

基于削边机刀具寿命的高速切削参数优化分析



王磊^{1,2,3,*}, 李珂¹, 洪刚¹

¹鲁控环保有限公司, 山东济南 250000

²阜宁协鑫集成科技有限公司, 江苏阜宁 224400

³句容协鑫集成科技有限公司, 江苏句容 212400

摘要: 近年来以高切削速度、小进给量、高切削精度为特征的高速切削技术迅猛发展。高速切削技术通过优化切削参数达到提高切削质量、降低成本、提升生产稳定性。实际生产过程中, 影响最终切削质量的因素多且因素之间并非完全独立, 难以选择出最佳的工艺参数组合。通过采用不同工艺参数组合实验利用田口分析来确定最佳参数比。通过削边机不同切削参数实验组合, 获得刀具磨损、切削质量、切屑长度数据; 实验数据通过田口分析、模糊控制明确切削速度、进给量、切削深度等切削参数对刀具寿命和质量的影响规律; 在优化刀具材质、改变切削工艺参数、刀具涂层等后, 在车间生产过程中进行试验分析, 获得最佳组合。实现削边机刀具使用寿命显著提高, 作业效率得到有效改善, 同时有效降低了企业成本, 生产连续性得到保障。

关键词: 高速切削; 控制因子; 刀具寿命; 田口设计

DOI: [10.57237/j.mse.2022.01.001](https://doi.org/10.57237/j.mse.2022.01.001)

Optimization Analysis of High Speed Cutting Parameters Based on Tool Life of Edge Cutting Machine

Wang Lei^{1,2,3}, Li Ke¹, Hong Gang¹

¹Lukong Environmental Protection Co., Ltd., Jinan 250000, China

²Funing GCL System Integration Technology Co., Ltd., Funing 224400, China

³Jurong GCL System Integration Technology Co., Ltd., Jurong 212400, China

Abstract: In recent years, high-speed cutting technology characterized by high cutting speed, small feed rate and high cutting accuracy has developed rapidly. High speed cutting technology can improve cutting quality, reduce cost and improve production stability by optimizing cutting parameters. In the actual production process, there are many factors affecting the final cutting quality and the factors are not completely independent, so it is difficult to select the best

基金项目: 2022 年度盐城市政府社会科学基金项目 (22skA12, 22skA11);

2021 年江苏省盐城市自然科学软课题基金项目 (yckxrkt2021-1);

2022 年江苏省镇江市社科联社科应用研究基金项目 (2022YBL048).

*通信作者: 王磊, 15951463654@163.com

收稿日期: 2022-08-22; 接受日期: 2022-09-29; 在线出版日期: 2022-12-01

<http://www.mechscieng.com>

combination of process parameters. The optimal parameter ratio was determined by using Taguchi analysis through experiments with different combinations of process parameters. The data of tool wear, cutting quality and chip length were obtained through the experimental combination of different cutting parameters; Through Taguchi analysis and fuzzy control, the influence of cutting parameters such as cutting speed, feed rate and cutting depth on the life and quality of the cutting tool is clarified; After optimizing the material of the tool, changing the cutting process parameters and the coating of the tool, the test analysis is carried out in the workshop production process to obtain the best combination. The service life of the edge cutting machine tool is significantly improved, the operation efficiency is effectively improved, the enterprise cost is effectively reduced, and the production continuity is guaranteed.

Keywords: High Speed Cutting; Control Factor; Tool Life; Taguchi Design

1 引言

高速切削技术是以高切削速度、快进给、低切削深度为特征的一种加工技术。高切削深度与大进给量保证同等时间内前者切削量更大, 加工效率更高、小切削深度保证切削过程中切削力更低, 切削面表面粗糙度更低[1, 2]。关于高速切削过程中刀具寿命研究集中于传统机加工行业, 通过研究相关作业过程改善刀具材料, 提高刀具寿命[3-5]。随着碳中和政策的公布, 光伏产业作为清洁能源支柱产业, 各厂商出货需求大幅上升, 作为光伏产业下游——组件端必须对各工序优化, 降低作业时间、提高生产质量, 提升产量。

削边机切削过程中的质量把关主要通过调节切削参数中的切削速度、进给量、切削深度[6-8]。通过不同工艺参数组合, 通过对刀具磨损、切削质量、切屑长度分析, 明晰各切削参数对组件切削质量和质量影响规律。

2 影响削边机刀具寿命的因素

机加工行业刀具材质、切削参数、刀具涂层成分是切削刀具寿命的主要影响因素。而在光伏组件加工中, 削边刀刀具选择对刀具寿命的影响因素有: 削边刀刀具材质、刀具涂层、切削深度、切削速度以及进给量。这里将影响刀具寿命和削边质量的因素分为两大类。

(1) 控制因子

控制因子是指削边作业过程中可以调节的相关参数, 通过这些参数的调节, 能对刀具寿命和切削质量造成影响。因此控制因子包括: 削边刀刀具材质、切削速度、进给量、切削深度。

(2) 噪声因子

噪声因子是指在影响刀具寿命和切削质量因素中

无法控制或者控制成本过高的因素。因此噪声因子例如: 刀架安装设计方式、刀具与刀架安装方式。

2.1 控制因子——削边刀刀具材质

在金属高速切削过程中, 高速切削刀具必须满足以下要求。

表 1 金属高速切削刀具材料要求[4]

| 要求 | 具体物化标准 |
|------|--------------------------------------------|
| 高硬度 | 硬度高于被加工件, 一般要求 $HRC > 55$ |
| 红硬性 | 高温下保持高硬度, 一般要求 500°C 不发生形变 |
| 高韧性 | 抵抗冲击形变, 满足加工手册杨氏模量要求 |
| 化学惰性 | 不与 Fe 组元素发生化学反应 |

常见的金属高速切削刀具主要分为 4 种。

表 2 常用高速切削刀具及其适用范围

| 种类 | 适用范围 |
|-----------|-----------------|
| 金刚石 | 超精密加工领域 |
| 立方氮化硼 | 黑色金属加工领域 |
| 陶瓷 | 铸造加工 |
| TiC 基硬质合金 | 用于加工碳钢与不锈钢和可锻铸铁 |

光伏组件削边作业过程中, 切削对象为层压工序后超出玻璃尺寸的 EVA 胶膜 (Ethylene Vinyl Acetate 即乙烯、乙烯基、醋酸盐胶膜) 和背板。参照 EVA 胶膜和背板相关物理特征, 光伏级别 EVA 采用的是 VA 含量在 28%-33% 的共聚物, 杨氏模量约在 4.7-6 的范围内、而背板材料的杨氏模量在 3-5 的范围内, 都远低于金属的杨氏模量。

因此实际光伏组件削边作业过程中有异于传统机加工切削, 被切削材料杨氏模量远低于金属材料。需要根据工艺要求选取合适的刀具材料。

2.2 控制因子——切削速度

在金属切削过程中，存在以下公式：

刀具耐用度（刀具寿命）：指一把刃磨好的新刀从投入使用到磨钝标准所经历的切削时间。一般用 T 来表示。

根据金属刀具耐用度方程：

$$T = \frac{C_t}{V_c^X f^Y a_p^Z} (X > Y > Z)$$

其中 C_t 是与工件材料、刀具材料和切削速度相关的常数、 V_c 为切削速度、 f 为进给量、 a_p 为切削深度。X、Y、Z 皆为常数。由此可以得出结论：切削速度对刀具寿命影响最大，其次是进给量，切削深度对刀具寿命影响因素最小[9]。

切削速度 V_c 是指刀具切削刃上的某一点相对于待加工表面在主运动方向上的瞬时速度。根据刀具耐用度方程可知，切削速度 V_c 对刀具寿命影响很大，选择一个合适的切削速度区间尤为重要。

2.3 控制因子——进给量

进给量 f 的定义：刀具在工件进给运动方向上相对

工件的位移量。进给量与刀具寿命成反比关系。此外进给量对削边过程中表面粗糙度影响尤为重要。粗车与精车最大的不同就是进给量的选择，粗车以大进给量为准，减少削边时间、而精车以小进给量为准，降低被削工件表面粗糙度。进给量的合理选择不仅决定了切削时间，也对削边效果有所影响。

2.4 控制因子——切削深度

切削深度 a_p 是指切削工件时，已加工表面和未加工表面之间的垂直距离。表征每次刀具切入工件的深度。切削深度的选择决定了走刀次数与加工效率。

切削工艺参数之间相互影响和制约，单独考虑其中某一种因素对刀具寿命和质量是不合理的，实际加工中综合考量要素之间的关系，根据重点项目选择合适的参数组合，依此才能获得合适的加工效果。

2.5 噪声因子——刀具涂层

涂层技术是以单一高强度和韧性材料为底材，在底材基体上涂上一层耐高温和耐磨损的材料[11]。利用涂层抗氧化性特性和良好的传热性，在切削过程中既能降低刀具磨损，也能传递转化的热能。机加工行业里常用涂层材料见下表：

表 3 常用刀具涂层适用范围 [4]

| | 涂层 | 推荐应用范围 | 备注 |
|------|-------------------------------------------------------|------------|----------|
| 通用涂层 | PVD-TiN | 加工各种刚 | 适用于高质量丝锥 |
| | CVD-TiC/TiCN/TiN | 加工各种刚 | 低中速加工 |
| | CVD-TiCN/TiN/-TiC/Al ₂ O ₃ /TiN | 加工刚的首选刀具 | 高耐磨性和韧性 |
| | CVD-TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN | 加工各种刚 | 可用来加工铸铁 |
| | CVD/Al ₂ O ₃ -Ti(N,B) | 高速车削碳钢和不锈钢 | 抗氧化和粘接磨损 |
| | CVD-TiCN/TiC/Al ₂ O ₃ | 加工不锈钢 | 不易形成积屑瘤 |

涂层技术在机械加工行业里应用广泛，但考虑到太阳能光伏组件削边过程，EVA 切削难度与切削时间都远低于传统金属加工、且涂层刀具成本高于普通刀具。因此运用涂层刀具必要性较低，暂将涂层列为噪声因子。

3 实验设计

实验目的：通过实验确定各控制因子的排秩顺序、确定优化后的切削工艺参数组合、优化组合参数效果验证。

选用田口正交表设计实验是因为：(1)实验次数少；(2)利用正交表实验所得到的结论在整个实验范围内成

立；(3)具有良好的再现性；(4)分析相对简单。

削边刀刀具材质的选择根据加工经验，材料备选为合金工具钢、碳素工具钢、高速钢。

切削速度区间选取为高速切削区间，利用高速切削优点提高生产效率，速度区间分为 60~80、80~100、100~120m/min 范围内。

进给量的选择 0.10~0.20mm/r 范围内，此项主要根据加工经验。

切削深度的选择决定了走刀次数，营口金辰削边机采用双程单次削边作业，再考虑到背板、EVA、玻璃厚度决定削边深度。将切削深度区间选定为 0.5~2.0mm 范围之内。

将以上数据列入田口统计表, 得到下表:

表 4 田口实验正交表设计

| 削边刀刀具材质 | 切削速度 (m/min) | 进给量 (mm/r) | 切削深度 (mm) |
|---------|-----------------|---------------|--------------|
| 高速钢 | 80 | 0.10 | 0.50 |
| 高速钢 | 100 | 0.15 | 1.00 |
| 高速钢 | 120 | 0.20 | 2.00 |
| 合金工具钢 | 80 | 0.10 | 0.50 |
| 合金工具钢 | 100 | 0.15 | 1.00 |
| 合金工具钢 | 120 | 0.20 | 2.00 |
| 碳素工具钢 | 80 | 0.10 | 0.50 |
| 碳素工具钢 | 100 | 0.15 | 1.00 |
| 碳素工具钢 | 120 | 0.20 | 2.00 |

依据上述实验条件进行试验, 记录相关试验数据。输出结果项有: 切屑长度、切削面表面粗糙度、爆件次数。数据经过模糊分析处理。

实验输出结果以切削质量为主控项, 以刀具切削寿命和切削长度为一般项, 主控项目对结果具有一票否决效果, 严控削件质量, 减少爆件; 在满足切削质量的前提下, 通过对比切削次数对比切削寿命,

表 5 削边刀刀次因素排秩表

| 水平 | 削边刀刀具材质 | 切削速度 | 进给量 | 切削深度 |
|-------|---------|------|------|------|
| 1 | 1877 | 1857 | 1760 | 1773 |
| 2 | 1767 | 1757 | 1747 | 1767 |
| 3 | 1633 | 1663 | 1770 | 1737 |
| Delta | 243 | 193 | 23 | 37 |
| 排秩 | 1 | 2 | 4 | 3 |

根据相关实验结果, 结合田口理论分析, 影响刀具寿命因素最大的是刀具材质; 其次是切削速度; 然后是切削深度; 最后是进给量。所以关于刀具优化流程为, 更换高性能刀具材料, 然后选取合适的切削速度, 切削速度的设置可以选取在合理的范围之内。最后根据层压工艺要求和背板以及 EVA 参数选择进给量以及切削深度。

4 优化过程

最优方案的设计一般根据实验中最有水平的组合, 根据实验数据选取每列中 K_i 值数值最大的相应水平为最优水平。故可得出最佳组合为:

因素刀具材质中: $K_1=5630$ 最大, 所以最优组合为水平 1, 即高速钢。

因素切削速度中: $K_1=5570$ 最大, 所以最优组合为水平 1, 即速度选为 80-100m/min 范围内。

因素进给量中: $K_2=5450$ 最大, 所以最优组合为水平 2, 即进给量选为 0.15-0.20mm/r。

因素切削深度中: $K_3=5320$ 最大, 所以最优组合为水平 1, 即切削深度选为 0.25-0.5mm 范围内。

因此在提高削边机刀具寿命最优解为: 高速钢、切削速度定为 80-100m/min 范围内、进给量定为 0.15-0.2mm/r 范围内、切削深度为 0.25-0.5mm 范围内。

4.1 刀具材质优化

削边刀刀具材质选取为高速钢中的 SKH-51[10]。由于 SKH-51 满足实际削边作业中的性能要求, 且具备一定的韧性, 有效提高刀具使用寿命。

表 6 高速钢 SKH-51 主要成分

| 元素 | 含量/% | 元素 | 含量/% |
|----|------|----|------|
| C | 0.85 | W | 5.8 |
| Mn | 0.45 | V | 1.8 |
| Cr | 4 | Mo | 4.8 |

表 7 高速钢 SKH-51 主要物性

| 类别 | 韧性高速钢, 韧性高, 切削性能优良 |
|------|-------------------------|
| 热稳定性 | 600 ℃ 高温下不易软化, 具备良好的红硬性 |
| 耐磨性 | 耐磨性比高铬高碳钢高 2 倍 |
| 硬度 | >60HRC |

削边机刀具常见磨损主要为: 后刀面磨损以及微崩刀以及边界磨损[10]。采用高速钢 SKH-51 不仅因为于 SKH-51 具备红硬性, 能降低刀面月牙洼磨损; 也因为韧性高于普通碳钢, 一定范围内减小微崩刀产生的概率。

削边机刀具形状选择主要依据机构运行方式及安装方式。刀具设计采取新型专利方式, 刀片上端设置导槽, 下端设置 V 字形开口[13-16]。

4.2 刀具涂层选择

涂层刀具抗氧化强, 且抗粘结性好; 并且涂层刀具的摩擦系数极低, 能够有效减少切削能的产生, 降低切削温度, 提高刀具切削寿命。关于刀具涂层的选择, 拟定为选用 TiCN 涂层(氮碳化钛涂层)刀具[4, 5]。

4.3 切削工艺参数调整

切削工艺参数的调整有切削速度、进给量、切削深度。考虑削边作业过程刀具硬度与 EVA 和背板硬度、单次切削时间短, 所以刀具与光伏组件材料不会产生

剧烈的摩擦，摩擦能远小于剪切能。所以热能中大部分由剪切能转化而来。因此参数优化思路是调整切削参数，降低切削能，减少产生的热量。

分析切削能与相关切削参数关系总体趋势[6]：当切削速度处于 60-90m/min 阶段时，随着切削速度的提升，剪切能和摩擦能呈现波动下降的趋势、而当切削速度处于 90-120m/min 阶段内，剪切能与摩擦能呈现波动上升趋势。结合刀具磨损情况与安全性，切削速度设置在 80-100m/min 区间内。

削边作业中组件订单版型、单双玻、背板与 EVA 材料都会导致切削深度的变化。参照刀具寿命与切削深度关系图[11]，将切削深度合理化区间定在 0.25-0.5mm 范围之内。切削深度略大于工艺参数，确保作业过程中能够完成对背板和 EVA 材料顺利切削。

进给量调节需要根据组件版型、削边机尺寸、相对位置来综合比对[12]。任一参数的变化都会导致改变削边质量。以金辰削边机为例，通过调节削边气缸行程改变进给量。难以得出统一性措施。

5 结论

本文主要关注削边机作业过程中对刀具寿命的影响因素，通过田口实验结合金属切削理论，通过确定影响因子来明确各影响因素的比重，提出对刀具寿命优化建议。通过优化刀具材质、改变切削工艺参数、而关于刀具涂层可拟用 TiCN 涂层。依据相关实验数据应用产线，以此改善削边质量，降低不良概率。

参考文献

- [1] 艾兴. 高速切削加工技术[M]. 北京. 国防工业出版社. 2003.
- [2] 汤志年. 高速切削加工在机械制造中的应用[J]. 内燃机与配件. 2021. (10): 102-103.
- [3] 祁志旭, 陈兴媚. 钛合金切削加工技术研究进展 [J]. 材料研究与应用. 2021, 15 (01): 71-76.
- [4] 王兵, 刘战强, 梁晓亮等. 钛合金高质高效切削加工刀具技术 [J]. 金属加工(冷加工). 2022. (03): 1-5+13.

- [5] 沈宇峰, 许爱军. 高速切削技术的研究与发展 [J]. 新技术新工艺. 2022. (02): 5-9.
- [6] 占刚. 切削参数对切削能影响实验研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术. 2017. (07): 146-148+151.
- [7] 淡书桥. 高速切削刀具在数控加工中的应用 [J]. 河北农机. 2020. (07): 45.
- [8] 阙焱彬. 基于田口法和主成分分析法的高速铣削 316L 不锈钢的参数优化 [J]. 机床与液压. 2016. 44 (04): 11-13.
- [9] 张幼桢. 金属切削理论 [M]. 北京. 航空工业出版社. 1988.
- [10] 肖诗纲. 刀具材料及其合理选择 [M]. 北京. 机械工业出版社. 1990.
- [11] 程政文.PVD 硬质合金涂层刀具切削和摩擦学性能研究 [D]. 武汉理工大学. 硕士论文. 2012.
- [12] 王奔. 不同切削距离下硬质合金刀具加工 GH4169 的切削性能研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术. 2019. 7. (7): 119-121.
- [13] 李军. 一种光伏组件自动削边机削边刀具 [P]. 中国专利 CN205572488U. 2016. (9).
- [14] 胡伟楠. 钛合金 TC4 高速切削加工性试验研究 [D]. 沈阳理工大学, 硕士论文, 2020.
- [15] 沙智华, 袁琳, 刘宇. 挤压切削加工工艺参数的多目标优化 [J]. 机床与液压, 2021. 49 (19): 10-14.
- [16] 葛传志, 朱留宪, 杨林嵩. TC4 圆弧形槽铣削刀具的研发设计及试验研究 [J]. 工具技术, 2022. 56 (08): 49-51.

作者简介

王磊

1998 年生，江苏淮安人，硕士。主要从事工业工程与智能制造等工作。

E-mail: 15951463654@163.com