

引文格式: 徐锦泐. 碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(22): 24-33.

XU Jinyang. Research advances in drilling-induced defects of carbon fiber reinforced polymers[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(22): 24-33.

碳纤维增强树脂基复合材料钻削缺陷研究进展*

徐锦泐

(上海交通大学, 上海 200240)

[摘要] 碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)以其优异的物理性能和柔性的结构功能在航空领域应用广泛,而钻削是实现CFRP结构件装配连接的关键制造工艺。由于CFRP具有非均质和各向异性特性,其制孔过程涉及复杂的切屑去除与表面创成机理,极易产生严重的加工损伤。在文献调研的基础上对CFRP切屑去除机理与钻削过程进行简述,然后对CFRP钻孔损伤模式进行分类,重点对CFRP钻孔分层、撕裂、毛刺等缺陷进行综述,阐述了此类缺陷的一般形成机制和评价方法,归纳了工艺条件对CFRP制孔损伤的影响规律。最后,总结了现有CFRP制孔缺陷抑制策略与方法,并指明了其未来发展方向。

关键词: 碳纤维增强树脂基复合材料; 钻削; 分层; 撕裂; 毛刺; 缺陷抑制

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.22.024



徐锦泐

副教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为复合材料精密切削技术、切削有限元仿真、微细加工及表面工程。

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)具有优异的物理性能和柔性

的结构功能,在航空领域获得了广泛的应用^[1-5]。CFRP设计自由度大,成型容易,常用于制作飞行器结构件(如飞机蒙皮壁板、机翼中间梁、机身隔框、舱门及整流罩等),在降低机体重量的同时,亦能有效提高零件的疲劳寿命。世界主要飞机制造商,如波音、空客、庞巴迪等均已广泛应用CFRP来加工新型飞机结构件以实现客机轻量化和耐久性目标。据相关资料显示,波音787梦想客机的复合材料使用率已达50%^[1];空客A380机身所用复合材料占比达25%,其中包括22%的CFRP^[6]。

CFRP是一种典型的各向异性材料,其由碳纤维增强体和树脂基体两种材料复合而成,碳纤维强度高、硬度大,而基体材料质软、粘性大^[1,7]。CFRP常采用螺栓连接和铆钉连接方式来实现结构件的装配,因而钻孔

成为CFRP结构件装配连接的关键制造工艺。由于CFRP具有非均质、各向异性、层间结合强度低等特点,纤维/基体在制孔过程中涉及复杂的切屑去除与表面创成机理。当钻头切削刃交替切割碳纤维增强相和树脂基体时,由于两种材料具有不同的切屑断裂模式,所以纤维/基体在材料去除过程中极易产生分层^[8-12]、毛刺^[13-14]、撕裂^[15]、表面凹坑^[16-18]等加工缺陷,极大地降低了复合材料结构件的加工质量,其中分层、撕裂损伤不仅会降低CFRP表面质量和装配公差,还会影响已加工孔的连接强度与疲劳寿命,甚至导致结构件的报废^[19-22]。尽管复合材料损伤修复技术已经出现,但额外的修复时间和成本仍严重制约了CFRP在航空制造领域的推广应用。为揭示CFRP钻孔缺陷形成机制,国内外学者已在

* 基金项目: 国家自然科学基金(51705319; 52175425)。

试验探究和仿真分析方面开展了大量的研究工作。在钻削 CFRP 过程中,切削参数、刀具材料和结构是影响复合材料制孔损伤的关键因素,通过优化加工参数和开发高性能专用钻头,能够在工艺层面大幅降低复合材料制孔损伤的产生,进而实现高质量制孔的目标。随着先进制造技术的发展,以螺旋铣孔、变进给钻削、超声振动制孔为代表的先进加工方法已逐渐应用到 CFRP 高质量钻孔中,为复合材料制孔缺陷的抑制提供了新方法。当前,随着我国大型宽体客机 CR929 的研制,复合材料高质量、低损伤加工已成为一项意义重大的工程。本文通过对 CFRP 钻削缺陷研究现状进行总结,重点揭示 CFRP 钻孔分层、撕裂、毛刺等切削缺陷形成机理,阐述 CFRP 制孔缺陷抑制最新研究进展,并梳理未来发展方向,以期为我国航空制造领域 CFRP 高质量加工提供指导与借鉴。

1 CFRP 切削机理

由于碳纤维和树脂基体存在截然不同的物理性质,CFRP 切屑去除过程与传统金属材料切屑去除相比更为复杂。国内外学者已在 CFRP 切削机理方面开展了大量的试验与仿真研究,相关研究表明,CFRP 成屑模式受纤维铺层角、纤维体积含量及刀具几何参数影响,切屑去除以压缩剪切、弯曲剪切、纤维/基体界面脱粘及纤维断裂为主^[2,23]。Koplev 等^[24-25]通过快速落刀法探究了单向铺层 CFRP 切屑去除机理,研究表明,脆性断裂主导 CFRP 加工过程,复合材料切屑主要为短小的非连续状形态,纤维铺层方向对碳纤维成屑过程起关键作用(图 1^[25])。Wang 等^[26]开展了单向铺层 CFRP 层合板正交切削试验,探究了刀具几何角度和切削参数对纤维/基体去除过程的影响规律,研究表明,复合材料的切屑主要以非连续状的形态存在,

其成屑过程主要受纤维铺层角影响并涉及挤压剪切、界面脱粘及面外剪切断裂 3 类去除机制(图 2^[26])。Iliescu 等^[27]应用离散元仿真方法研究了单向铺层 CFRP 正交切削机理,结果表明,当纤维角为 0° 时,纤维断裂分离主要由压缩、弯曲与分层等模式所主导;当纤维角为 45° 时,随着刀具进给,已加工表面纤维易发生回弹进而对刀具后刀面产生严重的刮擦作用,加剧后刀面的磨粒磨损;而当纤维角为 135° 时,纤维断裂主要由刀具挤压弯曲所引起,刀具磨损较小,但复合材料易发生纤维拔出、基

体压裂等缺陷,故已加工表面质量较差。Cheng 等^[28]应用细观机械建模方法建立了单向铺层 CFRP 正交切削力热耦合模型,在微观尺度揭示了 CFRP 切屑去除机理,并探究了不同纤维铺层角对碳纤维/基体微观断裂模式的影响机制。秦旭达等^[29]基于 Hashin 失效准则,建立了单向铺层 CFRP 二维正交切削宏观模型,结果表明,纤维铺层方向是影响 CFRP 切屑去除机理的关键因素,当纤维铺层角为 0°、45° 和 90° 时,复合材料已加工表面质量较好;而当纤维铺层角为 135° 时,所获得的加工表

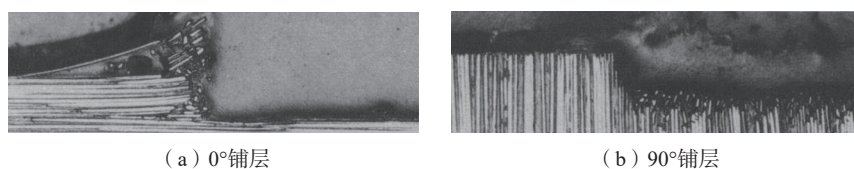


图 1 单向铺层 CFRP 层合板正交切削机理与切屑形态^[25]

Fig.1 Orthogonal cutting mechanisms and chip morphologies of unidirectional CFRP laminates^[25]

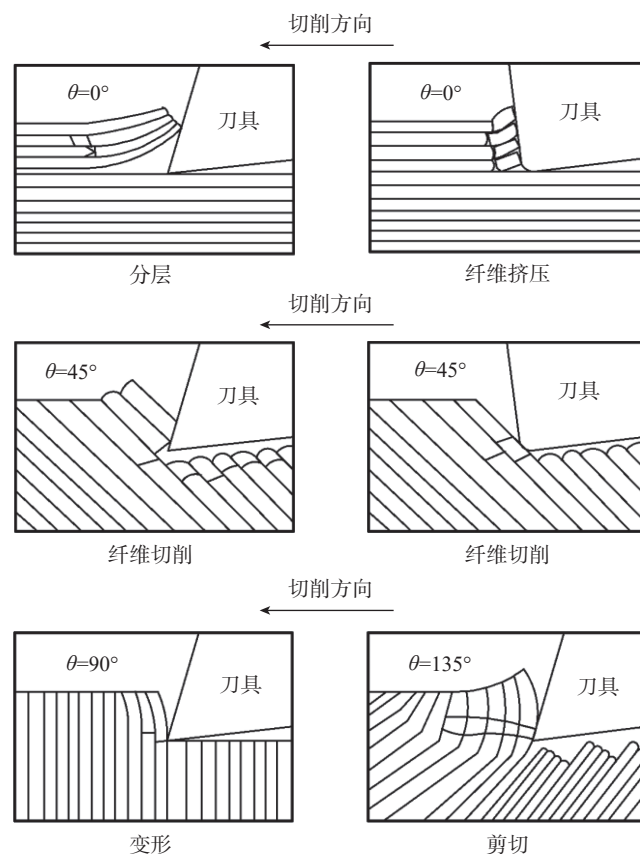


图 2 不同铺层条件下 CFRP 层合板切屑去除机理^[26]

Fig.2 Chip removal mechanisms of CFRP laminates under different fiber layouts^[26]

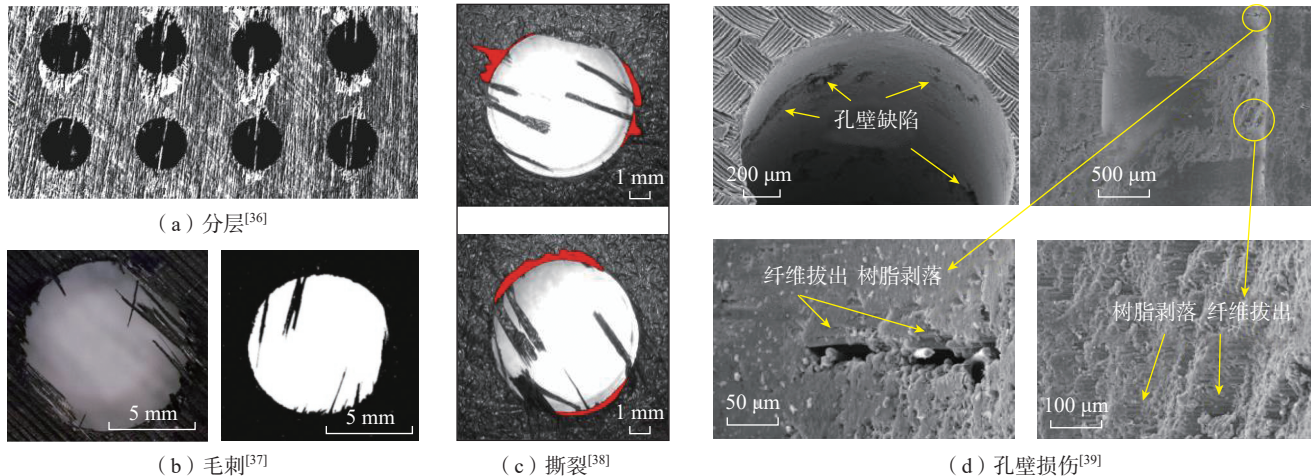


图3 CFRP 钻削常见缺陷形式

Fig.3 Typical defect forms in drilling CFRP

面质量最差。Yan等^[30]建立了单向铺层 CFRP 三维正交切削物理模型,探究了 CFRP 切削时的纤维断裂、基体开裂和纤维-基体脱粘的失效模式,发现各种纤维/基体失效模式的能量耗散与纤维铺层方向密切相关。此外,其他学者也在 CFRP 切削机理方面开展了一定的研究工作^[31-35]。由于切屑去除机理是决定 CFRP 钻削缺陷衍生、扩展和生成的关键因素,如何通过优化加工条件以获得适配的纤维/基体去除模式,是 CFRP 高质量制造的研究热点。

2 钻削缺陷类型及形成机理

CFRP 钻削过程涉及复杂的力热耦合效应,当切削刃与不同铺层纤维/基体发生摩擦、挤压时,多变的纤维断裂模式极易引起孔壁表面损伤,诱发严重的制孔质量问题。成屑过程中的力热耦合效应是决定 CFRP 制孔质量的关键因素。由于纤维/基体间力学性能相异,切削刃与 CFRP 间的力热耦合作用存在纤维间、铺层内与铺层间 3 种各向异性特性,故其表面质量的一致性难以保证。钻削缺陷是影响 CFRP 结构件装配精度与质量的关键因素,亦是导致复合材料零部件报废的主要原因。CFRP 制孔缺陷的类型主要包括分

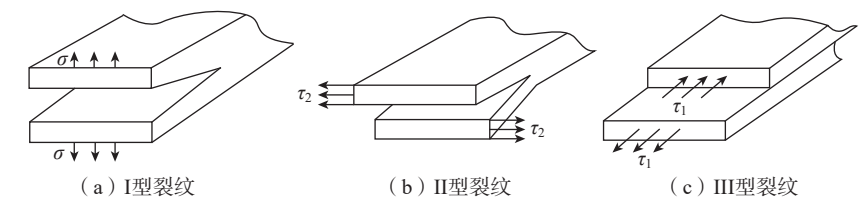


图4 CFRP 层合板钻削裂纹形式

Fig.4 Crack forms in drilling CFRP laminates

层、撕裂、毛刺和孔壁损伤,如图 3 所示^[36-39]。其中,分层和撕裂分别表征了复合材料层间脱粘损伤和出口材料过切行为,且二者具有不可修复性,直接影响已加工复合材料零部件的成品率;毛刺缺陷表征了复合材料钻削出口处未被切削刃完全切除的残留材料,属于二次可修复的表面缺陷;孔壁损伤主要包括表面凹坑、树脂涂覆、纤维拔出等缺陷形式。近年来,为实现 CFRP 高效高质制孔加工,国内外学者在缺陷形成机理及评价方法等方面开展了广泛的研究。

2.1 分层

分层是 CFRP 制孔加工中极为严重的损伤行为,其失效形式主要表现为相邻纤维铺层间的脱粘分离。该损伤不但严重影响复合材料的装配质量和疲劳性能,甚至直接造成复合材料结构件的报废^[5,12,40-42]。图 4 给出了 CFRP 钻孔过程中所涉及的 3 种裂纹扩展形式。在钻削 CFRP

过程中,钻头所产生的轴向力易在相邻纤维铺层间产生垂直应力,诱发 I 型裂纹破坏;钻头所产生的扭矩则易在相邻纤维铺层间产生面外剪切应力,诱发 II 型裂纹破坏;而钻孔偏斜引起的扭矩和轴向力耦合作用则易产生 III 型裂纹。

如图 5 所示^[43],CFRP 分层损伤分布情况可表示为

$$L = L_F + L_M \quad (1)$$

式中, L 为制孔总分层; L_F 为轴向力引起的分层; L_M 为扭矩引起的分层。在钻削过程中,CFRP 层合板的分层主要发生在孔的入口和出口附近(图 5^[43]),其破坏方式分别为入口剥离分层(Peel-up delamination)和出口顶出分层(Push-out delamination)^[44-45]。

如图 5 所示,当钻头开始切入纤维/基体层时,钻头横刃和切削刃将在入口侧纤维铺层间产生一对扭矩和沿刀具轴线的轴向推力,由于此时未切削层厚度较大,故由轴向力引起

的纤维层间分离与脱粘损伤较小,而由扭矩所引起的 II 型裂纹起主导作用,随着钻头的不断进给,入口侧纤维层在钻削扭矩作用下呈现向孔外剥离趋势,产生入口分层损伤;当钻头切入 CFRP 层合板中间部分时,此时已切削和未切削纤维部分的厚度已较厚,故由扭矩和轴向力引起的 II 型与 I 型裂纹破坏作用较弱,层合板中间部分几乎不发生分层损伤;当钻头即将钻出 CFRP 层合板时,此时已切削部分的纤维层厚度已较大,故抗扭能力较强,由扭矩所引起的 II 型裂纹损伤可以忽略,而由轴向力所引起的 I 型裂纹则起主要破坏作用。由于此时出口侧未切削纤维层厚度较薄,故轴向力易引起出口侧纤维层间的变形与分离,诱发严重的出口顶出分层。此外,由于钻头在钻出复合材料层合板时,出口处未切削层纤维厚度和刚性呈逐渐减小趋势,故由钻削轴向力引起的出口分层常大于入口侧的剥离分层^[46-49]。目前,国内外学者普遍认为复合材料出口分层的产生与其制孔时的“临界推力”密切相关,即当钻削轴向力大于临界推力时,分层损伤才会产生^[50]。为了定量分析 CFRP 制孔分层损伤程度,研究人员已经陆续提出一维长度^[51]、二维面积^[41,43,52-54]、三维体积分层评价因子^[38,55]。其中一维、二维分层因子的表征方式具有简单、直观且便于测量等特点,被广泛应用于各种复合材料切削分层评价中;三维分层因子因考虑了钻削分层损伤层内扩展与隔层传播效应,故更能准确地评价真实的复合材料分层损伤程度。近年来分层评价因子已得到不断完善和优化,建立能够综合评价 CFRP 分层衍生与演变机制及其对复合材料服役性能影响的指标体系仍是未来亟待研究的课题。

2.2 撕裂

撕裂是复合材料层合板在钻削力作用下沿最外层材料发生纤维剥

离或基体开裂的一类表面损伤形式,常产生于复合材料制孔出口侧且受纤维铺层方向影响。撕裂损伤易诱发复合材料表面微裂纹的扩展与演变,致使结构件在加载条件下发生开裂破坏,进而影响 CFRP 结构件的表面完整性和服役性能。此外,单向铺层 CFRP 在逆纤维切削条件下易产生严重的基体开裂现象,且在纤维切削角为 90° 时损伤程度达到最大。由于 CFRP 最外层材料的铺层方向是确定的,因此当钻头旋转方向固定时,钻削 CFRP 时的逆纤维切削关系只会出现在固定区域上,如图 6 所示^[15],受孔径对称关系影响,当钻头沿逆时针方向旋转加工时,CFRP 撕裂损伤主要出现在第二、第四象限,且沿孔径呈对称分布关系^[15]。

撕裂缺陷主要由 CFRP 内在的各向异性特性和出口侧纤维材料的弱刚性所引起。在钻削过程中,由于复合材料纤维-基体间的界面结合强度最弱,且最外层材料缺乏基体材

料的支撑作用,故在钻削轴向力作用下极易造成纤维-基体界面的脱粘失效,并萌生微裂纹,进而诱发基体开裂及纤维剥离现象。如图 6 所示,在 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ 逆纤维切削方向上,由于弯曲断裂主导复合材料的切屑去除过程,故最外层材料在沿孔径周向切削力的作用下,极易诱发纤维-基体界面脱粘,同时在钻削轴向力作用下易产生沿刀具进给方向上的弯曲变形,此时由于最外层材料缺少底部支撑作用,故在钻削合力作用下,最外层材料易产生严重的撕裂损伤;在 $60^\circ < \theta < 90^\circ$ 的大角度顺纤维切削方向上,只有当周向切削力垂直于层内 90° 方向的分力足够大时,最外层材料才可能产生撕裂缺陷。由于撕裂损伤常发生于复合材料最外层材料处,故具有易于观察和检测的特点。目前,针对 CFRP 撕裂损伤的评价大多是基于一维长度和二维面积的指标^[15],如何全面、准确地评价复合材料钻削撕裂程度,尚需研究者建

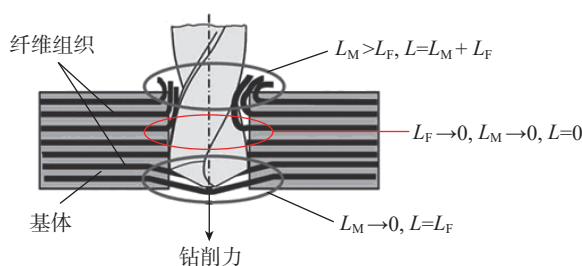


图 5 CFRP 钻孔分层损伤分布示意图^[43]

Fig.5 Schematic diagram of delamination distribution in drilling CFRP^[43]

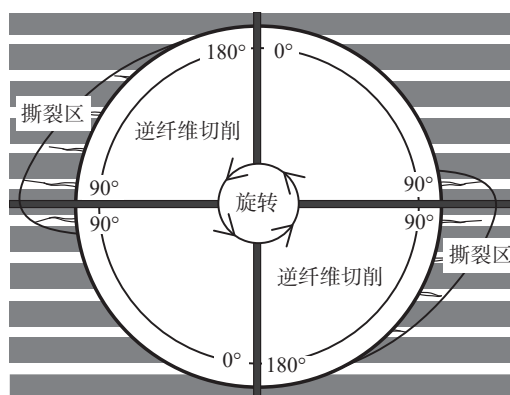


图 6 CFRP 制孔撕裂缺陷形成区域^[15]

Fig.6 Tearing formation area in drilling CFRP^[15]

立更加综合化的分析指标。

2.3 毛刺

毛刺是表征 CFRP 制孔出口侧未被刀具完全切断的一类表面缺陷形式。毛刺常悬浮于孔内侧,故会直接影响复合材料制孔质量及结构件的装配精度。依据复合材料毛刺形成机理的不同,CFRP 制孔毛刺可分为 I 型毛刺和 II 型毛刺。I 型毛刺是由刀具轴向力引起的沿刀具进给方向的未被切断的纤维束;II 型毛刺则表征由刀具周向切削时未被完全切断的纤维束,故毛刺与制孔刀具的旋转方向一致。此外,单向铺层 CFRP 在 $0^\circ < \theta < 30^\circ$ 的小角度顺纤维切削范围内,易产生纤维未被切断而造成的 II 型毛刺缺陷,且当纤维切削角越小时毛刺缺陷越明显。在 CFRP 制孔过程中,由于最外层纤维的铺层方向是固定的,因此沿轴向加工时纤维方向角较小的顺纤维切削关系只出现在固定区域上。如图 7 所示^[4],当刀具沿逆时针方向旋转钻削时,CFRP 层合板的 II 型毛刺主要出现在第一、第三象限,且靠近 $\theta=0^\circ$ 的区域内。目前,评价毛刺缺陷的方法主要包括测量毛刺高度、毛刺宽度及毛刺面积,其中,毛刺高度和宽度具有简单、直观且便于测量的特点,而毛刺面积则更能准确、全面地评价真实的缺陷程度^[14]。

2.4 孔壁损伤

CFRP 孔壁损伤主要由钻削过程中的力热耦合作用所引起,其缺陷形式包括纤维拔出、表面凹坑、树脂涂覆和基体玻璃化转变等。该类损伤不仅影响复合材料结构件的装配质量,疲劳裂纹的萌生与扩展速率,亦影响交变载荷下飞机零部件的连接强度和疲劳寿命^[5]。纤维拔出是纤维的退让性及刀具刃口的钝化而造成的未完全切割的残留材料,该类缺陷常从已加工孔表面悬浮伸出,严重影响复合材料孔壁几何精度。表面凹坑则是由于树脂基体的过切割

落而在已加工孔壁形成的若干微小空腔或空洞,进而影响孔壁的表面粗糙度。树脂涂覆则由钻削过程中刀具切削刃过热而引起的树脂基体粘附孔壁的现象。玻璃化转变属于一种比较严重的热损伤行为,主要由钻削过程中刀具-工件接触界面瞬时切削温度较高而引起的复合材料基体由固态向玻璃化态转变的不可逆行为,进而造成材料本体物理力学性能的降低。相关研究表明,纤维切削角对 CFRP 孔壁损伤分布有直接影响^[56-57],而钻削参数对孔壁损伤程度有显著影响^[58-61]。在选择适当进给量的条件下,提高主轴转速可减少孔壁表面损伤,并提高制孔质量。此外,制孔刀具对 CFRP 孔壁损伤有重要影响,开发高性能专用异型钻头能够有效抑制 CFRP 孔壁损伤,提高复合材料制孔质量^[62]。

3 CFRP 钻削缺陷影响因素

切削参数、刀具材料/几何结构、加工环境等都是造成 CFRP 钻孔缺陷的直接因素。国内外学者已开展了大量的研究工作,并取得了重要的研究进展。

CFRP 钻削参数主要包括进给量和主轴转速,其中进给量是影响 CFRP 制孔缺陷的最重要因素。进给量主要通过改变切屑厚度来影响

加工过程中的切削力热耦合作用,进而影响钻削轴向力值。与主轴转速相比,进给量对钻削力的影响更为显著。钻削轴向力随进给量增大而增大,复合材料分层损伤程度也随之增大^[51]。众多研究表明,进给量对复合材料制孔分层损伤呈正效应影响机制^[22,63-64]。此外,毛刺缺陷和撕裂损伤也随着进给量的增大而增大^[38]。相比之下,主轴转速主要通过改变切削温度来影响基体的热降解以及通过较高的应变率来影响复合材料的钻削损伤。在固定的材料去除率条件下,随着主轴转速的增加,分层损伤呈现降低趋势^[22,52,63]。此外,亦有文献表明,主轴转速与 CFRP 钻削损伤呈正相关性,即转速越大,复合材料分层损伤越严重^[41,58-59,65]。

刀具材料和几何结构是影响 CFRP 制孔质量的关键因素。研究表明,高性能涂层刀具和聚晶金刚石刀具能够显著提高 CFRP 的切削加工性,大幅降低复合材料分层、撕裂和毛刺等制孔缺陷^[22,64,66]。提高 CFRP 钻孔性能的刀具几何参数主要包括针对普通钻头的几何角度优化和针对特殊钻头的刃型结构设计。为进一步提高复合材料加工表面质量,各科研团队已开发了诸多适用于 CFRP 高质量制孔的专用异型钻头。图 8^[15]所示为常用的 CFRP 制孔异

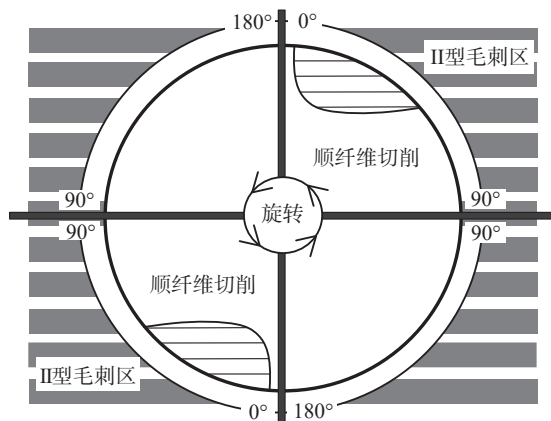


图 7 CFRP 制孔毛刺缺陷形成区域^[4]

Fig.7 Burr formation area in drilling CFRP^[4]

型钻头,主要包括阶梯钻、空心钻、锯钻、烛台钻、匕首钻和双顶角钻。相比传统的麻花钻,异型钻头的结构优势主要体现在减少了传统钻头横刃的几何尺寸并增加了刀具外缘切削刃,使得钻削力能够沿着刀具外缘分布,而非集中于钻头钻尖处,进而大幅降低钻削轴向力,实现 CFRP 的无分层制孔加工。

除切削参数和刀具外,加工环境亦对 CFRP 钻削缺陷产生有着显著影响。在现有研究中,低温冷却和微量润滑 (Minimum quantity lubrication, MQL) 是最常见的应用到复合材料钻削加工中的冷却方法。相关文献表明,与传统干切削相比,使用低温冷却技术能够有效降低 CFRP 制孔表面粗糙度,但是会增大复合材料分层损伤^[67-68]。此外, MQL 的应用会增大 CFRP 钻削轴向力,进而增大复合材料分层损伤程度^[69-70]。

4 CFRP 钻削缺陷抑制技术

为实现 CFRP 高质量钻孔加工,研究人员在对复合材料钻削机制和制孔质量进行研究的基础上,已开发了多种新型制孔工艺方法。以螺旋铣孔、变进给钻削和超声振动加工为代表的新型缺陷抑制技术不断涌现,并已逐渐应用到航空复合材料精密制孔加工中。

4.1 螺旋铣孔技术

螺旋铣孔是将传统铣削和钻削原理相结合而形成的新型制孔技术,其具有加工过程平稳,刀具受力小,一次加工即可满足精度要求的优点,已

成为 CFRP 加工研究的热点之一^[71]。螺旋铣孔过程主要由刀具沿自身轴线的自转,绕孔中心的公转,径向不连续进给和周向连续进给复合而成,并且可以通过改变孔轴线与刀具中心轴之间的偏心距来实现不同孔径的制孔要求。此外,由于运动轨迹的不同,螺旋铣孔相比传统钻孔在散热降温方面有着显著的优势。在传统钻削过程中,刀具后刀面常与工件材料形成连续、封闭的接触区域,该区域是钻削热的主要来源,且钻尖部位的切削区为半封闭区域,导致钻削热不易排散;相比之下,螺旋铣孔属于断续切削过程,刀具侧边与工件材料的接触为内切式接触(图 9^[72]),且刀具与工件接触面积远小于钻削接触面积,极大地减少了摩擦热的产生,也使得铣孔所产生的切削热能够及时传出,可避免因高温累积而引起的复合材料基体降解与热损伤^[5,73]。相关文献已表明:应用螺旋铣孔技术进行 CFRP 制孔加工,能够有效降低复合材料的铣孔温度和切削力,抑制钻削缺陷的生成,进而大幅提高复合材料已加工表面质量^[74-78]。

4.2 变进给钻削技术

由于进给量是影响 CFRP 钻削力与钻削温度的关键因素,通过改变进给参数能够有效降低复合材料制孔过程中的力热耦合作用,进而抑制复合材料制孔缺陷的产生。变进给技术是指随着加工材料的厚度不断变化,进给量也发生变化。例如,在切削开始时,给予刀具较大的进给量,可以避免孔入口处的分层;而在

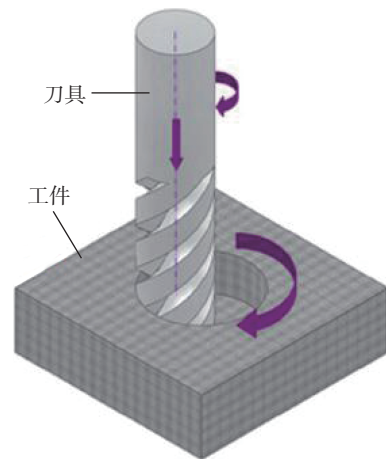


图 9 螺旋铣孔加工示意图^[72]

Fig.9 Schematic diagram of helical milling process^[72]

钻孔出口处降低进给量,可以有效地抑制孔出口处的分层损伤^[79]。相关研究表明,应用变进给钻削技术能够有效降低 CFRP 钻削轴向力值,进而抑制钻削分层损伤的产生^[80-82]。

4.3 超声振动加工技术

超声振动加工是一种非传统加工方法,其利用换能器(压电陶瓷)将高频电能转换为高频机械振动能,并将其应用于加工过程,通过机械作用和空化效应实现材料的去除^[83]。该加工方法不会引起热损伤和产生较大的残余应力,因此可以获得较高的复合材料制孔质量。超声振动加工技术通过对刀具或工件材料施加超声振动,使其以 20~40 kHz 的频率沿某个切削方向高速振动,促使刀具在一个振动周期内的有效切削时间缩短,并让刀具与工件切屑实现断续接触,进而极大地减少切削热量的生成,从而获得较好的加工质量。超声振动加工按刀具振动轨迹可分为轴向超声振动、径向超声振动和椭圆超声振动。该技术可显著抑制被加工材料表面微裂纹衍生,减小刀具与工件之间的作用时间与摩擦力,增强刀具对工件材料的切削去除作用,以达到减小切削力,降低切削热,改善工件加工精度与表面质量的目标,进而为 CFRP 高质量钻孔提供新的实现

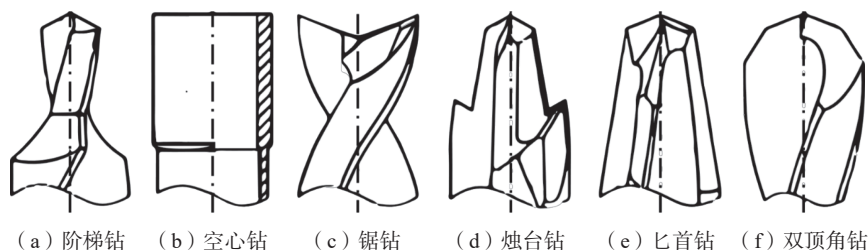


图 8 常用异型钻头^[15]

Fig.8 Commonly-used special drills^[15]

途径。相关研究已表明,采用超声振动技术钻削 CFRP 能够有效降低复合材料钻削力与切削温度,抑制复合材料制孔缺陷的生成,进而大幅提高被加工孔质量^[84-86]。

5 结论

尽管 CFRP 以其优异的物理性能和柔性的结构功能在航空领域获得了广泛的应用,其内在的非均质和各向异性特性亦给精密加工带来了巨大的挑战。为实现 CFRP 高效高质钻孔加工,国内外学者已开展了大量有价值的研究工作。本文在总结前人研究 CFRP 钻削缺陷的基础上,得到如下结论。

(1) 现有的关于 CFRP 切削损伤形成机制的研究大多依赖传统试验与仿真手段,而未形成具有体系性的缺陷形成机理解释。如何开发准确可靠的复合材料力热耦合切削本构模型是揭示微细观尺度下 CFRP 切削损伤形成机理的关键,亦是未来 CFRP 切削仿真研究的重要方向。

(2) 工艺参数、刀具材料/结构及加工环境是影响 CFRP 制孔缺陷的重要因素。通过优化工艺参数、开发适配的刀具几何结构和切削环境能够有效抑制 CFRP 钻孔损伤的产生,大幅提高复合材料被加工孔质量。

(3) 现有的关于 CFRP 切削表面损伤的评价仍主要沿用传统金属加工缺陷的评价方法,制定针对 CFRP 各向异性特性的表面质量评价体系是未来亟须解决的关键点。此外,开发准确可靠的复合材料切削损伤预测物理模型是实现 CFRP 加工缺陷精准控制的关键,亦是未来重要研究方向之一。

(4) 开发高性能异型钻头和新型加工技术是抑制 CFRP 制孔缺陷最行之有效的方法。未来,CFRP 高质量制孔加工将朝着数字化、网络化与智能化方向发展,研究人员可尝试将物联网、大数据和工业

云等智能制造赋能技术应用到新一代复合材料制孔加工中,通过开发复合材料专用在线缺陷检测、诊断与去除系统来实现 CFRP 高效低缺陷切削加工。

参考文献

- [1] 单晨伟,吕晓波.碳纤维增强复合材料铣削和钻孔技术研究进展[J].航空制造技术,2016,59(15):34-41.
- [2] SHAN Chenwei, LÜ Xiaobo. Research progress of milling and drilling on carbon fiber reinforced plastic[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(15): 34-41.
- [3] 徐锦泐,密思佩,明伟伟,等.纤维增强复合材料切削仿真研究进展[J].航空制造技术,2018,61(22):16-23.
- [4] XU Jinyang, MI Sipei, MING Weiwei, et al. Research advances in cutting modeling of fiber reinforced polymer composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(22): 16-23.
- [5] 明伟伟,王昌赢,魏莹莹,等.纤维增强复合材料制孔刀具技术研究进展[J].航空制造技术,2013,56(14):34-37.
- [6] MING Weiwei, WANG Changying, WEI Yingying, et al. Research progress of hole-making cutting tool on fiber reinforced plastic [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(14): 34-37.
- [7] 陈明,徐锦泐,安庆龙.碳纤维复合材料与叠层结构切削加工理论及应用技术[M].上海:上海科学技术出版社,2019.
- [8] CHEN Ming, XU Jinyang, AN Qinglong. Machining theory and application techniques for CFRP composites and multilayer stacks [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019.
- [9] 陈燕,葛恩德,傅玉灿,等.碳纤维增强树脂基复合材料制孔技术研究现状与展望[J].复合材料学报,2015,32(2):301-316.
- [10] CHEN Yan, GE Ende, FU Yucan, et al. Review and prospect of drilling technologies for carbon fiber reinforced polymer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2): 301-316.
- [11] AAMIR M, TOLOUEI-RAD M, GIASIN K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aero-space applications: A review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(5-6): 2289-2308.
- [12] CHE D M, SAXENA I, HAN P D, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering—Transactions of the ASME, 2014, 136(3): 034001.
- [13] VOß R, HENERICHS M, RUPP S, et al. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016, 12: 56-66.
- [14] BONNET C, POULACHON G, RECH J, et al. CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 94: 57-64.
- [15] LI N Y, LI Y G, ZHOU J, et al. Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 97: 11-17.
- [16] GAUGEL S, SRIPATHY P, HAEGER A, et al. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)[J]. Composite Structures, 2016, 155: 173-183.
- [17] GENG D X, LIU Y H, SHAO Z Y, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review[J]. Composite Structures, 2019, 216: 168-186.
- [18] XU J Y, AN Q L, CAI X J, et al. Drilling machinability evaluation on new developed high-strength T800S/250F CFRP laminates[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2013, 14(10): 1687-1696.
- [19] POÓR D I, GEIER N, PERESZLAI C, et al. A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 223: 109155.
- [20] XU J Y, YIN Y K, DAVIM J P, et al. A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites[J]. Composite Structures, 2022, 294: 115594.
- [21] HENERICHS M, VOß R, KUSTER F, et al. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2015, 9: 136-145.
- [22] LI H, QIN X D, HE G Y, et al. Investigation of chip formation and fracture

- toughness in orthogonal cutting of UD-CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(5-8): 1079-1088.
- [18] XU J Y, LI C, CHEN M, et al. An investigation of drilling high-strength CFRP composites using specialized drills[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 103(9-12): 3425-3442.
- [19] GENG D X, ZHANG D Y, LI Z, et al. Feasibility study of ultrasonic elliptical vibration-assisted reaming of carbon fiber reinforced plastics/titanium alloy stacks[J]. *Ultrasonics*, 2017, 75: 80-90.
- [20] WANG G D, MELLY S K, LI N. Using dampers to mitigate thrust forces during carbon-fibre reinforced polymer drilling: Experimental and finite element evaluation[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 37(1): 60-74.
- [21] FLEISCHER J, TETI R, LANZA G, et al. Composite materials parts manufacturing[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2018, 67(2): 603-626.
- [22] AL-WANDI S, DING S L, MO J. An approach to evaluate delamination factor when drilling carbon fiber-reinforced plastics using different drill geometries: Experiment and finite element study[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 93(9-12): 4043-4061.
- [23] GORDON S, HILLERY M T. A review of the cutting of composite materials[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2003, 217(1): 35-45.
- [24] KOPLEV A, BUNSELL A. Cutting of CFRP with single edge tools[C]. *International Conference of Advances in Composite Materials*. Paris, 1980.
- [25] KOPLEV A, LYSTRUP A, VORM T. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP[J]. *Composites*, 1983, 14(4): 371-376.
- [26] WANG D H, RAMULU M, AROLA D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(12): 1623-1638.
- [27] ILIESCU D, GEHIN D, IORDANOFF I, et al. A discrete element method for the simulation of CFRP cutting[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(1): 73-80.
- [28] CHENG H, GAO J Y, KAFKA O L, et al. A micro-scale cutting model for UD CFRP composites with thermo-mechanical coupling[J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 153: 18-31.
- [29] 秦旭达, 李永行, 王斌, 等. CFRP 纤维方向对切削过程影响规律的仿真研究[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(3): 472-476.
- QIN Xuda, LI Yonghang, WANG Bin, et al. Simulation of effect of fiber direction on cutting process of CFRP[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2016, 35(3): 472-476.
- [30] YAN X Y, REINER J, BACCA M, et al. A study of energy dissipating mechanisms in orthogonal cutting of UD-CFRP composites[J]. *Composite Structures*, 2019, 220: 460-472.
- [31] ANAND R S, PATRA K. Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, 16: 55-63.
- [32] LI H, QIN X D, HE G Y, et al. An energy based force prediction method for UD-CFRP orthogonal machining[J]. *Composite Structures*, 2017, 159: 34-43.
- [33] SHETTY N, SHAHABAZ S M, SHARMA S S, et al. A review on finite element method for machining of composite materials[J]. *Composite Structures*, 2017, 176: 790-802.
- [34] 路冬, 李志凯, 融亦鸣, 等. 基于宏观各向异性碳纤维增强树脂基复合材料的切削仿真[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3): 584-590.
- LU Dong, LI Zhikai, RONG Yiming, et al. Cutting simulation of carbon fiber reinforced resin matrix composite materials based on macroscopic anisotropy[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3): 584-590.
- [35] 熊威龙, 戴斌煜, 商景利, 等. 碳纤维复合材料切削过程的有限元模拟[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(1): 86-89.
- XIONG Weilong, DAI Binyu, SHANG Jingli, et al. Finite element simulations on cutting process for carbon fiber composite[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2014, 37(1): 86-89.
- [36] XU J Y, LIN T Y, DAVIM J P, et al. Wear behavior of special tools in the drilling of CFRP composite laminates[J]. *Wear*, 2021, 476: 203738.
- [37] GEIER N, SZALAY T, TAKÁCS M. Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 100(9-12): 3139-3154.
- [38] XU J Y, LI C, MI S P, et al. Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria[J]. *Composite Structures*, 2018, 201: 1076-1087.
- [39] SHYHA I S, ASPINWALL D K, SOO S L, et al. Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(12-13): 1008-1014.
- [40] DAVIM J P. *Drilling of composite materials* [M]. New York: Nova Science Publishers, 2009.
- [41] DAVIM J P, RUBIO J C, ABRÃO A M. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(9): 1939-1945.
- [42] LIU D F, TANG Y J, CONG W L. A review of mechanical drilling for composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(4): 1265-1279.
- [43] FARAZ A, BIERMANN D, WEINERT K. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(15): 1185-1196.
- [44] BABU J, SUNNY T, PAUL N A, et al. Assessment of delamination in composite materials: A review[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016, 230(11): 1990-2003.
- [45] PATEL P, CHAUDHARY V. Delamination evaluation in drilling of composite materials—A review[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 2690-2695.
- [46] SHYHA I, SOO S L, ASPINWALL D, et al. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(8): 1023-1034.
- [47] KHASHABA U A. Delamination in drilling GFR-thermoset composites[J]. *Composite Structures*, 2004, 63(3-4): 313-327.
- [48] KHASHABA U A, EL-SONBATY I A, SELMY A I, et al. Machinability analysis in

- drilling woven GFR/epoxy composites: Part I—Effect of machining parameters[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(3): 391–400.
- [49] KHASHABA U A, EL-SONBATY I A, SELMY A I, et al. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II—Effect of drill wear[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(9): 1130–1137.
- [50] HOCHENG H, TSAO C C. The path towards delamination-free drilling of composite materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 167(2–3): 251–264.
- [51] CHEN W C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, 37(8): 1097–1108.
- [52] TSAO C C, KUO K L, HSU I C. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(5–8): 617–622.
- [53] NAGARAJAN V A, RAJADURAI J S, KUMAR T A. A digital image analysis to evaluate delamination factor for wind turbine composite laminate blade[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8): 3153–3159.
- [54] DURÃO L M P, TAVARES J M R S, DE ALBUQUERQUE V H C, et al. Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 576–583.
- [55] 魏莹莹, 安庆龙, 蔡晓江, 等. 碳纤维复合材料超声扫描分层检测及评价方法[J]. *航空学报*, 2016, 37(11): 3512–3519.
- WEI Yingying, AN Qinglong, CAI Xiaojiang, et al. CFRP ultrasonic scan delamination detection and evaluation method[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3512–3519
- [56] WANG X M, ZHANG L C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(10): 1015–1022.
- [57] WANG C Y, CHEN Y H, AN Q L, et al. Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16(8): 1689–1697.
- [58] KRISHNARAJ V, PRABUKARTHI A, RAMANATHAN A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1791–1799.
- [59] HOU G Y, ZHANG K F, FAN X T, et al. Analysis of exit-ply temperature characteristics and their effects on occurrence of exit-ply damages during UD CFRP drilling[J]. *Composite Structures*, 2020, 231: 111456.
- [60] QIU X Y, LI P N, NIU Q L, et al. Influence of machining parameters and tool structure on cutting force and hole wall damage in drilling CFRP with stepped drills[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97(1–4): 857–865.
- [61] HOU G Y, LUO B, ZHANG K F, et al. Effects of heat accumulation on the characteristics of hole wall temperature and damages in drilling of UD CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(5–6): 1529–1546.
- [62] GEIER N, DAVIM J P, SZALAY T. Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125: 105552.
- [63] GAITONDE V N, KARNIK S R, RUBIO J C, et al. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45(22): 2359–2368.
- [64] PINHO L, CAROU D, DAVIM J. Comparative study of the performance of diamond-coated drills on the delamination in drilling of carbon fiber reinforced plastics: Assessing the influence of the temperature of the drill[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(2): 179–189.
- [65] GAITONDE V.N, KARNIK S R, RUBIO J C, et al. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 203(1–3): 431–438.
- [66] AMEUR M F, HABAK M, KENANE M, et al. Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: Cases of exit delamination and cylindricity error[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88 (9): 2557–2571.
- [67] BASMACI G, YORUK A S, KOKLU U, et al. Impact of cryogenic condition and drill diameter on drilling performance of CFRP[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7: 667.
- [68] XIA T, KAYNAK Y, ARVIN C, et al. Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 82(1): 605–616.
- [69] NAGARAJ A, UYSAL A, JAWAHIR I S. An investigation of process performance when drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite under dry, cryogenic and MQL environments[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 43: 551–558.
- [70] WANG F, QIAN B, JIA Z, et al. Effects of cooling position on tool wear reduction of secondary cutting edge corner of one-shot drill bit in drilling CFRP[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94 (9): 4277–4287.
- [71] 秦旭达, 陈仕茂, 刘伟成, 等. 螺旋铣孔技术在航空制造装配业中的发展应用[J]. *航空制造技术*, 2009, 52(6): 58–60.
- QIN Xuda, CHEN Shimao, LIU Weicheng, et al. Development and application of hole helical milling technology in aviation manufacturing assembly industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, 52(6): 58–60.
- [72] SADEK A, MESHREKI M, ATTIA M H. Characterization and optimization of orbital drilling of woven carbon fiber reinforced epoxy laminates[J]. *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, 2012, 61 (1): 123–126.
- [73] DENKENA B, BOEHNKE D, DEGE J H. Helical milling of CFRP–titanium layer compounds[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, 1(2): 64–69.
- [74] WANG H, QIN X, LI H, et al. A comparative study on helical milling of CFRP/Ti stacks and its individual layers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86: 1973–1983.
- [75] WANG Q, WU Y, LI Y, et al. Proposal of a tilted helical milling technique for high-quality hole drilling of CFRP: Analysis of hole surface finish[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 101: 1041–1049.
- [76] LIU J, CHEN G, JI C H, et al. An investigation of workpiece temperature variation of helical milling for carbon fiber reinforced plastics (CFRP)[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 86: 89–103.
- [77] PEREIRA R B D, BRANDÃO L C,

DE PAIVA A P, et al. A review of helical milling process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 120: 27–48.

[78] PERESZLAI C, GEIER N. Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9): 3913–3930.

[79] 刘雪梅, 孙会来, 贺龙宇, 等. CFRP 制孔技术的研究现状与发展趋势 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2018(3): 101–106.

LIU Xuemei, SUN Huilai, HE Longyu, et al. Research status and development trend of CFRP drilling technology[J]. Composites Science and Engineering, 2018,(3): 101–106.

[80] DHARAN C K H, WON M S. Machining parameters for an intelligent machining

system for composite laminates[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(3): 415–426.

[81] LI M, SOO S L, ASPINWALL D K, et al. Study on tool wear and workpiece surface integrity following drilling of CFRP laminates with variable feed rate strategy[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 407–412.

[82] YAŞAR N, GÜNEY M. Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2019, 41(3): 150.

[83] YANG Z, ZHU L, ZHANG G, et al. Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials[J]. International Journal

of Machine Tools and Manufacture, 2020, 156: 103594.

[84] MAKHDUM F, PHADNIS V A, ROY A, et al. Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforced plastics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(23): 5939–5952.

[85] FENG Q, CONG WL, PEI Z J, et al. Rotary ultrasonic machining of carbon fiber-reinforced polymer: Feasibility study[J]. Machining Science and Technology, 2012, 16(3): 380–398.

[86] SANDA A, ARRIOLA I, NAVAS VG, et al. Ultrasonically assisted drilling of carbon fibre reinforced plastics and Ti6Al4V[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 22: 169–176.

Research Advances in Drilling-Induced Defects of Carbon Fiber Reinforced Polymers

XU Jinyang

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Carbon fiber reinforced polymers (CFRPs) have been extensively used in the aviation field due to their superior physical properties and flexible structural functions. Drilling is a critical manufacturing process to realize the assembly of CFRP structural parts. Due to the heterogeneous and anisotropic characteristics of CFRPs, the hole-making process entails complex chip removal and surface generation mechanisms, prone to serious machining-induced defects. To date, worldwide scholars have carried out numerous investigations on the defect formation and suppression mechanisms of CFRPs. Based on the comprehensive literature survey, this paper firstly describes the chip removal mechanisms and drilling process of CFRPs, then classifies the CFRP drilling defect modes, and briefly reviews the CFRP drilling defects such as delamination, tearing, burrs, etc. The fundamental formation mechanisms of these defects are investigated, and the impacts of process conditions on the generation of CFRP hole defects are discussed. Finally, this paper summarizes the existing defect suppression strategies for CFRPs and points out the future development directions.

Keywords: CFRP; Drilling; Delamination; Tearing; Burrs; Defect suppression

(责编 大漠)