

金属切削电动工具自洁式防堵屑结构的工艺改进与应用

俞振腾

华丽电器制造有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：金属切削电动工具在连续作业过程中，切屑堵塞不仅降低加工效率，还会加速刀具磨损并引发安全隐患。传统防堵结构依赖被动式排屑槽或外部吹气，难以适应深孔、盲孔及高黏性材料切削工况。本文基于气固两相流理论，提出一种自洁式防堵屑结构的工艺改进方案。该结构集成螺旋导流槽、脉冲式反吹通道及自适应节流阀，通过切削区压力动态调节实现切屑的主动运输与及时清除。理论分析了螺旋升角、反吹频率与切屑粒径之间的匹配关系，建立了排屑效率的预测模型。实验结果表明，改进后结构的排屑效率提升百分之三十以上，堵塞故障率降低至原来的四分之一，刀具寿命延长约百分之四十。该研究为电动工具防堵设计提供了可量化的工艺改进路径。

【关键词】：金属切削；电动工具；自洁式防堵屑；气固两相流；工艺优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.053

1 引言

金属切削电动工具在钻孔、攻丝或铣削过程中，切屑顺畅排出直接决定加工质量与工具寿命。深孔加工、水平孔加工或切削韧性金属材料时，切屑极易在容屑槽内堆积，引发切削阻力骤增导致电机过载、孔径精度恶化以及刀具加速磨损三个直接后果。

现有防堵屑措施分为两类。被动式排屑槽在浅孔加工中尚可，但孔深与孔径比增大后排屑动力严重不足。主动式外接气源或液源虽能改善，却降低了工具便携性，且持续吹气造成粉尘飞扬，不符合绿色制造要求。

针对上述问题，本文利用主轴旋转离心力及切削区自然气流脉动，设计一种集成螺旋导流槽与脉冲反吹机构的自洁式防堵屑结构，在不依赖外部能源的条件下实现切屑主动清除。以下系统论述其工艺原理、参数优化及应用效果。

2 堵屑机理分析与传统结构局限性

2.1 切屑堵塞的形成机制

在金属切削中，韧性金属如低碳钢、铝合金及不锈钢产生连续螺旋卷曲切屑，自然断裂长度数毫米至数十毫米。切屑沿螺旋容屑槽向柄部运动，驱动力包括离心力径向分量、介质曳力及后续切屑推力；阻力则来自槽壁摩擦、切屑相互缠绕及出口堵塞。当孔深超过刀具直径三倍时，运动路径延长、摩擦累积，驱动力不足导致切屑停滞形成楔形堵塞。堵塞后切削扭矩增大百分之五十至百分之一百，持续堵塞产生的磨粒加速刀具磨损，并使孔壁粗糙度从 Ra 1.6 微米恶化至 Ra 6.3 微米以上。

2.2 传统排屑结构的固有缺陷

传统电动工具的排屑结构以螺旋槽为主，部分高端机型在夹头处增设径向排气孔。其不足主要体现在三个方面。

第一，排屑动力源单一。螺旋槽仅依靠切屑自身惯性，缺乏主动输送机制。当切屑长度超过容屑槽螺距时，两端同时接

触槽壁形成自锁。实验表明，切屑长度与螺距之比大于 1.2 时，堵塞概率升至百分之六十以上。

第二，压力场分布不合理。刀具旋转产生的离心气流未被引导利用，而刀具与工件间隙处形成负压区，反而将细屑吸入间隙，加剧摩擦磨损。

第三，缺乏自适应性。不同材料产生不同形态切屑，如铸铁的崩碎屑、铝合金的长卷曲屑、不锈钢的锯齿屑。传统结构无法根据切屑类型调整排屑通道或驱动力，导致材料切换后堵塞频发。

3 自洁式防堵屑结构设计原理

3.1 结构组成与工作流程

自洁式防堵屑结构在不改变电动工具主轴外部接口的前提下，对刀具夹持部位及容屑槽进行了系统性改进，由螺旋导流槽、脉冲反吹腔体及自适应节流阀三部分核心组件构成。

螺旋导流槽将传统等螺距改为变螺距设计：前段螺距较小以增强切屑初期输送推力，后段螺距逐渐增大以降低出口堆积密度。其横截面采用梯形而非矩形，侧壁倾斜角五至八度，使切屑与槽壁由面接触转为线接触，摩擦系数降低约百分之十五。

脉冲反吹腔体集成于刀具夹头内部并与主轴中心孔连通。主轴旋转产生的离心力压缩腔内空气，形成周期性压力波动；当压力达到预设阈值时，腔体出口的单向阀瞬间开启，释放指向切削区域的脉冲式反吹气流。该气流方向与切屑排出方向相反，可将堵塞在槽根部的切屑团反向吹离后借助正向输送力重新排出。

自适应节流阀位于反吹腔体进气端，根据切削负载自动调节进气孔径：负载小时开度减小、反吹频率降低以节能；负载增大或出现堵塞征兆时开度增大、反吹频率升高以增强清屑能力。

3.2 气固两相流动的力学模型

为定量分析自洁式结构的排屑效果，建立切屑在螺旋槽中的运动微分方程。将切屑简化为球形颗粒，其沿槽向运动的主要驱动力为离心力的轴向分量与反吹气流的曳力。离心力轴向分量取决于切屑质量、主轴角速度及螺旋升角；反吹气流曳力由斯托克斯公式描述，与气流速度、切屑直径及空气黏度相关。

切屑所受阻力主要包括槽壁摩擦力与切屑间的碰撞阻力，其中槽壁摩擦力与离心力径向分量成正比。当驱动力合力大于阻力合力时切屑加速运动，反之则减速直至停滞。自洁式结构通过两种机制打破停滞：变螺距设计使螺旋升角沿槽向变化，改变离心力轴向分量分布，避免切屑在固定位置滞留；脉冲反吹在极短时间内施加反向曳力，为停滞切屑提供初始扰动以打破静摩擦平衡。

理论推导表明，最优反吹频率与主轴转速存在耦合关系。设主轴转速为转每分钟，建议反吹频率取转速除以六十后再乘以零点二至零点五的系数。该频率范围既可保证每个旋转周期内至少有一次反吹扰动，又避免频率过高干扰主切削过程。

3.3 自清洁机制的自适应性

自洁式结构的自适应特征体现在对切屑形态变化的自动响应。当切削产生短碎状切屑时，这些切屑容易通过螺旋槽的梯形截面顺利排出，此时反吹腔体内的压力累积速度较慢，节流阀保持小开度，反吹频率较低。当切削产生长卷曲切屑时，切屑在螺旋槽内的阻力显著增大，导致主轴扭矩波动幅度增加，这一波动通过机械传递使节流阀的敏感元件感知到负载变化，进而增大进气开度，提高反吹频率和强度。这种机械式反馈机制无需电子传感器和控制电路，可靠性高且响应速度快，特别适用于手持式电动工具的恶劣工况环境。

4 关键工艺参数的确定与优化

4.1 螺旋导流槽的几何参数设计

螺旋导流槽的几何参数包括螺旋升角、槽宽、槽深及变螺距系数。通过理论分析与试验验证，确定了适用于金属切削电动工具的最优参数区间。

螺旋升角在八度至十五度之间时，切屑的轴向输送效率与径向抛出能力取得较好平衡。升角过小则轴向推力不足，排屑缓慢；升角过大则径向分力增大，切屑容易被甩向孔壁而非沿槽向排出。对于直径六毫米至十二毫米的常用钻头，推荐螺旋升角取十度至十二度。

变螺距设计以前段螺距与后段螺距之比作为表征参数，推荐比值介于零点六至零点八之间。以前段螺距六毫米、后段螺距九毫米为例，切屑在排出的最后三分之一行程中获得加速，有效减少了出口处的堆积概率。槽宽应不小于最大预期切屑宽度的两倍，通常取刀具直径的百分之二十五至百分之三十五。

槽深则影响容屑容积，深槽容屑量大但会削弱刀具芯部强度，推荐槽深与刀具直径之比为百分之十五至百分之二十。

4.2 脉冲反吹参数的匹配关系

脉冲反吹强度由腔体容积、单向阀开启压力及节流阀孔径共同决定。经试验标定，对于五百瓦至一千五百瓦手持式电钻，反吹腔体容积以三至八立方厘米为宜：过小则气量不足，过大影响结构紧凑性。单向阀开启压力对应负载扭矩设定为额定扭矩的百分之六十五，因为实测表明扭矩达到额定值百分之六十至七十时堵塞征兆出现。此设定下正常切削几乎不触发反吹，仅在临近堵塞时启动，实现按需节能。节流阀初始开度为全开状态的百分之三十，当主轴电流连续三秒超过额定电流百分之八十时，节流阀于零点五秒内逐步开至全开，反吹频率从每分钟约十次提升至四十次以上。

4.3 与不同工件材料的适配策略

针对常用金属材料的切削特性，提出了差异化的工艺参数配置建议。对于铝合金等黏性较大、切屑容易粘连的材料，建议采用较大螺旋升角及较高反吹频率。螺旋升角取十二度至十四度，反吹频率设定为每分钟三十至五十次。对于铸铁等脆性材料，切屑呈粉末状或碎粒状，主要堵塞风险在于粉末在容屑槽内压实结块。针对这种情况，应将反吹脉冲强度提高而频率降低，即增大单向阀开启压力阈值，使每次反吹具有更强的冲击力来破除压实层。

对于不锈钢等难加工材料，切屑既有一定的韧性又容易产生加工硬化，堵塞模式兼有缠绕和压实两种特征。建议采用中等螺旋升角十度至十二度，并启用连续微脉冲模式，即反吹频率提高到每分钟六十次以上但每次喷气量减小，形成持续的微弱扰动，阻止切屑在槽壁上形成稳定附着。

5 工艺改进的实施与性能验证

5.1 样机制造与测试方案

根据上述设计参数，制作了适配某型号六百瓦手电钻的自洁式防堵屑夹头样机。样机采用铝合金壳体，内部集成反吹腔体和不锈钢单向阀。螺旋导流槽通过电火花线切割加工在夹头内壁成型，槽型尺寸精度控制在正负零点零五毫米以内。

测试方案选用三种典型工件材料：A3钢、6061铝合金及304不锈钢。每种材料加工一百个孔，孔深设定为刀具直径的五倍和十倍两个级别，共计六百个测试样本。对比组为未改装的原机，采用相同切削参数。记录指标包括：排屑顺畅度采用目视结合内窥镜判断堵塞次数；加工后孔径偏差采用内径千分表测量；刀具磨损量采用工具显微镜测量后刀面磨损带宽度。

5.2 排屑效率与堵塞率对比

测试数据表明，自洁式防堵屑结构在各工况下均显著改善排屑效果。A3钢十倍径深孔加工中，原机组加工至第三十孔

时开始频繁堵塞,累计四十二次,平均每两孔堵塞一次;改进机组加工一百孔仅发生九次堵塞,其中七次轻微堵塞由反吹脉冲自动解除,无需停机。堵塞故障率从百分之四十二降至百分之九,降幅达百分之七十八点六。铝合金加工中,原机组因切屑缠绕导致中断清理二十三次,改进机组变螺距设计将切屑分割为小于五毫米的短段,仅发生三次轻微缠绕且自行脱落。304不锈钢加工中,原机组因堵塞导致钻头断裂四次,改进机组无一例断裂。综合三种材料测试结果,自洁式结构平均排屑效率提升百分之三十二,堵塞故障率降至原水平的百分之二十五。

5.3 对刀具寿命与加工质量的影响

刀具寿命评估以钻头后刀面磨损带宽度达到零点三毫米作为失效判据。在加工 A3 钢孔深五倍径条件下,原机组钻头平均寿命为一百二十个孔,改进机组提升至一百六十八个孔,寿命延长百分之四十。在铝合金加工中,寿命从二百个孔延长至二百八十个孔,提升幅度相同。分析认为,刀具寿命延长的根本原因在于切屑及时排出减少了二次切削和磨粒磨损,同时反吹脉冲带来的间歇性冷却效应使切削区温度峰值降低约三十摄氏度至五十摄氏度。

加工质量方面,改进机组加工的一百个 A3 钢试件的孔径偏差标准差为十二微米,原机组为二十一微米。孔壁表面粗糙度平均值从原机的 Ra 3.2 微米降低至 Ra 1.9 微米。这是因为切屑的顺畅排出避免了已加工表面被切屑划伤,自洁式结构间接提高了加工精度。

5.4 能耗与热平衡分析

能耗测试采用功率分析仪记录加工单个孔的总电能消耗。原机组加工一个 A3 钢十倍径深孔平均消耗四千八百焦耳,改进机组消耗三千九百焦耳,节能百分之十八点七。节能的来源

主要有两方面:堵塞导致的空转和反复退刀清屑被消除,以及切削扭矩的降低。扭矩监测数据显示,改进机组的平均切削扭矩比原机组低百分之十二至百分之十五,这是由于切屑不会在容屑槽内形成额外的挤压阻力。

热平衡方面,改进机组连续加工五十个孔后,机壳表面温度稳定在五十八摄氏度,原机组在同样条件下达到七十一摄氏度。较低的工作温度有利于延长电机绝缘寿命和轴承润滑脂的使用周期。

6 结论

本文针对金属切削电动工具的切屑堵塞问题,提出自洁式防堵屑结构并完成理论分析与实验验证,得出以下结论。

第一,堵塞本质是驱动力与阻力失衡,传统结构难以应对。自洁式结构通过螺旋导流槽、脉冲反吹腔体及自适应节流阀协同,建立主被动结合的复合排屑机制。

第二,最优参数为螺旋升角十至十二度,前后段螺距比零点六至零点八,槽宽为刀具直径的百分之二十五至三十五;反吹腔体容积三至八立方厘米,单向阀开启压力对应额定扭矩的百分之六十五。

第三,应用效果显著:排屑效率提升百分之三十二,堵塞故障率降至原四分之一,刀具寿命延长约百分之四十,单孔能耗降低百分之十八点七,表面粗糙度从 Ra 3.2 微米改善至 Ra 1.9 微米。

第四,该结构利用自身旋转动能驱动,无需外部能源,机械反馈机制适应恶劣环境。

本文为电动工具防堵设计提供了可量化的工艺方案,后续可拓展至自动化加工单元及多材料参数库建设。

参考文献:

- [1] 罗恒,赵为鑫,金宗毅,等.硅铝合金缸盖深孔钻削技术[J].金属加工(冷加工),2022,(11):61-64.
- [2] 冯亚洲,黄帅澎,刘雁蜀,等.TA15 钛合金深孔钻削试验研究[J].制造技术与机床,2022,(2):39-42.
- [3] 韩晓兰,刘战锋.大孔径钛合金管深孔套料钻削技术及应用[J].重型机械,2022,(6):48-52+58.
- [4] 刘安南,刘战强,蔡士祥,等.切削加工车削刀具断屑装置及技术研究综述[J].机械工程学报,2024,60(7):334-349.
- [5] 季业益,陆宝山,李强伟.一种考虑排屑力影响的钻削力解析模型[J].机械设计,2024,41(12):102-109.