

刀具

航空航天特种材料的加工方案

当前，减轻飞机重量这一目标正在促使航空航天工业采用越来越多的特种材料，例如复合材料、钛合金和铬镍铁合金。相比普通材料，此类材料重量更轻，强度更高，但在加工方面，特别是铣削和钻削方面，它们各自拥有不同的加工难题。

文 | SECO 公司

在铣削和钻削加工中，航空航天制造商通常使用整体硬质合金刀具或整体高速钢刀具。在此类加工过程中，制造商必须尽可能达到最高的质量水平，这往往需要通过密切地监控和维护工艺安全性来实现。虽然存在对零件成本的担忧，但在大多数情况下，生产高质量的零件是优先考虑的事项，而提高生产率则一般处于次要地位。

借助机床和刀具的可预测性能，航空航天制造商力求实现工艺的安全性和稳定性。在刀具方面，航空航天制造商必须拥有具

备长久且稳定刀具寿命的铣刀和钻头。而且，即使他们知道刀具的具体使用寿命，也会在刀具完全磨损之前，提早安排机床更换刀具。得益于机床和刀具技术，复合材料、钛合金和铬镍铁合金等材料已经从过去几乎无法加工，发展到如今航空航天制造商能够充满信心地高效加工的阶段。带来更佳工艺控制和一致性的一种刀具技术便是先进的特制整体铣刀和钻头。这种刀具专为克服此类材料的加工难题而开发。通过整合多种创新性镀层和槽型，并配以先进的加工技术和方法，这些特制刀具不仅能提供工艺安全性，而且能提高生产效率和产量。

复合材料加工

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加工在航空航天工业中蓬勃发展。然而，由于此类材料极为耐磨和强韧，因此难以使用常规铣削刀具进行加工。此外，加工时还必须防止发生分层（即各个碳纤维层分离）。通过使用坚硬、锋利且采用特殊表面镀层的整体硬质合金铣刀，可以轻松应对这些挑战。

从槽型的角度来看，高效的复合材料刀具采用低螺旋角来减小材料片层上承受的轴向力，以防止发生分层。此外，同时具有左螺旋和右螺旋的刀具也是加工复合材料的高效槽型。此类刀具通常被称为压缩刀具，在侧铣时，它们可将切削力导向到工件厚度的中心并进行压缩，以保持片层完好无损。不仅如此，此类刀具槽型还有利于更灵活地切削复合材料。

就加工技术而言，复合材料的切削参数通常取决于各种材料自身。用于复合材料的整体硬质合金刀具的典型速度约为 150 m/min，而进给率约为 0.07 mm。但要注意，



图 1 用于 CFRP 的 3 刃 PCD 钻头 CX1

在这组材料中，使用了多种不同类型的粘接剂，而每种粘接剂都需要各自不同的速度和进给率。这些粘接剂的熔点通常决定切削复合材料时的速度和进给率。此外，纤维含量和纤维方向也对加工工艺（决定切削速度、进给率和最佳刀具路径）有着显著的影响。

对于航空航天应用，复合材料中的钻孔必须完整，不允许有干涉和影响后续组件加工工序的粗糙或磨损的纤维。复合材料钻削的两个常见难题是材料分层和纤维未切断，特别是在工件的背侧或出口侧。钻削时，刀具的作用力向下压材料，随着钻头靠近出口侧，过大的作用力会导致钻头生硬地挤破孔的最后一部分，结果会造成复合材料纤维粗糙或磨损，而不是干净地切削，从而导致材料分层。

凭借用于加工复合材料的 C1 金刚石镀层整体硬质合金钻头，山高提供了一个具有两个钻尖角（中心为 130° ，钻头倒角为 60° ）的槽型。加工时，钻头的中间点先从孔末端退出，切掉孔的部分材料。这样，当 60° 部分退出时，钻头穿过材料的进给作用力会显著减少。因此，材料分层和未切削的纤维会更少。除了 2 刃金刚石镀层钻头外，山高还为复合材料开发了一种独特的 3 刃 PCD 尖钻头槽型。这种新型 PCD 钻头槽型的工作条件与标准复合材料钻头相同，但其效果更好，因为它的切削刃更多。钻头有更锋利的切削刃且每转产生的进给作用力更小，特别是在退孔时。此外，与金刚石镀层相比，该钻头拥有完整的 PCD 钻尖，在多数情况下刀具寿命可延长多达 4 倍。

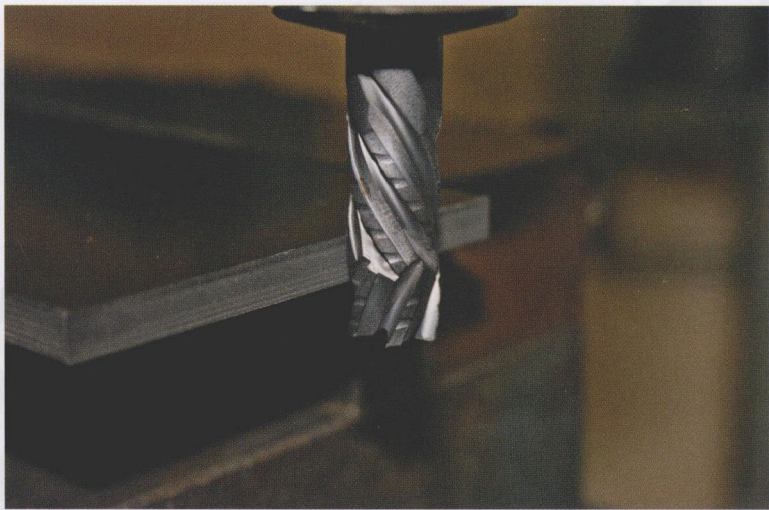


图 2 带有断屑槽的新型双螺旋粗加工立铣刀 JC845

钛合金的加工

在航空航天工业中，钛合金通常用于三个基本应用领域：飞机结构件、喷气发动机的低温段部件和起落架系统。一种常用的钛合金是 5553，属于近- β 相合金，通常用于制造起落架零件。TiAl6-4 属于 α - β 相合金，是应用最广泛的钛合金材料之一，尤其适用于制造结构件。令钛合金难以加工、具有较低可加工性能的主要因素是其较低的导热性能、较高的粘着性和加工硬化等因素。钛合金具有低导热性，这意味着在切削过程中产生的热量传导到刀具中，而不是被切屑从切削区带走。

钛合金的高粘着性意味着切屑往往会粘在刀具上，从而产生极长的切屑，而不是通常人们所希望的更易于排出的较短切屑。该材料的加工硬化性能会在加工时发生，导致材料表面由于加工产生的压力效应而出现一层薄薄的硬化层。虽然可以使用适合加工多种材料的通用型整体硬质合金刀具对钛合金进行加工，但那些针对钛合金的加工特性而专门设计的刀具一般会提供更出色的加工效果。此类特殊的刀具具有

极佳的性能，但在处理多种不同材料时，其通用性可能较差。因而，山高专为钛合金和不锈钢而设计的高速钢 (HSS) 刀具。Jabro® HPM（高性能加工）系列中的部分刀具也是专为钛合金等特定材料牌号设计的。此类刀具采用了特殊的槽型和设计，特别适合加工钛合金。槽型和设计包括 $40^\circ\sim 50^\circ$ 之间的大螺旋角；内冷通道，可使切屑不会粘到刀刃上并快速排屑，同时还有助于冷却切削区；不均等的齿距，可在高切深过程中减少振动；将硬质合金与氮化铝镀铬镀层相结合。未使用氮化钛，这可防止刀具和材料之间发生化学反应。

在航空航天领域，大多数孔径都很小。对于小于 1 mm，最大不超过 20 mm 的直径，整体硬质合金钻头广泛用于钛合金和铬镍铁合金的钻削领域。与铣削钛合金一样，钻削工艺产生的热量也易于进入刀具中，而不是在切屑内带走。为了解决这一问题，钻头槽型通常都具有非常锋利的切削刃。通常，由于需要极为锋利的切削刃，用于钛合金的钻头都没有镀层。另外，镀层在一定程



图3 双螺旋 Dura 镀层的精铣刀 JC840

度上会增加摩擦，增大了热量生成。更重要的一点是，在加工后材料会收缩。因此，钻体上需要一个更大的倒锥。

铬镍铁合金加工

在航空航天制造业中，铬镍铁合金零件通常非常昂贵，不仅仅是材料本身的成本，还包括在进入加工阶段前为了生产它们而花费的时间。铬镍铁合金和钛合金之间存在某些相似之处。但就可加工性而言，铬镍铁合金（镍基高温合金）是最难加工的材料。它们具有极低的导热性和极高的应变硬化，甚至高于钛合金。铬镍铁合金还具有高粘着性，因此在用于传统加工方法时，切削速度很少会超过 25~30 m/min。

用于加工铬镍铁合金的刀具槽型与用于钛合金加工的槽型有很大的不同，铬镍铁合金槽型具有非常陡的后角。这种槽型可最大限度减少刀具和材料的接触。这一点至关重要，因为铬镍铁合金具有塑性和高记忆性，这意味着它会在受到刀具的作用力时稍微弯曲。因此，刀具倾角和材料的接触时间越长，刀具发生的磨损就越大，而其使用寿命就越短。

为进一步降低刀具和铬镍铁合金间的摩擦，山高采用了氮化铝钛镀层。该镀层已进行了抛光，拥有极其平滑精细的表面质量。

钻削铬镍铁合金时，需要使用较低的速度和进给量，因为该材料更硬、更难以切削。与铣削铬镍铁合金一样，在钻削时，该材料的切削性能也会发挥作用。在航空航天应用领域中，铬镍铁合金组件的孔深通常不超过 3xD。

钛合金和铬镍铁合金的四种加工方法

钛合金和铬镍铁合金有四种基本的加工技术或方法。第一种是传统加工，该方法需要在 $a_e : a_p$ 为 1 : 1 的情况下寻求平衡，也就是说，加工采用全切宽、一定的切深（最大为刀体直径 1 倍）和平均进给率；第二种是高性能加工 (HPM)，该方法需要使用专为钛合金和铬镍铁合金设计的刀具，例如山高的 HPM 系列刀具。这些刀具在采用大切深 a_p （最大为 1.5*Dc）和全切宽 a_e 的情况下运行。在短时间可切除大量金属，从而提升生产率；第三种是高进给加工 (HFM)，该方法使用极小的轴向切深 a_p 和全切宽 a_e ，因此切宽为 1*Dc。该

方法使用的特定刀具槽型可将切削力引导到机床主轴上，因此尤其适合因刀具悬伸长和复杂应用（如深度为 5*Dc 及以上的槽）而造成不稳定的加工工况；第四种是高速加工 (HSM)，该方法使用相当低的 a_e 径向切深和极大的 a_p 切深。由于径向切深相对较低，因此具有较小的接触弧，这有助于减少切削区内产生的热量（因接触时间较短），从而允许较高的切削速度进行补偿和提高生产率。

机床和切削刀具的发展使得这些方法得以实现。如山高的 HPM 刀具槽型具有特殊特性，如不均等的齿距、弯曲的螺旋角，这为高性能加工方法提供了必要的稳定性。在高进给和高速加工中，这些方法通常依赖于机床的能力和刀具槽型。

在很大程度上，机床和刀具需要协调工作来满足航空航天制造商的特定材料加工要求。正确的机床和正确的刀具都必须具备。这在高进给和高速加工中尤为如此，该类加工不仅需要具有高进给率的机床，还需要能够处理与高进给和高速铣削加工相关的更大程序和 NC 文件的 CNC 控件。

要高效地加工航空航天业中目前遇到的挑战性材料，关键是获得完整的加工解决方案，而不仅仅是获得一个产品。完整的刀具解决方案不仅包括必要的槽型和设计，还包括应用工程支持。人员的丰富知识和经验与先进的产品相结合，可以形成一个完整的解决方案并实现理想的结果。零件质量和工艺安全性要求制造商拥有专为特定应用，无论是复合材料、钛合金、还是铬镍铁合金而设计的最佳刀具，以实现最优性能。[MM]