

塑模典型特征的电极设计及加工技术

胡滨铠, 林明山

(漳州职业技术学院装备制造与车辆工程学院 精密机械功能零部件智能制造
福建省高等学校应用技术工程中心, 福建漳州 363000)

摘要: 以某款额温枪模具型芯制造为例, 开展电火花特种加工中典型特征电极的设计研究, 并设计出各类特征电极。通过对零件结构、加工精度要求及放电间隙等多因素的综合分析, 提出基于工艺特征的小电极合并与复杂轮廓拆分电极策略。基于铜质电极材料性能, 以难加工电极结构为例, 介绍数控加工技术, 提出工艺规划及加工要点。模具制造完成后, 生产的产品已通过客户验收, 表明该研究的应用效果良好。

关键词: 模具型芯; 电火花加工; 电极设计; 数控加工

中图分类号: TG76.11

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0178-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.033

Electrode Design and Machining Technology of Typical Characteristics of Plastic Mold

HU Binkai, LIN Mingshan

(Fujian Provincial Higher Education Engineering Center for Applied Technology in Intelligent Manufacturing of Precision Mechanical Functional Components, School of Equipment Manufacturing and Automobile Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: Taking the manufacturing of a core mold for a certain type of forehead thermometer as an example, a design study of typical feature electrodes in electrical discharge machining was conducted, and various types of feature electrodes were designed. Through a comprehensive analysis of multiple factors such as part structure, machining accuracy requirements, and discharge gap, a strategy for merging small electrodes based on process features and splitting complex contour electrodes was proposed. Based on the properties of copper electrode material, a difficult-to-machine electrode structure was used as an example to introduce numerical control machining technology and put forward process planning and machining points. After the mold manufacturing was completed, the produced products passed the customer's acceptance, indicating that the application effect of the study was good.

Keywords: Mold core; Electric discharge machining; Electrode design; NC machining

在压铸、注塑等成型模具制造过程中, 由于存在形状复杂、精密面、孔槽、窄缝等难以直接用切削方式加工到位的部位, 通常采用拆分成镶件或采用电火花加工来解决。电火花加工是利用电极与工件之间通电时产生的瞬时高温逐层蚀除工件表面材料^[1]。电火花加工的关键在于电极的设计与制造, 这在模具制造中是一项关键技术, 不仅直接影响模具的制造成本和使用寿命, 还影响产品质量^[2-6]。模塑零件中, 部分型腔可以直接用电极加工完成, 但有些型腔细长且深^[7], 不宜直接加工, 需要采用镶件来解

决。然而, 某些镶件的成型部位难以通过车削或铣削直接获得, 仍需要电极加工来解决。此外, 有些型腔虽然可以用电极直接加工, 但型腔间距离较近或形状复杂^[8-9], 电极设计的合理性直接影响加工时间和电极材料的使用^[10]。此类问题值得设计者深入研究以寻求合理解决方案。本文以某款具有典型特征的额温枪模塑零件为例, 介绍其电极设计与数控加工过程, 为行业提供参考。

1 电极结构及工艺特征

电极结构主要由电极位、避空位和电极底座等组成。

收稿日期 Submitted date 2025-03-14; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-18

基金项目: 中国高等教育学会2022年度课题项目(22SZH0425)

联系人, 576161286@qq.com

引用本文: 胡滨铠, 林明山. 塑模典型特征的电极设计及加工技术[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 178-182.

Citation: HU B K, LIN M S. Electrode design and machining technology of typical characteristics of plastic mold[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 178-182.

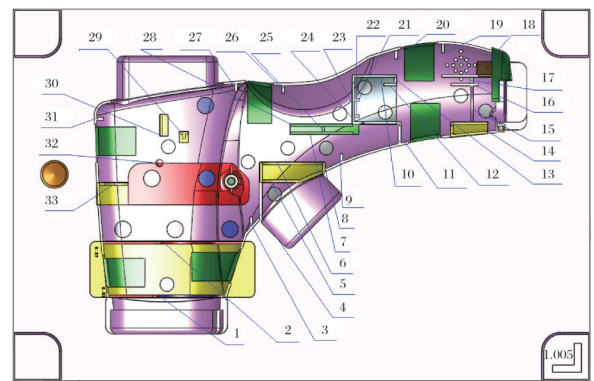
电极位是电极和待加工工件放电间隙即击穿介质的最小距离,避空位目的是避免电极板与待加工件距离靠太近,便于带走残渣,也称冲水位,一般取5 mm。电极底座是便于找正电极和待加工件的相对位置,底座厚度一般取4 mm,电极底座板中心与型芯中心距离数值应取整便于放电校对,同时设置防呆角防止安装出错。根据业界工作经验总结出宜采用电火花加工的工艺特征主要包括尺寸微小^[11-12]且直接加工难度大的斜面、平缓过渡面、垂直走向的直角交汇处、无法直接通过刀具路径加工的过渡面、两个面均为较大斜角的非水平表面、非圆角或圆角半径较小的形状交叉部位、加工宽度在2 mm以内且深宽比较大的狭窄凹槽、由商标文字图案等构成的精细浅型腔、模具材料硬度极高以及在模具结构中对表面精度要求极高^[13]且普通数控加工无法满足加工标准的部位等^[14],遇到该类工艺特征的零件,基本上采用电火花加工来解决。

制造电极的材料应具有良好的导电性,能够顺利进行电化学反应,主要有紫铜、石墨、铜钨合金(Cu-W)和银钨合金(Ag-W)等^[15]。紫铜是常用的电极材料,加工稳定性优,电极损耗较少,机械加工性较差,且该材料在精磨加工阶段存在一定难度,主要适用于加工中小型、形状复杂,且对加工精度和质量要求极高的花纹模及型腔模具^[6]。石墨是常用的电极材料,加工稳定性较优,电极损耗较少,机械加工性较好,常应用于型腔加工中,尤其契合宽脉宽、大电流的作业条件。以铜作为原材料,展现出损耗低、耐高温、变形微的特性。不过,其短板也不容忽视,加工期间易出现脱落、掉渣状况,致使加工表面粗糙,在精加工阶段还极易引发拉弧问题^[17]。其中,埃米级石墨在对加工精细度及精度要求近乎极致的领域发挥关键作用,如超微细加工、构造复杂的型腔加工以及对工件表面粗糙度数值要求严苛的加工任务;渗铜特细石墨一般应用于对电极强度要求严苛的微细电极制造或在冲油环境不佳的情况下使用。常见于注塑模具制造、硬质合金加工、小孔加工等领域;特细石墨主要应用于对电极强度与精度要求极高的加工过程,常见应用场景包括注射模和挤压模的制造、盲孔加工以及充当低损耗的粗加工电极等^[18]。Cu-W合金、Ag-W合金加工稳定性佳,电极损耗小,机械加工性能良好,但价格偏高。适用于工具钢、硬质合金模具以及特殊异形孔槽加工^[19]。通过对比,采用紫铜材料,其在电化学反应过程中不易被氧化、腐蚀及良好制造性能,与其他材料相比在价格、使用难易程度、重复使用性等方面具有优势^[20-21]。

电极设计及数控编程加工主要依靠CAD/CAM软件来实现,例如CimatronE有独立的专业化电极设计模块,可实现拆电极、设计电极及电极加工模板、复制镜像电极等智能化功能^[22-23],因此被广泛采用。本文以紫铜为电极材料,借助CimatronE为工具介绍电极设计及数控加工制造。

2 典型特征的电极设计技术

图1为某款额温枪模具型芯零件,型芯尺寸为270 mm×210 mm×50 mm,材料为738模具钢。因产品功能需要设置较多类型和数量的加强筋^[24-25],必须加工成型凹槽。经分析,该零件共有70多处(图中未尽标出)需要设计电极,用电火花加工来完成。进一步分析发现,该零件上需要拆电极的沟槽存在许多典型特征,如窄长深双U形的1和2,多异形组合的29、30、31、32和33,双T形5、6、7和28,闭合轮廓狭长异形的10、11、12、13、20、21、22、24和25,开放轮廓窄沟异形的11、14、18、19和20,异形细长成型镶件的14等。此外,有些位置拆电极时因考虑加工的难易性,电极不能拆分成整体电极,需要拆分成主体电极及小凸台电极等。



注:1-17—电极位;18—镶件;19-33—电极位;34—镶件。

图1 某款额温枪模具型芯零件

Fig.1 Mold core part of a certain forehead temperature gun

2.1 双窄长深沟近距离的并列整体电极设计

图2为双窄长深沟近距离的并列整体电极。从图2a可以看出,型芯上的双U形槽穴1和2,根据成型工艺要求,该处设计为嵌入镶件,以利于排气,该区域边界和长宽深分别为50.72 mm×0.80 mm×16.28 mm和42.34 mm×0.80 mm×12.17 mm,深宽比均大于3,使用球刀加工较为困难。因此,需要将部件制成两个镶件并嵌入,随后还要借助电火花加工来完成成型部位的加工,即存在电极位1和电极位2。每个电极位在结构上均设有双U形凸台,且凸台间设有细长直槽。由于电极位1和电极位2形状相似,且二者间距较近,故宜将二者设计为一个并列整体电极。不仅可节省铜材,还能减少加工与打磨次数,从而显著提升效率与精度。依据CimatronE电极设计功能,设计出如图2b所示的双U形电极零件。电极1和电极2的底座与台阶采用常用参数设计。因此,对于形状大小相似、对称布局及拼接等类型的电极,在设计完成后可将其保存为模板,以便后续便捷调用,减少基本设计步骤与设置参数,实现高效电极设计。

2.2 结构各异的多沟槽电极归类设计

图3为结构各异的多沟槽电极。模具零件中的窄长深槽和平行短间距深槽的边界盒尺寸分别为29.43 mm×

1.08 mm×4.25 mm 和 15.66 mm×1.12 mm×3.91 mm。由于电极位 31 和 33 距离较近,且电极位 32 与 33 呈垂直“L”形,设计为单个电极时加工难以到位,还会浪费电极材料。为了减少铜材料的使用,降低加工和打磨次数,提高模具制造的效率和精度,建议将电极位 31 和 33 设计成如图 3b 所示的整体电极,将电极位 29、30 和 32 设计成如图 3c 所示的整体电极。此外,需要注意电极位 31 和 33 是开放型电极,为确保加工到位,开口处的电极轮廓应延伸 0.5~1.0 mm。

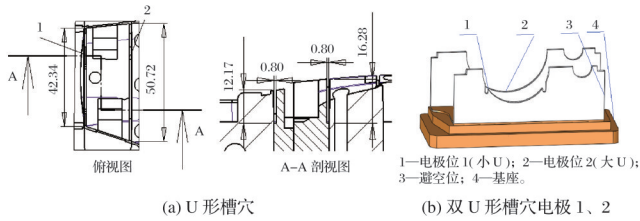


图2 双窄长深沟近距离的并列整体电极

Fig.2 Juxtaposed integral electrodes of two narrow, long and deep trenches in close proximity

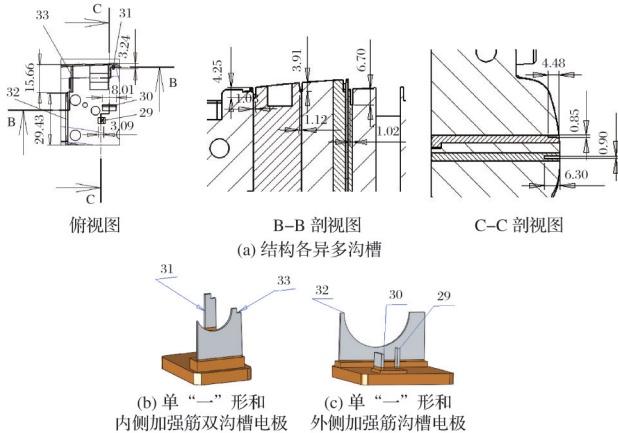


图3 结构各异的多沟槽电极

Fig.3 Multi-groove electrodes with different structures

2.3 有位置精度要求的多深沟电极整合设计

图4为有位置精度要求的多深沟电极整合。从图4a可以看出,模具零件中存在有位置精度要求的多深沟形槽,边界盒长宽深分别为 23.80 mm×1.00 mm×8.11 mm 和 14.11 mm×0.93 mm×5.90 mm。因电极位 5、6 距离较近,仅为 9.80 mm,电极位 7 和电极位 28 距离仅为 1.80 mm,这四处沟槽对产品位置有精度要求,如果分开加工则难以保证精度,且加工效率低,为提高制造效率和精度,宜将电极位 5、6、7、28 设计成一个如图 4b 所示的整体电极。

2.4 大小各异多沟槽的电极的整合设计

图5为大小各异多沟槽电极的整合。从图5a可以看出,模具零件中存在窄长异形深沟槽,槽的形状各异,体型小且数量多,其中最深达 15.24 mm,宽度最小仅为 0.40 mm,因电极位 23 分别和电极位 22、电极位 21、电极位 13 和电极位 25 均形成垂直形状,电极位 24 和电极位 11 形成垂直形状,电极位 13 分别与电极位 10 和电极位 12 均形

成垂直形状,这 10 个电极几乎两两互有关联。常规做法是做出 10 个电极,这样不仅浪费材料,而且加工和打磨需要重复 10 遍,装夹重复 10 遍,累积误差增多,难以保证加工到位。为提高制造效率和精度,宜将电极位 22、21、13、25 整合成一个如图 5b 所示的整体电极,宜将电极位 12、24 设计成一个如图 5c 所示的整体电极,宜将电极位 10、11 设计成一个如图 5d 所示的整体电极,宜将电极位 20 设计成一个如图 5e 所示的整体电极。需注意的是,电极位 11 和电极位 20 是开放型电极,为保证加工到位,开口处的电极轮廓应延伸 0.5~1.0 mm。

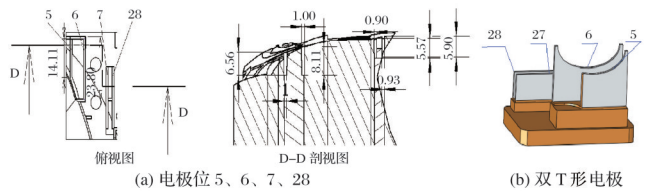


图4 有位置精度要求的多深沟电极整合

Fig.4 Multi-deep groove electrodes integration with position accuracy requirements

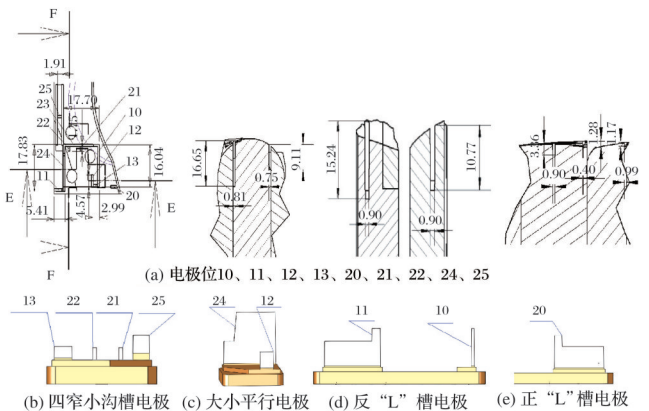


图5 大小各异多沟槽电极的整合

Fig.5 Multi-groove electrodes integration with different sizes

2.5 开放轮廓的深窄沟槽多阶电极设计

图6为开放轮廓的深窄沟槽多阶电极。从图6a可以看出,模具零件中存在同时有双凹形窄深槽和倒“L”形槽的异形窄沟槽,其中边界盒最深达 13.41 mm,最小宽度仅为 0.80 mm。因 4 个电极位均处于平行布局,为提高制造效率和精度,宜将电极位 19、20、14、11 设计成一个如图 6b 所示的整体电极。需要注意的是,电极位 11、19、20 是开放型电极,为保证电极打到位,开口要延伸 0.5~1.0 mm。电极位 18 宽仅为 0.8 mm,深 11.4 mm,因过于细小长条,加工时易变形,难以到位,宜将电极位 18 设计成一个如图 6c 所示的多阶电极,以确保电极刚度。

2.6 细长镶件成型电极的拆分设计

图7为细长镶件成型电极的拆分。从图7a可以看出,该型芯成型部分的头部包含尖锐弧形曲线、弧形曲面和阶梯垂直面,加工难度大,容易出现断刀和工件变形问题,同时需兼顾加工效率,且该部位为易损件。因此,宜将其设

计为钢镶件,避免与型芯一体加工。这种设计不仅可避免复杂的定制化和多电极设计,还有利于排气和提高产品质量。该镶件成型部位存在异形窄长深槽,边界盒尺寸为47.05 mm×8.00 mm×2.51 mm,难以直接通过铣削加工实现,必须采用电极加工。鉴于轮廓复杂,需拆分为多个电极完成加工。由于镶件的长高比远超5倍,建议将两个异形成型镶件呈180°环形阵列布局,并设计为一个电极,这样既能节省铜材料,又能显著提高加工效率,减少累积误差。电极位37和电极位35为拆分电极,重合部分至少4 mm,电极位37和电极位36也是如此。最终,该异形细长成型镶件被设计为4个电极,如图7b所示。

的范围内。然而,紫铜材料较软,电极成型部位存在狭长、异形、边缘小等特征,加工过程中易产生变形、弯曲等问题,这是加工的难点。因此,在加工时应设置合理的工艺参数。

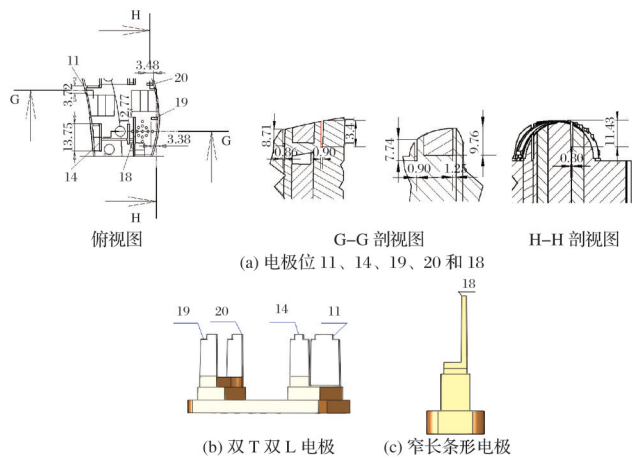


图6 开放轮廓的深窄沟槽多阶电极

Fig.6 Deep narrow groove multi-stage electrodes with open profile

3 铜质材料电极的数控加工技术

紫铜作为电极材料,具有良好的切削加工性能^[26],使用常规切削刀具即可进行车削、铣削、钻孔等加工操作,刀具磨损相对较小,能够较为方便地加工出各种复杂形状的电极,且加工表面质量较易保证,粗糙度可以控制在较好

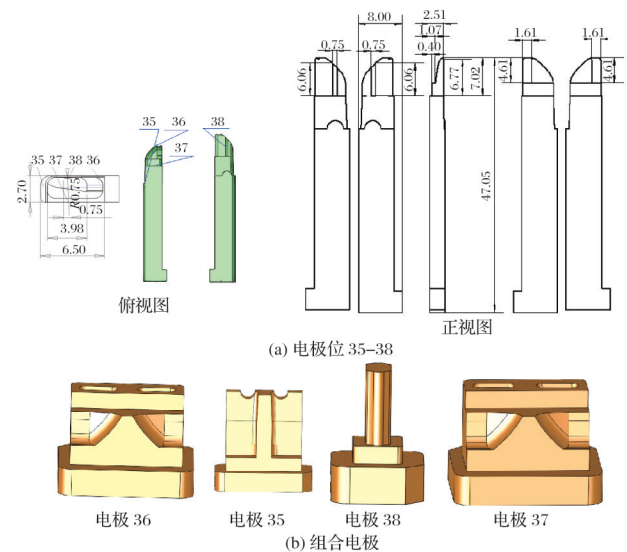


图7 细长镶件成型电极的拆分

Fig.7 Electrode separation of slender insert molding

以图7中电极35为例,介绍这种厚度薄且细长、加工难度较大的电极零件的数控加工技术。该电极具有两个距离较近的小孔槽,数控加工时容易过切、变形,且由于距离小,被加工材料刚性不足,容易弯曲。为确保放电时成型部位加工到位,在电极成型部位进行精加工时,余量应设置为负值,但基准板精加工余量需要设置为0,可通过偏刀和变换导轨方式实现负余量。基于发那科(FANUC)数控加工系统,以CimatronE作为编程软件,制定的工艺规划。表1为加工工艺规划。

表1 加工工艺规划

Tab.1 Processing technology planning

加工位置	加工余量/mm	刀具	步距/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	进给/(mm·r ⁻¹)
粗加工放电和避空区域	侧壁0.10/底部0.08	D8	0.350	8 000	3 500
粗加工基座侧壁	侧壁0.15/底部0.06	D8	0.400	8 000	3 500
粗加工侧壁曲面	侧壁0.14/底部0.10	D2	0.100	16 000	1 600
粗加工上部两台阶平面	侧壁0.30/底部0.03	D2	0.300	16 000	800
粗加工第三两台阶平面	侧壁0.30/底部0.03	D2	0.300	10 000	800
粗加工曲面角落	侧壁0.05/底部0.04	D2	0.070	16 000	1 600
精加工曲面最小台阶平面	侧壁0/底部0	D8	0.500	8 000	1 000
精加工放电和避空区域	侧壁-0.01/底部0	D8	0.080/0.350	8 000	1 000
精加工基座侧壁	侧壁0/底部0	D8	0.400	8 000	1 000
精加工两个U形孔槽	侧壁0.08/底部0.02	D1	0.030	18 000	500
精加工上部两台阶平面	侧壁0/底部0	D1	0.080/0.350	18 000	500
精加工第三两台阶平面	侧壁0/底部0	D1	0.080/0.350	18 000	500
精加工侧壁曲面	侧壁0/底部0	D1	0.080/0.025	18 000	800
精加工两个U形孔槽	侧壁0/底部0	D1	0.080/0.025	18 000	500

加工过程应注意以下要点:(1)为提高加工效率,粗加工时需要成型部位和避空位先开粗;对于外侧开放区域,加工参数均宜适当大些;对于精加工曲面处最小台阶平面、精加工上部两台阶平面和精加工第三两台阶平面宜采用面铣加工;对于外侧开放区域,余量小,宜加大切深。(2)避免断刀,对于曲面区域余量不均匀,进给量适当小些;对于两台阶平面贴近直壁,进给量最好再小些。(3)避免铜材料黏刀,对于精加工放电区域和避空区域,加工参数转速和进给宜给小些;对于粗加工两个U形孔槽,便于排屑,宜设置大转速,低进给。(4)防止工件变形,精加工两个U形孔槽,宜采用高转速和低进给。

基于先进的数控系统,充分发挥紫铜电极加工优势,精准的编程指令确保复杂形状电极的高质量成型。严格把控加工过程要点,刀具、切削参数与冷却协同配合,有效克服紫铜加工难点。这不仅使电极加工精度控制在0.02 mm以内,满足高精度模具需求,还大幅提升了加工效率,将废品率控制在合理范围内,显著降低了生产成本。研究为模具制造产业中紫铜电极加工提供了坚实的技术支撑。其余电极的数控加工方法与上述电极数控加工基本相似。

本套模具共有100多处需要电极加工,经数字化设计优化后,铜材用量从约40 kg降至约16 kg,铜材节省率达60%。此外,还减少了抛光和电极加工次数,显著缩短了电极设计与制造周期。图8为生产出的产品。

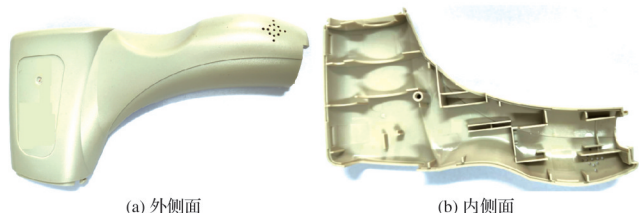


图8 生产出的产品

Fig.8 Produced product

4 结论

本文以某款额温枪模具型芯为例,针对其薄细多筋条等显著特征,开展了电极设计与数控加工的应用研究。结果表明,将部分位置设计为镶件形式,不仅便于成型时排气和加工时排屑,还能简化加工流程,便于损坏时更换,且使用钢材替代铜材可节约原材料成本。然而,对于不便设计为镶件的位置,必须通过拆分电极并采用电火花加工来完成。在电极设计中,需注意多个狭长窄槽空间距离过小,不利于一体成型电极的制作,应将其拆分为若干个电极进行拼接。这种操作不仅能减少小电极的数量,还能间接提高位置精度,避免因多次校正电极而引起的安装误差,确保位置精度,同时减少铜材的使用量。本套模具共100多处需要电极加工,优化后,铜材节省率达60%,抛光和电极加工次数减少,电极设计与制造周期缩短。目前,该模具已通过试样并进入量产阶段,该电极设计与数控加工技术合理可行,具有在行业内推广应用的价值。

参考文献

- [1] 李冀霞, 罗金星, 柳荣俊, 等. 微细电火花加工航空油嘴精密流量孔试验研究[J]. 电加工与模具, 2024(6): 19-24.
- [2] 夏斯伟, 刘志东, 吴小川, 等. 共轭回转式电火花精密加工工艺及其展望[J]. 电加工与模具, 2024(增刊1): 26-32.
- [3] 程思竹, 罗永康, 肖刚锋, 等. 模具电极加工生产线设备信息管理系统的设计与开发[J]. 精密成形工程, 2022, 14(10): 147-154.
- [4] 王志浩, 王燕青, 马虎亮, 等. 钻削与电火花小孔组合加工装置及实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(3): 132-135.
- [5] 王威, 余兴华, 贾志新, 等. 极间介质状态对电火花加工放电点分布的影响研究[J]. 制造技术与机床, 2024(12): 85-90.
- [6] 刘庆玉, 沙瑞, 王亚青, 等. SiC_p/Al复合材料纳米混粉电火花-电解复合加工特性研究[J]. 电加工与模具, 2025(增刊1): 66-74.
- [7] 岳晓明, 李国栋, 聂维梁, 等. 高品质大深径比微孔电火花加工研究现状[J]. 电加工与模具, 2024(4): 10-19.
- [8] 刘雨婷, 刘建勇, 罗学科, 等. 复杂型腔类零件电火花加工电极运动轨迹搜索算法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(12): 93-101.
- [9] 吴恩涛, 邱明波, 姚宗秀, 等. 精密方孔电火花加工用方形电极的修正试验研究[J]. 电加工与模具, 2024(2): 15-20.
- [10] 宋子雄, 周明, 王泽涵, 等. 电火花多电极高效加工GH4169D闭式整体叶轮[J]. 现代制造工程, 2024(5): 95-103.
- [11] 王文成, 李丽, 刘在超, 等. 提高电火花微小孔加工质量的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(3): 140-146.
- [12] 罗学科, 李若冰, 刘建勇, 等. 微小孔电火花-钻削无变质层复合加工技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(19): 41-47.
- [13] 刘思嘉, 徐默然, 李树健, 等. 电火花放电辅助铣削加工工艺对不同性能材料加工的实验研究[J]. 工具技术, 2025, 59(3): 38-42.
- [14] 殷小清, 王阳, 张洲. 模具铜电极设计及其数控编程[J]. 模具制造, 2014, 14(3): 73-76.
- [15] 李文明, 周长武. 铜钨合金工具电极电火花多次切割工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2022(9): 62-68.
- [16] 王成安, 王海雄, 黄增祥. 紫铜表面微铣削加工最小切削厚度分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(5): 165-168.
- [17] 阮晶晶, 巫湘坤, 李勇慧, 等. 低成本干法石墨厚电极的制备与性能研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(6): 2248-2255.
- [18] 吕通发, 何永春, 牟鑫, 等. 激光制备石墨烯/镍/铜触头材料及其性能研究[J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(4): 126-135.
- [19] 李文明. CuW合金电极窄缝多次线切割加工试验研究[J]. 模具工业, 2017, 43(1): 68-70.
- [20] 牛慧贤. 铜箔在锂离子电池中的应用与发展现状[J]. 稀有金属, 2005(6): 898-902.
- [21] 沈则亮, 刘永贵, 韩忠冠. 基于HSM与EDM的模具型腔加工研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(4): 106-108.
- [22] 林明山. CimatronE的注塑模具设计与数控编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [23] 李占君, 王霞. 基于Pro/E和Cimatron E的注塑模具设计与加工[J]. 现代塑料加工应用, 2011, 23(3): 42-45.
- [24] 张留伟, 符立华, 洪维, 等. 基于Moldflow的汽车前保险杠大型精密注塑模具设计[J]. 塑料科技, 2024, 52(11): 130-135.
- [25] 聂五四, 刘淑梅, 汪东亮, 等. 医用接插件模具设计及工艺优化[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 145-151.
- [26] 王能慧, 王传锋, 许文虎, 等. 不同对偶材料对石墨-铜材料磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(9): 102-111, 129.