

钎焊金刚石套料钻CFRP制孔研究

徐九华 牟娟 陈燕 傅玉灿 王伟锋

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

摘要:碳纤维增强复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)中高硬度碳纤维易加速孔加工钻头的磨损,导致加工质量变差。采用钎焊金刚石套料钻加工CFRP不仅可提高钻头的耐磨性,加工质量也得到了改善。为更好地优化提高套料钻加工性能,试验采用有序排布的金金刚石磨粒制作钎焊套料钻,尝试通过改变磨粒数量来调整单颗磨粒切厚大小,对相同工艺参数下不同单颗磨粒切厚对钻削轴向力、孔壁粗糙度以及出入口质量的影响进行了研究。建立了金刚石磨粒的运动模型,并分析了套料钻制孔中已加工表面的形成过程。试验结果与分析表明:制孔质量与容屑空间和单颗磨粒切厚有关。在容屑空间充足的情况下,随着单颗磨粒切厚的减小,轴向力减小,制孔质量提高。

关键词:碳纤维增强复合材料;钻削;钎焊金刚石套料钻;单颗磨粒切厚

中图分类号:TG74 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)05-0747-07

Analysis on CFRP Hole Making with Brazed Diamond Core Drill

Xu Jiuhua, Mu Juan, Chen Yan, Fu Yucan, Wang Weifeng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The high hardness of carbon fiber in carbon fiber reinforced plastics (CFRP) leads to quick wear, low durability of drills, and poor machining quality in drilling process. Applying brazed diamond core drill to drilling CFRP can improve drill durability and increase machining quality. In order to optimize the setting of diamond grits on core drill, the diamond grits are orderly set to make core drill, and the maximum undeformed chip thickness are changed through changing the diamond quantity. The influences of maximum undeformed chip thickness on thrust force, surface roughness of hole wall and quality of hole entrance and exit are compared under the same machining parameters. The moving model of diamond grits is set up to analyze the forming process of machined surface. The results and analysis show that the drilling quality is influenced by chip storage space and the maximum undeformed chip thickness. If the chip storage space is sufficient, the thrust force decreases and the drilling quality improves with the decreasing maximum undeformed chip thickness.

Key words: carbon fiber reinforced plastics(CFRP); drilling; brazed diamond core drill; maximum undeformed chip thickness

碳纤维增强树脂基复合材料(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)具有比强度高、比模量高、疲劳寿命长、极端温度条件下的热膨胀系数低、不易腐蚀等特点,因而被广泛应用于航空航天领域^[1]。随着碳纤维增强复合材料应用量的增加,其二次加工质量也越来越重要。碳纤维增强复合材料具有非均质及各

向异性的特点,层间强度低,在机械加工过程中,特别是制孔过程中容易产生毛刺、分层、撕裂等缺陷,属于典型的难加工材料^[2]。碳纤维增强复合材料层板上所加工的孔多用于铆钉连接或螺纹连接,为保证其连接强度,对于孔壁质量,如孔壁的表面粗糙度也提出了严格要求。孔壁作为已加工表面,其形成过程及质量

基金项目:国家自然科学基金(51075210)资助项目;国家数控机床重大专项(2012ZX040003031)资助项目;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(KFJJ20110222)资助项目。

修订日期:2012-08-27

通讯作者:徐九华,男,教授,博士生导师,长江学者,E-mail:jhxu@nuaa.edu.cn。

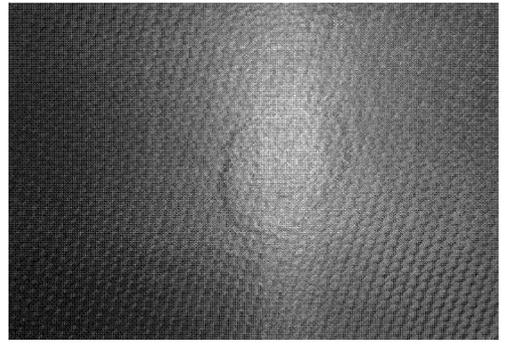
都与复合材料的铺层方式等有着密切联系。Wang 等人^[3]利用直角自由切削方法对单向和多向碳纤维增强复合材料的切削机理进行了研究,得出纤维方向与切削方向的夹角在一定范围内时,纤维与基体所受的剪切力与宏观切削力间的经验公式。文中也探讨了在一些典型的铺层角度中,纤维方向与切削方向的夹角对加工表面粗糙度的影响。

在提高孔加工质量、延长钻头寿命方面,很多工具制造企业推出了专用的钻头来提高加工质量及加工效率,如 Sandvick, Kennametal, SECO 等公司。Wu 等人^[4]使用多面钻以降低钻头钻削时的轴向力来提高加工质量。Jain 和 Yang^[5]发现增加切削刃的数量可以降低轴向力的最大值。因此有些研究者开始研究“以磨代切”这种多刃加工的方式,如大连理工大学的高航、鲍永杰等^[6]将电镀金刚石套料钻应用到了孔加工中,得到如下结论:电镀金刚石钻头钻削碳纤维复合材料时钻削轴向力较小,钻削质量较好,更适合于碳纤维复合材料的加工。钻头转速提高有利于减小钻孔缺陷的产生,钻削轴向力随钻头转速的升高而降低,随钻头直径的增大而增大。而电镀金刚石套料钻难以实现磨粒的严格有序排布,无法通过对单颗磨粒切厚的准确控制来实现对加工表面质量的控制。南京航空航天大学利用在钎焊工艺上的优势,开展了钎焊金刚石工具应用于碳纤维复合材料加工的研究^[7-8]。实际生产中,碳纤维增强复合材料直径 6 mm 孔数量较多,加工用的手风钻的主轴转速是 15 000 r/min,进给速度约为 150~180 mm/min。本文尝试根据这些要求设计并制作了分别焊有 8 排、12 排、16 排金刚石磨粒的套料钻,通过改变磨粒数量来控制单颗磨粒切厚大小,并考察单颗磨粒切厚对于轴向力、孔内壁粗糙度、进出口质量的影响。根据分析结果确定保证加工质量并提高加工效率的单颗磨粒切厚的合适范围。

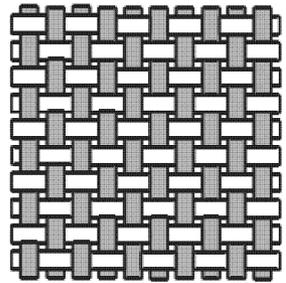
1 试验条件

试验的工件材料是体积分数为 60% 的碳纤维增强树脂基复合材料层合板,如图 1(a)所示,碳纤维牌号为 T300,碳纤维带型号为 G803PV,环氧树脂基体是中温树脂体系 3234。碳纤维层合板采用平纹编织方式,如图 1(b)所示。复合材料板尺寸为 150 mm×100 mm×3.6 mm。

加工所用的钻头为金刚石有序排布的钎焊套料钻,金刚石磨粒粒度为 80/100,经进一步筛选,金刚石磨粒粒径范围为 160~180 μm。排布方式分别是 8 排(1 号套料钻)、12 排(2 号套料钻)和 16 排(3 号套料钻),如图 2 所示。基体材料为 45 钢,套料

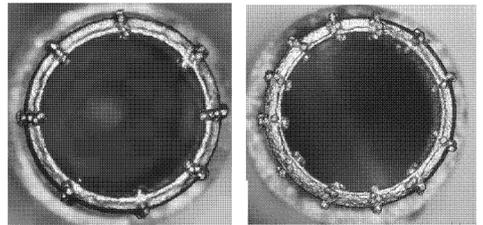


(a) 实物照片



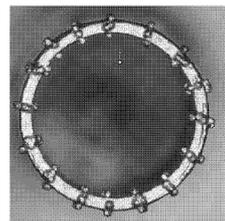
(b) 平纹编织方式

图 1 碳纤维增强复合材料层合板



(a) 1号套料钻

(b) 2号套料钻



(c) 3号套料钻

图 2 试验中使用的钎焊金刚石套料钻

钻直径为 6 mm。

试验在数控雕铣机 HG410 上进行,雕铣机主轴转速为 3 000~24 000 r/min,最高进给速度为 5 m/min, X, Y 和 Z 方向上的最大工作行程分别为 410, 410 和 110 mm。钻削过程中同时进行了钻削力的采集,测力系统由 Kistler 9272 测力仪、电荷放大器 Kistler 5070 以计算机组成,如图 3 所示。加工后的进出口质量通过三维视频显微镜 Hirox KH-7700 进行观察检测。

试验工艺参数为主轴转速 15 000 r/min,进给

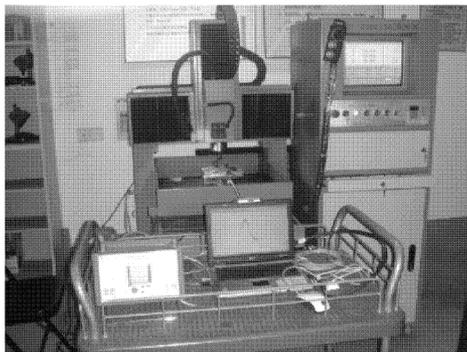


图3 试验系统

速度分别为 60, 100, 150 和 200 mm/min。

2 试验结果

2.1 钻削轴向力

图4为3种钎焊金刚石套料钻在不同进给速度下的钻削轴向力图。其中1号套料钻在进给速度为150 mm/min时,出口出现严重的撕裂缺陷,因此未继续提高进给速度进行加工。2号与3号套料钻的加工质量较好,进给速度继续提高至200 mm/min。

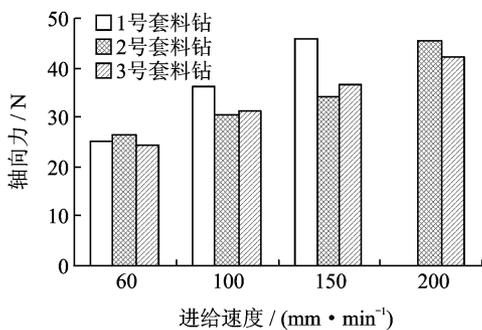


图4 不同进给速度下的轴向力

仔细分析该图可知,当进给速度为60 mm/min时,1号、2号及3号套料钻的钻削力差别很小,均为26 N左右。随着进给速度的增加,不同钻头的轴向力差距也在增大。当进给速度增加到150 mm/min时,1号套料钻的轴向力为46.3 N,2号套料钻的钻削轴向力为34.3 N,3号套料钻的钻削轴向力为36.6 N。1号套料钻轴向力明显大于2号与3号套料钻,2号与3号套料钻的轴向力暂时相差很小。当进给速度继续增加到200 mm/min时,2号套料钻的轴向力为45.7 N,3号套料钻的钻削轴向力为42.1 N。2号与3号套料钻的轴向力差距也随着进给速度的进一步增大而扩大。

2.2 孔壁粗糙度

在碳纤维增强复合材料孔加工的质量评价中,对孔壁粗糙度的大小提出了要求。孔壁粗糙度测量

使用的是德国 Mahr 公司生产的 Perthometer M1 便携式粗糙度测量仪。由于碳纤维增强复合材料板是平纹编织方式,孔壁内的不同位置处粗糙度大小存在一定差异,测量选择了0°与45°两个具有代表性的位置进行分别测量,如图5所示,测量项目为轮廓算术平均偏差 R_a 。

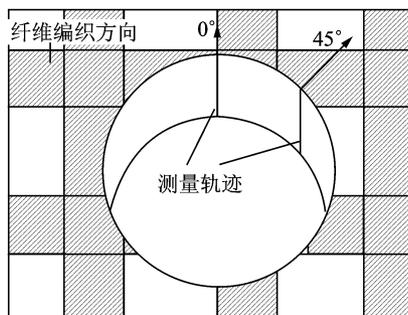


图5 孔内壁粗糙度测量位置示意图

两种套料钻所加工的所有孔在45°方向上的粗糙度均略大于0°方向,但两个方向上的粗糙度变化趋势一致。以下选取不同的进给速度下孔壁在45°方向上的粗糙度值 R_a 为例进行分析,如图6所示。3种套料钻的孔壁粗糙度值都低于1 μm ,但数值大小上还是存在一定差距。3种套料钻所加工的孔壁粗糙度都随进给速度的增加而增大。在同样进给速度条件下,随着磨粒数量的增加,单颗磨粒切厚降低,孔壁粗糙度大小也在降低。试验中孔壁粗糙度值最低时仅有0.51 μm ,最高时为0.84 μm 。

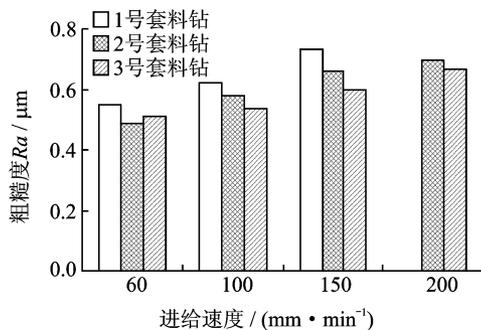


图6 不同进给速度下的孔壁粗糙度

2.3 出入口质量

金刚石套料钻在加工碳纤维增强复合材料时,入口与出口处是薄弱环节,容易产生撕裂、毛刺等缺陷。这是由于入口处的材料刚性高,材料抵抗变形的能力较强,不容易产生缺陷。当磨粒磨削至靠近层板底部时,材料的最后一层由于缺少底部材料的支撑,而刚性降低容易发生变形。金刚石磨粒的推挤就会引起材料大变形而导致撕裂缺陷的产生。

试验中使用的3种套料钻所加工出的孔入口均没有出现撕裂或毛刺缺陷。图7为2号套料钻在

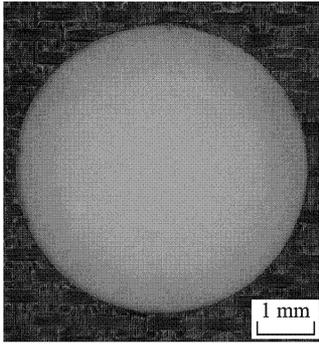
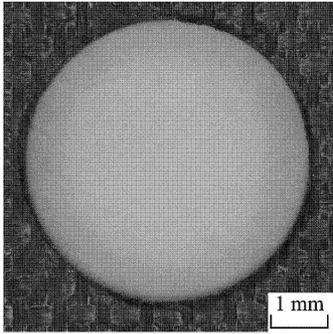


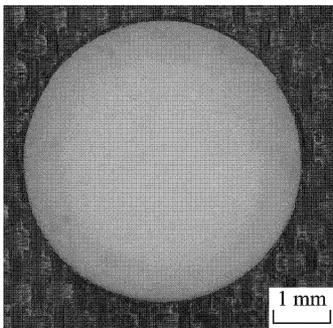
图7 孔入口形貌(2号套料钻,进给速度200 mm/min)

进给速度为200 mm/min时所加工的孔入口,没有出现任何毛刺及撕裂缺陷。

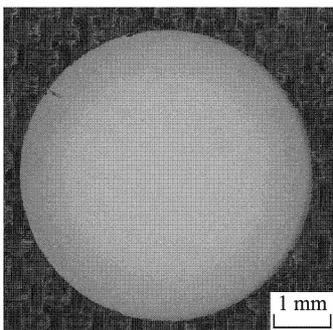
从不同工艺参数下的出口质量来看,出口缺陷主要是撕裂,而3种套料钻所加工的孔出口开始出现撕裂缺陷的进给速度各不相同。如图8所示,1号



(a) 出口形貌(1号套料钻,进给速度100 mm/min)



(b) 出口形貌(2号套料钻,进给速度200 mm/min)

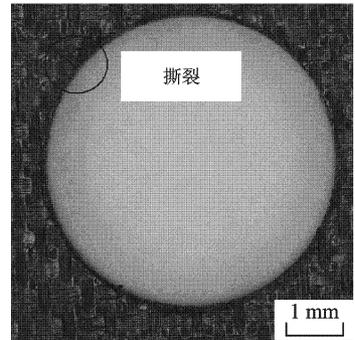


(c) 出口形貌(3号套料钻,进给速度150 mm/min)

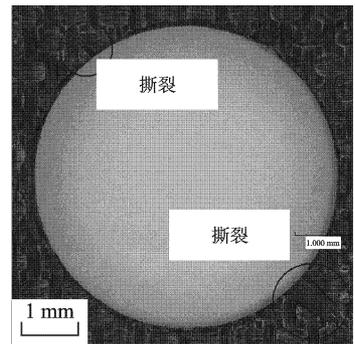
图8 无缺陷孔出口形貌

套料钻在进给速度100 mm/min,2号套料钻在进给速度200 mm/min,3号套料钻在进给速度150 mm/min,出口均平整光滑,没有出现毛刺及撕裂缺陷。

随着进给速度的提高,1号套料钻及3号套料钻所加工的孔出口处开始出现撕裂缺陷,如图9所示。1号套料钻在进给速度150 mm/min,出现了两条窄而长的撕裂缺陷,宽度均为0.5 mm,长度为1.1 mm左右。3号套料钻在进给速度200 mm/min,出现了两条撕裂缺陷,一条细长形的宽0.4 mm,长1 mm,另一条更加细长的撕裂仅宽0.15 mm,长0.7 mm。



(a) 出口形貌(1号套料钻,进给速度150 mm/min)



(b) 出口形貌(3号套料钻,进给速度200 mm/min)

图9 有缺陷孔出口形貌

3 分析与讨论

3.1 单颗磨粒切厚的计算

套料钻上的每颗磨粒运动轨迹都是一条圆柱螺旋线,其导程由进给量决定。图10(a)以焊有8排磨粒的1号套料钻为例,对磨粒运动轨迹进行了示意,磨粒运动的实际导程远小于图中所示。多颗磨粒共同运动,不同磨粒运动轨迹之间留下的工件材料体积很小,从而形成规则的孔壁表面。对于单颗磨粒而言,其加工过程从切入材料到切出材料是连续的。

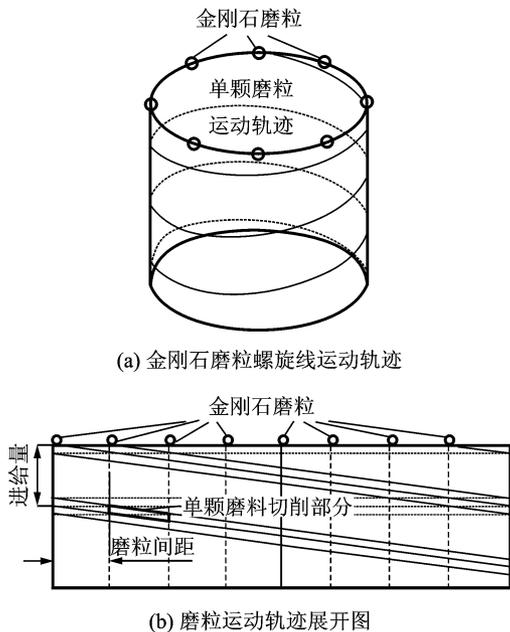


图10 钎焊套料钻上金刚石磨粒运动轨迹

将图10(a)中的圆柱面沿磨粒附近的母线进行展开,如图10(b)所示。对左边两颗磨粒及最右侧磨粒共3颗磨粒的运动轨迹进行示意,磨粒间距及每颗磨粒的切削部分如图中所示。3种套料钻在同样的工艺参数下,每颗磨粒的运动轨迹仍是相似的,仅有磨粒间距发生变化,进而影响单颗磨粒切厚的形状及大小。

根据图10的几何关系,可以得到单颗磨粒切厚的表达式为

$$h = \frac{pv_w}{v_s} = \frac{pf_n}{n\pi D} = f \frac{p}{\pi D} \quad (1)$$

式中: h 为单颗磨粒切厚; p 为磨粒间距; v_w 为进给速度; v_s 为切削速度; f 为每转进给量; n 为主轴转速; D 为钻头直径。

3种套料钻的单颗磨粒切厚如图11所示,均以磨粒O为起点,磨粒A,B,C分别为3号套料钻、2号套料钻、1号套料钻上与O相邻的磨粒。每颗磨粒运动轨迹线的斜率由进给量与孔周长共同决定,然而实际的进给量相对于孔周长小得多,因而磨粒实际运动轨迹的斜率很小。随着磨粒数量增加,不仅是单颗磨粒切厚在减小,单颗磨粒切除的材料长度也在减小。单颗磨粒切厚取决于磨粒间距及磨削工艺参数,不仅影响了作用在磨粒上的磨削力大小,还影响着已加工表面粗糙度。单颗磨粒切厚的大小对钻削轴向力大小及孔壁粗糙度值的影响趋势是一致的,即随着单颗磨粒切厚的增大,轴向力增大,而且孔壁粗糙度值也随之增大。

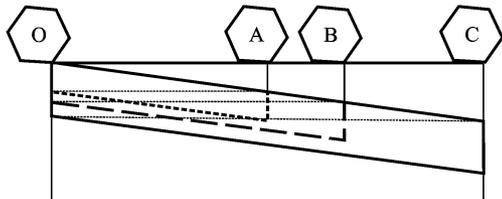


图11 单颗磨粒材料切除量示意图

3.2 单颗磨粒切厚对轴向力的影响

套料钻的切削过程依靠金刚石磨粒起切削作用,尤其是顶部的金刚石磨粒起主要的切削作用,绝大部分的材料去除任务由这部分磨粒完成,而套料钻外侧的磨粒主要起修磨作用。图12指出了套料钻顶部及内外侧顶端的金刚石磨粒分别切除的材料部分。

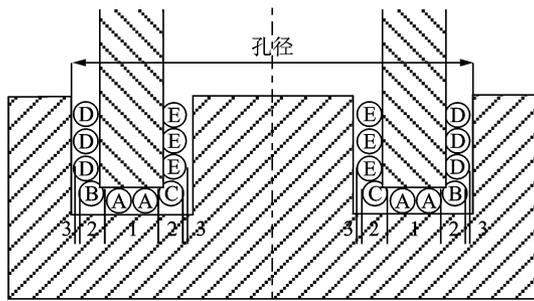


图12 不同位置金刚石磨粒的切削作用

位于套料钻基体管壁顶端正上方的磨粒A首先接触材料,切除材料部分1,在材料内部首先形成一个宽度等于磨粒A宽度的圆环状槽。磨粒B和C分别位于套料钻基体管壁的内外侧肩处,高度略低于磨粒A,切除材料部分为2。随着磨粒B和C开始切削,圆环槽被扩大,切除材料部分2的多少取决于磨粒B外侧与磨粒A外侧的尺寸差加上磨粒C内侧与磨粒A内侧的尺寸差。当分别位于套料钻基体管壁内外侧的磨粒D和E开始接触材料时,材料中的圆环槽外侧被扩展至孔的直径大小,内侧则被加工为最终切屑的直径大小。材料部分3的多少取决于磨粒D外侧与磨粒B侧的尺寸差加上磨粒E内侧与磨粒C侧的尺寸差。

金刚石磨粒产生的磨削力主要来源于:克服碳纤维及环氧基树脂体弹性变形的抗力;克服碳纤维断裂和环氧树脂基体剪切的抗力;克服已形成的切屑与磨粒之间的摩擦阻力以及克服磨粒与已加工表面间的摩擦阻力。3种套料钻在主轴转速不变的情况下,轴向力都随着单颗磨粒切厚的增大而增大,这主要是由于单颗磨粒切厚增大时磨粒所克服的被加工材料变形、断裂的抗力越大,磨粒收到来

自切屑与已加工表面的摩擦阻力也增大。单颗金刚石磨粒产生的磨削力增大,多颗磨粒磨削力合成的轴向力也就越大。

3.3 单颗磨粒切厚对孔壁粗糙度的影响

如图11所示,孔内壁的最终形成是依靠一定数量的磨粒D,磨粒D的等高性将会直接影响孔内壁的粗糙度。由于试验中所使用的磨粒经过进一步的筛选,磨粒粒径差别小,等高性比较好。虽然磨粒粒径差别小,金刚石磨粒的形状决定了两颗磨粒之间还是会留下一部分未切除的残留材料,如图13所示。一方面,不同排磨粒之间的相对位置不完全一致,随着磨粒数量的增加,后续磨粒将前面残留的材料加工掉的几率增大,孔内壁的表面粗糙度值将会进一步降低。另一方面,随着单颗磨粒切厚的减小,磨粒之间未切除的残留材料高度会减小。这样最终形成的孔壁表面微观高度差减小,表面粗糙度值也低。

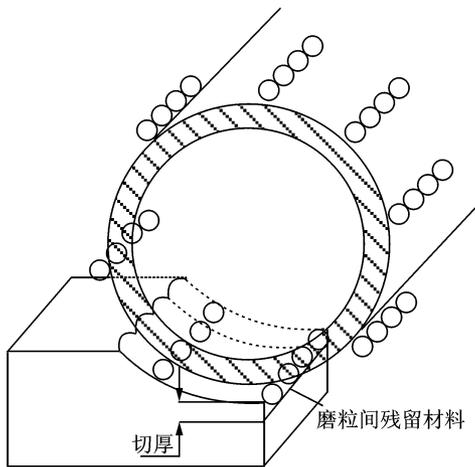


图13 金刚石磨粒间残留材料及磨粒的位置关系

3.4 单颗磨粒切厚对进出口质量的影响

孔进出口出现的缺陷主要是撕裂缺陷。金刚石磨粒开始与工件接触时,材料仅发生弹性变形。随着磨粒继续切入,磨粒施加的载荷进一步增大,材料的变形程度增加,当材料变形超过弹性变形的临界点,材料中开始产生接触应力并在材料中产生凹坑,并推动磨粒前方的材料隆起而在复合材料表面形成损伤。随着金刚石磨粒继续前进,磨粒两侧推动已隆起的材料继续向前,当隆起的材料边缘发生断裂脱离材料主体,就形成了撕裂缺陷^[9-12],如图14所示。

试验最大的单颗磨粒切厚为 $1.66\ \mu\text{m}$,最小单颗磨粒切厚为 $0.25\ \mu\text{m}$ 。随着单颗磨粒切厚的增加,磨粒施加的载荷也在增加,磨粒加工引起的撕裂范围及凹坑深度也随之增加。因此,减小单颗磨粒切厚来降低磨粒产生的磨削力可以有效地减小撕裂缺陷大小,提高加工质量。根据试验中轴向力

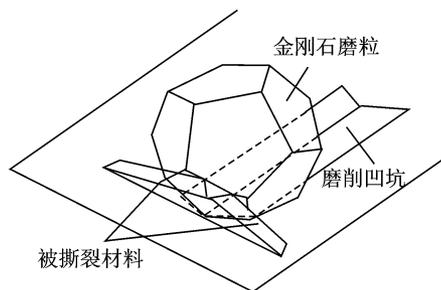


图14 撕裂缺陷形成示意图

大小,出口质量及孔内壁质量,可以看出当单颗磨粒切厚小于 $1.11\ \mu\text{m}$ 时,可以获得好的表面加工质量。但由于套料钻直径限制,仅依靠金刚石磨粒数量的增加来减小单颗磨粒切厚也是不可取的,还需要考虑金刚石磨粒数量的增加会带来的容屑空间减小的问题。

3.5 容屑空间的安排

碳纤维复合材料在磨削加工中形成的磨屑呈粉末状,加上粒度80/100的金刚石磨粒粒径小,磨粒出露高度相对较小,磨粒间的容屑空间小,因而容易发生磨屑堵塞在磨粒之间。这种堵塞是嵌入型堵塞,仅仅是机械的存在于磨粒之间,而没有与磨粒之间发生化学粘着。加之钻削是一个半封闭的加工方式,在孔钻通前,除少量磨屑在离心力作用下飞出孔外,大部分的磨屑随着套料钻运动在孔内运动,遇到磨粒间的空隙处可能会停止运动,如图15所示。过多的磨屑积压在磨粒之间,在磨削力的作用下逐渐被压实,影响到磨粒的实际出露高度。磨粒及磨粒间压实的磨屑与待磨削材料的接触直径增大,对材料施加的载荷也增大,材料表面的损伤区域随之增大,从而使加工缺陷产生或扩大。

试验中使用的套料钻基体顶部管状部分壁厚均为 $0.45\ \text{mm}$,直径为 $5.4\ \text{mm}$,金刚石磨粒粒径范围是 $160\sim 180\ \mu\text{m}$ 。套料钻顶端的管壁内外侧都焊有金刚石磨粒,包括磨粒在内的平均厚度约为 $0.80\ \text{mm}$,每排金刚石磨粒长度约为 $4\ \text{mm}$ 。根据单

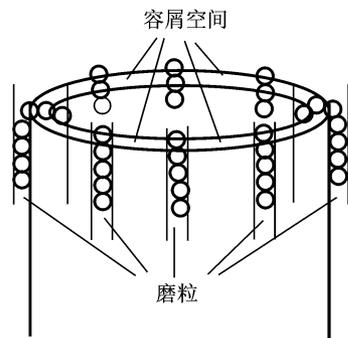


图15 容屑空间示意图

磨颗粒切厚的计算,套料钻上每排磨粒在钻头每转中产生的磨屑体积

$$V_1 = f \times (2\pi r/n) \times 0.8 = 15.072f/n \quad (2)$$

式中: f 为每转进给量; r 为孔半径, n 为金刚石磨粒排数。

套料钻顶部两排磨粒之间的容屑空间体积约为

$$V_2 = [\pi r^2 - \pi(r - 0.8)^2] \times 0.18/n - (0.8 \times 0.18) \times 0.18 = 2.351/n - 0.026 \quad (3)$$

3种套料钻上每排磨粒间的容屑空间分别为1号 0.268 mm^3 ,2号 0.170 mm^3 ,3号 0.121 mm^3 。对于试验中使用的套料钻而言,同样的进给速度下,随着磨粒排数的增加,单颗磨粒切厚的减小使每排磨粒每转产生的磨屑体积减小,而每排磨粒间的容屑空间也在减小。根据试验中的孔加工质量,可以看出1号和2号套料钻的容屑空间大小可以满足容屑要求,而3号套料钻的容屑空间小,已经对加工质量产生了不利影响。因此,仅通过不断增加金刚石磨粒数量的方式来减小单颗磨粒切厚,而不考虑容屑空间的安排,也不利于提高加工质量。

4 结束语

采用8排、12排和16排金刚石磨粒的套料钻,可以通过改变磨粒数量来控制同样工艺参数下的单颗磨粒切厚大小。

随着单颗磨粒切厚的减小,轴向力减小,孔内壁粗糙度值降低,进出口质量提高。进给速度达到 200 mm/min ,单颗磨粒切厚为 $1.11 \mu\text{m}$ 时的轴向力为 45.7 N ,表面粗糙度值为 $0.69 \mu\text{m}$;当单颗磨粒切厚减小至 $0.83 \mu\text{m}$ 时的轴向力减小至 42.1 N ,表面粗糙度值降低至 $0.66 \mu\text{m}$ 。

比较3种套料钻的加工质量,8排磨粒的套料钻在进给速度 150 mm/min 下由于单颗磨粒切厚过大而加工质量不理想,16排磨粒的套料钻在进给速度 200 mm/min 下由于容屑空间较小而影响加工质量。因此,对于直径 6 mm 的套料钻,选择12排粒度80/100的磨粒较合适。

参考文献:

[1] 李威,郭权锋.碳纤维复合材料在航天领域的应用[J].中国光学,2011,4(3):201-212.

Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 201-212.

[2] 张厚江.碳纤维复合材料(CFRP)钻孔出口缺陷的研究[J].机械工程学报,2004,40(7):150-155.

Zhang Houjiang. Investigation of the exit defects in

drilling carbon fibre-reinforced plastic plates [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2004, 40 (7):150-155.

[3] Wang D H, Ramulu M, Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part 1: Unidirectional laminate [J]. Int J Mach Tools Manufact, 1995, 35(12):1623-1638.

[4] Wu S M, Shen J M, Chen L H. Multifacet drills [C]//Proc 14th National SAMPE Technology Conference. California: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1982:456-463.

[5] Jain S, Yang D C H. Delamination-free drilling of composite laminates [J]. ASME J Eng Ind, 1994, 116:475-481.

[6] 鲍永杰,高航,李凤全.电镀金刚石钻头钻削碳纤维复合材料研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2009(3):38-42.

Bao Yongjie, Gao Hang, Li Fengquan. Researches on drilling CFRP (carbon fiber reinforced plastics) with diamond electroplated drill bit [J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2009(3):38-42.

[7] 王巍,陈燕,牟娟,等.钎焊金刚石工具磨削CFRP的试验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2012,32(1):15-18.

Wang Wei, Chen Yan, Mou Juan, et al. Experiment on CFRP edge machining with brazed diamond grinding head [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2012, 32(1):15-18.

[8] 贺虎,苏宏华,陈燕,等.钎焊金刚石套料钻钻削CFRP的孔质量研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2011,30(2):13-16.

He Hu, Su Honghua, Chen Yan, et al. Researches of hole quality during drilling of CFRP with brazed diamond core drill [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 30(2):13-16.

[9] Hanasaki S, Fujiwara J, Miyamoto T, et al. Analysis of CFRP cutting by finite method [J]. International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 1994, 28(4):340-342.

[10] Bhatnagar N, Ramakrishnan N, Naik N K, et al. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates [J]. Int J Mach Tools Manufact, 1995, 35(5):701-716.

[11] 张双寅,蔡良武.预测复合材料开裂方向的比应变能密度准则[J].应用数学和力学,1993,14(1):79-87.

Zhang Shuangyin, Cai Liangwu. The strain energy density ratio criterion for predicting cracking direction in composite materials [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 1993, 14(1):79-87.

[12] Wu E M. Fracture mechanics of anisotropic plates [C]// Tsai S W, Halpin J C, Pagano N J, eds. Composites Materials Workshop Technomic Publishing Co. Lancaster PA: [s.n.], 1968:20-43.