

五轴高速铣削数控机床加工金属铝蜂窝的经济性工艺研究

王宏涛

中国航空制造技术研究院, 北京 101300

[摘要]此文主要探讨了五轴高速铣削数控机床加工铝基蜂窝芯产品的相关工艺, 其中介绍了金属铝蜂窝芯材的材料特性, 阐述了五轴高速铣削数控机床加工金属铝蜂窝的优势, 研究了加工此类材料的固持方法、刀具选择、加工工艺规划等关键工艺的经济性选择, 并对加工过程中的质量控制问题进行了讨论, 为提高数控加工金属铝蜂窝的精度和效率, 生产成本的降低提供理论与实践依据。

[关键词]金属铝蜂窝; 固持方法; 刀具选型; 加工工艺; 生产成本

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16473

中图分类号: TG54

文献标识码: A

Economic Process Research on Five Axis High Speed Milling CNC Machine for Machining Aluminum Honeycomb Metal

WANG Hongtao

AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 101300, China

Abstract: This article mainly discusses the relevant processes of machining aluminum based honeycomb core products with five axis high-speed milling CNC machine tools. The material characteristics of metal aluminum honeycomb core materials are introduced, and the advantages of machining metal aluminum honeycomb with five axis high-speed milling CNC machine tools are elaborated. The economic choices of key processes such as holding methods, tool selection, and machining process planning for machining such materials are studied. The quality control issues in the machining process are also discussed, providing theoretical and practical basis for improving the accuracy and efficiency of CNC machining metal aluminum honeycomb and reducing production costs.

Keywords: metal aluminum honeycomb; holding method; tool selection; processing technology; production costs

1 金属铝蜂窝材料结构特性

金属铝蜂窝是由多层铝箔通过胶黏剂等工艺形成的蜂窝状结构, 其蜂窝芯由正六边形或其他形状的孔格组成, 孔格尺寸、壁厚等参数决定了铝蜂窝的性能。金属铝蜂窝芯材因其质量轻、比强度比刚度高等优异性能, 在航空航天、汽车、建筑等众多领域得到了广泛应用。然而, 由于其特殊的结构, 金属铝蜂窝毛坯内应力大、变形严重, 造成装夹难度大, 加工时难以完全固定。同时, 金属铝蜂窝塑性强、易变形, 在加工过程中孔格极易出现挤压、撕裂现象, 加工完成后易残留毛刺^[1]。金属铝蜂窝产品的数控加工面临诸多挑战, 但通过合理的工艺参数和加工路径编程方法, 能够实现复杂形面和高精度要求的金属铝蜂窝零部件的五轴数控加工任务。

2 五轴数控加工金属铝蜂窝的优势

蜂窝类产品加工设备有高速数控铣削加工、超声数控加工、激光切割加工、电火花切割加工和高压水枪切割技术等相关设备, 其中激光切割加工和电火花切割属于线性切割加工, 适用产品形面简单, 种类单一, 无法进行复杂形面铝蜂窝产品进行生产, 而高速数控铣削加工和超声数控加工对产品加工的灵活性更高, 能够满足复杂形面的加工需求, 但因超声数控加工设备的使用投入成本较高, 常

规蜂窝产品精度要求下, 五轴高速铣削数控机床的加工成本及质量更能够满足金属铝蜂窝产品的生产需要。

五轴数控机床加工系统能够精确控制刀具的运动轨迹, 并且可以通过五轴数控编程软件实现对复杂形面的产品进行精确的加工控制, 而高速铣削相较于传统设备的铣削, 高速旋转的主轴转速能够使刀具在加工时对所加工的产品产生的切削力进一步降低, 并且因刀具的高速旋转也能够提高生产加工效率。

对于加工金属铝蜂窝产品, 因其材质及结构特殊性, 孔壁易因外力出现塑性变形的问题, 加工过程中产生的切削力越小, 越能够保证金属铝蜂窝产品的加工质量, 故而五轴高速铣削数控加工设备在金属铝蜂窝产品的加工上既能保证产品的加工精度及表面质量, 又能够保证金属铝蜂窝产品生产的经济性。

3 数控加工铝蜂窝的关键工艺经济性研究及成本控制

3.1 固持方法

本文研究对象为金属铝蜂窝芯材, 主要采用五轴高速数控铣削加工, 需要在铣床上利用夹具对蜂窝芯进行固持, 按照夹具对蜂窝芯的固持状态可以分为端面固定法、悬臂式固定法和完全固定法^[2]。

对于蜂窝构型芯材的固持方式行业内普遍使用端面固定法,其操作较为简单灵活,对蜂窝孔格垂直方向不做加工面的一个端面进行固定即可,常使用双面胶带或覆隔离膜的方式进行固定蜂窝类产品,通过双面胶带的胶黏剂或覆膜后的密闭吸附性(真空平台吸附覆膜),使产品固定在机床平台上,而覆隔离膜的端面固定需要先行使用胶黏剂将隔离膜与蜂窝端面进行牢固粘连固定,此方式在产品加工完成后的清理去除工作较双面胶带的胶黏剂残留的去除清理较难,业内也更多选择使用双面胶带进行产品固定,且产生的相关成本及操作难度较低;而悬臂式固定法需要使用专用外接设备产生磁场对产品孔格内部的特定的磁性填充物施加固持力,使填充物更加紧密,增加填充物与蜂窝产品孔格内壁的摩擦力进行蜂窝产品的固定,设备投入成本较高且操作复杂;完全固定法则是常用水或聚乙二醇作为填充物,使其固液转化对蜂窝孔格内部进行完全填充,将蜂窝产品转变为实体结构再进行后续的加工生产工作,此方法因将蜂窝特殊的孔格结构变为常规结构材质,可有效提高生产过程的加工精度及质量,但在蜂窝产品加工完成后蜂窝孔格内部填充介质清理还需继续进行投入处理,其中使用水为介质进行孔格填充时,需要使用专用冷冻降温设备对其进行固液转化,设备投入成本较高,且易受到环境影响,而使用聚乙二醇作为填充介质可通过简单加热液化,再填充至蜂窝产品孔格内,在常温等待其固化即可,使用聚乙二醇作为填充介质的完全固定法更易于实现。

金属铝蜂窝在加工固持选择中,考虑生产成本的经济性及可行性,首选为使用双面胶带的端面固定法,但因其蜂窝孔格薄壁结构的特殊性,其与双面胶带的接触面较小,双面胶带提供的固持力有限,如在加工过程中出现脱黏情况,也可增加使用聚乙二醇的完全填充的固持方式进行固持力的补充,组合固持方式如图1所示,来保障铝蜂窝加工过程中的质量稳定性。且因金属铝蜂窝的金属特性,加工完成的产品清理也可直接使用热水浇淋浸泡的方式进行产品的快速清理,从而保证降低生产成本的同时保证产品生产质量。



图1 组合增强固持方式

3.2 刀具选择

因蜂窝芯材结构特殊性,选择合适的刀具非常重要,刀具选择直接关系到零件的切削效果和加工效率^[3]。使用常规的数控铣削刀具,极易使蜂窝产品所加工的表面出现撕裂或毛刺等缺陷情况,影响产品的表面质量。目前,蜂窝芯材产品面加工常使用盘型铣刀,这种刀具分为刀杆、刀体和刀片三部分组成,其中主要参与加工的部分为刀体

和刀片。

蜂窝芯材加工使用的刀体主要有金刚石喷砂碎屑器、碎齿形碎屑器及无齿形碎屑器3种类型,刀片主要有无齿形、锯齿形及波浪形3种类型,在固定加工参数下,对这9种组合方式均进行了实际金属铝蜂窝的加工试验,并对其主要表面质量参数进行了统计对比,实验数据详见表1^[4]。

表1 刀具工艺试验结果

碎屑器类型	刀片类型	毛刺数量/个	孔格撕裂面积/cm ²
金刚石喷砂碎屑器	无齿形盘型刀片	极多	300~500
	锯齿形盘型刀片	极多	300~500
	波浪形盘型刀片	极多	300~500
碎齿形碎屑器	无齿形盘型刀片	3~10	≤1
	锯齿形盘型刀片	20~30	≤1
	波浪形盘型刀片	≤3	≤1
无齿形碎屑器	无齿形盘型刀片	3~10	≤1
	锯齿形盘型刀片	20~30	≤1
	波浪形盘型刀片	≤3	≤1

由于金属铝蜂窝薄壁孔格易变形的特殊性,宜选用较为锋利的刀具类型,减少加工过程中产生的切削力来保证铝蜂窝产品的加工质量,并且从试验结果也可以看出,使用粗糙的金刚石喷砂碎屑器刀体加工后的铝蜂窝表面毛刺极多,撕裂问题明显,锯齿形盘型刀片加工的铝蜂窝表面毛刺问题较多,故而在主流常用盘铣刀组合中刀体即可选用碎齿形碎屑器及无齿形碎屑器,刀片即可选用无齿形和波浪形刀片进行组合使用。

在研究过程中,经过实际持续分类组合使用试验发现,碎齿形碎屑器及无齿形碎屑器两种刀体对金属铝蜂窝加工质量影响差别不大,但无齿形碎屑刀体因结构简单,较具有锋利小碎齿的刀体使用寿命要更长;波浪形刀片在加工后表面毛刺数量要多于使用无齿形刀片所加工的铝蜂窝,但在加工效率上波浪形刀片较无齿形刀片能够采用更大的进给速度及切削量,并因波浪形刀片的回转外形降低刀片持续加工时刀片接触蜂窝的切削时长,在使用寿命上要长于无齿形刀片。

考虑到生产成本的经济性,在保证加工质量的前提下,加工选用的盘型铣刀的刀体可选择构型简单的无齿形刀体,而刀片则可分工序选择使用进行成本控制,即在粗加工即半精加工使用波浪形刀片,加快去除余量速度,控制使用成本,提高加工效率,在精加工余量较小时使用无齿形刀片来保证铝蜂窝产品加工的表面质量。

3.3 加工工艺规划

金属铝蜂窝产品因其应用场景领域越来越多,外形也越来越复杂,但因蜂窝芯材的制备方法^[5],更多的金属铝蜂窝产品在加工前所使用的毛坯料均较为规整,这也导致大部分产品在加工去除余量时区域余量存在差异,如在航

空领域所使用作为填充物使用的蜂窝芯材多为楔形结构,在规整长方体毛坯内厚端去除余量较小,而薄端则需要大量去除余料,且因蜂窝材料结构的特殊性,切削量不宜过大,需对余量进行长时间的加工去除工作,降低生产效率,增加生产成本。

为提高金属铝蜂窝数控加工的加工效率,降低生产成本,可由加工准备阶段对毛坯余量进行准备阶段的工艺优化,优化过程如图2所示。

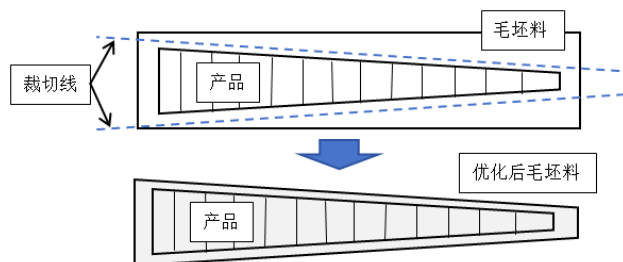


图2 准备阶段毛坯料工艺优化方式

此过程要对铝蜂窝产品的基准姿态进行确认,确保产品加工姿态不进行改变,优化后的毛坯料要满足产品孔格方向的技术要求,结合理论余量制定毛坯安全余量尺寸,再通过多工种相结合的方式,手工或使用倒角机进行原始毛坯快速裁切,对产品的安全余量进行大量去除,从而减少数控机床加工过程的大量余量去除工作,提高生产效率,降低综合投入成本。优化后的毛坯料也要在产品数模中进行模拟创建,以保证软件加工程序与实际数控机床加工的关联性与准确性。

4 数控加工铝蜂窝的质量控制

4.1 尺寸精度控制

在加工过程中途特定工序,需要对金属铝蜂窝产品进行加工余量尺寸的测量和检查,根据理论设计余量与实际测量余量对比,在精加工阶段对加工铣削量进行调整,以保证最终尺寸精度的准确控制,并在产品加工完成后,对所有加工表面进行检验以确保满足工程图样或相关技术文件要求,建议使用激光跟踪仪、三坐标测量仪或摄影测量系统对工件型面采点测量,采点间距一般不大于150mm。

4.2 表面质量控制

金属铝蜂窝在加工后的表面质量直接影响其使用性能,需要注意加工过程中的切削参数和刀具磨损情况,避

免表面出现划伤、撕裂等缺陷,并且蜂窝芯加工面及孔格内部均不允许存在多余物,一般多余物可通过目视进行检查,加工产生的铝箔碎屑等金属类多余物的检测可使用X光照射检测,残留聚乙二醇可采用紫外线照射观察荧光情况进行检查,目视观察在紫菀线照射下工件是否存在荧光点,残留水渍通常使用目视观察。

4.3 变形控制

金属铝蜂窝在加工生产搬运过程中容易产生塑性变形,这也是金属蜂窝芯材质量控制的关键环节。采用合适的装夹方式,刀具类型,合适的加工参数,可以有效减少变形,对于铝蜂窝的搬运转移等动作,需轻取轻放,防止金属铝蜂窝芯材出现形变,造成质量损失。

5 结论

五轴高速铣削数控加工金属铝蜂窝是一项具有挑战性但又非常重要的加工技术。通过深入了解铝蜂窝材料的特性,合理选择固持方法、刀具类型和加工工艺规划,并加强加工过程中的质量控制,可以实现高质量、高效率、成本可控的金属铝蜂窝产品的数控加工。随着数控加工技术的不断发展和创新,铝蜂窝加工的精度和效率将进一步提高,加工成本能够进一步降低,为铝蜂窝芯材在更多领域的广泛应用提供有力保障。在未来的研究中,还需要进一步探索新的加工工艺和质量控制方法,以满足不断提高的工业需求。

【参考文献】

- [1] 申翔宇. 基于五轴高速铣削数控机床的航空用芳纶纸蜂窝加工工艺及试验研究[J]. 纤维复合材料, 2024(3): 10-16.
 - [2] 马成, 刘方军. 蜂窝材料加工工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2016, 498(3): 48-54.
 - [3] 孙健淞, 董志刚, 王毅丹, 等. 超声切割铝蜂窝试验研究[J]. 机械工程学报, 2017(19): 128-135.
 - [4] 吴涛. 金属铝蜂窝数控加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(12): 161-163.
 - [5] 牛景露. 芳纶蜂窝芯的超声切削系统开发及其切削性能研究[D]. 大连: 连理工大学, 2017.
- 作者简介: 王宏涛(1993.11—), 男, 专业方向: 机械设计制造及其自动化, 工程师, 籍贯: 北京平谷。