，反应迅速地提供高价值的硬质合金零件。这项工作往往包括精益生产管理



图1 这个尾翼转子的轮毂是一个 14 in² 的钛金属组件，其平直度公差为 0.002 in

的两种不同含义。精益生产及其效率，这两者对 ADEX 公司的成本优势和其文化建设是至关重要的。这是精益生产管理的其中一个含义。同时，Premo 先生说，这对其报价的加工业务利润率本身也往往含有“精益求精”的含义。在其车间最近达到的、可比较的加工性能水平基础上来估算价格。Premo 先生以此为据，建立某种预期，在该项业务工作运行期间，发现和进一步改进生产工艺，以达到更高的性能水平。

这些性能水平往往超越了刀具手册中规定的水平。在最近的一个涉及 6-4 号钛金属零件的加工实例中，该车间设计了一种生产工艺，并作出了一份报价，希望某种立铣刀能够持续加工 5 个工件。但结果是，该刀具却持续加工了 155 个工件，于是该刀具供应商同意回收了 ADEX 公司最终不需要使用的所有刀具。

ADEX 公司的工程技术人员说，就这种高性能刀具的潜力而言，没有任何一种品牌的刀具能



图3 现在 6-4 号钛金属的加工占据了该车间的大部分加工业务

够达到如此独特的水平。该车间用于铣削加工钛金属的刀具至少来自于 6 家刀具公司。为了充分发挥这些刀具的潜力，该车间在切削过程中，尽可能使刀具与材料的接触路径保持恒定，避免进给方向发生突然变化。ADEX 公司在执行该刀具路径策略前后所取得的经验表明，在硬质合金加工过程中，切削方向的变化，正

是造成刀具寿命缩短的根本原因。

Mastercam 软件的“动态铣削”功能就是 ADEX 公司应用这一恒定接触原理而发挥 CAM 能力的一个具体实例。当其与加工的形状相比，编程功能所创建的铣削路径，看起来往往是违反常规的，因为其路径的设计需要刀具与材料的接触保持恒定不变（图 2）。以这种方法编程的整个铣削操作中，刀具上的应力没有出现显著的波动现象。现在，ADEX 公司的编程人员已习惯使用这种功能，因为他们经常通过刀具供应商对开槽刀具所提出的建议，找到铣削加工参数。这家车间很少需要进行真正的开槽切削，从恒定的材料接触中所获得的切削优越性，就像开槽切削那样，能够随着曲线而不是随着直线进行加工。

以这些理论为出发点，在钛金属加工方面，该车间正在寻求使切削深度足以达到工件的淬硬表面内部，而且又要使其具有足够的轻巧度，以便以超过同一工

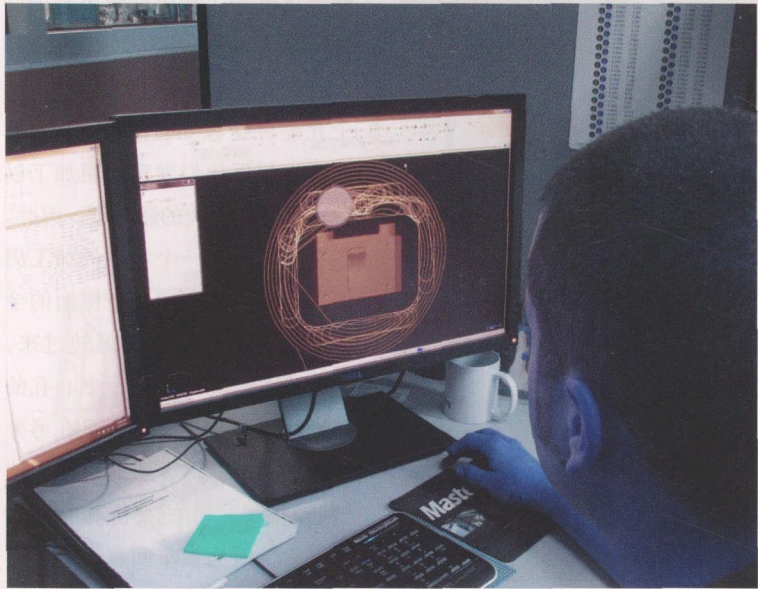


图2 使材料与刀具保持恒定不变的接触，可产生看起来好像违反常规的刀具路径，但这样的路径可使刀具的负荷保持稳定

件淬硬的速度而快速进给。因为 6-4 号钛金属工件淬硬速度很快，如果切削力度太轻或太慢，其切削深度或速度超过了其淬硬速度，会对金属材料的加工造成更大的风险。

这些因素，使 ADEX 公司在投入时间和材料进行实验方面具有更好的成本效益，为零件的重复加工寻求最佳生产工艺。对于一把特定的刀具和一种特定的加工件而言，往往只有通过实验才能找到最佳工艺参数。其研究从来不是从零开始的，因为以前的工作成果都能够作为经验应用到以后的实际生产之中。以这种方法，将重点放在维护内部知识的基础之上，对成功加工硬质金属是至关重要的，这对于钛金属的加工尤为如此。建立钛金属加工的知识基础，可以说是比任何其他金属都更有价值。在很短的时

间内，该车间已经学会如何将最新的铣刀刀几何形状，与新的涂层结合在一起，使刀具的锋利程度更高，加工 6-4 号钛金属的性能，有时候远远超过刀具供应商所建议的参数。ADEX 公司声称，问题的关键是：要确保该加工工艺不会对潜在的性能与编程路径过度妥协，以至于不必要的应力增加而损害刀具。

节约调试时间

车间加工钛金属和有效加工其他硬质合金的另一部分额外配置与夹具系统有关。在市场中，该公司提供的批量加工服务规模往往是很小的，因此工件在机床上的调试和装卸必须尽快完成。在其加工中心上加工生产时，ADEX 公司采用 Jergens 球锁刀具系统，以便快速、准确地将其夹具卡紧就位。不过，即使有了这

套系统，任何零件调试装卡的次数也要尽量保持最少。在加工钛金属时，使刀具上的负荷保持稳定，也会对发挥其优势作出贡献。

该车间最近承接的一个钛金属零件加工业务可以为我们提供一个例证。一架军用直升机的尾桨轮毂至少需要在一台加工中心上进行 6 次调试装卡。这是因为 14 in² (1 in=25.4 mm) 的零件平直度允差只有 0.002 in。以前，该零件通常先采用粗加工方式，再在两面进行半精密加工，去除粗加工遗留下来的翘曲度，然后是精密加工。ADEX 公司的工程师们在做这一加工业务的报价时，假设他们的加工工艺也采用同样的方式，

但究其翘曲度的原因，竟然是切削过程中的高切削力造成的。在这些切削力之中可能包含使刀具负荷保持稳定的 ADEX 编程刀具路径。以前那种典型的粗加工高峰切削力方式已经一去不复返了。事实上，ADEX 公司加工工艺中的切削力均值较低，但不影响加工效率，这是因为高进给速度弥补了切削深度不足的问题。起初，在半精密加工之前，ADEX 公司的员工们希望找到一个允差保持在 0.020 in 左右的翘曲度。相反他们发现，粗加工以后没有造成很大的翘曲度。因此，现在该车间在一个零件的加工周期中，首先要完成一个侧面的全部加工，然后将零件翻转过来，再完成另一面的加工。中心孔的精密镗削加工操作甚至是在另外的机床上完成的。实践证明，该“精益加工件”的报价具有很大的优势，因为该车间赢得了这一加工业务，实现了比以前报价具有更高效率的加工工艺。MM

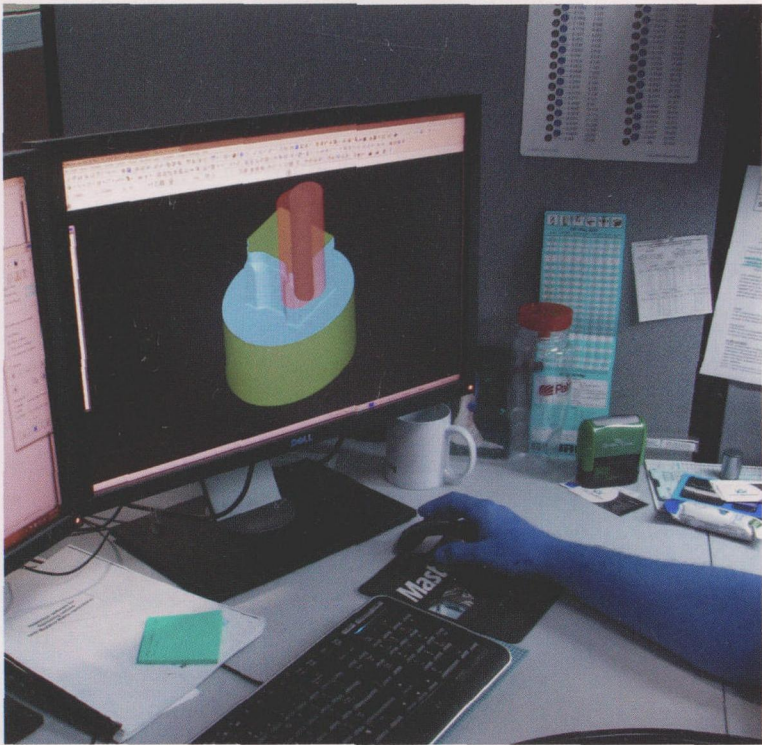


图 4 在钛金属加工中，ADEX 公司使用的 Mastercam 软件之另一个特点被称之为 OptiRough，它可以使刀具的磨损分布到整个端面铣刀上，而不会集中到刀尖处