

金刚石刀具促进复合材料钻孔加工应用的发展

Diamonds Advance Composites Drilling

肯纳飞硕金属(上海)有限公司

由于碳纤维材料和金属材料的机械性能有极大差别,在对紧固孔进行有效的钻孔加工时,需要使用具有高耐磨性和优化槽型的切削刀具产品。在加工航空航天领域零配件时,多晶金刚石(PCD)刀具要比传统的碳化钨硬质合金刀具有更高的加工效率。一些领先的刀具制造商正在开发并生产 PCD 钎焊钻头产品。

碳纤维增强复合材料(CFRP)具有比重小、强度高、优异特性,并且在极端条件下具有稳定的材料属性,因此在全球航空航天领域有着广泛的应用。

CFRP 材料可以单独使用,也可以与钛板和铝板配合使用。举例而言,波音 787 制造材料的 80% 为复合材料,相当于其总重量的 50%,可以减少 1500 张铝板和 50000 个固定件的使用。与波音 767 相比,可以节省 20% 的燃油消耗。

目前,胶粘和焊接等连接技术存在很多问题,因此,铆接固定技术在实际应用中依然占主流地位。

由于碳纤维材料和金属材料的机械性能有极大差别,在对紧固孔进行有效的钻孔加工时,需要使用具有高耐磨性和优化槽型的切削刀具产品。在加工航空航天领域零配件时,多晶金刚石(PCD)刀具要比传统的

碳化钨硬质合金刀具有更高的加工效率,一些领先的刀具制造商正在开发并生产 PCD 钎焊钻头产品。这些刀具产品的切削刃采用 PCD 材料,钻体部分为整体硬质合金材料。硬质合金钻体有很好的刚性和尺寸精度,确保钻孔的加工质量,同时具有内部螺旋冷却通道,螺旋式排屑槽可以提高冷却性能和排屑性能,这些特性对钻孔加工是非常必要的。

位于功能区的切削刃部分采用 PCD 材料,具有极好的耐磨性,可提高加工效率。图 1 所示为采用 PCD 钎焊刀片的定制模块化钻头。

优化的刀具设计具有关键性的作用,在加工先进的航空航天复合材料时可以确保极好的钻孔质量。在刀具尺寸设计中,很多因素对钻孔质量都有影响,例如,为了降低切削力而提高刀尖半径的锐度、增大前角等。

其他因素还包括:为了减小推进力、避免纤维材料的撕裂现象而减小钻尖角度,为了改善毛口高度控制性能而优化刃口设计。机床刀具、主轴及整体刀具的刚性、刀柄、内冷或射流冷却方式,以及钻孔工件材料在刀具设计过程中也都是需要重点考虑的因素。

在多数情况下,为了满足客户的



图1 采用PCD钎焊刀片的定制模块化钻头

不同需求,需要为客户及时提供定制刀具产品。

刀具开发过程

为了开发一款高性能的PCD刀具产品,应当在考虑综合因素的情况下,再进行深入的研究。这种开发过程不仅决定了刀具的性能,还对刀具的加工效率和成本有重要影响。

在生产用于复合材料加工的合成金刚石钻头产品时,有4种主要技术可以应用。

1 CVD(化学气相沉积)金刚石涂层钻头

整体硬质合金钻头在最后一个工艺进行CVD金刚石涂层处理,这种方法成本效益高,但刃口锐度受到了涂层厚度的影响。此外,由于硬质合金基体部分和金刚石涂层部分的硬度不同,导致吸收冲击能量的性能不佳,防崩刃性能也很有限。

2 PCD镶刃钻头

圆锥型的PCD材料按照特点钻尖槽型烧结至较小尺寸的硬质合金基体之上,然后,将这些半成品钎焊到整体硬质合金钻体上。为了处理硬质合金和PCD连接面之间的高应力问题,这款PCD产品在PCD材质优化方面受到了限制。后烧结工艺因为需要增加内部冷却孔以去除非功能区的金刚石材料,成本高昂。

3 PCD纹络钻头

在整体硬质合金棒料之上预先加工的槽内填入PCD粉末原料,然后经过高温高压处理形成PCD排列结构,再对棒料进行剪切,钎焊到钻体上,最后按照规定槽型进行磨削处理。这种PCD纹络技术可以制造复杂槽型以及具有高正前角外形的刀具产品;与PCD镶刃刀具产品相比,只需较少的磨削处理。这种刀具因为要对复杂3D槽型进行高温高压处理,所以尺寸受限。此外,高钴成分材料的使用降低了PCD材料的硬度和耐磨性。

4 PCD钎焊钻头

对于较小尺寸刀具来说,最成熟的PCD钻头加工技术为2D技术(例如PCD扁钻),可以使用一种特殊的硬质合金和PCD夹层材料,而对于较大尺寸刀具,则可以使用纯PCD钻尖材料。

这款产品很难增加一个用于复合材料加工的前角,在槽型方面有严重的缺陷。3D钎焊需要多个所需材质的PCD刀座,且微观结构应按照规定切割为螺旋形状,在整体硬质合金钻头上应磨削出一个对应的螺旋槽,以安装PCD刀片。

与PCD镶刃产品相比,这款3D钎焊产品只在功能区采用PCD材料,大大提升了加工性能,被用于开发本文所述的PCD测试钻头。

选择PCD材质的另一个重要原因是金刚石材料的机械加工性能。机械加工性能是通过计算由不同PCD原材料制成相同刀具的时间评定的,重点关注各个制造步骤,包括PCD刀盘的腐蚀和PCD材料的磨削。机械加工性能越好,等级就越高,制造时间越短,成本越低。这与在开发一款具有竞争性的刀具产品时,刀具性能的重要性是一样的。

PCD钎焊

本文中介绍的刀具产品需要将PCD螺旋切片钎焊到碳化钨刀体上,选用的钎焊技术应尽量避免处于亚稳态的多晶金刚石石墨化,还需要将PCD与碳化钨进行粘结处理,这需要运用高效的钎焊技术。高效的钎焊材料通常包括高熔点聚合物材料,如钛材料,因此钎焊温度很高,对金刚石相的稳定性有负面影响。为了避免石墨化,在钎焊过程中应避免氧化环境,最新的技术包括氩气环境中的感应钎焊以及真空钎焊。

优化的刀具槽型

在对复合材料/钛材料层叠板

进行钻孔加工时,选择合适刀具槽型非常困难,因为这两种材料在切削过程中表现出不同的特性。CFRP材料的钻孔加工通常需要大螺旋角和长切削刃,因为碳纤维应当沿着切削刃发生剪切作用,长切削刃通过小钻尖角实现。

此外,CFRP材料的钻孔加工还应降低轴向力,以避免在退刀时发生加工材料层裂。

这些特点可以形成非常锋利的切削刃槽型,同时也减小楔块角度。后角可以高达 20° ,螺旋角约为 30° 。钛材料的切削原则上也可使用锋利的切削刃,但与CFRP材料的钻孔加工相比,需要一个更加稳定的楔块角。钛材料加工中的刀具后角通常在 $8^\circ\sim 14^\circ$ 之间的范围。与钢材料加工相比,这些后角通常更大(在本文展示产品中约为 12°),后刀面上热量的降低,能够减少刀侧面的磨耗。大后角与典型的 30° 螺旋角结合应用时,会明显降低切削刃的强度。螺旋角已减小至 $15^\circ\sim 20^\circ$,从而可对大后角做出平衡。

本文展示的这项制造工艺可以根据所需刀具槽型,选择不同的螺旋角。这是本文展示工艺的主要优势之一,因为普通的PCD刀尖镶刃刀具允许使用的最大螺旋角仅为 8° 。为了实现孔径紧密公差,钻尖应当具备卓越的自定中心性能,这一点是绝对必要的。从另一个角度而言,钻尖角度对毛刺的形成也起到重要的影响。

众所周知,钻尖角在低于 90° 或高于 150° 时,可以帮助降低钻孔出口处的毛刺高度。因此,钻尖角为 155° 的钻头适合钛材料加工的需求,但定中心性能不好。所以,推荐使用双钻尖角设计方案,其中内部钻尖角为 130° ,外部钻尖角为 155° 。与普通应用的长切削刃钻头相比,这款钻头产品的整体钻尖高度较低。因此,第3条和第4条刃带可以很快

接触材料,有益于形成更紧密的孔径公差。其另一个优势在于具备内冷性能。

对纯 CFRP 板材进行钻孔时,在压缩空气的作用下,内冷孔可以促进 CFRP 切屑经钻头排屑槽快速排出;对 CFRP/ 钛层叠板材料进行加工时,可以通过密封的内部冷却通道进行微量润滑(MQL),在促进润滑的同时还可以降低在钛材料加工中形成的高热,因为这种材料的热传导率较低。

在使用 PCD 刀具进行钻孔加工时,微量润滑是绝对必要的,否则切削刃部位形成的高热会导致石墨化或形成碳化钛,这种反应会形成排屑槽部位出现化学磨耗,最终会导致排屑槽内的 PCD 材料崩裂。

试验性研究

这款 PCD 刀具产品经过了试验性测试,目的在于评估在规定应用中最合适的 PCD 材质和刀具槽型。测试过程中的刀具设置和切削参数如下。

1 测试刀具

PCD 钎焊钻头,直径为 11.113mm,3 种不同的 PCD 材质(G4、KD1415、KD1425),未经涂层处理相同槽型的钻头。

2 测试材料

测试材料包括一块厚度为 8.7mm 的购置 CFRP 板材(Isocarbon 3k),并与一块厚度为 10.8mm 的 Ti-6Al-4V 板材牢固地层叠在一起。使用测试刀具进行通孔加工,从 CFRP 侧进刀,从钛板侧出刀。

3 机床刀具及冷却剂

CNC 加工中心(HeckertC WK 400)1 台,水平主轴,主轴贯通式微量润滑方式(Vascomill MMS FA2)。

4 切削参数

切削速度为 20m/min (65 SFM),进给率为 0.05mm/rad (0.002ipr),同时适用于 CFRP 和钛材料加工。不

使用啄钻加工法。

5 刀具检测

为了监控刀具磨损过程,在完成 4 个孔的钻孔加工后,使用显微镜对钻头进行检测。在完成 24 个孔的钻孔加工后,在扫描电子显微镜下观察刀具的磨耗结构。

6 钻孔测量

在完成所有加工测试后,对测试材料进行清洗和标注。对所有钻孔进行检测。对 4 个孔的内部进行直径测量(2 个在 CFRP 板材的进口处和出口处附近,2 个在钛板材的相同位置)。同时还对钛板材底部出口孔表面的毛刺高度进行测量。

结果及分析

超长、可预测以及稳定的使用寿命是决定刀具产品是否能够赢得客户的主要因素。在对 CFRP/Ti 复合基体材料进行钻孔加工时,为了获得满意的钻孔质量,必须同时满足几个要求。钻孔尺径为紧公差尺寸,以安装紧固件,钻孔出口处的毛刺高度必须符合规定要求,以减轻或避免去毛刺工序。为了避免因刀具突变失效

而导致的钻孔损坏,并尽力维护刀具的可修磨性,钻尖的崩刃现象必须尽可能降低,并对其进行监控。

通过以下标准确定测试刀具已达到使用寿命极限:

- (1) 钻孔尺寸公差为 $11.113+70\mu\text{m} (H10)$;
- (2) 毛刺尺寸为 0.2mm;
- (3) 出现钻尖崩刃。

测试表明,PCD 钻头在使用寿命即将结束时的主要失效模式是钻尖出现崩刃,硬质合金钻的失效模式表现为毛刺高度超限。在这次测试中,所有钻孔都符合钻孔质量要求。

1 钻孔尺寸

图 2 显示内容为测试 PCD 刀具的钻孔加工尺寸。在对每个钻孔检测时,孔径的测量位置选择在 4 个不同的位置:2 个在 CFRP 板材部位,2 个在钛板材部位,分别对应于钻孔进口表面和出口表面。

由图 2 可以看出,位于钛板材部位的钻孔质量非常好,尺寸在规定公差值的中间范围,上下浮动范围很小,为 $10\mu\text{m}$ 。钛板材钻孔入口处和出口处的尺寸非常接近。但在 CFRP

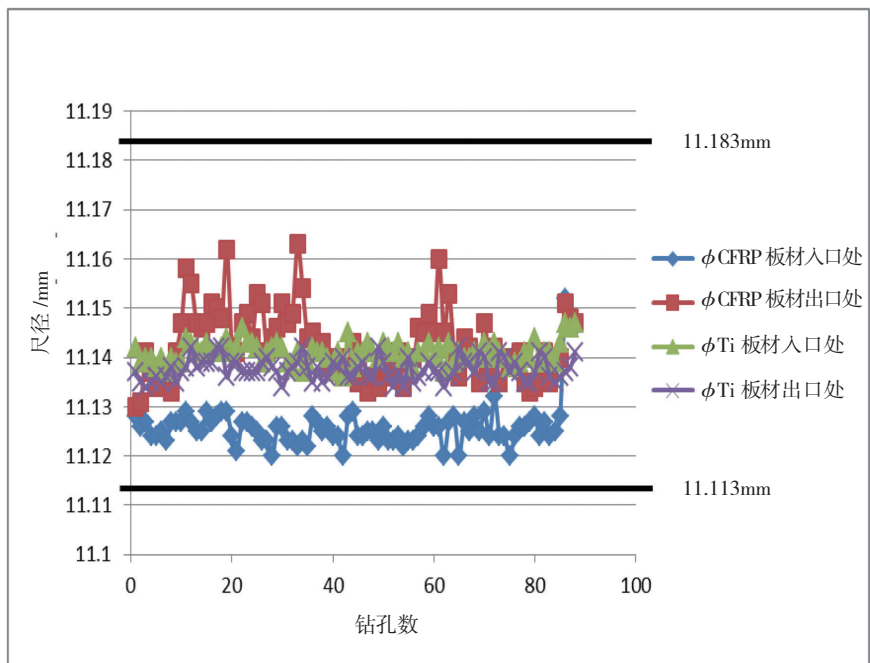


图2 一款 PCD 刀具加工钻孔数与尺径的对比

板材部位, 钻孔入口处和出口处的孔径差较大。这种现象是因为在排屑过程中, 切屑对钻孔避刮擦造成的结果。

对于减少切屑的刮擦, 以及增加钻孔尺寸的一致性而言, 提高切屑控制性能是非常必要的。仅仅依靠刀具设计提高切屑控制性能是非常困难的。在加工实践中, 一种成熟的工艺是增加啄钻操作, 或通过振动支持钻孔操作, 实现控制切屑长度并减弱切屑刮擦效果。

测试结果表明, 在此展示的新型钻尖产品可以加工出 H10 公差等级的钻孔尺寸。在优化加工条件以及加工过程稳定的情况下, 甚至可以实现 H8 公差等级的钻孔尺寸。不能证明钻孔质量与切削刃材料有必然关系。相同钻尖槽型的 PCD 钻头和硬质合金钻头的钻孔加工质量是相

似的。

2 毛刺

在探讨与毛刺高度控制和磨损结构相关的钻孔结果时, 可以清晰地看到不同切削刃材料产生的不同结果。图 3 为一款硬质合金刀具和 2 款 PCD (KD1415 和 G4 材质) 刀具钻孔加工时毛刺高度的发展过程与钻孔数的对比情况。

可以看出, 硬质合金钻仅完成 14 个钻孔加工之后, 在钻板材出口处的毛刺高度就明显增加; 而 2 款 PCD 刀具在加工过程中, 首次出现毛刺超过规定的钻孔分别是第 57 个钻孔和第 117 个钻孔。

从理论上讲, 毛刺高度的发展过程与刀具钻尖部位的磨损紧密相关。这一点可以在硬质合金刀具和 PCD 刀具的对比中显明, 因为这 2 种材料的硬度有很大的不同。所以, PCD

刀具钻尖处的磨耗发展过程较慢。与硬质合金钻相比, PCD 钻的钻尖磨耗要少得多。这 3 种 PCD 材质的磨耗发展情况区别很小。PCD 材质的主要磨耗类型为切削刃 / 钻尖部位的崩刃。

表 1 对这 3 种 PCD 测试材质的刀具寿命做了综合对比。可以看出, G4 和 KD1415 材质在刀具平均寿命方面非常相似。KD1415 在刀具使用寿命的稳定性方面表现更好, 并且因为机械加工性能更好, 可以减少制造成本。因此在本文所述的加工应用中, 被选为最适宜的材质。

结束语

开发了 3 款采用不同 PCD 材质以及优化槽型的 PCD 整体硬质合金钎焊钻头产品, 并对这些产品进行了测试。测试结论如下:

(1) 在 PCD 刀具制造过程中, 3D 钎焊技术允许刀具采用灵活的螺旋角角度, 因此也可以采用大前角设计方案。与 PCD 镶刃产品相比, 3D 钎焊产品因为去除了刀具功能区表面的 PCD 材料, 所以具有更好的机械加工性能;

(2) 这款开发的 PCD 钻产品采用优化的刀具槽型(双钻尖角度、螺旋槽、内部螺旋冷却通道、大前角), 可以加工高质量的钻孔(钻孔尺径及毛刺高度控制);

(3) 与未经涂层处理的整体硬质合金钻相比, PCD 钻在使用寿命方面有显著的改善;

(4) 所有测试 PCD 刀具有相同的磨损形态, 从前刀面出现细微裂缝开始, 最终会因钻尖崩刃导致突发性失效;

(5) 在刀具寿命稳定性和机械加工性能方面, KD1415 要比 G4 和 KD1425 材质有更佳的表现。所以, KD1415 是最适合本文所述加工应用的材质。

表1 3种PCD测试材质的刀具寿命比较

参数	G4	KD1415	KD1425
钻头 1	28	68	56
钻头 2	123	71	62
钻头 3	81	88	16
平均值	77	76	45
偏差 (+/-)	(46/49)	(12/8)	(17/29)

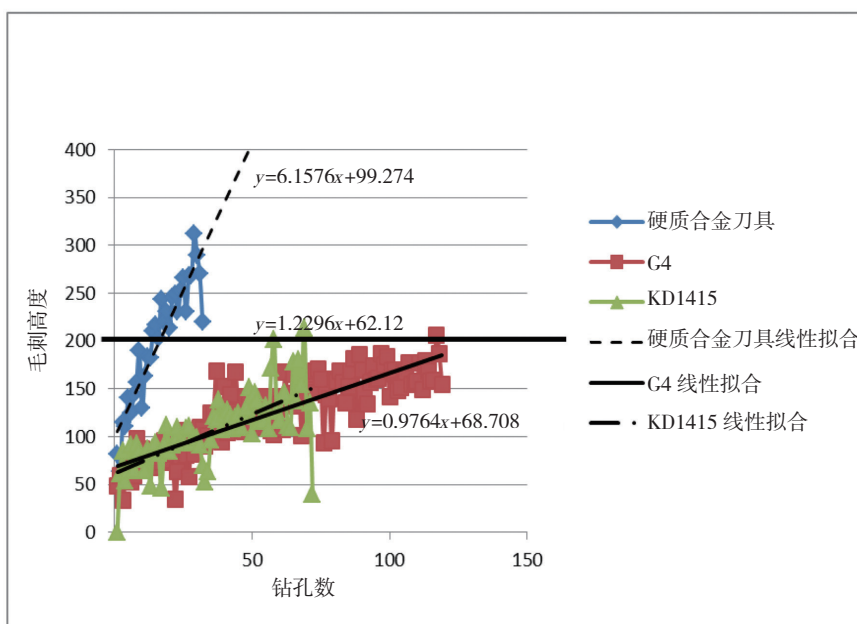


图3 因刀具磨耗导致的毛刺高度发展过程与钻孔数的对比

(责编 亿霖)