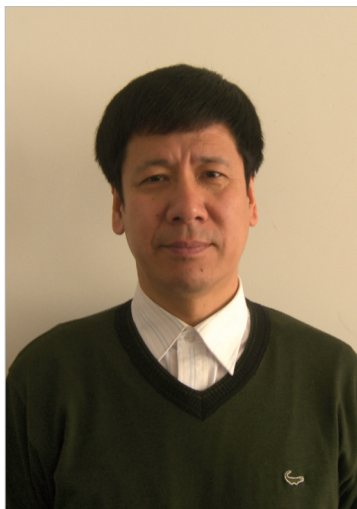


复合材料高效加工刀具技术

High-Efficiency Cutting Tool Technology for Composites

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 唐臣升



唐臣升

研究员级高级工程师,主要从事金属切削刀具以及金属切削加工技术、数控加工技术的研究工作。中国机械协会生产切削分会委员,中国刀具协会会员。独立或主持完成中国航空工业、省级、市级科研项目 20 多项。曾多次荣获中航工业集团、辽宁省、沈阳市科技成果和科技论文一、二、三等奖 20 余项;获得国家发明专利 2 项(其中 1 项专利还荣获中国国际发明博览会金奖),已获申请号发明专利 6 项,2 项授权实用新型专利,已获申请号实用新型专利 9 项;获得国家软件著作权保护 4 项;发表核心期刊论文 2 篇。

碳纤维复合材料铣边主要是将成形后复合材料零件周边的多余部分去除,而碳纤维复合材料型面铣削加工主要是将复合材料按零件型面设计要求加工成形。

复合材料具有高比强、高比模、耐疲劳等诸多优点,因而,已越来越广泛地被应用在航空航天制造业中,如波音 787 飞机复合材料的应用量已达到 50%。我国飞机上复合材料的应用比例也大幅度增加。但是,复合材料是一种非常难加工的材料,其主要原因是复合材料是 2 种或 2 种以上的材料通过物理方法形成的,不同于晶格结构的金属,因而材料的塑性变形难,散热性也差,因此,复合材料铣削加工性能差、效率低、刀具寿命短,被加工表面粗糙度值高,易出现分层或抽丝现象。传统的复合材料加工刀具的切削刃不足够锋利、切削阻力大,加剧了刀具的磨损,而且刀具的切削进给速度很低,很难满足复合材料优质高效的加工要求。

为了解决复合材料加工难的问题,我们专门对碳纤维和芳纶纤维、

纸蜂窝等典型航空复合材料加工的系列专用刀具及其加工工艺进行研究。主要技术途径是,首先,对国内外关于复合材料及其加工方面的技术资料进行分析研究;其次,对复合材料的化学和物理性能、材料的切削加工性能进行系统的技术分析;再次,确定加工复合材料刀具的材料、结构及其切削方式;最后,依据大量的切削试验数据,对加工复合材料刀具的结构参数及其切削加工参数进行优化处理,以确定最佳的刀具设计。

复合材料的制孔加工

复合材料加工主要包括制孔加工和铣削加工,下面就碳纤维、芳纶纤维和纸蜂窝等典型航空复合材料加工制孔加工刀具及其工艺方法进行介绍。

1 碳纤维复合材料制孔加工

(1) 碳纤维复合材料制孔刀具的分类。

碳纤维复合材料制孔的刀具主要有整体硬质合金钻头、硬质合金铰刀、硬质合金和PCBN/PCD(聚晶立方氮化硼/聚晶金刚石)铰钻以及钻铰铰复合刀具,如图1所示。



图1 碳纤维复合材料制孔刀具

碳纤维复合材料制孔系列刀具针对被加工复合材料及其结构的不同都有其对应的最佳结构参数及其切削加工参数,这些最佳参数都是通过系统的优化切削试验后获得的。

这些刀具具有复合材料铣削加工性能好、效率高、刀具寿命长、被加工表面粗糙度好等优点。因此,应用该系列刀具避免了复合材料加工易出现分层或抽丝的现象,很好地满足了复合材料优质高效的加工要求。

(2) 碳纤维复合材料制孔加工方法。

碳纤维复合材料制孔工艺方法

如图2所示。碳纤维制孔工艺主要技术要求是,在保证被加工孔精度的前提下尽可能防止被加工孔出现分层或抽丝现象,同时,应尽可能提高制孔加工的效率。碳纤维复合材料

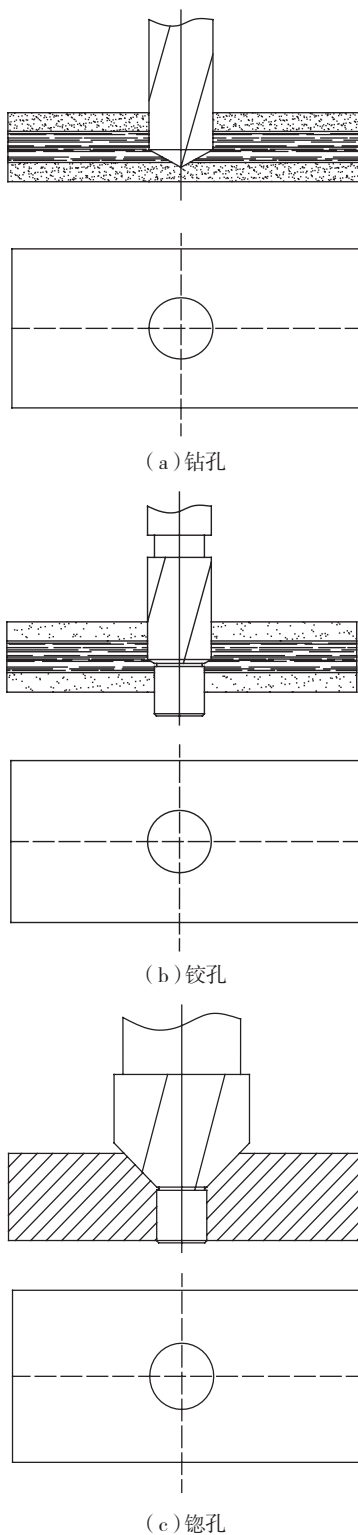


图2 碳纤维复合材料制孔加工方法

制孔系列刀具的优化切削试验目的就是 will 碳纤维复合材料制孔系列刀具专用化,以极大地提高碳纤维复合材料制孔加工的效率和质量。

2 芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料制孔加工

(1) 芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料制孔刀具的分类。

芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料制孔刀具主要有整体硬质合金麻花钻、整体硬质合金鱼鳞钻以及PCBN/PCD(聚晶立方氮化硼/聚晶金刚石)钻头。

我们常用的芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料制孔刀具是整体硬质合金鱼鳞钻,也是一项具有自主知识产权的产品,如图3~图4所示。其中,图3所示的是整体硬质合金鱼鳞钻的图片,而图4所示的是一种规格整体硬质合金鱼鳞钻的结构设计图。该鱼鳞钻同时具有钻削和铣削功能,并且钻尖为“三尖两刃”结构,从而更好地满足了芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料高精度制孔加工的要求。

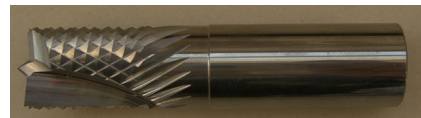


图3 加工芳纶蜂窝夹层鱼鳞钻

(2) 芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料制孔的方法。

纸蜂窝一般不单独制成飞机构件,常与芳纶纤维复合材料制成夹层结构,以增加其结构强度。因此,这里主要介绍芳纶与纸蜂窝纸蜂窝夹层结构复合材料制孔的制孔工艺方法,如图5所示。

针对纸蜂窝及芳纶夹层复合材料的结构特点及其加工特点,我们研制了“三尖两刃”结构鱼鳞钻铣刀。该刀具的“三尖两刃”结构更好地保证了纸蜂窝及芳纶夹层结构钻孔的质量,避免了芳纶复合材料出现分层或抽丝的现象。

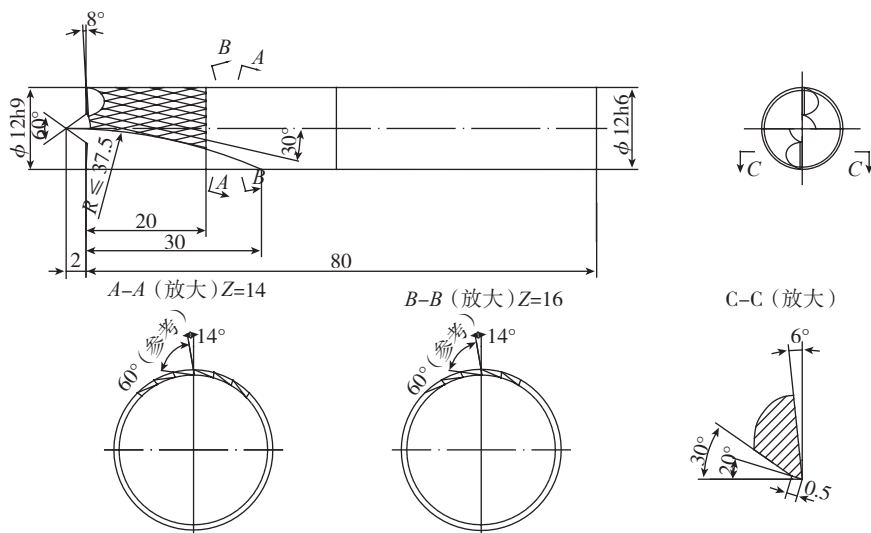
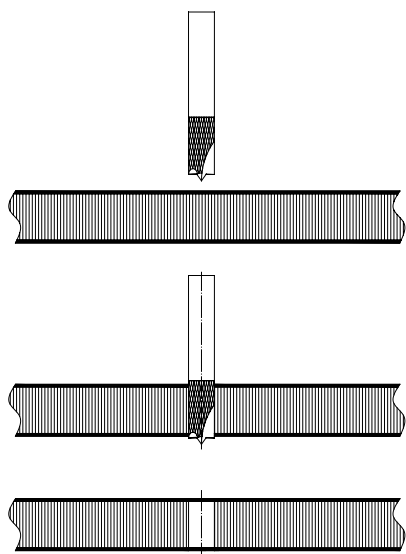


图4 加工芳纶蜂窝夹层鱼鳞钻结构图

图5 芳纶与纸蜂窝夹层结构复合材料
钻孔示意图

复合材料铣削加工技术

除了制孔加工外,复合材料的加工主要就是复合材料的铣边以及曲面的五坐标铣削加工,尤其是蜂窝复合材料曲面的五坐标铣削加工。

1 碳纤维复合材料的铣削加工

1.1 碳纤维复合材料铣削加工刀具的分类

加工碳纤维复合材料铣刀的特点是刀具的材料硬度高、耐磨性好。因此,加工复合材料铣刀均为硬质合金、金刚石、CBN等超硬材料;加工

复合材料的铣刀转速又是特别高,一般都大于12000r/min,达到了以铣代磨效果。同时,为了防止复合材料分层,加工复合材料铣刀的侧刃均为左右对称双螺旋刃结构。

碳纤维复合材料铣削加工刀具主要有整体硬质合金鱼鳞铣刀、PCBN/PCD(聚晶立方氮化硼/聚晶金刚石)直刃铣刀、左右旋交错刃无毛刺铣刀等。

下面简要介绍我们单位研制的碳纤维复合材料铣削加工鱼鳞铣刀和左右旋交错刃无毛刺铣刀,如图6、图7所示。这2种刀具已经获得了国家专利。

(1)加工碳纤维复合材料整体硬质合金鱼鳞铣刀。

常见的复合材料加工方法一种是切削,另一种是磨削。为了不出现材料分层或毛刺现象而且还要提高

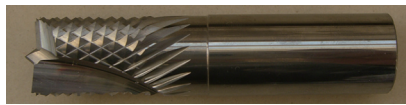


图6 加工复合材料鱼鳞铣刀



图7 加工复合材料左右旋交错刃无毛刺铣刀

加工效率,对于复合材料铣削加工应该采用铣磨结合的加工方式。因此,我们便提出了设计整体硬质合金“鱼鳞”铣刀。该刀具是由刃部和柄部两部分组成,该种鱼鳞铣刀刃部上的切削刃是由左右旋对称交错的螺旋槽而形成的许多切削单元组成,左旋螺旋槽比右旋多2条,左右螺旋槽的螺旋角均为30°;每个切削单元为主切削刃长只有0.05~0.1mm的螺旋刃;螺旋刃前角制成10°~15°,且前刀面在法剖面上为直线;螺旋刀槽深为刀具直径的7%~8%;螺旋刃后角制成20°~25°;螺旋刃后刀面沿圆柱面宽度制成0~0.01mm。

该刀具的优点为:切削刃是由许多切削单元组成,切削刃锋利,从而极大地降低了切削阻力,而且可以实现高速切削,达到了以铣代磨的效果,因此,提高了复合材料的加工效率和表面质量,延长了铣刀的使用寿命。

(2)加工复合材料左右旋交错刃无毛刺铣刀。

左右螺旋交错刃硬质合金立铣刀主要用于纸蜂窝及其芳纶夹层结构复合材料的切边铣削加工。由于该刀具的切削刃是左右螺旋对称交错的,而且左右螺旋切削刃的交汇处始终保持在纸蜂窝及其芳纶夹层结构的中间位置,因此,在切边加工过程中,夹层结构两表面的切削力始终向着夹层结构的中心,从而避免了产生裂纹、起层或抽丝现象。

加工复合材料左右螺旋交错刃硬质合金立铣刀如图8所示。

1.2 碳纤维复合材料铣削加工方法

碳纤维复合材料铣边主要是将成形后复合材料零件周边的多余部分去除,而碳纤维复合材料型面铣削加工主要是将复合材料按零件型面设计要求加工成形。

根据碳纤维复合材料的加工特点,碳纤维复合材料铣边和型面铣削加工刀具主要是具有自主知识产

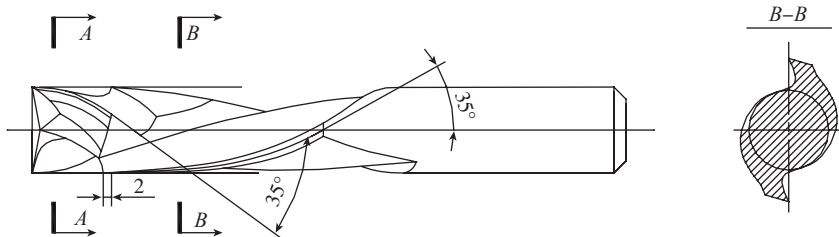


图8 左右螺旋交错刃硬质合金立铣刀结构

权的硬质合金“鱼鳞”铣刀,该刀具的优点如前所述,切削刃锋利,可以实现高速切削,达到了以铣代磨的效果,因此,提高了复合材料的加工效率和表面质量,更好地防止了碳纤维复合材料出现分层或抽丝等现象。

2 芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料的铣削加工

2.1 芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料铣削加工刀具的分类

加工芳纶纤维、纸蜂窝及其夹层结构复合材料刀具主要有PCBN/PCD(聚晶立方氮化硼/聚晶金刚石)直刃铣刀、左右旋交错刃无毛刺铣刀以及加工纸蜂窝复合材料专用组合铣刀等。

图9是我们单位研制的加工纸蜂窝复合材料专用组合铣刀。该刀

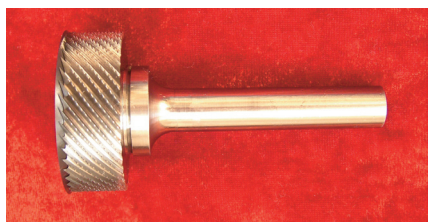


图9 加工纸蜂窝铣刀

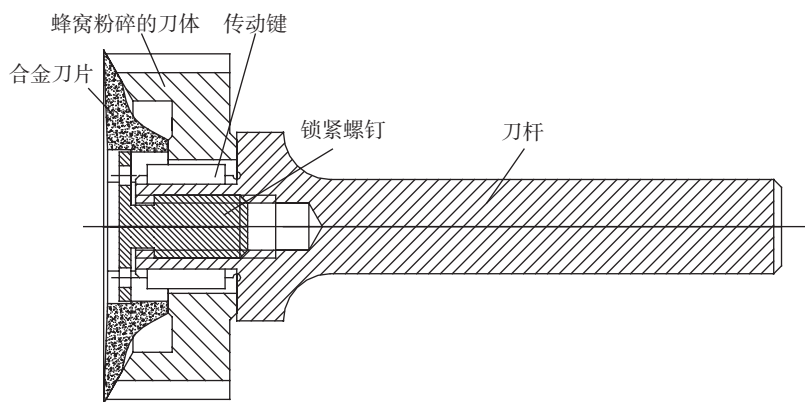


图10 加工纸蜂窝铣刀装配图

具已经获得了国家专利。

根据纸蜂窝复合材料的平面以及五坐标曲面的切削加工特点,设计出高精度、高效率纸蜂窝复合材料平面与曲面切削加工刀具,实现所设计刀具的精准制造及刀具尺寸检测,并通过切削试验来优化刀具的设计及其切削加工参数。

刀具的装配图如图10所示,主要是由合金刀片、蜂窝粉碎的刀体、传动键、锁紧螺钉以及刀杆五部分组成。刀片主要作用是将纸蜂窝材料要去掉的部分切断。蜂窝粉碎的刀体主要作用是将切掉的纸蜂窝粉碎变成碎末状切屑。刀杆主要是将刀具的各组件连接成一体,同时也是刀具的柄部。

2.2 纸蜂窝、芳纶纤维复合材料及其与纸蜂窝夹层结构复合材料铣削加工方法

(1) 纸蜂窝复合材料铣削平面加工方法。

纸蜂窝的平面加工方式如图11所示,刀具端部的合金刀片将纸蜂窝材料切断,而侧刀则将切掉的纸蜂窝

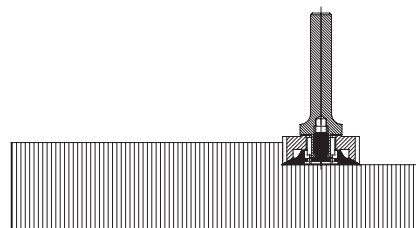


图11 纸蜂窝平面铣削加工示意图

粉碎变成碎末状切屑。

(2) 纸蜂窝与芳纶复合材料夹层结构的切边铣削加工方法。

如前所述,由于芳纶具有极强的韧性以及纸蜂窝的低刚性,而且纸蜂窝芳纶夹层结构中的芳纶复合材料为薄板类结构,因此目前芳纶复合材料的切边加工大多应用直刃金刚石刀具和左右交错刃数控立铣刀加工,以确保切边后纸蜂窝芳纶夹层结构复合材料具有较好的粗糙度和尺寸精度。目前,我公司采用性价比较高的左右交错刃数控立铣刀加工纸蜂窝芳纶夹层结构复合材料。为了提高刀具的寿命,可以将刀具的刃部加以成本较低的金金刚石涂层。

用左右交错刃数控立铣刀加工复合材料的工艺方法如图12所示。

用左右交错刃数控立铣刀加工复合材料工艺方法的优点如前所述,由于该刀具的切削刃是左右螺旋对称交错的,而且,左右螺旋切削刃的交汇处始终保持在纸蜂窝及其芳纶

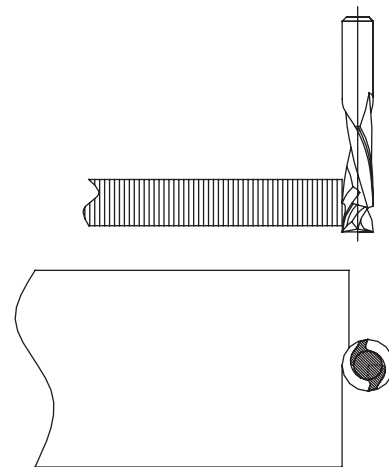


图12 用左右交错刃数控立铣刀加工复合材料示意图

夹层结构的中间位置,所以,再切边加工过程中,夹层结构两表面的切削力始终向着夹层结构的中心,从而避免了产生裂纹、起层或抽丝现象。

(3) 纸蜂窝复合材料曲面五轴数控铣削加工方法。

·凸形曲面纸蜂窝的加工方法。

凸形曲面纸蜂窝的加工方法如图 13 所示,刀具端部的合金刀片将纸蜂窝材料切断,而侧刃则将切掉的

(4) 纸蜂窝五坐标曲面加工方法。

某纸蜂窝产品的形状近似于抛物面,根据纸抛物面的曲面特点,我们采取了螺旋切削加工路线,使得被加工表面质量更好、加工效率更高。该加工法类似于苹果自动削皮机一样,让刀片相对苹果做螺旋切削运动,将苹果皮连续地削除,而削皮过程中始终保持刀片与苹果

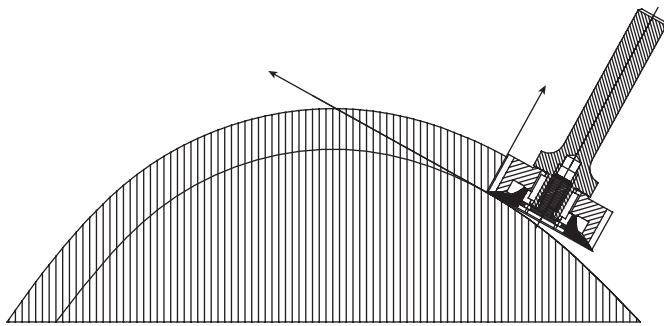


图13 纸蜂窝曲面铣削加工示意图

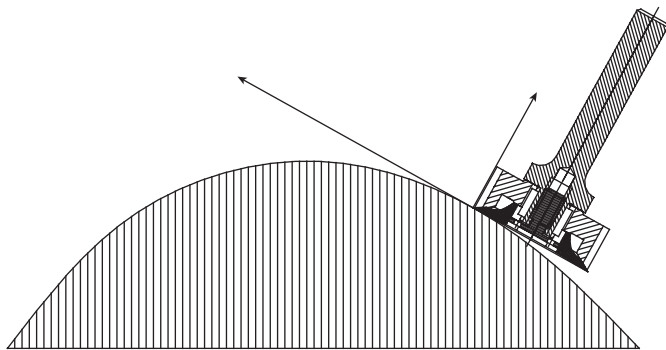


图14 被加工纸蜂窝曲面与刀具位置关系示意图

纸蜂窝粉碎变成碎末状切屑。刀具与被加工零件表面的关系如图 14 所示,在加工过程中,始终保证刀具的断面与被加工曲面相切于切削点。

·凹形曲面纸蜂窝的加工方法。

凹形曲面纸蜂窝五坐标加工与凸形曲面五坐标加工用纸蜂窝加工专用铣刀有所不同,尤其是较大曲率的凹形曲面加工。凸形曲面五坐标铣削加工用纸蜂窝加工专用组合铣刀,而凹形曲面纸蜂窝五坐标加工一般用鱼鳞铣刀,其加工方法如图 15 所示。

表面相切于切削点。纸蜂窝抛物曲面五轴数控加工用纸蜂窝加工专用组合铣刀,具体加工方法如图 16 所示。

纸蜂窝抛物曲面数控切边加工用鱼鳞铣刀,具体加工方法如图 17 所示。

结束语

经过加工复合材料系列刀具的专项研制以及多年来的推广应用,该项加工复合材料系列刀具的设计和制造技术及其应用技术已日趋成熟、

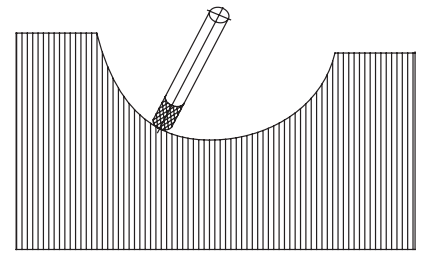


图15 凹形曲面纸蜂窝五轴数控加工示意图

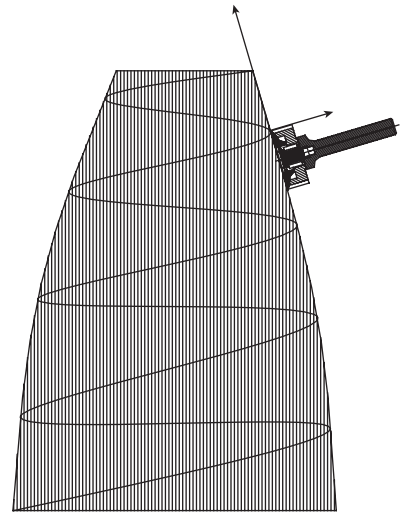


图16 纸蜂窝抛物曲面铣削加工工艺方法示意图

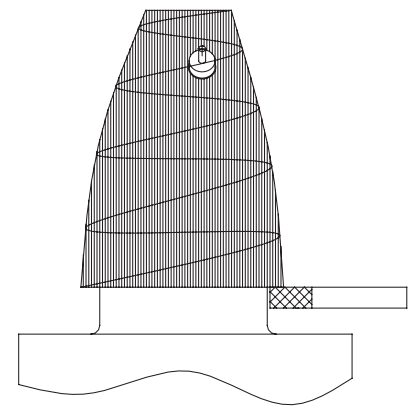


图17 纸蜂窝抛物曲面数控切边加工方法

更加专业。该项技术填补了国内空白,已获得了 5 项国家发明和实用新型专利。该系列产品能适应不同材料、结构以及精度复合材料零件的加工,不仅适用于航空制造业,同时也适用于其他复合材料制造业。因此,该项成果具有广泛的推广价值,也必将带来巨大的社会效益。

(责编 夏宛)