

# 复合材料孔加工技术的新进展

## New Developments in Composite Hole-Making

山特维克可乐满

在不断发展的复合材料领域,加工面临着新的挑战。从根本上而言,这些材料并非难以加工。目前的挑战在于更为高效、安全地加工出符合更高质量要求的孔,尤其是加工带有金属叠板材料的复合材料。这就要求开发出更为优异的刀具解决方案来应对不断提升的需求。同时,由于在复合材料不同工艺装备的加工领域,孔加工居于主导地位,因而钻头正在经历一次切削刀具技术的全面变革。

以碳纤维增强塑料(CFRP)为主体的复合材料的应用愈发普遍,涵盖了航空航天业以及其他行业,尤其是汽车工业和国防工业。与铝合金相比,不难看出复合材料倍受青睐的原因所在:碳纤维增强塑料(CFRP)的抗拉强度通常较铝合金高14倍以上,而其热膨胀系数还不到铝材的1/19;此外其刚度可高出5倍以上,而重量仅为铝合金的1/2。空中客车A380飞机采用了25%的高级复合材料,而新的波音787梦之翼客机使用复合材料的比重高达50%。甚至

是现代军用飞机(比如美国的F-22)也采用复合材料,其结构至少1/3采用复合材料制造;预计将来会上升到2/3。

复合材料机翼,包括翼梁、桁条和蒙皮等这样的结构件,通常由各种不同成分的碳纤维复合材料构成。其他要求苛刻的结构(例如中央翼盒),由几种复合材料构成,通常还覆以铝合金和钛合金叠层。这些复材部件上存在着大量紧固件的孔需要加工,由于紧固件孔的制造品质直接关系到产品的安全性,因而相关孔加工

刀具的发展正日益成为复合材料加工行业的关注要素。基于复材本身特性的制造缺陷,钻削CFRP复合材料会涉及分层和劈裂等问题。此外,如果用同一支刀具在各种航空结构件中的复材和金属叠板(如铝合金或钛合金)上制孔时,就需要选择专注于具体应用的解决方案,这一点非常重要。如此一来,刀具也就必须应对完全不同的工况、迥然不同的材料加工性能、切屑成形以及排屑。

CFRP和CFRP/金属叠板零件上需要加工的部位通常少于传统金

属零件,但由于其材料加工性能的特殊性,对产品品质要求更为苛刻。CFRP 复材的加工涉及到纤维的割断,这时为了获得净切削,在刀具和加工方法上就需要有所改变。复合材料导热性差并且没有成形的切屑,这样一来,加工过程中所产生的切削热的移除就很成问题,因为在高温下,复合材料的树脂基体会被破坏。因此,与金属相比,这些材料在切削过程中属性变化很大,表现出极大的难加工性和不可预测性。CFRP 复材作为零件材料的比重与日剧增,这些方面都要求刀具行业提供不断改善的刀具方案来满足日益增长的工艺需求。

在切削这些材料和零件的工艺过程中,孔加工的工序占据主导地位。在航空航天业中,大部分加工集中于基于复合材料的框架和零件上紧固孔的制备。即使用更大的结构件来减少装配量,孔加工仍对效率、成本和制程的安全性起着决定性的作用。这也就是说,在考虑提高刀具性能、工件质量的一致性和制程安全时,孔加工是其重点关注的对象。

## 工艺规划

令人满意地钻削 CFRP 与相关叠板材料零件孔是一个难题。为确保稳定的工艺过程,工艺规划包括如下内容:应用的描述,待加工的孔数、孔大小、深度和质量要求,制造设备或机床类型、装夹稳定性,CFRP 复材和金属叠板属性,搜集整理类似材料的加工经验数据以及利用从富有经验的专业刀具供应商处所获得的支持。

切削 CFRP 和叠板零件时,正确地应用专用切削刀具是获得理想孔和减少粉尘污染的关键所在。金属材料的制孔质量标准不完全适用于复合材料制孔。无切屑残留和传统的表面粗糙度通常不是衡量复材孔质量的标杆。孔质量一般是基于复

合材料底层分离的程度(分层)和孔中任何残余的纤维剥离(破裂)。这些有的不能直接检测到的缺陷,对刀具是否发挥相应的切削效应是一大考验。有些孔质量的下降甚至发生在刀具的磨损征兆发生之前。

切削过程中由于 CFRP 纤维的硬度,刀具磨损很快。当粘合在较软而且粘性大的树脂中时,就可能出现纤维剥离、弹性错配以及层间破裂的趋势。这样很容易损坏孔入口、出口和孔壁,使其不符合质量要求。另外,当加工叠有钛或铝一类的金属时,刀具必须具有足够的穿透能力。

将新型 CFRP 材料引入到生产中需要新的方法,并且在建立工件材料属性时,基于刀具供应商推荐的应用最佳的刀具和切削参数的测试一直是主要的参考依据。它们并非均质材料,并且可加工性能比金属要差。CFRP 需要根据表面、结构、纤维、树脂和厚度(孔深)进行区分。具有叠层时,金属叠板的种类以及厚度也是需要计入工件加工性能分析的重要因素。

机床设备与装夹的能力和稳定性会影响到切削刀具的选择。通常分自动型、动力型或手持型,体现到具体的设备类别则表现为 CNC 机床、机器人、轻便型自动进给设备或手动风钻。此外,由于工序要求和操作员的工作经验有所不同,需要在刀具选择上做相应的补偿。

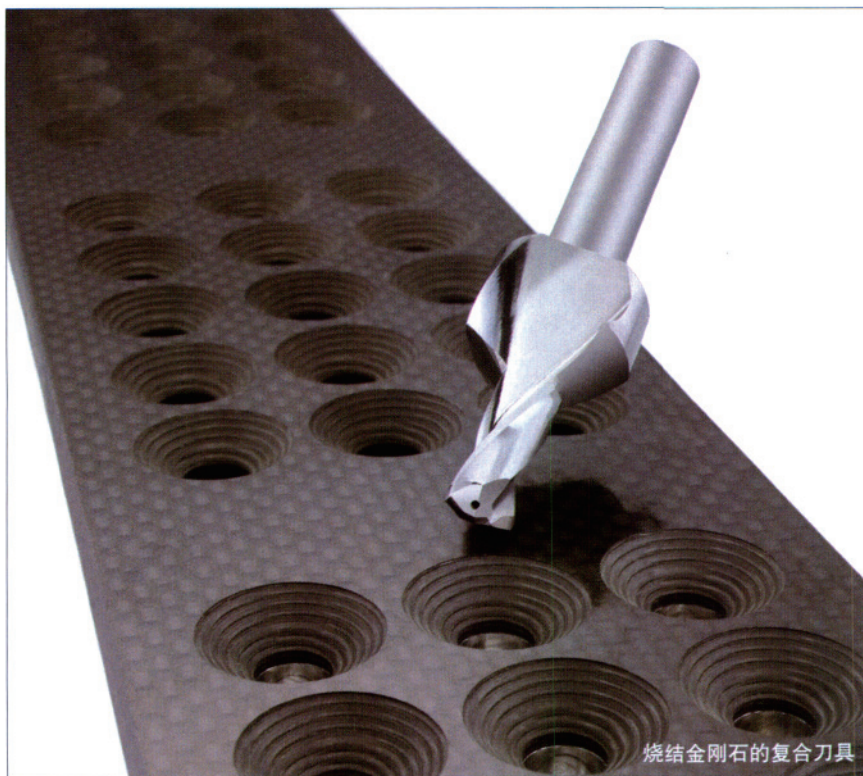
所加工孔的数量往往被看作计算刀具成本的因素。在大批量、单一品种 CFRP 材料制孔时,需要选择经过优化的专用刀具才能更有效率。另一方面,如果孔数量较少,再加上 CFRP 增强复材的种类、零件外形、加工特征以及工件的装卡有很大变化,则意味着应选择通用型刀具。

## 新解决方案

目前,主要的 CFRP 和叠板材料刀具解决方案是基于金刚石涂层硬质合金钻头和烧结金刚石钻头概念(分标准、半标准和定制产品)。

### 1 复材加工的最佳刀具材质

聚晶金刚石(PCD)是最硬的刀具材料,耐磨性最好。同时,它也是



烧结金刚石的复合刀具



专为优化不同应用而开发的标准PCD涂层钻头

用于加工 CFRP 以及叠板材料的最佳刀具材料。在质量水平和一致性要求更趋严格并且对生产效率要求更高的现状下,采用硬质合金作为钻体材料(带有 PCD 切削刃)的钻头可作为复合材料孔加工的理想刀具。硬质合金刀具可通过其钻尖设计和钻柄进行增强,同时在保证刀具后角和排屑能力最大化的前提下,确保最佳的切削效应。使用手持刀具加工、操作员施加的推力不均匀或者钻头和导向套间隙容易变化时,硬质合金的钻头尤其适合此类不稳定的工况。同样这些钻头也可以应用于定进给设备以及在机床上需要一次走刀加工叠层材料的时候。作为切削刀具材料,硬质合金和 PCD 各有不同的优缺点。硬质合金非常坚固,但加工研磨材料时磨损很快;PCD 非常耐磨但易碎。如果把这 2 种刀具材料组合到一起,一定可获得最佳的效果。

## 2 钻尖结构对复材加工缺陷的影响

针对不同的材料和切削工况,需要提供不同钻尖形式和材质的具有 PCD 涂层的标准、半标准和定制品钻头。精心开发的钻尖,可以作为 CFRP 高纤维基或高树脂基的复合材料的首选,同时也可以加工复材金属叠板材料。

应根据现有 CFRP 的特性作出选择,其中有不同的钻尖形式和 PCD 材质可供选择。在机床和定进给设备的应用中,可选用 2 种标准钻头优化工序。一种钻头最适合于高纤维

含量材料,具有降低孔中纤维破裂趋势的极强能力。钻头周边处有用以切断纤维的尖刺,这样既可有效地避免劈裂和分层缺陷的发生;同时,它也适合于 CFRP 和铝叠层材料。另一种标准钻头擅长于钻削高树脂基的 CFRP 复材,其双顶角钻尖结构使钻头能够平稳地切入和切出工件,由此降低了分层风险。

用户可以通过定制选项选择所需的标准品系列之外的产品。要获得加工 CFRP 与铝叠层材料时的通用型钻头,可采用半标准化方式。此类方式所获得的通用性主要针对于高纤维基复合材料,这在大量不同应用中找到最佳的通用解决方案提供了便利。

在为钻削 CFRP 复材或叠板材料进行工艺规划时,需要考虑许多因素。在大量不同的部件材料中理想地钻削孔绝非易事,这时刀具供应商对试切参数、应用的推荐以及高品质的技术支持会助用户一臂之力。

为了获得更长的刀具寿命、更精确的孔公差和缩短加工时间,不同钻尖形式的新一代 PCD 涂层刀具提升了此类产品的强度和精度。类金刚石涂层是硬质合金钻头上的备选,其优点包括高通用性、低成本以及可重磨性。

## 3 化繁为简——山特维克可乐满的通用解决方案 CoroDrill 854 和 CoroDrill 856

切削刀具和刀具系统的专家山特维克可乐满采用 CoroDrill 854 和

CoroDrill 856 金刚石涂层的整体硬质合金钻头,实现了在复合材料加工过程中可靠、高效和高品质的孔加工。CoroDrill 854 钻头的槽形设计是为了提高高纤维含量材料孔出入端的质量,是一款高效率的切削刀具。例如,使用 CoroDrill 854 钻头在 CFRP/ 铝叠层复合材料上加工 1/4 英寸 (6.35 mm) 的孔通常使用以下切削参数:切削速度为 45 m/min;钻深为 70 mm;进给率为 0.03 mm/r;进给为 51 mm/min。为了获得最佳加工效果,山特维克可乐满建议采用干切削或 MQL (微量润滑) 切削条件。

为确保最佳钻孔质量、加工过程安全性和单孔的制造成本,选择正确的钻头是重中之重。考虑到这一点,在容易发生纤维碎裂或起毛的情况下,最好选用带“Spurred”槽形的 CoroDrill 854 钻头;如果发现高树脂含量的材料很难控制分层缺陷的话,则建议使用 CoroDrill 856 钻头,这主要是因其双顶角设计可使钻头平稳地钻入,切出工件材料。

钻削复合材料时,钻削轴向力是产生分层以及劈裂缺陷的主要原因。因此,CoroDrill 854 和 CoroDrill 856 的独特槽形可以降低钻削轴向力,并实现碳纤维的正确切削,以满足严格的孔质量要求。在航空领域,对加工的孔质量的要求通常包括表面粗糙度  $R_a < 4.8 \mu\text{m}$ ,孔径周边小于 1mm 的分层,无纤维碎裂现象。

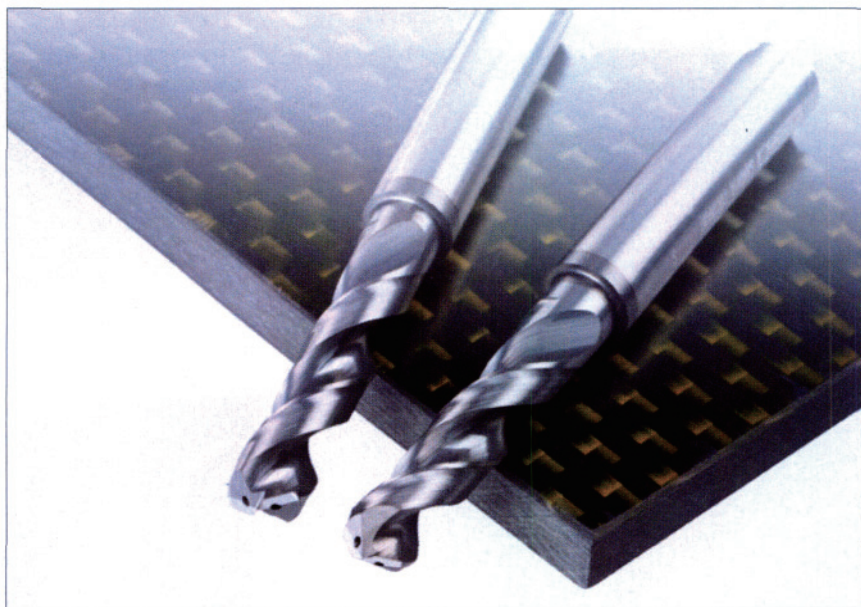
在高树脂含量复合材料上加工孔时,CoroDrill 856 钻头的小顶角和大前角有助于改进孔质量以及降低轴向力,对薄壁件来说,这一点尤其重要。这 2 款 CoroDrill 钻头产品均有助于消除钻孔毛刺,并提高表面质量。

大量的切削试验表明,新型 CoroDrill 产品在提高生产效率和延长刀具寿命方面性能突出。例如,使用 CoroDrill 854 在 CFRP 环氧树脂覆以铝合金叠层 (12mm+12mm) 上

加工直径 1/2 英寸 (12.7mm) 的孔时, 加工结果令人非常满意。在切削速度为 118m/min, 进给率为 0.05mm/r 的切削参数下, CoroDrill 854 可加工厚度为 24mm 的叠层材料 650 个孔——相当于钻削了 15.6m。所有孔的表面粗糙度都在  $R_a < 1.6 \mu\text{m}$  (铝合金) 和  $R_a < 3.2 \mu\text{m}$  (CFRP) 之内, 同时满足 IT8 公差等级标准要求。进入 CFRP 时的分层是微乎其微的, 而从铝合金退出时的毛刺高度也正好在 0.2mm 的最大允许范围内。

在另一项试验中, CoroDrill 856 无论在效率还是孔质量方面都优于竞争对手的钻头。在 CFRP 增强 (双马来酰亚胺) 高温树脂材料上钻削 1/4 英寸 (6.35mm) 孔时, 目标是要击败竞争对手设定的 300mm/min 的制孔速度, 同时保持 H11 的孔公差。通过将切削速度从 100m/min 提高到 150m/min 并略微将进给率从 0.06mm/r 放慢到 0.05mm/r, CoroDrill 856 不仅实现了 373mm/min 的制孔速度, 而且将孔入 / 出端的孔口质量提高了 25%。

目前可为客户提供直径 4~12.7mm (长达 5 倍径) 的选择, CoroDrill 854 和 CoroDrill 856 钻头为标准涂层 N20C, 这种金刚石涂层延长了刀具寿命, 尤其适合切削如复合材料一类的研磨材料, 摩擦系数很低。可根据特定的直径、长度、槽形和材质 (包括硬质合金和聚晶金刚石) 提供定制服务, 同时也提供库存



CoroDrill 854 和 CoroDrill 856 钻头

产品。

#### 4 硬质合金与 PCD 的完美结合 (烧结金刚石钻头)

用于 CFRP 和叠层材料的最新钻头类型基于烧结技术, 即在硬质合金钻体中集成了 PCD 切削刃。这种先进的工艺方法得益于过去 20 年间所开发的已获得专利的技术, 在高韧性的硬质合金钻体中结合了坚固且耐磨的 PCD 切削刃。这样一来, 就使 PCD 切削刃融合为钻头的一部分, 由于距钻尖足够远, 因此就能够应用高强度的钎焊与钻头本体连接。钻尖的刃形角度全部经过磨削, 切削刃由合金刀体渐变探出, 起到了保护钻尖的作用。

烧结技术使得开发更多的金刚石钻尖刃形角度成为可能, 采用传统的焊接 PCD 工艺就无法实现这一点。这样, 无论在刚性差还是刚性好的不同工况下, 都可以提供不同的优化钻尖设计来稳定地加工出大量高品质的孔。

烧结 PCD 钻头通常应用在自动化加工设备, 旨在优化刀具性能以及保证钻削 CFRP 复材的时候孔质量的一致性。同时为了应用更高的切

削速度并保证更小的孔入口和出口缺陷, 其独特的切削刃要经过刃口强化处理。

烧结 PCD 钻头也可针对叠有金属叠板的 CFRP 复材而专门设计。在高应力的集中区域经过精密研磨, 使钻头更能保持锋利性, 并确保更长的刀具寿命。同时也能确保刀具在低钻削力下切削 CFRP 纤维, 这样在复材层或金属层的孔出端, 可保证劈裂、分层和毛刺等缺陷风险最小化。

应用最新的刀具技术加工 CFRP 复合材料以及 CFRP 复材 + 金属叠板材料, 是成功的前提。在更长的刀具寿命期间确保质量水平的一致性、操作员安全性、减少废品以及对缩短生产时间、满足与日俱增的需求均要求开发出专注于复材加工的更好的刀具方案。作为切削解决方案的创新者与合作供应商, 山特维克可乐满与 Precorp 携手为 CFRP 和叠层材料提供品质一流的刀具产品以及技术服务。不断改进的标准品与定制 PCD 和硬质合金钻头能够全面满足航空航天工业与其他行业中广泛应用这些材料加工时所面临的问题。

(责编 良辰)



烧结PCD和PCD涂层钻头——专为加工CFRP复材或复材金属叠板材料而优化设计