

运载器排焰口的自动铣切工艺研究

张秀艳, 王树华, 李哲, 于炳涛, 杨华飞, 景迪, 王洋*

中国运载火箭技术研究院, 首都航天机械有限公司, 北京

收稿日期: 2023年4月13日; 录用日期: 2023年6月8日; 发布日期: 2023年6月14日

摘要

针对传统手工制运载器排焰口精度差、效率低、工人劳动强度大等问题, 借用自动钻铆设备, 提出自动铣削窗口的方式, 突破了基于线激光校准的桁条高精度定位技术、粗铣留余量-精铣角度补偿法技术和基于程序嵌套的快速编程技术, 实现了排焰口的自动铣切, 并与手工铣切进行了对比, 自动铣切效率高、精度高、质量一致性好。

关键词

排焰口, 自动铣切, 角度补偿

Research on the Automatic Milling Technology of Rocket Flame Outlet

Xiuyan Zhang, Shuhua Wang, Zhe Li, Bingtao Yu, Huafei Yang, Di Jing, Yang Wang*

Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing

Received: Apr. 13th, 2023; accepted: Jun. 8th, 2023; published: Jun. 14th, 2023

Abstract

In order to solve the problem of poor accuracy, low efficiency and high labor intensity of rocket flame outlet using traditional manual milling, the automatic milling is proposed by using the automatic riveting equipment. It breaks through the key technology of high precision positioning of stringer using line laser calibration, leaving a margin when rough milling and angle compensation when precision milling, fast programming technique based on program nesting, and realizes the automatic milling of flame outlet hatch. Compared with manual milling, automatic milling has high efficiency, high precision and good quality consistency.

*通讯作者。

文章引用: 张秀艳, 王树华, 李哲, 于炳涛, 杨华飞, 景迪, 王洋. 运载器排焰口的自动铣切工艺研究[J]. 国际航空航天科学, 2023, 11(2): 39-46. DOI: 10.12677/jast.2023.112006

Keywords

Flame Outlet Hatch, Automatic Milling, Angle Compensation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现有的运载器级间分离通常采用热分离方案，级间段上须开排焰口来满足发动机点火的排焰需求，对于蒙皮桁条铆接部段，排焰口设置在相邻桁条和中间框之间，为矩形结构[1]。为保证排焰效果，排焰口数量较多，一个级间段产品上多达上百个排焰口。某产品一二级级间段排焰口位置如图 1 所示，位于级间段靠近下端框处，沿周向进行布置。级间段产品采用壁板方式装配[2]，先在壁板自动钻铆设备上完成壁板的自动钻孔和铆接，再在铆接型架上完成壁板的组装。为保证开口位置的准确性，排焰口通常在蒙皮与桁条铆接完成后再制出。

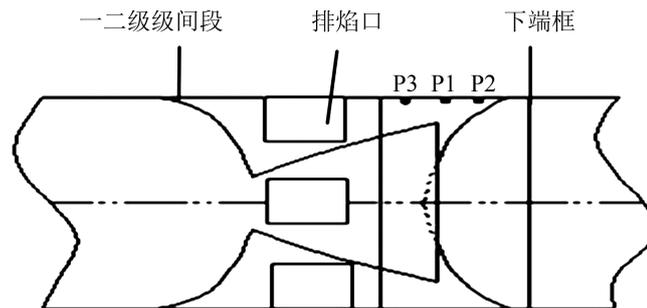


Figure 1. Outlet location map

图 1. 排焰口位置图

排焰口的传统制造方法为手工钻孔后再铣磨，但这种方式存在精度差、效率低、工人劳动强度大等问题，同时壁板结构产品无法采用普通的数控加工设备进行装夹。随着自动钻铆技术的应用，在进行壁板自动铆接后可以利用壁板设备的铆接末端拓展铣切功能，直接进行排焰口自动铣削，无需进行装夹，从而提高加工效率和铣切质量。诸多学者对自动钻铆进行了工艺研究，得出钻孔、铆接最优工艺参数[2] [3]，但尚缺乏对部段状态下铣削窗口的工艺研究，本论文为国内首次利用壁板自动钻铆设备进行在产品壁板状态下进行铣切。目前研究进展为成熟应用阶段，形成了完备的工艺技术。

2. 手工铣切工艺方法

排焰口的传统手工铣切方法如图 2 所示，根据图纸或者安装样板划出排焰口位置线，使用风钻沿排焰口轮廓连续钻孔，使用榔头锤掉排焰口蒙皮，使用风铣刀一点点把排焰口修齐，打磨切口直至符合设计尺寸及光洁度要求。该方式存在以下不足：精度差，尺寸难以保证。操作过程完全靠手工保证，定位精度差，且对人员熟练度要求较高。效率低、劳动强度大。需使用风钻将开排焰口部位轮廓密密麻麻地钻出孔，上百个窗口通常需要 4 名操作者连续工作 3 天才能完成。操作过程中需要高强度的重复性劳动，操作人员极易疲劳。存在损伤产品风险。操作过程人工操作，容易出现工具脱手损伤蒙皮的问题。



Figure 2. Flow chart of traditional production process of drain port
图 2. 排焰口的传统制作工艺流程图

3. 自动铣切工艺方法

3.1. 壁板定位

级间段壁板在壁板自动钻铆设备上的定位如图 3 所示，在自动钻铆设备上完成壁板的自动制孔和铆接后，产品不下架，更换铣刀进行排焰口的铣切。

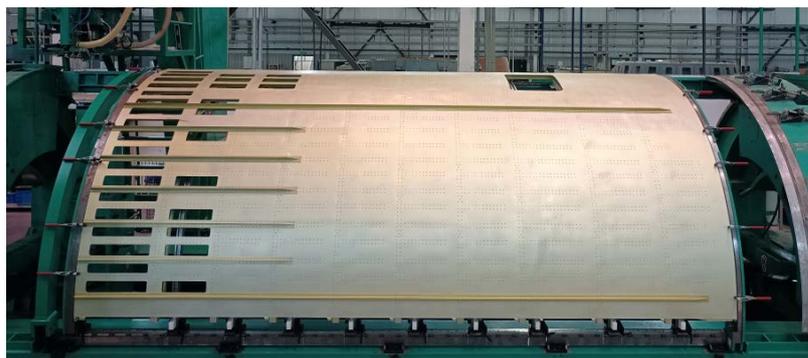


Figure 3. Positioning of inter stage panel on panel automatic drilling and riveting equipment
图 3. 级间段壁板在壁板自动钻铆设备上的定位

产品长达四米，桁条在这个长度上直线精度非常差，而排焰口均位于各个桁条间，若沿着桁条边直线铣切排焰口边缘会伤到桁条或者排焰口距桁条过远。设计要求窗口铣切精度为 ± 1 mm，采用手工铣切时可用样板或人工划线来保证，但自动铣切时，由于桁条定位精度为 ± 1 mm，同时考虑设备本身精度、壁板定位精度等，很难保证窗口铣切精度，因此亟需进行技术攻关。

3.2. 铣切工艺参数研究

影响铣切质量的因素主要有：主轴转速、进给量和刀具半径。主轴转速是铣切的重要工艺参数之一，合理选择设备主轴转速参数不仅能提高加工效率，同时可以减少毛刺产生，保证铣切质量[4]。结合生产经验，初步选择转速 4000 r/min~10,000 r/min 作为试验参数。采用试验件进行铣切工艺参数研究。铣切时切削效率与主轴转速、进给量有关。如果进给速度过大，容易产生毛刺等缺陷，造成铣刀烧蚀、折断；但进给速度过小，铣切效率低下，初步选择进给量 0.03 mm/r~0.08 mm/r。刀具半径影响铣刀径向跳动，进而影响切削性能、铣切质量。初步选择刀具半径 R10。综上，初步确定的铣切试验工艺参数范围如表 1 所示。

Table 1. Product inspection refined management process description

表 1. 产品总检查精细化管理流程描述

项目	刀具半径(°)	主轴转速(r/min)	进给量(mm/r)
参数	R5、R10、R15	4000~10,000	0.03~0.08

针对表所列工艺参数范围按照三个参数水平进行细化，3 项参数运用 $L_9(3^3)$ 正交表设计试验，如表

2 所示(其中 L 代表正交表, 角标 9 代表试验次数, 角标 3 表示因素个数, 3 表示因素的水平数)。

Table 2. Factor level table

表 2. 因素水平表

因素水平	A 刀具半径(°)	B 主轴转速(r/min)	C 进给量(mm/r)
1	R5	4000	0.03
2	R10	6000	0.06
3	R15	10,000	0.08

铣切试验初选方案见表 3 所示, 以铣窗口余料平均毛刺高度作为定性评价指标, 依据试验方案确定的参数组合试验铣切, 重复 10 组, 取均值作为该组试验的最终结果进行分析, 见图 4。

Table 3. Milling test parameter primary scheme

表 3. 铣切试验参数初选方案

试验号	刀具半径(A)	主轴转速(B)	进给量(C)	试验方案
1	R5	1 (4000)	1 (0.03)	A1B1C1
2	R5	2 (6000)	2 (0.06)	A1B2C2
3	R5	3 (10,000)	3 (0.08)	A1B3C3
4	R10	1 (4000)	2 (0.06)	A2B1C2
5	R10	3 (10,000)	3 (0.08)	A2B3C3
6	R10	2 (6000)	1 (0.03)	A2B2C1
7	R15	2 (6000)	1 (0.03)	A3B2C1
8	R15	1 (4000)	3 (0.08)	A3B1C3
9	R15	3 (10,000)	2 (0.06)	A3B3C2

初选铣切试验结果如表 4 所示, 对结果数据采用极差分析法进行分析。根据余料平均毛刺高度结果数据: 对比 K_1^A 、 K_2^A 、 K_3^A , 最优的刀具半径参数为 K_2^A , 且对比 K_1^A 、 K_2^A 之间的差距较小, 更优的主轴转速参数在 A1 与 A2 之间; 对比 K_1^B 、 K_2^B 、 K_3^B , 最优的主轴转速参数为 K_2^B , 且 K_2^B 与 K_3^B 之间的差距较小, 更优的主轴转速参数在 B2 与 B3 之间; 对比 K_1^C 、 K_2^C 、 K_3^C , 最优的进给量参数为 K_1^C , 且 K_1^C 、 K_2^C 差距较小, 更优的进给量参数在 C1 与 C2 之间。综上, 初选试验得出的最优铣切参数为 A2B2C1, 且进一步优选试验的参数选择范围界定为(A1~A2)、(B2~B3)、(C1~C2)。

Table 4. Primary test results and analysis

表 4. 初选试验结果及分析

试验号	刀具半径(A)	主轴转速(B)	进给量(C)	平均毛刺高度
1	R5	1 (4000)	1 (0.03)	0.44
2	R5	2 (6000)	2 (0.06)	0.51
3	R5	3 (10,000)	3 (0.08)	0.54

Continued

4	R10	1 (4000)	2 (0.06)	0.11
5	R10	3 (10,000)	3 (0.08)	0.21
6	R10	2 (6000)	1 (0.03)	0.06
7	R15	2 (6000)	1 (0.03)	0.52
8	R15	1 (4000)	3 (0.08)	0.23
9	R15	3 (10,000)	2 (0.06)	0.34
K1	1.51	1.07	0.73	/
K2	0.34	0.95	0.96	/
K3	1.17	0.96	1.25	/

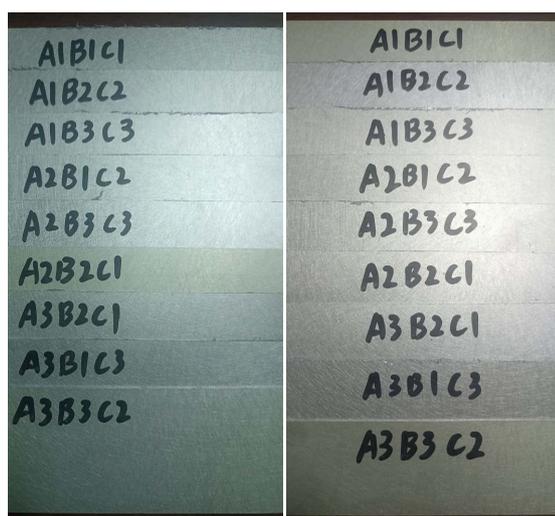


Figure 4. Results of primary test and optimal test
图 4. 初选试验、优选试验结果

根据初选试验结果，在选定的参数范围内再次细化参数水平进行优选试验，具体过程不再赘述，铣切工艺参数试验得出的最佳铣切参数如表 5 所示，依据表 5 的参数进行验证试验，进行排焰口铣切，平均毛刺高度符合要求，无需单独的毛刺清理工序。

Table 5. Milling process parameters
表 5. 铣切工艺参数

项目	刀具半径(°)	主轴转速(r/min)	进给量(mm/r)
参数	R5	8000	0.04

3.3. 基于线激光校准的桁条高精度定位技术

壁板自动钻铆设备自带线激光器，可充分利用线激光定位器来提升桁条定位精度，将线激光器定位于壁板自动铆接设备预装配平台的定位框的轴向方向上，利用线激光器打出的直线与桁条轴线进行对比，保证桁条轴线与线激光线重合，如图 5 所示，通过此方法，桁条定位精度可提升至 ± 0.5 mm。



Figure 5. Line laser positioner calibrates the truss axis diagram
图 5. 线激光定位器校准桁条轴线图

3.4. 粗铣留余量 - 精铣角度补偿法技术

桁条装配精度大幅提高，但依然无法使用数控程序一次铣切到位，为此借助了粗铣加精铣的方法，通过粗铣后测量排焰口左右两侧余量差，在精铣时用主程序来补偿角度，实现排焰口精准自动铣切。

如图 6 所示，图中红色轴线作为主程序的窗口理论中心，同一种窗口使用相同的子程序，但理论中心线与实际窗口中心线往往不重合，所以粗铣子程序的加工范围一般留余量 1 mm~2 mm，通过粗铣后测量两侧余量，将精铣程序主程序轴线做偏心处理，以实现精准铣切。

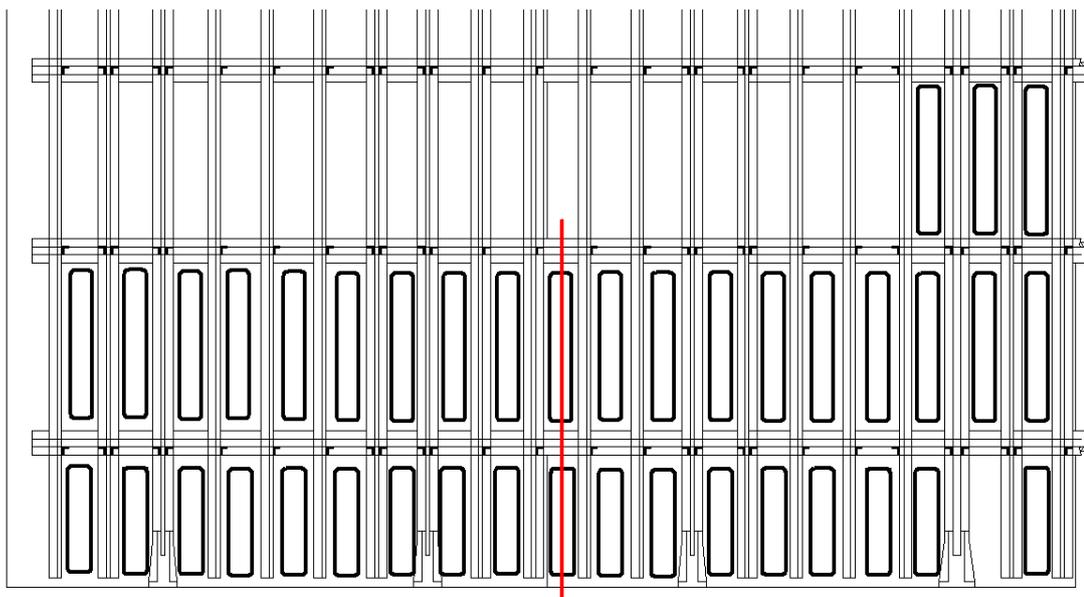


Figure 6. Main program center location
图 6. 主程序中心位置

铣切后的排焰口处蒙皮掉落，容易出现蒙皮飞出伤人、卡停设备等问题，通过分析掉落模式和程序编制的便易性，在每个排焰口两侧各留余量，保证铣切后蒙皮仍丝连于产品，统一拆除，提高了铣切的安全性和效率。

3.5. 基于程序嵌套的快速编程技术

排焰口编程量很大且排焰口拐角程序难以实现,为此借助了程序嵌套的方法,将排焰口分类为若干类型,各自形成子程序,主程序定位各个排焰口角度,同时定制异型铣刀,实现一键铣切。

实例如下:

```
G55
SOFT
FFWON
S8000 M3
M27
G90 G01 A=-1.224 F80
G01 X=4183 F60000
ZZ1002                %根据排焰口中心角度调用子程序
。 。 。
ZZ1002                %子程序走该类型铣切路线
G0 U=-196.135 Z5
G90 G01 Z=-7 F30
G91 G01 X=400 F500
G91 G01 A=1.94 F20
G91 G01 X=-400 F500
G91 G01 A=-1.94 F20
G90 G01 Z=3 F3000
G153 G0 Z0
M17
```

进行关键技术攻关后,排焰口的自动铣切工艺流程如图 7 所示,首先进行桁条轴线激光校准,保证桁条装配精度 ± 0.5 mm,再在壁板自动钻铆设备上自动钻孔和铆接,然后进行粗铣排焰口,根据排焰口窗口两侧余量进行角度补偿,补偿后再精铣排焰口,最后进行排焰口的手工统一拆除。

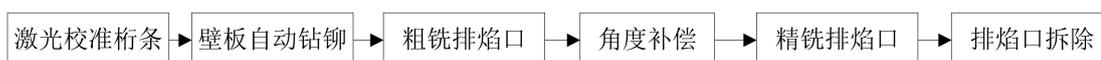


Figure 7. Flow chart of the milling process of the outlet

图 7. 排焰口的铣切工艺流程图

4. 手工铣切与自动铣切结果对比

某型号级间段共 140 个排焰口,将手工铣切与自动铣切进行了对比,结果见表 6。

铣切效率:采用手工铣切需 4 名操作人员用时 3 天完成(工时为 96 小时),采用自动铣切需 1 名操作人员用时 2 天完成(工时为 16 小时)。采用自动铣切效率提高 5 倍。

铣切精度:手工铣切精度 ± 1 mm,自动铣切精度 ± 0.5 mm,优于设计指标要求,且一致性好,杜绝了手工铣切损伤蒙皮的风险。

一次合格率:手工铣切一次合格率 95%,自动铣切一次合格率 100%,避免工人返修造成的费时费力,进一步提升效率和精度。

Table 6. Parameters table of burr free hole making process**表 6.** 无毛刺制孔工艺参数表

对比项	铣切方式	手工铣切	自动铣切
时间(小时)		96	16
铣切精度(mm)		±1	±0.5
一次合格率(%)		95	100

由分析得采用自动铣切效率提高 5 倍、铣切质量一致性好、产品一次铣切合格率高，满足航天产品高质量、高效率、高效益的“三高”发展要求，可推广至所有箭体舱段操作口在部段状态下需铣切的产品。

5. 结束语

本文对运载器排焰口的自动铣切进行了工艺研究，突破了基于线激光校准的桁条高精度定位技术、粗铣留余量 - 精铣角度补偿法技术和基于程序嵌套的快速编程技术，实现了排焰口的自动铣切，并与手工铣切进行了对比，得到如下结论：

- 1) 手工铣切需 96 小时，自动铣切需 16 小时，自动铣切效率提高 5 倍。
- 2) 手工铣切精度±1 mm，自动铣切精度±0.5 mm，自动铣切精度高、质量一致性好。
- 3) 手工铣切一次合格率 95%，自动铣切一次合格率 100%，自动铣切合格率高。

本文的自动铣切方法可推广至所有箭体舱段操作口在部段状态下需铣切的产品。

参考文献

- [1] 北京蓝箭空间科技有限公司. 一种运载器热分离级间段的抗扭转排焰口结构的制作方法[P]. 中国专利, CN10722619B. 2018-05-22.
- [2] 章茂云, 孟令博, 孙立强, 张秀艳, 庄树鹏, 安立辉. 自动钻铆技术在运载火箭壳段产品中的应用分析[J]. 航空制造技术, 2015(7): 72-75+79.
- [3] 章茂云, 孙立强, 金健, 臧建新, 孟令博, 庄树鹏. 运载火箭一级箱间段壁板自动钻铆工艺研究[J]. 航天制造技术, 2014(4): 22-25.
- [4] 武玉玉, 蒋平, 高波, 任一鹏. 级间热分离瞬间高压峰值研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2015(5): 22-25.