

难加工材料的铣削和钻削加工

Milling and Drilling Technology for Difficult-to-Machine Material

山高刀具公司 Teun Van Asten Wilco van den Boogaard Pär Nordberg

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,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。

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,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。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,生产完美的零件是优先考虑事项。

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。先进的特制整体铣刀和钻头能够带来更佳的工艺控制和一致性,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。

铣削加工

1 复合材料

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。

常用的两种镀层工艺是物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD),此外还有一种高级切削材料多晶金刚石(PCD)。PVD镀层属于物理工艺,包括氮化铝、氮化铬和氮化钛镀层,其维氏硬度约为3000。通过化学工艺CVD形成的金刚石镀层的硬度较PVD镀层高出3倍以上,可达到10000维氏硬度等级。PCD

刀具采用整体PCD片,这些PCD片可通过铜焊固定到整体硬质合金基体上。

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。

虽然压缩刀具是一种常用方法,但山高等刀具公司开发了具有不同新槽型(如双螺旋)的压缩刀具。例如,山高开发了两款这种类型的双螺旋压缩刀具。一款具有较少的刀刃,可提供更大的切屑间隙,而且其切削刃上还有断屑槽,主要用于粗加工(图1);另一款为无断屑槽的具有平滑切削刃的多刃刀具,可以提供理想的精加工性能。

就加工技术而言,复合材料的切



图1 JC845新型双螺旋粗加工立铣刀

削参数通常取决于材料自身。用于复合材料的整体硬质合金刀具的典型速度约为 150m/min, 而进给率约为 0.07mm。但要注意, 在这组材料中使用了不同类型的粘接剂, 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。

2 钛合金

在航空航天工业中, 钛合金通常用于 3 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。

例如, 山高的方案中有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。其槽型和设计包括 $40^\circ \sim 50^\circ$ 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。

一些特定因素可决定是使用整体硬质合金刀具还是使用 HSS 刀具, 而主要因素是刀体直径。当应用场合要求使用更小直径的刀具时, 当工件几何形状极为复杂时, 或如果需要大切深(a_p)时, 应使用整体硬质合金刀具。

对于复杂性较低的大批量工件, 如果要求大切宽(a_e)和大切深(a_p), 则建议使用 HSS 刀具。当使用高扭矩和高马力的旧式传统机床时, 也应考虑使用此类刀具。

3 铬镍铁合金

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的生产时间。在进行了数小时甚至数天的加工后, 如果零件报废, 则会带来巨大的损失。

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 25m/min 或 30m/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, 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, 刀具发生的磨蚀就越大, 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粗糙度。

4 钛合金和铬镍铁合金的加工方法

钛合金和铬镍铁合金有 4 种基本的加工技术或方法。

(1) 传统加工, 该方法需要在 1×1 的 a_e 和 a_p 之间寻求平衡, 即加工采用全切宽(1 倍直径)、一定的切深(最大为刀体直径 1 倍)和平均进给率。

(2) 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, 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 倍直径) 和全切宽 a_e 的情况下运行。在短时间内可切除大量金属, 从而提高生产率。

(3) 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 倍直径。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, 因此尤其适用于以下应用场合: 因刀具悬伸长和复杂应用(如深度为 5 倍直径及以上的槽)而造成不稳定的加工工况。

(4) 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。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。

钻削加工

1 复合材料

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(而不是钻削)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。

为了克服这些挑战,刀具公司通过在钻头上使用不同的钻尖角和螺旋角来尽可能减小钻头在材料上施加的进给作用力。应注意,一些钻头槽型会产生与其他钻头相比更小的进给作用力,性能更出色。

例如,140°的钻尖角(最常用于整体硬质合金钻头)在钻削复合材料时非常适合钻削多个孔。但只要刀具变钝就会失去效力。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°,钻头倒角上为 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(如果有)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(图 2)。这种新型 PCD 钻头槽型的工作条件与



图2 用于CFRP的3刃PCD钻头

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(3 刃)。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。

2 钛合金

在航空航天领域,大多数孔径都很小。对于小于 1mm,最大不超过 20mm 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。

3 铬镍铁合金

由于铬镍铁合金具有非常强的磨蚀性和硬化性,因此用于该材料的高效钻头槽型基本上与用于钛合金的钻头槽型相同。但是,该钻头槽型添加了镀层,以便增加耐磨性并减小摩擦。例如,山高使用氮化钛铝镀层

来保护其铬镍铁合金钻头并延长使用寿命。

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 3 倍直径。

镀层在提高航空航天钻削工艺安全性和生产率方面发挥着关键作用,山高等刀具公司一直致力于获得更好的控制和掌握钻头切削刃的处理技术。通过镀层的各种有效变化(如氮化钛铝)和对切削刃的控制,山高已能够开发出可将钻削速度和进给率提升一倍的钻头。

将来会对现有槽型进行更多的改造,以进一步提高钻头性能。很多这些微小变化只有在当今先进机床技术的帮助下才能实现或变为可能。每年进行数百万钻孔作业的航空航天制造商已经将他们的目光投向了这些特制钻头上。

结束语

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手头上拥有专为特定应用(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。但是,该刀具必须从能够并且愿意提供刀具操作指导的供应商处获取,以实现最优性能。为了充分利用当今专为坚韧的航空航天材料而设计的先进刀具,教育和培训是关键。

(责编 深蓝)