

航空碳纤维复合材料构件 无缺陷制孔方法的研究*

Study on the Drilling Processes Without Disfigurements for Aero Carbon Fiber Reinforced Plastics Parts

中航工业沈阳飞机工业(集团)有限公司 冯子明 欧阳
大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 鲍永杰 高航



冯子明

研究员级高级工程师,任职于沈阳飞机工业(集团)有限公司。长期从事飞机制造技术及柔性装配技术研究,承担“十一五”期间国防基础科研及科技支撑项目研究。

电镀金刚石钻头切削原理和普通的钻头不同,电镀金刚石钻头钻孔的本质为“以磨代钻”,制孔时每一个磨粒的运动轨迹是螺旋线。刀具端面上的磨粒为主切削部分,这些磨粒大多数是负前角,一个具有很大负前角的切削刃以很高的速度切入复合材料表面,磨粒切削刃和纤维之间产生摩擦、挤压作用,并且克服碳纤维和基体的弹性变形的阻力形成切屑。

碳纤维增强复合材料(CFRP)作为一种先进的复合材料已经在飞机结构中得到了越来越广泛的应用,并不断地从非承力构件向次承力构件和主承力构件的方向发展,复合材料在飞机上的用量和应用部位已成为衡量飞机结构先进性的重要指标之一^[1-3]。

随着碳纤维复合材料用量的不断扩大,机械加工工作越来越多,然而由于碳纤维复合材料可机械加工性差、刀具磨损严重,生产中出现的

诸如制孔毛刺、撕裂、分层缺陷等问题也越来越多,一直以来采用硬塑料板或铝板顶紧钻头出口处,防止复合材料孔出口面撕裂,严重影响了产品质量和生产效率,已经引起企业越来越高度的重视。美国的F-22战斗机在研制过程中将复合材料的无缺陷高效制孔做为一项关键技术提出并花大力气加以研究和解决^[2-5]。

国外一些大公司为了解决复合材料加工问题,开发出了许多特殊刀具,如波音飞机公司针对芳纶纤维增

* 国防基础科研项目、国家自然科学基金项目(50875034)和国家863计划资助项目(SQ2008AA04XK1478912)。

强复合材料加工问题,开发了一种贯穿全长的单向四槽螺旋硬质合金铣刀,较好地解决了切削热问题^[5]。美国堪萨斯州立大学 Z.C. Li 等人利用超声振动加工工艺,采用金属结合剂烧结金刚石钻头进行碳纤维复合材料钻孔研究,取得了较好的效果^[6]。波音公司针对碳纤维复合材料和钛合金钻削加工而研制的金刚石复合钻头可以实现复合材料与钛合金构件的一次加工,刀具寿命得到了大大的提高,钻孔质量也有所改善,同时提高了加工效率^[7]。

目前我国装配制孔仍然以传统的硬质合金刀具为主,不仅刀具磨损严重,而且加工效率低下、加工质量不稳定。本文结合生产实践,从制孔缺陷形成过程的分析入手,分析了切削力对制孔缺陷的影响规律,探讨了“以磨代钻”工艺的实用价值,为改善和提高企业碳纤维复合材料构件制孔质量和效率提出了一条有效的技术途径。

碳纤维复合材料制孔缺陷的形成机制

1 钻孔缺陷形成观察

航空板类碳纤维复合材料构件一般多用单向预浸料按照设计要求叠合制成多层板使用,由于层间结合强度与纤维本身强度不同,以及在钻削过程中纤维方向与切削方向的夹角变化等原因,会表现出的不同的切削性能,导致钻孔过程中形成各种各样的缺陷。

横刃钻出时,横刃周围材料有不同程度的退让现象形成凸起形状,此时最表层纤维大部分未被剪断,这主要是由于最表层材料没有束缚,承载能力较低,所以在钻削力的作用下材料产生退让。当钻头进一步钻出时,随着主切削刃的深入,部分纤维被切断,钻孔缺陷在钻削力的作用下沿着材料表层纤维方向扩展,在已钻出的切削刃附近仍然有相对较大面积凸

起部分,此时是分层、撕裂缺陷形成的主要阶段,当缺陷的扩展程度大于孔的直径时,便成为最终缺陷。当切削刃大部分钻出时,此时表层纤维大部分被切断,并且由于此时钻削力降低,缺陷扩展的趋势减小。当切削刃全部钻出时,副切削刃对已形成的缺陷进行修正,进一步将未切断纤维进行切断。

从上面的分析可知,硬质合金麻花钻钻削碳纤维复合材料时,在钻削力的作用下,出口侧材料首先产生局部分层现象,随着钻头的深入缺陷沿纤维方向扩展,同时纤维被切断,缺陷扩展超过孔直径时便形成了影响孔质量的最终缺陷。

2 钻削轴向力对分层、撕裂缺陷的影响

轴向力是生成缺陷的主要因素,通过轴向力与分层、撕裂的评价因子之间的关系可以研究轴向力对缺陷的影响。分层缺陷通常采用分层因子指标来评价分层缺陷的程度,即分层缺陷区域的最大直径与名义直径的比值 $F_d = D_m / D$ 来说明分层缺陷的程度;撕裂缺陷可以采用撕裂因子来评价撕裂缺陷的程度,即撕裂缺陷区域的面积与孔名义面积的比值 $F_s = S_a / S$ 来说明撕裂缺陷的程度。

试验选择钻头转速为 6000r/min,进给速度分别为 25mm/min、35mm/min、45mm/min、55mm/min 4 种,每组参数重复试验 3 次,分别对轴向力及分层因子取均值。对钻孔后试件进行超声探伤,测定分层区域的最大范围值,计算分层因子。

图 1 为分层因子与轴向力的关系拟合曲线,从图

中可知,在轴向力小于 65N 时,未产生分层现象,轴向力大于 65N 时,随着轴向力的增大分层因子增大,也就是说,分层缺陷的程度增大,分层因子与轴向力呈线性关系。

为了获得明显的撕裂缺陷与轴向力的关系,选用低钻头转速 1500 r/min (缺陷明显),进给速度分别为 25mm/min、35mm/min、45mm/min、55mm/min 4 种,每组参数重复试验 3 次,分别对轴向力及撕裂因子取均值。撕裂因子与轴向力的关系曲线如图 2 所示,轴向力对撕裂缺陷有较大的影响,撕裂因子随着轴向力的增大而增大,在轴向力超过 120N 时,撕裂因子急剧上升。通过对试验数据点的线性拟合、二次非线性拟合和三次非线性拟合,可以发现三次非线

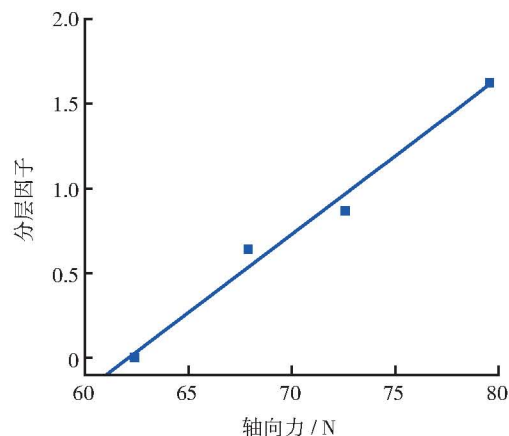


图1 分层因子与轴向力的关系

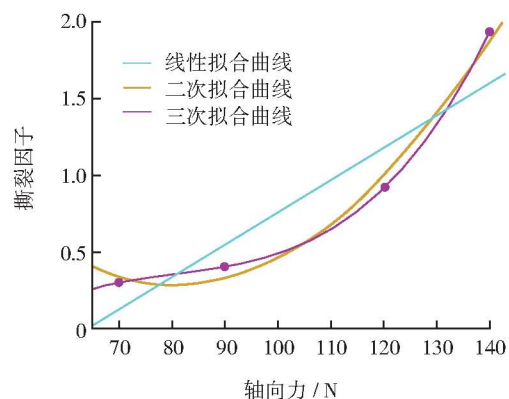


图2 撕裂因子与轴向力的关系

性拟合与试验数据相符合程度高。

复合材料低损伤高效制孔加工技术

1 螺旋面钻尖钻头的加工方法

为改善传统硬质合金麻花钻加工复合材料易产生毛刺等问题,尝试将钻头刃磨成螺旋面钻尖进行钻孔。与普通麻花钻钻尖相比,螺旋面钻头刃尖在靠近钻心处具有较大的后角,并使横刃的前角增大,横刃为S形,因此其定心好,切入稳定,钻削轴向力可以降低15%~20%,且具有比较好的排屑能力。

分别对顶角(2ϕ)为 96° 、 108° 、 122° 、 130° 和 146° ,后角为 5° 螺旋面钻头在相同参数下(钻头转速12000r/min,进给速度52mm/min)进行对比试验,部分钻孔质量如图3所示,从图中可知,改变钻头几何参数可以改进钻孔质量,顶角为 130° 螺旋面钻头钻孔质量相对最好。

2 “以磨代钻”制孔方法

针对碳纤维增强复合材料硬度大、加工发热严重,对切削力敏感等特点,试验研制了电镀金刚石钻头。电镀金刚石钻头切削原理和普通的钻头不同,电镀金刚石钻头钻孔的本质为“以磨代钻”,制孔时中每一个磨粒的运动轨迹是螺旋线。刀具端面上的磨粒为主切削部分,这些磨粒大多数是负前角,一个具有很大负前角的切削刃以很高的速度切入复合材料表面,磨粒切削刃和纤维之间产生摩擦、挤压作用,并且克服碳纤维和基体的弹性变形的阻力形成切屑。

为了更好地说明电镀超硬磨料钻头的特点,分别采用直径5mm硬

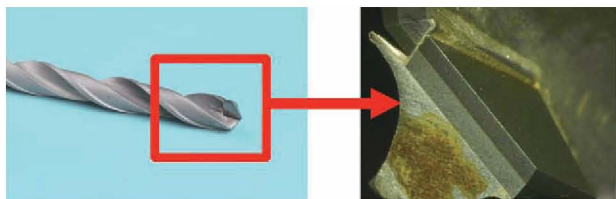
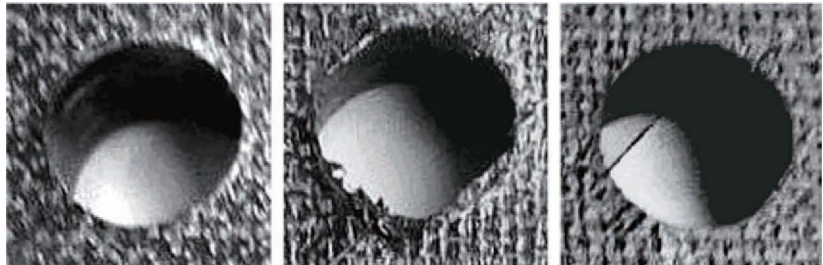


图4 研制的PCD钻头



(a) $2\phi=130^\circ$ (b) $2\phi=146^\circ$ (c) $2\phi=118^\circ$

图3 不同螺旋面钻尖加工的孔质量比较

质合金钻头与电镀金刚石钻头钻孔质量进行对比。采用硬质合金钻头钻孔时,孔出口处无法避免大的毛刺、飞边现象,而采用电镀金刚石钻头钻孔时,孔出口无毛刺、孔形完整,加工质量较好。

3 新型PCD刀具加工方法

复合材料与钛合金/铝合金构件装配制孔是航空构件装配制造的常见工艺。然而两种材料巨大的性能差异给装配钻孔加工带来极大的困难。由于铝合金材料不易磨粒加工,为此又进行了图4所示的聚晶金刚石(PCD)制孔刀具的应用研究,试验复合材料与金属材料装配制孔的效果。

与硬质合金钻头加工结果相比,PCD钻头加工碳纤维复合材料孔质量不仅可以满足质量要求,同时加工钛合金孔时,其出口处的质量显著优于普通硬质合金刀具加工的孔,进一步的试验表明不同材质、不同顶角的PCD钻头对加工质量有较大的影响,对此有待进一步的优化试验。

结果分析与讨论

(1) 纤维方向对钻孔缺陷的形成有严重的影响,纤维方向与刀具切削角度为锐角时,纤维不容易被剪断,容易产生缺陷,特别是在临界角度 6° 附近时,缺陷相对较为严重,在纤

维方向与刀具切削角度为钝角时,缺陷较少,加工质量好。

(2) 钻孔轴向力与碳纤维复合材料的分层因子呈线性关系,轴向力越大,分层缺陷越严重;轴向力与撕裂因子缺陷关系呈三次曲线,轴向力增大,撕裂缺陷迅速增大。可见,在相同加工效率条件下,降低钻孔轴向力,例如优化刀具角度和“以磨代钻”等,可以显著提高加工质量。

(3) 通过上述不同制孔刀具的试验研究可知,采用“以磨代钻”方法可以显著提高复合材料的制孔质量。若采用机器人或数控机床自动制孔,则基于套料的“以磨代钻”方法将可以获得良好的加工质量。

(4) 硬质合金螺旋面钻头的刀刃锋利,对于降低钻削轴向力、提高碳纤维复合材料钻孔质量有明显作用,但是耐用度相对较低,且需要专用设备进行刃磨。为此已经研制了螺旋面钻头手工快速刃磨专用装置,能够实现螺旋面钻头的快速刃磨。

(5) 研制的新型PCD刀具在碳纤维复合材料和钛合金材料的装配制孔加工方面表现出良好的加工效果,具有良好的应用前景,如何进一步优化刀具性能,降低刀具成本,方便刀具的再刃磨等问题是今后需要解决的问题。

本文有参考文献7篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)