

复合材料后加工技术的研究现状及发展趋势

胡宝刚 杨志翔 杨哲

(航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室 北京 100076)

文 摘 分析了国内外复合材料后加工技术的研究现状和发展趋势,重点阐述了复合材料切削力和切削温度、切削刀具材料及结构、特种加工技术、表面质量评价技术研究等方面的研究成果,同时提出了建议。

关键词 复合材料,切削工艺,表面质量,特种加工

Present Situation and Development Trend of Study on Machining Processing of Composite Materials

Hu Baogang Yang Zhixiang Yang Zhe

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Present situation and development trend of study on machining processing of composite materials is discussed in this paper. Main achievements in cutting principles, material and structure parameter selections of cutting tools, special cutting and evaluation of surface quality, are also presented here. In the end, some suggestions are given.

Key words Composite materials, Machining processing, Surface quality, Special type machining

1 前言

复合材料因具有轻质、高比强度、高比模量等优良特性在许多领域已取代金属材料获得广泛的应用。在过去几十年里,复合材料已大量应用于航天、航空和造船等工业,而且这种趋势仍在继续^[1]。这些材料成型后大都需要机械加工来获得所需的尺寸精度,但由于复合材料具有硬度高、强度大、导热性差、各向异性等特点,属于难加工材料,这些材料的加工问题是加工金属时从未有过的,因此复合材料后加工工艺的研究已引起了国内外的广泛关注,学者们在复合材料切削机理、刀具材料和结构、特种加工、制孔工艺等领域开展了许多研究工作,取得了一些成果。

2 复合材料切削机理的研究

70年代以前,复合材料的加工基本上沿用金属材料的加工工具和切削工艺,后来在复合材料切削

加工过程中遇到越来越多的问题,如刀具快速磨损、钻孔分层等。这些问题的出现给复合材料的加工提出了新的课题,70年代后国际上陆续发表了一些有关复合材料加工的论文,早期的复合材料加工技术的研究是塑料加工的延伸,80年代,Miner和Mackey在研究了两相复合材料切削工艺的复杂性后指出不仅要更新刀具概念,而且也需要改进切削工艺。

复合材料切削机理的研究是国内外学者研究的重要方向,在大量研究试验基础上,Koplev第一个提出复合材料切屑形成过程是材料断裂过程的观点^[2],他与他的合作者描述切削表面质量与增强纤维的取向有关,这一观点得到了复合材料切削加工领域学者们的支持。在此基础上,学者们将目光投向了切削力、切削热等研究方向上,并且取得了许多有价值的研究成果。

2.1 复合材料切削力的研究

收稿日期:2000-05-18

胡宝刚,1965年出生,高级工程师,主要从事复合材料加工工艺的研究工作

与金属材料加工不同,复合材料中的增强纤维是切削过程中的主要磨损要素,复合材料中的基体在切削过程中主要将切削力传递到纤维上,材料的各向异性经常导致复合材料制品出现纤维拔出、内部脱粘、分层等缺陷,这可能导致复合材料力学性能降低和表面粗糙度变差,因此复合材料切削力的研究成为切削机理研究的热点。

研究初期有些学者试图将金属材料加工过程中切削力的概念引入复合材料加工,但复合材料的切削破坏形式与金属材料完全不同,因此学者们在研究总结的基础上提出了许多新的模型。Hocheng 和 Puw 根据纤维增强复合材料含有两种机械性能和热学性能完全不同的两相材料的特点,在 C/PEEK、C/ABS 和 C/E 复合材料磨削试验的基础上提出了预测复合材料切削力的机械学模型,分析了纤维方向对切边、表面粗糙度和切削力的影响,推荐了纤维的磨削方向^[3]。C. W. Wern 和 M. Ramulu 等人用光弹法研究和分析复合材料切削过程中的应力场分布,他们发现不同切削方向的纤维表面通过剪切和拉伸断裂而破坏,当刀具与工件成一定角度时,纤维通过剪切和弯曲失效而破坏,在纤维与切削方向成 45° 夹角时可以明显观察到纤维—基体间的粘结破坏,研究结果表明纤维方向对切削力和应力场的分布有重要影响^[4]。

日本大阪大学的花崎伸作等人通过 CFRP 切削试验作出结论^[5]:在碳纤维与切削方向成任何角度情况下,纤维被切断的原因都是由于刀具前进引起的垂直于纤维自身轴线的剪切应力超过剪切强度极限造成的。

Koplev 等人在前人研究的基础上,观察到切削方向平行或垂直于纤维方向的区别,提出用垂直或平行纤维方向的合力来预测切削力大小。

北京航空航天大学的陈鼎昌教授等人,多年来开展了碳纤维复合材料钻削工艺的研究,针对单向 CFRP,初步建立了钻削力的理论模型。分析了纤维角与切削力之间的关系,实验结果验证了纤维方向对切削力的影响。同时提出了出口处分层缺陷的过程模型和检验方法。

以上从不同角度研究了纤维方向与切削力之间的关系,得出了切削过程中纤维的破坏模式,对于研究复合材料的切削机理作出了重要贡献,但是有关

切削力对复合材料性能的影响的研究、刀具材料和几何参数与复合材料的切削力之间的关系等尚缺乏深入细致的研究,这些理论基本上以碳纤维复合材料的切削试验为基础,因此还不能解释所有复合材料的切削机理,尤其是 C/C 和陶瓷基复合材料。

2.2 复合材料切削热的研究

复合材料切削热一方面来自纤维断裂和基体剪切所消耗的功,另一方面来自切屑对前刀面的摩擦和后刀面与已加工表面的摩擦所消耗的功。鉴于复合材料切屑形成过程是基体破坏和纤维断裂相互交织的复杂过程,加上复合材料的导热性比金属材料差等原因,切削过程中切削热将主要传向刀具和工件,导致刀具的快速磨损,甚至损伤复合材料的性能。复合材料切削热的研究主要集中在切削温度的测量方法上,国外有成功测定孔出口侧一点温度的报道^[6],北京航空航天大学复合材料加工技术研究课题组先后采用热像仪、红外测温仪、人工热电偶等手段测试 C/E 复合材料钻削过程中的切削热,他们用埋入人工热电偶的方法测量到钻头切削部分靠近中心和最外侧两点的温度,结果表明 C/E 复合材料的钻削温度一般不超过 150 ~ 200^[7]。

就目前的研究情况,在复合材料切削热的研究方面处于切削温度测试方法的探索阶段,还有大量的工作要做。

2.3 切削工艺与复合材料性能之间的关系

切削工艺对复合材料性能的影响是复合材料加工技术研究中最重要内容,国内外在这方面的研究尚处于起步阶段,有许多工作有待进行。Koplev 等人最早开展这方面的研究工作,他们在研究中发现切削平行于纤维方向时,切削表面有可见的纤维,垂直于纵向的纤维都全部断裂。当切削垂直于纤维方向时,在切削表面未发现纤维,相反他们发现整个切削表面有一层薄薄的基体材料,Koplev 等还发现了在表层下面有一层材料断裂。此外,当切削垂直于纤维方向时,他们还观察到无断裂的凹槽,相反当切削平行于纤维方向时,凹槽前面有裂纹现象。Inoue 和 Kawaguchi 报告了磨削过程中磨削表面的质量与纤维方向有关^[8]。

以实验观察结果为基础,Koplev 等人指出,CFRP 的切削方向垂直于纤维方向时,在刀尖附近出现了两种不同的结果,当刀具向前移动时,它对复合

材料施加压力,引起复合材料断裂,并产生碎裂,同时作用在刀具下的切削力在试样中,产生一个细小的裂纹(约 0.01 mm 深),当切削方向平行于纤维方向时,刀具施加在工件上的力引起复合材料断裂。

上述结果研究了复合材料性能与切削工艺之间的某些关系,但没有深入分析切削工艺对复合材料性能的影响,因此不可能从改进切削工艺的角度来减轻复合材料的损伤,有必要深入开展这方面的研究。

3 复合材料切削刀具材料及结构的改进

聚合物基复合材料(如 GFRP、CFRP、KFRP)的耐磨性好、硬度大、导热性差,在切削过程中,纤维作为切削硬质点连续磨损刀具,因此刀具快速磨损,许多刀具难以完成复合材料构件的切削全过程。最近十多年来,切削刀具材料及结构参数的改进成为复合材料切削工艺研究的又一热点。

复合材料的性能取决于不同的纤维和基体的性能、纤维方向、纤维和基体的体积比。刀具连续遭受基体和纤维的磨损,因此切削力变化很大,比如碳纤维增强铝基复合材料,刀具必须经受铝基体和硬的碳纤维的磨损。同样,玻璃/环氧复合材料中,刀具必须承受低温软的环氧基体和脆性的玻璃纤维的磨损。芳纶纤维增强环氧复合材料的硬度大,这需要切削刀具适应这些变化。纤维和基体的性能、纤维方向、材料各向异性、硬的耐磨纤维、高的纤维体积分数等因素使玻璃纤维、石墨纤维和碳纤维增强的复合材料切削加工时刀具快速磨损而切削困难。对于玻璃纤维增强的复合材料,高速钢(HSS)刀具、碳化物刀具是最常用的刀具材料;芳纶纤维增强的复合材料是一种硬度更大的材料,切削刀具应保持锋利和洁净,应经常清洗以去除粘在刀具上的部分固化的树脂,在切削过程中这些树脂能快速磨损刀具,切削芳纶纤维增强复合材料时对刀具的需求不同于玻璃纤维或碳纤维,一般采用硬质合金刀具或 PCD 刀具^[9,10]。有些复合材料(如高硅氧纤维增强的复合材料)的切削加工不得使用金刚石刀具,目前已开发了一些先进的刀具材料,包括不同结构形式的聚晶金刚石刀具、金刚砂镀层刀具和金刚石涂层刀具等,如中心钻、铣刀、钻头、磨削砂轮等。

Hasegawa、Hanasaki 和 Satanaka 对 GFRP 加工刀具的磨损特性作了大量的研究,他们发现在一定的

切削长度下,玻璃纤维与刀具之间的磨损是主要的磨损,刀具和玻璃纤维之间的接触力成正比。根据切削速度他们将刀具磨损分为三类。低速条件下,他们发现刀具磨损不可忽视,与切削速度无关,而仅与切削长度有关;中速条件下,刀具磨损随切削速度增加而增加;高速切削时,刀具磨损与速度无关,Hasegawa 等人建立了刀具磨损的流变模型以解释切削 GFRP 时观察到的磨损现象。

为解决难加工复合材料的切削问题目前开发了许多特殊刀具,如波音飞机公司开发了一种贯穿全长的单向四槽螺旋旋转硬质合金铣刀,靠近刃口有一个反方向的螺旋槽,开槽与刀具轴线成 20°。这些刀具被设计用于芳纶纤维增强复合材料的加工,刀具切削时有最小的切削热。刀具制造商们也正努力研制开发复合材料切削用的刀具新材料,并不断改进结构,Sandvick 和 Kennametal 公司研制成功能满足碳纤维复合材料加工需求的硬质合金铣刀和钻头,但针对 C/C 和陶瓷基复合材料的切削刀具则寥寥无几,大部分刀具由使用者自行设计制造。

刀具对复合材料切削加工质量有重要影响,以前各研究使用单位没有形成统一的刀具标准,因此切削工艺研究结果缺乏可比性,有必要专题研究复合材料的切削刀具材料和结构参数,以最终确定复合材料的切削工艺规范。

4 复合材料特种加工技术的研究

复合材料传统的切削加工,刀具磨损快,刀具费用高,此外传统的切削加工易引起大的塑性变形和固化热应力,特别是环氧基复合材料。非接触式的材料加工工艺为复合材料的加工提供了新的可能,特种加工能降低粉尘和噪音污染,但特种加工都有各自的优缺点,如电解加工方法要求复合材料能导电,激光加工要求材料能吸收光和良好的导热性能,此外激光加工、电子束加工、等离子切割加工等有明显的切削热影响区^[11]。其中水射流加工和激光加工在复合材料切削加工中的应用研究最引人注目。

4.1 复合材料的水射流加工技术的研究

水射流加工尤其适合加工薄的复合材料层压板,优化的水射流加工通过调整工艺参数能克服常规机械加工的部分缺点^[12]。复合材料中的增强纤维是切削过程中的主要磨损要素,复合材料中的基体在切削过程中主要将切削力传递到纤维上,与复

合材料其他加工方法相比,水射流加工的主要优点是效率高和精度高。切割能从任何方向(角度)开始,对被切削材料的厚度几乎没有限制。另一优点是切削阻力小,工件不易撕裂和分层。主要缺点是当工件厚度增加时易引起表面毛刺,与碳纤维复合材料相比,加工 GFRP 时易产生崩边。此外由于复合材料中环氧等基体在加工过程中吸收水分而导致纤维拔出、内部脱粘、分层等缺陷,这对于航空航天材料是一个严重的问题,因为这可能导致质量增加和强度降低及加工表面的不规则和分层等。

4.2 激光加工

激光加工的物理过程是传热,当激光打到工件时,反射、吸收和激光传导、反射的激光束的数量主要取决于激光源的波长、工件表面粗糙度、氧化度、光的温度被复合材料吸收的激光能的大小,取决于材料光学性能和热化学性能^[13]。

切削时被吸收激光的百分比应尽可能高(或者反射尽可能低),大多数复合材料在短波时能快速吸收激光,在这些波长下只需要很小的激光功率,小波长的 Nd:YAG 激光器最适合切削金属基复合材料,而不用 CO₂ 激光源。相反一些有机树脂和其它化合物在大波长时吸收的百分比更高(与 CO₂ 激光器 10.6 mm 波长相似),所以 CO₂ 激光器更适合于切削芳纶复合材料,用于切削复合材料的激光类型取决于工件材料的性能和激光的特点(如激光密度、激光的发射波长、作用时间、激光偏振、指定波长的吸收效率、熔化和蒸发速度、热容、扩散率、蒸发热等)。

纤维和基体间的热性能有区别,这种区别对于芳纶纤维来说尤其不可忽视。与基体相比,玻璃纤维和石墨纤维蒸发所需的能量比基体大,因此激光加工所需要的能量主要取决于所用的纤维以及纤维体积分数,而不是基体。

激光切削复合材料的特点是材料浪费少(宽度窄)、安装时间短、无需切削刀具(也无刀具磨损问题)、切削深度大、热输入低,工件的撕裂和损伤较小。激光加工可能的局限是热影响区(HAZ),切削时高温传递给工件,容易引起复合材料内部基体材料的变化,并可能导致材料疲劳性能的降低,另外钻深孔时会降低孔的质量,钻盲孔时难以控制钻孔深度。

利用激光技术进行预浸布带和无纬布的切割已
宇航材料工艺 2000 年 第 5 期

初步取得成功,复合材料激光打孔技术的研究已开始引起重视,可以预料复合材料激光加工技术在未来十年内将取得重要成果。

除水射流加工和激光加工外,复合材料超声加工技术的研究也曾吸引了许多学者们的注意,但是目前的研究水平停留在原理探索阶段,应在复合材料超声打孔方面先行开展研究工作。

5 复合材料表面质量评价技术的研究

过去几十年里,复合材料在我国航空航天和民用工业获得了广泛的应用,但国内没有复合材料表面质量的评价方法,因此在复合材料的设计、制造和使用过程中沿用金属材料的表面质量评价方法,复合材料加工及其表面质量评价缺乏一个统一的方法和手段。

为了研究切割边缘的表面特性,国外有些学者采用扫描电镜的测试手段^[14]。目前复合材料的切削表面粗糙度主要靠目视,因此无法比较,没有大家接受的度量标准,此外纤维拔出、断裂和分层也对测试结果有影响。另有报道采用非接触式测量(LSP)方法用于金属基复合材料试样表面粗糙度的测试^[15]。粗糙度值主要取决于在可接受误差范围内的接触式和非接触式激光测试的近似值。

6 建议

在今后的工作中建议开展下列研究工作:

- (1) 复合材料表面质量评价技术的研究;
- (2) 先进功能复合材料构件精密加工技术的研究;
- (3) 复合材料加工刀具材料和结构参数的研究;
- (4) 复合材料特种加工技术的研究。

参考文献

- 1 翁祖琪,陈博.中国玻璃钢工业大全.国防工业出版社,1992
- 2 Koplev. The cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP. Composites, 1983; 14(4): 371 ~ 376
- 3 Puw H Y, Hocheng H. Milling force prediction for FRP. Proceedings of the ASME 1993 Materials Congress, 1993; (10): 239 ~ 240
- 4 Wern C W, Ramulu M, Shukla A. Investigation of stresses in the orthogonal cutting of FRP. Experiment Mechanics, 1996; 36(1): 31 ~ 41

(下转第 31 页)

结构、再生相(疏松、夹杂)、粘流—粘滞特性的检测^[8]。

5 结语

由于复合材料是一种复杂的多相体系,在其原材料的采购、中间材料的制作和制件的最后成型中,存在着诸多不定的影响因素,这使得复合材料构件的内部缺陷和加工、使用时的结构损伤不可避免。同时,先进复合材料构件大多应用于航空航天领域,其结构的可靠性和安全性是设计成败的关键,所以复合材料构件内部缺陷与损伤的无损检测就显得极为重要。近年来,我国复合材料无损检测技术得到了飞速的发展,X射线法、超声检测法和声发射法已成为最为核心的检测方法,其中超声检测技术,特别是超声C扫描,由于显示直观、检测速度快,已成为飞行器零件等大型复合材料构件普遍采用的检测技术。但是,我国复合材料无损检测技术的发展还远不能适应复合材料应用技术的发展,还没有得到一些复合材料构件制造企业的高度重视,这对我国复合材料工业的发展极为不利。只有很抓技术进步、加强宣传与应用推广,才能使无损检测技术成为

我国复合材料健康工业发展的有力保障。

参考文献

- 1 耳东. 复合材料无损检测的新进展. 航空制造工程, 1994;(5):33
- 2 于雪云. 复合材料方向舵、垂尾超声检测方法和应用研究. 见: 航空航天工业部科学技术研究院编. 航空复合材料技术成果文集, 航空工业出版社, 1993:278
- 3 陈积懋, 张颖. 复合材料无损检测的新进展. 航空工艺技术, 1998;(5):17
- 4 余南廷, 陈积懋编著. 复合材料无损检测与评定. 中国航空学会, 1997:152
- 5 Josep H B et al. Model based control of voice and product thickness during autoclave curing of carbon/epoxy composite laminates. Journal of Composite Materials, 1995;(8):1 000~1 023
- 6 Prosser W H et al. Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix tracking in composites. Material Evaluation, 1995;53(9):1 052
- 7 Kristen weight. An overview of NDE methods for thick composites and proposal for analysis of computed technology data. ADA288733, 1994
- 8 Robert E, Green J R. Nondestructive characterization of material properties. Mechanical Engineering, 1987:268

(上接第 27 页)

- 5 花崎伸作. CFRP 切削工具磨耗机构. 见: 日本机械学会论文集(C 编), 1994;(60):297~302
- 6 King W, Grab P. Quality definition and assesment in drilling of FRP. Annals of the CIPP, 1989;38(1):119~123
- 7 胡凡. 复合材料钻削加工技术的研究. 北京航空航天大学硕士论文, 1985
- 8 Inoue H. Study on the cutting mechanism of GFRP. Proc. Int. Symp. Comp. Mat. and Struct., 1986;(3):1 110~1 115
- 9 韩荣第, 于启勋. 难加工材料切削加工. 机械工业出版社, 1994:116~124
- 10 Ramulu M, Faridnia M, Garbini J L, Jorgensen J E. Machining of graphite/epoxy composite materials with polycrystalline diamond (PCD) tools. ASME, 1991;113:430~436
- 11 刘晋春, 赵家齐. 特种加工. 机械工业出版社, 1994:

129~193

- 12 张卫山译. 单向石墨/环氧复合材料的纯水射流切割及磨料水射流切割. 宇航材料工艺, 1995;(5):52~56
- 13 Schucker D, Veas G. Laser material processing of composite materials. In: Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress. Pittsburgh, Pennsylvania, 1993;(10):17~21
- 14 Wallbank J, Pashby I R, Kim Y H. A comparison between the chip forming behavior and the surface integrity in reinforced and non-reinforced polymeric materials. Materials Park, OH, ASM International, 1992;(1):205~211
- 15 Johansson J O, Chandrasekaran H. Surface Quality in Aluminium Alloy Matrix Composites—evaluation of Finish Ground Alumina Fibre Reinforced Material. 1995:1~20