

金属-氟塑料复合阀芯 V 形槽工艺改进

郭 叶, 赵 飞

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要: 金属-氟塑料复合密封结构多用于液体火箭发动机阀门中, 金属与氟塑料相接处一般有 V 形槽过渡, 加工金属-氟塑料复合 V 形槽过程容易发生飞溅而出的铁屑损伤氟塑料表面或表面粗糙度差。为解决这一问题, 通过分析金属-氟塑料复合密封结构特点, 总结传统机械加工工艺的缺点, 优化切削路线, 设计刀具参数, 采用有限元仿真技术, 利用三维仿真软件 DEFORM 模拟切削过程, 计算切削过程的平均切削力, 并通过正交试验法, 对模拟结果进行优选。最终从工艺方法、刀具参数、切削参数 3 个方面改进了金属-氟塑料复合 V 形槽加工方法。提出的改进方案解决了金属-氟塑料复合 V 形槽加工过程铁屑飞溅问题, 提升了金属-氟塑料复合阀芯生产合格率, 这套改进方案已应用于多种复合式阀芯生产过程。

关键词: 复合结构; 机械加工; 切削参数; 有限元模拟; 正交试验; 工艺改进

中图分类号: V463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2020)06-0103-06

Study on improvement of V-groove process for metal-fluoroplastic composite valve spool

GUO Ye, ZHAO Fei

(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: The metal-fluoroplastic composite sealing structure is mostly used in valves of liquid rocket engine. Generally, there is a V-shaped groove transition at the junction of metal and fluoroplastic. During processing the metal-fluoroplastic composite V-shaped groove, iron filings splashing out are likely to damage the fluoroplastic surface or cause poor surface roughness. In order to solve this problem, the tool parameters were designed by analyzing the structural characteristics of metal-fluoroplastic composite seal, summarizing the shortcomings of the traditional machining process and optimizing the cutting route. Using the finite element simulation technology, the 3D simulation software DEFORM was used to simulate the cutting process, and the average cutting force of the cutting process was calculated. In addition, the simulation results were optimized with the orthogonal test method. Finally, the processing method of metal-fluoroplastic composite V-groove was improved from three aspects of process method, tool parameters and cutting parameters. The proposed improvement scheme solves the problem of iron filings splashing during the metal-fluoroplastic composite V-groove processing process, and improves the production qualification

收稿日期: 2020-02-21; 修回日期: 2020-05-26

基金项目: 航天先进制造技术研究联合基金(U153710077)

作者简介: 郭叶(1989—), 女, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机阀门制造及装配技术

rate of the metal-fluoroplastic composite valve spool. This improvement scheme has been applied to the production process of various composite valve spools.

Keywords: composite structure; mechanical processing; cutting parameter; finite element simulation; orthogonal test; process improvement

0 引言

复合式阀芯是由金属基体镶嵌非金属密封材料而成^[1],其特点是密封面采用金属-非金属复合密封结构,在航天产品中密封可靠性高,应用范围广,多项阀门采用该结构阀芯保证阀门性能可靠。复合式阀芯的结构主要应用于吹除系统、燃料系统阀门中。

复合式阀芯加工难点之一是金属-非金属复合 V 形槽的加工,以金属-氟塑料复合 V 形槽为例,其加工难点主要包括 2 个方面:①多余物^[2]难以控制:在使用成形刀具加工时,零件加工部位一端是金属材料,一端是氟塑料材料,切削金属端时所形成的铁屑会黏附在塑料端的表面上,形成致命多余物^[3-4]。②加工性能存在较大差异:由于材料特性,非金属面和金属面的加工具有不同的切削性能,切削规律、刀具结构、切削量均存在差异^[5],同样的加工工艺方法得到的切削力不同,因此,需要选用不同的刀具和设置不同的切削参数以保证非金属表面和金属表面的加工精度。

本文采用分层逐点逼近法加工复合 V 形槽,结合优化刀具参数,并通过模拟加工过程,以切削力为评价指标,采用正交试验法优选切削参数等方法改进金属-氟塑料复合 V 形槽工艺技术。

1 金属-氟塑料复合 V 形槽结构和工艺现状

金属-氟塑料复合结构如图 1 所示,金属与氟塑料相接处设置 V 形槽进行过渡,角度为 a 。

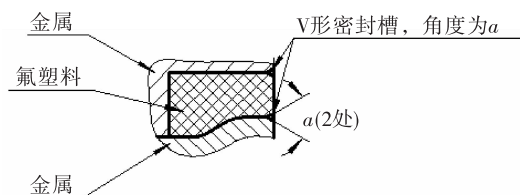


图 1 金属-氟塑料复合 V 形槽 (角度为 a)

Fig. 1 Metal-fluoroplastic compound V-shaped groove (angle is a)

V 形槽一般采用靠模法加工,即选用与加工型面一致的刀具一次加工成型^[6]。这种加工方法的弊端是零件加工部位一端是金属材料,一端是塑料材料,使用成形刀加工,产生的带状铁屑容易将塑料端损伤或是黏附在塑料端的表面上,如图 2 所示。

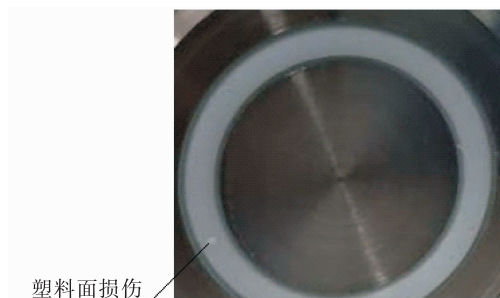


图 2 氟塑料面损伤

Fig. 2 Surface damage of fluoroplastics

2 金属-氟塑料复合 V 形槽加工工艺改进和分析

2.1 金属-氟塑料复合 V 形槽加工方法改进

本文采用分层逐点逼近法进行加工,如图 3 所示,切削路线^[7]如图 4 所示为 $E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J$,在考虑多余物控制的基础上,通过不断调整加工路径和切削参数,控制切屑流向,从塑料面起刀,从金属面退刀,这样可以使毛刺尽可能流向金属层,减少金属多余物流向塑料层进而对产品质量产生影响。

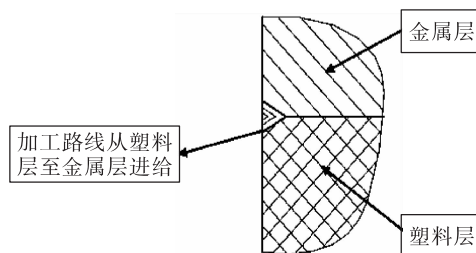


图 3 分层逐点逼近法

Fig. 3 Layered point-by-point approximation

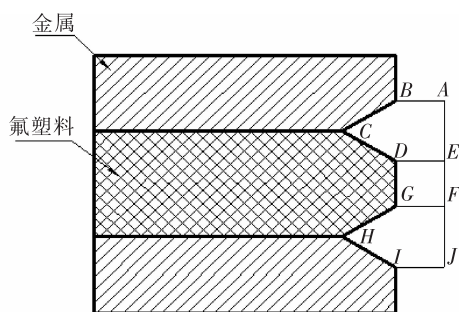


图4 复合V形槽切削路径

Fig. 4 Cutting route of compound V-shaped groove

2.2 金属-氟塑料复合V形槽加工刀具改进

金属-氟塑料复合V形槽虽为2种材料组成,但由于结构限制,在数控加工中需要实现连续加工,中途无法换刀,传统成形刀加工法在加工过程中会产生毛刺等多余物,因此为了避免多余物的产生,选择刃磨后刃口锋利的高速钢尖刀进行加工。

刀尖角角度小于零件要求角度 α 的刀尖角,在进行切削时不会干涉,如图5所示,刀具几何参数如表1所示。



图5 复合V形槽加工刀具

Fig. 5 Machining tool of compound V-shaped groove

表1 刀具几何参数

Tab. 1 Tool geometric parameter

刀尖圆弧 半径/mm	前角 /(°)	后角 /(°)	副后角 /(°)	刀尖角 /(°)
0.1	12	15	15	$\alpha - 10$

刀具前角增大可以有效增加刀具的锋利程度,减少切削热的产生^[8],但前角越大切削刃强度越差^[9],为增加刀具切削刃的强度,选择前角角度为12°。刀具的主后角与副后角的作用是减少刀具后

面和副后面与加工表面的摩擦,但后角与副后角偏大会降低刀具强度,故选择15°的主后角和15°的副后角。

2.3 金属-氟塑料复合V形槽切削参数优化

精密零件表面的加工,对表面粗糙度影响最大的因素是切削热和切削力,而对两者影响最大的切削参数是切削速度和背吃刀量^[10-11]。且加工金属面与非金属面在参数选择上略有差异,金属面加工的难点是尽量控制铁屑的流向,使其不能与非金属密封面接触,因此转速相比非金属表面的加工要低一些,但是不能过低,否则会导致刀具急剧磨损。

切削速度、进给量、背吃刀量是车削加工中的重要工艺参数,通过结合现场设备加工能力、所用刀具类型、零件材料、精密加工理论知识等条件,能够分别确定3种工艺参数的选择范围。V形槽特征尺寸及切削余量与宏观零件相比大幅减小,因此需要确定能够形成连续切屑的最小切削厚度,然后在此基础上确定背吃刀量的参数范围。

以BXG不锈钢为例,材料具有冲击韧性好、强度高优势,广泛应用于各类航天用阀门产品中,故本文将以此种材料为例,采用DEFORM软件通过有限元分析技术进行切削仿真^[12]及加工研究。在有限元中,材料的形变-失效对应着单元弹性变形、塑性变形、损伤开始到单元失效的整个过程^[13]。

切削模拟将采用经典三维斜角切削模型^[14-15],通过DEFORM软件模拟BXG不锈钢切削过程,BXG不锈钢材料的材料本构模型采用Johnson-Cook流动应力模型^[16-17]

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \cdot \left[1 + C \ln \left[\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \right] \right] \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_p - T_0} \right)^m \right) \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 m 、 n 为材料特性参数(参数如表2所示); $\bar{\sigma}$ 为流动应力; T 为变形温度; T_0 为参考温度; T_p 为材料熔点。

通过模拟一组逐渐减小的切削厚度各自所对应的切屑状态最终确定切削厚度的参数选择范围。以转速 $n = 300 \text{ r/min}$,进给量 $f = 0.05 \text{ mm/r}$ 为定量,背吃刀量依次为 $a_p = 0.1$ 、 0.05 、 0.03 、 0.02 mm 进行模拟,模拟结果如图6所示。

表 2 Johnson-Cook 材料方程参数表
Tab. 2 Parameters in Johnson-Cook material equation

参数	数值
初始屈服应力 A/MPa	968.88
硬化模量 B/MPa	567.17
硬化指数 n	0.375
强化参数 C	0.0394
软化指数 m	1.30

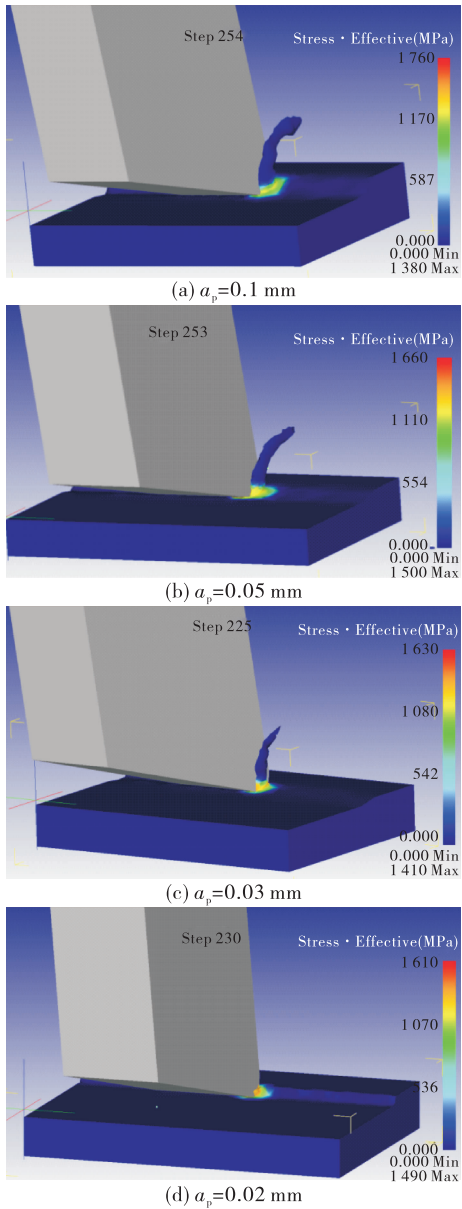


图 6 切削过程仿真

Fig. 6 Simulation of cutting process

如图 6 所示,切削厚度 a_p 在 0.1、0.05、0.03 mm

情况下,被切削材料均能够产生连续的切屑,切削厚度 a_p 为 0.02 mm 时,刀具依然能够对材料进行去除,但无法形成连续性切屑,因此材料已加工表面的表面质量会降低,且飞散的铁屑很容易刮伤或嵌入非金属表面,对非金属密封面造成损伤。为保证金属-氟塑料复合 V 形槽具有较好的机械加工表面质量,加工金属表面吃刀量参数需在大于 0.02 mm 的范围内选择。

采用尖刀进行加工时,为避免铁屑飞溅,需选择较低的进给量和转速,将进给量参数的选择范围确定为 0.01 ~ 0.03 mm/r,转速参数的选择范围确定为 200 ~ 400 r/min。

确定加工方法、刀具参数、切削参数后,还需解决加工过程中高速钢会产生大量的切削热,使非金属材料产生热变形问题,因此加工过程中需添加冷却液降温,而一般的冷却液对非金属材料会产生腐蚀,因此,采用酒精进行冷却,不仅可以带走加工产生的切削热,而且能够对非金属材料进行保护。

3 工艺改进验证

按照改进后的加工方案,通过正交试验原理设计切削模拟方案,选取 9 组试验方案进行切削模拟实验,将背吃刀量 a_p (mm)、进给量 f (mm/r)、转速 n (r/min) 作为试验因素^[18-20],然后对每个因素选取 3 个水平进行模拟,最终评价指标为切削模拟过程中的刀具在 x 、 y 、 z 方向的受力情况。切削模拟选取的因素、水平如表 3 所示,确定的切削模拟方案如表 4 所示。

表 3 切削模拟选取的因素水平表

Tab. 3 Selected factor level of cutting simulation

水平	n /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	a_p /mm	f /($\text{mm} \cdot \text{r}^{-1}$)
1	200 (A1)	0.03 (B1)	0.01 (C1)
2	300 (A2)	0.05 (B2)	0.02 (C2)
3	400 (A3)	0.10 (B3)	0.03 (C3)

通过分析切削模拟所得结果,能够得到使得刀具在 x 、 y 、 z 方向受力均较小的切削加工工艺参数,在此参数下刀具工作过程中受力减小,保证了切削刃和刀具角度的完整性,从而提高了刀具寿命和加

工产品的合格率。

表 4 正交切削模拟方案表

Tab. 4 Scheme of orthogonal cutting simulation			
序号	转速	背吃刀量	进给量
1	A1	B2	C1
2	A1	B1	C2
3	A1	B3	C3
4	A2	B2	C1
5	A2	B1	C2
6	A2	B3	C3
7	A3	B2	C3
8	A3	B1	C1
9	A3	B3	C2

使用表 4 中确定的正交切削模拟方案进行切削模拟,对 x 、 y 、 z 3 个方向的切削力进行记录,如表 5 所示。

表 5 模拟切削力结果

Tab. 5 Simulation results of cutting force			
序号	f_x/N	f_y/N	f_z/N
1	0.45	10.90	1.83
2	0.35	10.80	1.79
3	1.57	20.70	2.77
4	0.51	10.80	1.82
5	0.22	10.90	1.82
6	1.72	21.30	2.80
7	0.70	15.00	2.30
8	0.37	6.70	1.42
9	1.56	17.30	2.42

因上述模拟过程属多指标正交试验情况,即需使刀具在 x 、 y 、 z 3 个方向所受切削力均较小,因此通过综合平衡考虑,对模拟数据进行分析以得出理论最优工艺参数。通过对 3 个指标进行极差分析,结果如表 6 所示。由表 6 可知,试验因素进给量 f 均采用 C1 水平,即 0.01 mm/r 的进给量能够保证切削过程中刀具受力较小,试验因素背吃刀量 a_p 均采用 B1 水平,即 0.03 mm 的背吃刀量能够保证切削过程中刀具受力较小。通过分析极差可知,在 F_x 、 F_y 、 F_z 指标中,背吃刀量 a_p 的极差均大于进给量 f 和转速 n 的极差,进给量的极差均大于转速的极差,因

此证明背吃刀量 a_p 对于指标的影响程度大于进给量 f 和转速 n ,进给量对于指标的影响程度大于转速,故选取背吃刀量 a_p 和背吃刀量的最优水平后再进行转速 n 的最优水平选取。

表 6 极差分析表

Tab. 6 Range analysis table						
评价指标	n 极差	a_p 极差	f 极差	最优工艺参数组合		
f_x	0.26	3.91	2.66	A1	B1	C1
f_y	4.00	30.90	28.60	A3	B1	C1
f_z	0.30	2.96	2.80	A3	B1	C1

因零件回转中心较小,且转速对切削力的影响很小,因此,可以从提高加工效率方面考虑选取 $n = 400\text{ r/min}$ 。

以上为金属部分的切削参数,对于非金属部分,由于切割非金属部分时产生的飞屑为塑料,不会对产品造成损伤,因此可适当增大转速和进给量来提高加工效率,因此,非金属部分切削参数为: $n = 500\text{ r/min}$, $a_p = 0.03\text{ mm}$, $f = 0.03\text{ mm/r}$ 。

按照优选出的最佳切削参数进行实际加工,产品尺寸精度满足公差范围 $\pm 0.1\text{ mm}$,非金属密封面无损伤,表面粗糙度达 Ra1.6,如图 7 所示。

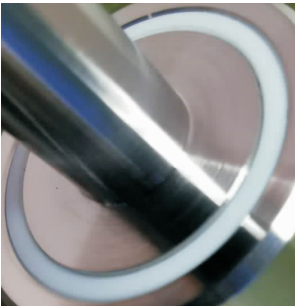


图 7 复合式 V 形槽加工效果

Fig. 7 Processing effect of compound V-shaped groove

目前,本文提出的这套金属-氟塑料复合 V 形槽已应用于液体火箭发动机吹除系统、燃料系统的多种阀门的复合式阀芯加工过程,实现批产应用,并经过飞行考核。

4 结语

针对金属-氟塑料复合 V 形槽的结构特点,本

文提出了一整套完整、系统的加工工艺设计方案思路。通过合理设计金属-氟塑料复合 V 形槽切削路线、优化切削刀具的结构和参数、优化加工过程中影响加工质量的切削参数等工艺过程,确定金属-氟塑料复合 V 形槽加工工艺方法,此方法已推广应用于液体火箭发动机阀门复合式非金属密封结构的精密加工。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] 李文斌, 王道虎, 马飞, 等. 箭体阀门多余物预防与控制[J]. 航天制造技术, 2014(4): 50-52.
- [3] 牛书锋, 张国悦. 液氧/煤油发动机多余物自动检测技术[J]. 火箭推进, 2019, 45(4): 69-73.
- NIU S F, ZHANG G Y. Automatic detection technology of redundancy in LOX/kerosene engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(4): 69-73.
- [4] 王辉, 李护林, 崔超海. 发动机总装多余物控制方法[J]. 航天制造技术, 2003(5): 39-42.
- [5] 蒋丽飞, 肖雅文. 关于提高聚四氟乙烯材料切削加工质量的研究[J]. 电子世界, 2013(24): 241.
- [6] 刘战强. 先进切削加工技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 尹婷. 关于数控金属切削工艺的探析[J]. 现代工业经济和信化, 2017, 7(11): 63-64.
- [8] 赵飞, 黄红耀. 大直径薄壁球形阀芯加工工艺[J]. 火箭推进, 2012, 38(1): 62-67.
- ZHAO F, HUANG H Y. Machining technology of thin-walled spherical valve core with large diameter[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(1): 62-67.
- [9] 杨金发. 航空难加工材料典型零件切削技术研究[J]. 金属加工(冷加工), 2011(17): 6-9.
- [10] 徐鸿翔, 赵保科, 赵飞, 等. 精密球体零件加工工艺的研究与应用[J]. 火箭推进, 2016, 42(5): 88-91.
- XU H X, ZHAO B K, ZHAO F, et al. Research and application of manufacturing technique for precision spherical parts[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2016, 42(5): 88-91.
- [11] 王立新, 张程焱, 俎晓莉, 等. 切削参数对高强铝合金干切削加工表面形貌的影响[J]. 工具技术, 2019, 53(11): 29-33.
- [12] 张世文, 黄永鹤. 仿真技术在机械设计制造中的应用探讨[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(22): 136-137.
- [13] 陶琪. 考虑材料硬度影响的切削机理分析及切削仿真平台开发[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [14] 周怀彪, 徐汝锋, 杨学明, 等. 微细铣削中临界切削参数仿真与试验研究[J]. 制造技术与机床, 2019(12): 101-104.
- [15] 赵康. 基于 ABAQUS 的二维切削仿真网格自适应划分[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [16] 孔虎星, 郭拉凤, 尹晓霞. 基于 ABAQUS 的钛合金切削有限元分析[J]. 机电技术, 2011, 34(4): 22-23.
- [17] 赵娜, 刘二亮, 张慧萍, 等. 金属切削变形常用本构模型研究进展[J]. 工具技术, 2016, 50(1): 3-8.
- [18] 许洪昌, 叶文华, 梅胜敏. 金属切削数据库建造技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(5): 651-655.
- [19] 庄燕, 范希营. 基于正交试验的数控切削参数对铝合金表面 Ra 值的影响[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(6): 33-35.
- [20] 李学光, 王惠伟, 张树仁, 等. 基于正交试验法的切削参数优化研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(8): 17-19.