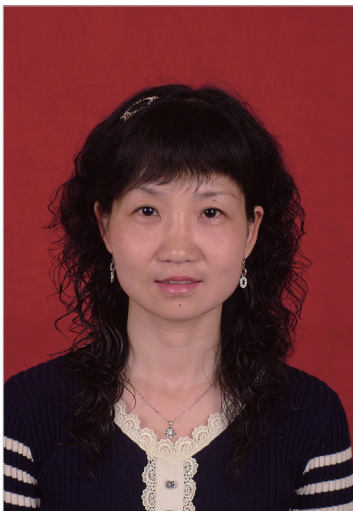


航空领域复合材料的机械 加工技术探析

Machining Technology of Composites in Aviation Industry

中航飞机股份有限公司西安飞机分公司 崔娟



崔娟

中航飞机股份有限公司西安飞机分公司复合材料厂工程师,主要从事复合材料的机械加工技术研究,相关工艺文件的编制,以及机械加工制件材料消耗工艺定额文件的制定,目前承担着新研材料科研重点课题,在机械加工领域申报/授权国家发明专利。

近年来,复合材料在航空领域上已获得大量应用,可实现飞机结构相应减重 25%~30%。在民用飞机波音 757、波音 767、波音 777、A300、A340 上,复合材料用量已占飞机全部用料的 11%~20%。商用飞机波音 787

复合材料切削加工的常规方法较为简单,工艺也较成熟,但是难以加工形状复杂的工件。复合材料特种加工具有常规机械加工方法无法比拟的优点,具有加工质量高、能加工复杂形状的工件、容易监控和经济效益高等优点,是复合材料机械加工未来发展的主要方向。

上大量使用 CFRP,已占飞机体积的 11%,占结构件重量的 50%。波音 787 每年所用的燃料费,比波音 767 减少 500 万美元。A380 的机身、机翼板,采用大量的复合材料制造。武装直升飞机 AH-60、NH-90、V-22、RAH-66 上,从整流罩、地板、壁板等次承力结构到旋翼框架等主要承力结构上都使用复合材料,且高达飞机重量的 50%。

目前广泛使用的复合材料,多以树脂或铝合金为基体,用纤维或颗粒增强,具有良好的综合性能^[1]。但是复合材料的切削加工有较大难度,例如碳纤维增强复合材料是一种难切削加工材料,它的脆性大、硬度高,加工时容易出现边缘分层、钻孔分层、外层撕裂、毛刺等问题;刀具磨损严重;由于复合材料导热系数低,热量难以在加工中排除,使切削区温

度迅速上升,基体容易软化或烧焦;难以保证零件加工精度和表面质量等,这是工业生产中面临的新问题。

复合材料的机械加工特点与方法

复合材料的切削加工通常分为常规加工和特种加工两类方法。常规加工基本上可以采用金属切削加工工艺和装备。一般说来,常规方法较为简单,工艺也较成熟,不足的是难以加工形状复杂的工件,而且刀具磨损快,加工质量不高,所产生的切削粉末不利于人体健康。特种加工有激光束加工、高压水切割、电火花加工、超声波加工、电子束加工和电化学加工等。这些方法独特,具有常规机械加工方法无法比拟的优点,是复合材料机械加工未来发展的方向^[2]。

1 复合材料的机械加工特点

1.1 玻璃钢的机械加工特点

玻璃钢有酚醛树脂基、环氧树脂基、不饱和聚酯树脂基等,树脂基体不同,可切削性也不相同。环氧树脂基比酚醛树脂基难切削。

试验证明,切削玻璃钢的刀具材料以高速钢磨损最严重,用金刚石或立方氮化硼刀具切削加工玻璃钢,可大大提高生产效率。选择刀具几何参数时,对玻璃纤维含量高的玻璃钢板材、模压材料和缠绕材料,使 $r_0=20^\circ\sim 25^\circ$;对纤维缠绕材料,使 $r_0=20^\circ\sim 30^\circ$ 。由于玻璃钢回弹性较大,后角要选大值,使 $a_0=8^\circ\sim 14^\circ$;副偏角小些,可降低表面粗糙度,精车时为 $6^\circ\sim 8^\circ$ 。加工易脱层、起毛的卷管和纤维缠绕玻璃钢,应采用 $6^\circ\sim 15^\circ$ 刃倾角。切削时 $v=40\sim 100\text{m/min}$ 、 $f=0.1\sim 0.5\text{mm/r}$ 、 $a_p=0.5\sim 3.5\text{mm}$,精车时 $a_p=0.05\sim 0.2\text{mm}$ 。

1.2 碳纤维增强复合材料的机械加工特点

碳纤维增强复合材料是由质软而粘性大的基体和强度高、硬度大的纤维混合而成的二相或多相结构,其力学性能呈各向异性,机械加工条件比较恶劣,碳纤维增强复合材料切削加工的主要特点如下:

(1) 材料产生分层破坏。分层是复合材料铺层之间脱胶而形成的一种破坏现象,当切削参数不合理时会使层间受力过大而导致分层,分层会严重降低材料的性能甚至使零件报废,即使是微小的分层也是非常严重的安全隐患。

(2) 刀具磨损严重,耐用度低。切削区温度高且集中于刀具切削刃附近很窄区域内,纤维的回弹及粉末状的切屑又加重了擦伤刃口和后刀面,加之碳纤维的硬度非常高,故刀具磨损严重,后刀面产生沟状磨损,耐用度低。

(3) 产生残余应力。这主要是因为切削过程中切削温度较高,增强纤维和基体树脂的热膨胀系数相

差太大,存在着热应力,这是产生残余应力的原因之一;同时由于复合材料呈现各向异性,层间强度低,切削时在切削力的作用下容易产生分层、撕裂等缺陷,进而产生残余应力。钻孔时尤为严重,加工质量难以保证,表面的尺寸精度和表面粗糙度不易达到要求。

(4) 切削温度高。碳纤维增强复合材料切屑形成过程是一个基体破坏和纤维断裂相互交织的复杂过程,在此过程中,碳纤维作为切削硬质点连续磨耗刀具,因碳纤维断裂和基体剪切,以及切屑与前刀面、后刀面与已加工表面之间的摩擦而产生大量的切削热,加之碳纤维复合材料导热性差等原因,切削热主要传向刀具和工件,导致刀具的快速磨损。

1.3 热塑性树脂基复合材料的机械加工特点

(1) 加工时加冷却剂,以避免过热,过热会使材料基体软化或烧焦;

(2) 采用高速切削;

(3) 切削刀具要有足够容量的排屑槽;

(4) 采用小的背吃刀量和小的进给量;

(5) 车刀应磨成一定的倾角,刀头和刀具要锋利,以尽量减少刀具切削力(工件材料抵抗刀具切削时产生的阻力);

(6) 热塑性复合材料钻孔应使用麻花钻头;

(7) 应采用碳化钨或金刚砂刀具,或用特殊的塑料用高速钢刀具;

(8) 工件必须适当支承(背部垫实),以避免切削压力造成的分层;

(9) 精密机械加工时,要考虑塑性记忆和加工车间的室温。

1.4 金属基复合材料的机械加工特点

金属基复合材料(Metal Matrix Composite, MMC)的最大特点是成型性能好,一次成型后已基本能满足使

用要求。但是随着复合材料应用领域的扩大,特别是金属基复合材料在工业及宇航领域中的应用,对这种材料的加工和精加工日趋重要。

传统的切割、车削、铣削、磨削等工艺一般都可用于金属基复合材料,但是刀具磨损较严重,往往随着增强材料体积分数和尺寸的增大而加剧。对于一些单纤维增强的金属基复合材料,往往必须用有金刚石尖或镶嵌有金刚石的刀具。对于短纤维或粒子复合材料,有时也采用碳化钨或高速钢工具。

对于多数金属基复合材料,使用锐利的刀具、合适的切削速度、大量的冷却/润滑剂和较大的进刀量,可以得到很好的效果。一般来说,金刚石刀具要比硬质合金及陶瓷刀具好,可更适用于高速车削。反过来,如果使用碳化物刀具,若车削速度低,则刀具寿命长。线锯也可用来割金属基复合材料,但一般速度较慢,只能切直线。

2 复合材料的常规机械加工方法

复合材料的常规机械加工方法简单、方便、工艺较为成熟,但加工质量不高,易损坏加工件,刀具磨损快,而且难以加工形状复杂的工件^[3]。

2.1 锯切

玻璃纤维增强热固性基体层压板,采用手锯或圆锯切割。

碳纤维增强复合材料采用金刚砂刀具切割加工工艺,切割效果好。切割工艺参数与碳纤维增强复合材料厚度有很大关系,进给量应与厚度成反比例。

热塑性树脂基复合材料采用带锯和圆锯等常用工具时要加冷却剂。石墨/环氧复合材料最好用镶有硬质合金的刀具切割。

金属基复合材料可用镶有金刚石的线锯锯切,不过切割速度较慢,且只能作直线锯切。采用金刚石砂轮对陶瓷基复合材料进行常规锯切,可有两种速度:一种是 250r/min ,另

一种是 4000r/min。这种锯切会使切割面的陶瓷基复合材料有相当大的损坏。

2.2 钻孔和仿形铣

在复合材料上钻孔或作仿形铣时,大多数热固性复合材料层合板经钻孔和仿形铣后会产生收缩,因此精加工时要考虑一定的余量,即钻头或仿形铣刀尺寸要略大于孔径尺寸,并用碳化钨或金刚石钻头或仿形铣刀。钻孔时最好用垫板垫好,以免边缘分层和外层撕裂。另外钻头必须保持锋利,必须采用快速除去钻屑和使工件升温最小的工艺。

由于碳纤维复合材料的性质与金属不同,因此在碳纤维增强复合材料的加工中不能简单地沿用金属材料的加工工具和工艺,碳纤维增强复合材料钻削制孔方向是碳纤维增强复合材料的关键加工工艺之一。防止钻孔时出口端纤维分层,在结构开敞条件下,孔的出口面要用硬质高密度板支撑并垫实,这样能有效地防止孔出口分层和劈裂。在条件允许的情况下,制造碳纤维增强增强复合材料构件时可考虑在出口面加贴 1~2 层玻璃布,并与构件同时固化,待钻完孔后将玻璃布撕去,这样也可防止孔出口面分层。在碳纤维增强复合材料需要钻孔的出口面均匀地涂上一层结构胶,待固化后钻孔,同样可防止孔出口面分层和劈裂。

热塑性树脂基复合材料钻孔时,更要避免过热和钻屑的堆积,为此钻头应该有特定的螺旋角,有宽而光滑的退屑槽,钻头锥尖要用特殊材料来制造。一般钻头刃磨后的螺旋角约为 10°~15°,后角为 9°~20°,钻头锥角为 60°~120°。一般手电钻转速为 900r/min 时效果最佳,而固定式风钻则在转速为 2100r/min 和进给量为 1.3mm/s 时效果最佳。

2.3 铣削、切割、车削和磨削

聚合物基复合材料用常规普通车床或台式车床就可方便地进行车

削、镗削和切割。目前加工刀具常用高速钢、碳化钨和金刚石刀头。采用砂磨或磨削可加工出高精度的聚合物基复合材料零部件。最常用的是粒度为 30~240 的砂带或鼓式砂轮机。热塑性聚合物基复合材料用常规机械打磨时,要加冷却剂,以防磨料阻塞。磨削有两种机械可用,一种是湿法砂带磨床,另一种是干法或湿

工产品的前提是刀具要锋利、切削速度要适当、要供给充足冷却液或润滑剂和进给速度要快。

3 复合材料的特种加工方法

复合材料的特种加工方法主要包括激光束加工、高压水切割、电火花加工、超声波加工、电子束加工和电化学加工等,各种加工方法的优缺点和应用范围如表 1 所示^[2,4-5]。

表1 各种加工方法的优缺点和应用范围

加工方法	优缺点	应用范围
激光束加工	切缝小、速度快、能大量节省原材料、切削面光洁度高	加工形状复杂的工件,主要应用于打孔和成型切割
高压水切割	切口质量高,结构完整性好,速度快,切割无尘、无味、无火花、振动小、噪音低	适宜金属基复合材料的切割
电火花加工	切口质量高,不会产生微裂纹,唯一不足是工具磨损太快	适用于热敏感性较强材料的制孔
超声波加工	加工精度高,能改善切削状况	适宜在硬而脆的材料上打孔和开槽,加工薄壁件
电子束加工	加工精度极高,没有热影响区;不足是会产生裂纹和界面脱粘开裂,需要专用设备,加工成本高	适宜在大多数复合材料上打孔、切割和开槽
电化学加工	打工表面质量好,不会损伤工件	宜于大多数具有均匀导电性复合材料(前提是不吸湿)的开槽、钻孔、切削和复杂孔腔的加工

法研磨盘。使用碳化硅或氧化铝砂轮研磨时不要用流动冷却剂,以防工件变软。

目前碳纤维增强复合材料磨削加工的研究比较少,且主要集中在对不同砂轮磨削性能的比较方面,需要促进磨削加工在碳纤维复合材料中的应用。

复合材料层合板采用一般工艺就能在标准机床上铣削。黄铜铣刀、高速钢铣刀、碳化钨铣刀和金刚石铣刀均可使用。铣刀后角必须磨成 7°~12°,铣削刃要非常锋利。高速钢铣刀的铣削速度建议采用 180~300m/min,进刀量采用 0.05~0.13 mm/r,采用风冷。

热塑性树脂基复合材料可以用金属加工车床和铣床加工。高速钢刀具只要保持锋利,就能有效使用。

金属基复合材料一般用切割、车削、铣削和磨削就可加工。对大多数金属基复合材料而言,获得优良机加

结束语

一般说来,复合材料切削加工的常规方法较为简单,工艺也较成熟,但是难以加工形状复杂的工件。复合材料特种加工具有常规机械加工方法无法比拟的优点,具有加工质量高、能加工复杂形状的工件、容易监控和经济效益高等优点,是复合材料机械加工未来发展的主要方向。

参考文献

- [1] 黄丽. 高分子材料. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [2] 孙大涌. 先进制造技术. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 刘雄亚, 谢怀勤. 复合材料工艺及设备. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1987.
- [4] 牛春匀. 飞机复合材料结构设计与制造. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [5] 胡传圻. 特种加工手册. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.

(责编 亦非)