

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.006

基于 TRIZ 的空间螺旋孔电火花加工装置设计

石平义, 朱派龙, 吴静文, 丘娜

(广东轻工职业技术学院 机电技术学院, 广东 广州 510399)

摘要: 针对很难利用传统的机械加工方法实现空间螺旋孔加工的问题, 利用 TRIZ 创新方法提出空间螺旋孔加工装置的设计思路。应用 TRIZ 创新理论对空间螺旋孔加工装置进行矛盾分析和资源分析; 建立该加工装置的功能结构模型, 综合利用物场分析法确定可行的解决方案; 对设计方案整体结构进行建模并完成该装置的控制系统设计。通过现场加工实验表明: 该装置结构简易、成本低, 能够实现螺旋孔加工。

关键词: 空间螺旋孔; TRIZ 理论; 电火花加工; 冷却水道

中图分类号: TG662 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)01-0024-06

Design of Space Spiral Hole EDM Device Based on TRIZ

SHI Pingyi, ZHU Pailong, WU Jingwen, QIU Na

(School of Mechanical and Electrical Technology, Guangdong Industry Technical Polytechnic, Guangzhou 510399, China)

Abstract: To overcome the difficulty in processing space spiral holes by traditional machining methods, TRIZ innovative method is proposed to design space spiral hole machining device. Contradiction analysis and resource analysis on the space spiral hole machining device are carried out. The functional structure model of the machining device is established, and the solution is determined by material field analysis method. The overall structure of the design scheme is modeled and the control system design of the device is completed. The field experiment shows that the device is simple in structure, low at cost and capable of spiral hole machining.

Keywords: spatial spiral hole; TRIZ theory; EDM; coolant gallery

0 引言

近年来, 新能源已经成为了世界各国竞争的主要焦点, 通过技术进步开发与制造高效节能的设备是解决节约能源、发展新能源问题的一种有效途径。然而, 在一些行业中螺旋冷却水道结构的制造始终是一个关键技术问题。如模具行业螺

旋冷却水道(图 1(a)), 新能源汽车的电动机冷却领域^[1](图 1(b)), 涡轮叶片螺旋孔冷却通道(图 1(c)), 节能散热技术领域的换热器、冷却器、预热器中的肋化内冷却通道零部件及机床电主轴冷却管道^[2]等加工过程存在无法采用机械加工方式实现螺旋孔的加工。

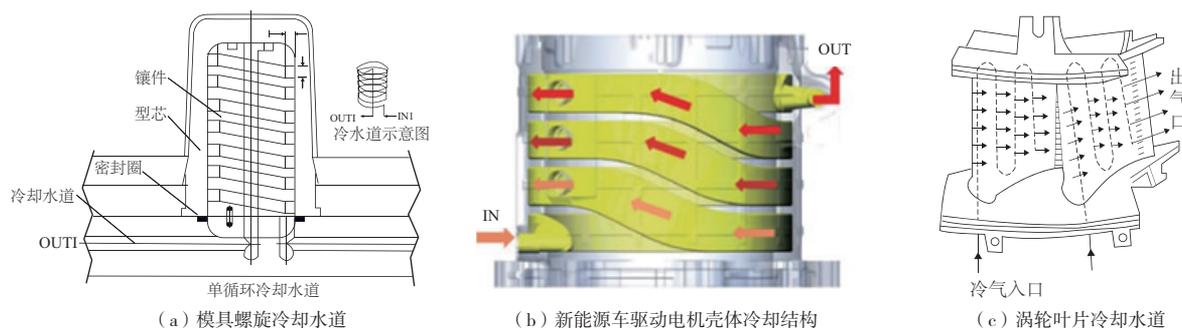


图 1 部分行业螺旋冷却水道结构

基金项目: 2022 年广东省普通高校青年创新人才项目(2022KQNCX173); 2020 年广东轻工职业技术学院自然科学基金项目(KJ2020018)

第一作者简介: 石平义(1989—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 硕士, 研究方向为机械自动化、数控技术, shipyi@163.com。

目前,已有国内外学者对螺旋孔相关加工技术进行了一些研究。如浙江工业大学学者陈明等^[3]提出不同流场构型对微细螺旋孔电解加工的影响,研究了利用电解加工螺旋孔技术,从理论上研究了电解加工微细螺旋槽的一些规律。美国通用公司在专利中提出一种螺旋孔的加工方法:在管状电极外部利用掩膜一层螺旋形光刻胶的方法来制作工具阴极,然后使用该阴极将冷却孔加工成竹节孔^[4],但是该实施装置和操作复杂,难以实施,成本较高,效率较低,而且未见其后期的实际研究成果及应用推广。

TRIZ 理论是解决产品创新设计、创造性发现和解决问题的一种系统理论和方法工具^[5]。该方法能够帮助研发设计人员打破思维局限,获得问题的理想解决方案。本文针对当前螺旋孔加工装置及方法上的欠缺,以实现螺旋孔可行加工装置设计为创新目的,利用 TRIZ 理论发散思维,创新设计适用范围较广的空间螺旋孔加工装置。

1 基于 TRIZ 的螺旋孔加工装置设计思路

由于电火花加工到不同深度时出现排渣、散热等客观条件变化,相同加工参数得到的放电加工速度和效率是不稳定的,另外电火花加工机床其主轴运动是上下直线运动,内部机械传动方式单一导致进给速度也不恒定,因而采用数控系统来控制带有预置回转运动的角速度存在困难,需要采用其他方式避开进给速度变化的问题。其次,为了有效保证火花液的循环流动和对工件加工时的辅助效果并避免短路,目前大多数电火花机床的火花液冲洗方式多为外冲洗方式,对于内孔的加工冲洗效果并不理想,这使得机床加工零件的形状、大小受到限制。最后,作为电火花加工机床的关键部件——工具电极的结构及材料不同,引起加工的零件范围、速度受到进一步限制^[6]。为突破以上思维局限,应用 TRIZ 的冲突矩

阵找出可行的发明原理,确定产品新功能的设计方案,最终得到几种可实现螺旋孔加工的装置。基于 TRIZ 的空间螺旋孔加工装置设计流程如图 2 所示。

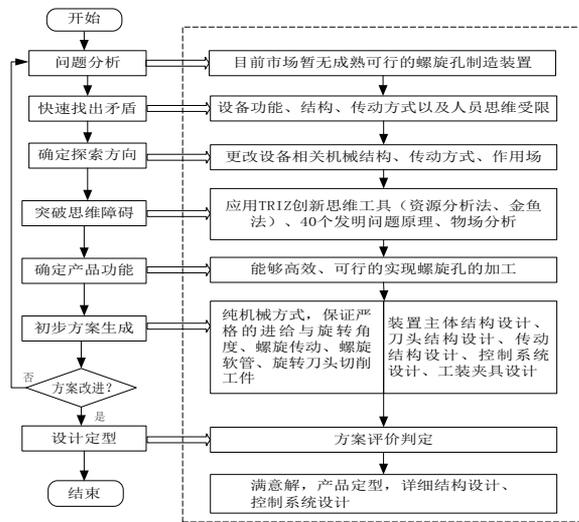


图 2 基于 TRIZ 的空间螺旋孔加工装置设计流程图

根据 TRIZ 理论设定电火花空间螺旋孔加工装置的最终理想解 (IFR) 为:

- 1) 实现适用性广泛的螺旋孔加工装置,设计出可行的螺旋孔加工装置,能够适应不同材料、不同行业、不同大小的螺旋孔加工需求;
- 2) 提高加工效率,实现高效率的传动,稳定的加工过程。

2 求解过程

2.1 因果分析

当前,缺少机械加工隧道式空间螺旋孔的装置,许多同行认为是不可能实现螺旋孔加工的。利用 TRIZ 创新思维方法——鱼骨图因果分析法,从机械加工相关实际情况考虑,着重从研发人员、设备、物料、工艺、环境等多个因素绘制加工螺旋孔装置难以实现的因果分析图,如图 3 所示。

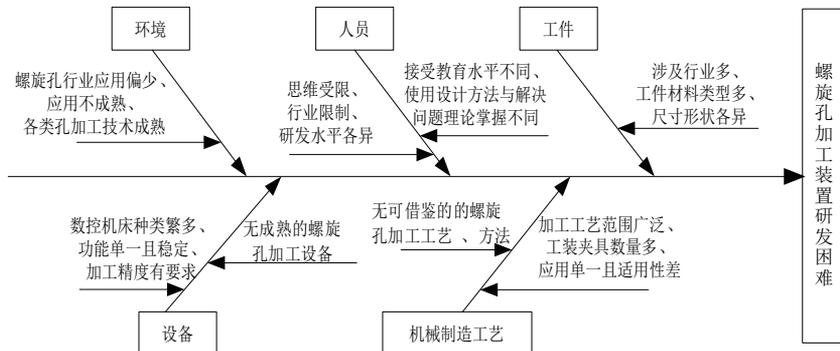


图 3 空间螺旋孔加工因果分析图

通过以上分析,不难发现造成螺旋孔加工难以实现的主要原因有:1)研发人员的设计思路与应用理论水平受限;2)当前机械制造工艺与设备适用范围有限。

2.2 资源分析

为了解决以上问题,进一步利用TRIZ理论中的相关方法寻求实现螺旋孔加工的可用技术资源,从而实现最终解决方案。结合本问题的特点,首先考虑利用TRIZ创新思维中的九屏幕资源分析法获得系统内外部尽可能多的可用资源^[7],据此分析得到问题的主要技术矛盾,列出矛盾矩阵,从而通过查阅矛盾矩阵求得问题的解决方法。

应用九屏幕法,从超系统、系统、子系统的过去、现在、未来,寻求从时间和系统两个维度解决空间螺旋孔加工系统内外部的可用资源。该方法有助于多角度地看待问题,突破原有思维的惯性,帮助确定解决问题的方法。空间螺旋孔加工装置九屏幕法如表1所示。

表1 九屏幕法

名称	过去	现在	未来
超系统	普通机床、专机	数控机床、电火花加工机床	FMS生产线、智能制造
系统	普通孔的加工装置	无可行的螺旋孔加工装置	成熟的螺旋孔加工装置
子系统	专用工具、专用机械系统	通用的传动方式与加工技术	各类孔加工全自动化

通过以上九屏幕法资源分析发现,目前解决本课题的可用资源主要为数控机床、电火花加工机床、通用的机械传动方式等技术资源。为了确保装置的自动化,实现螺旋孔加工所需的运动与结构,必须提升现有加工装置的复杂性与自动化程度。为了保证装置的市场竞争力和广泛应用,需要保证装置具有良好的适应性、通用性。另外,机械加工孔类零件时,工件与刀具长时间作用会影响刀具使用寿命,可用时间减少,因此将运动的物体作用时间作为恶化参数。另外,随着刀具开始对工件材料的去除作用,导致刀具(电极)等物质参数恶化,因此将物质的损失作为另外一个主要恶化参数。根据改善参数和恶化参数查找阿奇舒勒(G.S.Altshuler)矛盾矩阵表,建立系统的阿奇舒勒矛盾矩阵表,如表2所示。

表2 阿奇舒勒矛盾矩阵表

改善的参数	恶化的参数	
	物质的损失(23)	运动物体的作用时间(15)
自动化程度(38)	35,10,18,5	6,9
适应性及多用性(35)	15,10,2,13	1,3,5,13
装置的复杂性(36)	2,4,8,10,15	4,10,15,28

2.3 装置功能构建与方案确定

通过以上的设计与分析,依据P&B设计方法理论,将设计对象看做一个系统,用系统工程进行分析和综合^[8],明确设计任务,建立系统功能结构进行分析。结合实现螺旋孔加工工艺与原理,抽象出设备中可能用到的功能元,建立螺旋孔加工装置功能元列表,如表3所示。

表3 螺旋孔加工装置功能元

功能元名称	组成	功能
电能	电机、螺旋电极	驱动、加工
信号	反馈信号、控制信号	控制设备
机械能	机械传动、螺旋运动	运动传递
化学能	火花液的存储与输送方式	排屑、冷却

根据抽象出的设备主要功能元,运用TRIZ方法理论设定电火花空间螺旋孔加工要实现的主要功能是:

- 1)实现空间等距螺旋孔加工;
- 2)电解液高效存储与冲液压力、流速可控;
- 3)可靠的控制系统。

为了提高发明原理应用的有效性,将出现频率高的发明原理进行研究利用^[9]。根据表3可知,可能有助于解决本案问题的发明原理对应的发明问题原理和出现的频率最高的为发明原理10:预先作用。该原理有两种具体方法描述,其中方法1,预先对物体施加必要的改变。方法2,预先安置物体,使其在最方便的位置发挥作用。从综合发明原理及创新设计角度联想到普通机床加工孔类时,一般方案是通过电机带动齿轮传动到工件或者刀具旋转,而螺旋孔加工装置的关键在于机械传动形式的改变与结构布置。根据发明原理10所提示的方法1,在当前实现孔的加工装置上,对一些结构进行预先施加必要的改变,实现螺旋孔加工工艺与动作,改变常见圆柱状刀具的结

构形式为弯曲状。改变直线传动路线为螺旋传动,实现了预先对加工刀具的结构与传动结构必要改变。进一步的研究,根据该发明原理 10 所提示的方法 2,预先安置切削刀头在螺旋管上,使得

刀具刚接触或者接近到加工工件时,便可实现螺旋运动而发挥加工作用。据以上分析,进一步地设计出装置初步功能模型如图 4 所示。

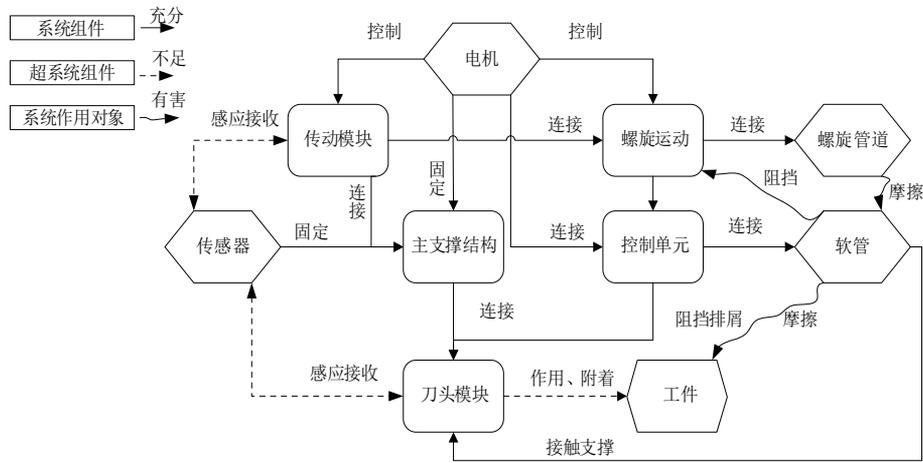


图 4 电火花加工装置功能结构示意图

2.4 应用物场分析求解

根据 TRIZ 理论的实践应用情况,在利用 TRIZ 矛盾矩阵法解决问题时,存在工程参数选择的不同,直接影响系统的可行性和方案的优劣^[10]。因此,完全依靠 TRIZ 矛盾矩阵法得到的方案可能并不一定是最理想的解决方案。同时考虑到 TRIZ 理论方法中物场分析法是一种与现有技术系统相互关联的问题建模方法,物资的输出是由于另一个物体(工具)或者某些场(能量类型)的作用下引发的,因此,考虑综合利用物场分析来解决问题。

从当前利用纯机械方式加工孔类机床来看,一般会存在刀具磨损快、维修费用高、效率低等实际问题,可在当前系统上利用物场分析法求解。建立当前常用机械加工孔系统的物场模型如图 5(a)所示,S1 工件,S2 装置,二者之间作用场为机械场 F,可以看出,刀具直接作用于工件,属于有害效应完整模型。

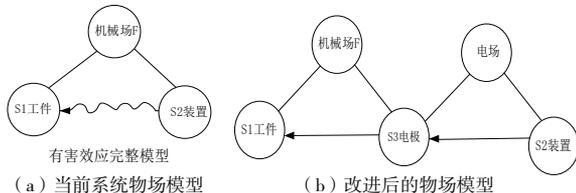


图 5 物场模型

为了解决以上有害效应模型,考虑利用电场,运用电火花原理加工螺旋孔,同时改进当前机械

传动系统以适应电火花加工系统传动需要,改进的系统物场模型如图 5(b)所示。依据新的物场模型思路,结合现有电火花加工机床系统作为参考,最终设计出如图 6 所示的空间螺旋孔电火花加工装置方案。该设计方案的装置主要由主轴系统、丝杠传动系统、螺旋管电极、火花液及其冲液装置、工作台等部件组成。

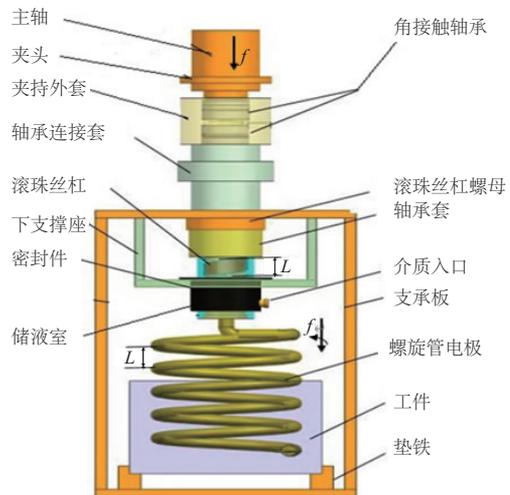


图 6 基于电火花的空间螺旋孔加工系统原理图

图 6 中,整套附加装置通过夹头与电火花机床主轴联接固定,整套装置安装固定在电火花机床工作台上。加工时,电火花机床主轴的直线进给运动驱动滚珠丝杠和空间螺旋管电极直线运动及回转运动。由于丝杠与螺旋电极的螺距相同,保证了电极的直线进给和旋转运动的比例保持恒定,实现电

极与主轴螺旋式进给,从而完成隧道式螺旋孔的加工。为了解决电火花加工过程中的排屑、冷却液循环等问题,采用成型的空间螺旋管电极内喷压力火花液,供液充分,能够到达细小而工作行程很远处,排渣彻底、散热效果好且加工过程稳定,不会产生“二次放电”,加工孔尺寸一致性好,效率较高。

3 控制系统原理设计

电火花加工装置的电气控制系统组成主要包

括脉冲电源、控制电路、检测与保护电路等^[11]。其中,脉冲电源为电火花系统提高放电所需能量以保证加工的螺旋孔效果;控制电路直接控制整个装置的机械运动以保障螺旋孔加工所需运动,主要包括间隙量控制、间隙电压控制、电极参数控制、伺服控制等控制功能;保护电路用来检测瞬间放电情况和间隙电压,保持工具电极与工件之间恒定放电间隙。整个螺旋孔加工装置控制系统原理示意图如图 7 所示。

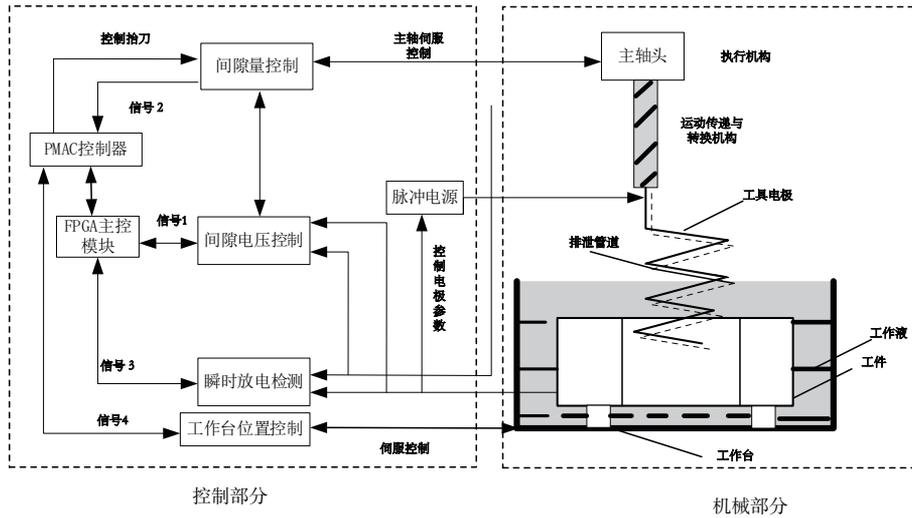


图 7 空间螺旋孔电火花加工系统控制系统示意图

整个控制系统采用“上位机人机界面+PMAC+FPGA”的多处理器控制策略进行控制,保证加工过程快速、稳定、准确地进行^[12]。其中,人机交互界面主要完成加工参数设定等设备控制功能,PMAC 控制器处理电极伺服控制策略、主轴与工作台位置定位伺服控制运动、系统自动控制功能。FPGA 主控模块完成放电状态检测与统计、间隙保护、电极参数自调整、脉冲电源控制与保护等功能。该装置的控制系統工作流程如图 8 所示。

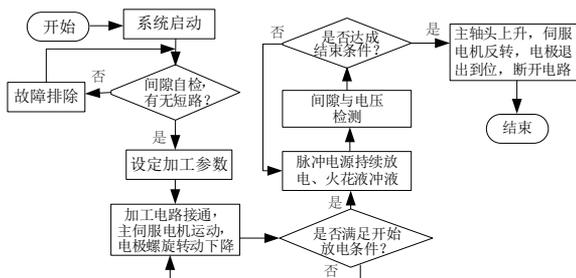


图 8 螺旋孔加工装置控制系统工作流程图

为了验证所设计的加工装置可行性,在电火花机床基础上搭建了空间螺旋孔加工实验平台,如图 9 所示。在此平台上开展了螺旋孔加工实

验,实验后在工件上成功加工出螺旋孔结构,有效验证了该装置的可行性。

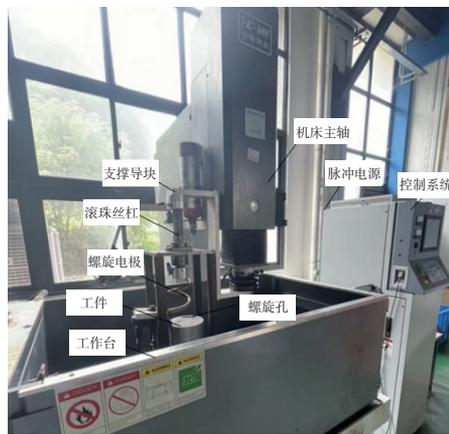


图 9 螺旋孔加工实验平台

4 结语

利用 TRIZ 理论克服了传统的惯性思维,实现了螺旋孔加工装置从无到有的突破,并综合运用不同的 TRIZ 创新方法求解,最终得到了理想的螺旋孔电火花加工实现方案。该装置具有结构小巧、操作方便、可靠等优点,加速螺旋孔加工装置

的行业应用过程,给空间螺旋孔加工技术在相关行业的开发和应用带来参考价值。

参考文献:

- [1] 丁永根,徐天稷,张南,等.新能源汽车驱动电机壳体冷却结构设计及热仿真分析[J].时代汽车,2020(16):71-72.
- [2] 吴明阳,李宝伟,孙宇杰,等.高速电主轴冷却系统试验研究[J].机床与液压,2021,49(1):56-62.
- [3] 陈明,王明环,彭伟.不同流场构型对微细螺旋孔电解加工的影响[J].机电工程,2009,26(10):87-89.
- [4] LEE C P, PAULCHIU R S. Method for enhancing heat transfer inside turbulated cooling passages: US6582584[P]. 2003-06-24.
- [5] 檀润华,王庆禹,苑彩云,等.发明问题解决理论:TRIZ:TRIZ过程、工具及发展趋势[J].机械设计,2001,18(7):7-12,53.
- [6] 鲍中美.电火花成形加工常见工艺问题分析和对策研

- 究[J].机械设计与制造,2007(9):200-202.
- [7] 王曰辉.基于TRIZ理论的齿轮装夹系统创新设计[J].制造技术与机床,2021(5):124-127.
- [8] 林兴坡.基于P&B与TRIZ的产品适应性设计研究及其应用[J].机电技术,2011,34(4):100-103.
- [9] 王立新,张玉环.基于TRIZ的动静压滑动轴承油腔结构创新设计[J].润滑与密封,2021,46(2):73-78.
- [10] 李梅芳,赵永翔. TRIZ 创新思维与方法理论及应用[M].北京:机械工业出版社,2022.
- [11] 朱勋鹏. TRIZ 辅助便携式电解去小孔毛刺装置设计[J].机床与液压,2017,45(10):11-14.
- [12] 王力,都日苏拉.热障涂层高温合金电火花小孔加工伺服控制系统的研制[C]//第17届全国特种加工学术会议论文集(上册).广州:中国机械工程学会特种加工分会,2017:427-430.

收稿日期:2023-06-20

(上接第15页)

1) 在实验参数范围内,垂直磨削方向表面粗糙度在 $0.40\sim 1.68\ \mu\text{m}$,沿磨削方向表面粗糙度在 $0.08\sim 0.28\ \mu\text{m}$;垂直磨削方向的表面粗糙度值与砂轮线速度呈负相关而与工件进给速度和磨削深度呈正相关。

2) 降低工件进给速度和磨削深度能使表面形貌轮廓峰起伏程度减小,形貌纹理变紧密,增大砂轮线速度不会使轮廓峰起伏程度发生明显变化,但可以使形貌纹理变紧密。

3) 增大砂轮线速度而减小工件进给速度和磨削深度会使磨削表面坑洞缺陷密度和划擦痕迹明显程度降低,减小磨削深度能缓解磨削表面的烧伤现象。为获得更好的表面质量,推荐磨削参数为 $v_s = 36\ \text{m/s}$, $v_w = 50\ \text{mm/min}$, $a_p = 0.1\ \text{mm}$ 。

参考文献:

- [1] 任敬心,华定安.磨削原理[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [2] 黄新春,张定华,姚倡锋,等.镍基高温合金GH4169磨削参数对表面完整性影响[J].航空动力学报,2013,28(3):621-628.
- [3] 傅玉灿,张志伟,徐九华,等.定向凝固镍基高温合金叶片榫齿高效深切成型磨削[J].南京航空航天大学学报,2014,46(2):190-196.
- [4] 靳淇超,曹帅帅,汪文虎,等.DD5镍基单晶高温合金缓进磨削表面完整性研究[J].西北工业大学学报,2022,40(1):189-198.
- [5] 孙超,张国军,尹佳超.GH4169镍基高温合金砂带磨

削表面完整性分析[J].金刚石与磨料磨具工程,2016,36(1):74-78.

- [6] ZENG Q R, LIU G, LIU L, et al. Investigation into grindability of a superalloy and effects of grinding parameters on its surface integrity[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture,2015,229(2):238-250.
- [7] WANG J W, XU J J, WANG X F, et al. A comprehensive study on surface integrity of nickel-based superalloy Inconel 718 under robotic belt grinding[J].Materials and Manufacturing Processes,2019,34(1):61-69.
- [8] LI Z, DING W F, LIU C J, et al. Grinding performance and surface integrity of particulate-reinforced titanium matrix composites in creep-feed grinding[J].The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,94(9):3917-3928.
- [9] 杜随更,姜哲,张定华,等.GH4169合金磨削表面塑性变形层的微观结构[J].机械工程学报,2015,51(12):63-68.
- [10] 蔡明,巩亚东,屈硕硕,等.镍基单晶高温合金磨削表面质量及亚表面微观组织试验[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(3):386-391.
- [11] 白洋.镍基高温合金单晶零件磨削性能实验研究[D].沈阳:东北大学,2018.
- [12] ZHU X X, WANG W H, JIANG R S, et al. Performances of Ni3Al-based intermetallic IC10 in creep-feed grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108(5): 809-820.

收稿日期:2023-05-24