

铍材薄壁回转零件加工刀具磨损研究

陈晓磊,王锐,邱增帅,严小军,刘建梅

北京航天控制仪器研究所

摘要: 由于铍材的难加工特性和薄壁回转体零件的高加工精度要求,需考虑加工过程中多种因素产生的影响,从而保证加工质量。针对铍材薄壁回转零件加工时的刀具磨损,通过工艺试验,对精密镗刀的刀具磨损形式和变化规律、加工参数对其的影响规律和最小切削厚度进行研究,为实际生产的刀具加工补偿奠定基础。

关键词: 铍;回转体零件;精密镗刀;刀具磨损

中图分类号: TG71;TH161

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2020.07.005

Tool Wear Study of Machining Thin-wall Helicoid Beryllium Workpiece

Chen Xiaolei, Wang Rui, Qiu Zengshuai, Yan Xiaojun, Liu Jianmei

Abstract: Due to the difficult-to-cut characteristic of beryllium and high machining precision of helicoid thin-wall workpiece, many factors need to be considered to guarantee machining quality during the machining process. The tool wear of machining beryllium helicoid thin-wall workpiece is the main object in this essay. The study of borer wear types and change rule, effect rule of process parameters and minimum thickness of cut are conducted by experiment to lay the foundation of tool compensation in future production.

Keywords: beryllium; helicoid workpiece; precision borer; tool wear

1 引言

航天精密回转体零件具有结构比刚度高、布局紧凑、轻量化等特点,广泛应用于航天弹、箭、星、船等各类精密产品中,如惯性导航系统、伺服机构、精密回转机构支撑轴系等关键零件。作为一种稀有轻金属材料,铍材料具有极低的密度、较好的热稳定性和极高的比刚度,是高端精密仪表系统关键零部件的首选材料^[1]。但铍材是典型的难加工材料,热等静压残余应力大,缺口敏感性强且对机加工损伤极其敏感^[2],在钻镗孔的加工中非常容易出现崩边和裂纹,对刀具具有较大的冲击力,因此加工铍材的刀具磨损较为严重。

精密回转体零件的制造精度是影响产品性能和可靠性的关键因素,由于其形状复杂、结构单薄、刚性差,导致在传统制造过程中加工效率低,批产质量一致性不易保证。根据实际加工经验和国内外学者的研究可知,刀具磨损是影响加工质量和零件最终加工精度的重要因素。为此,本文针对某航天精密回转体零件的加工开展刀具磨损研究^[3-5]。

2 铍材精密镗削中常见的刀具磨损形式

在实际回转体的加工中,采用山特维克 CXS-04T098-15-4215R1025 精密镗刀(见图2),刀具信

息见表1。回转体零件见图1,精密镗刀见图2。



图1 回转体零件



图2 精密镗刀

表1 精密镗刀几何参数

刀具材料	涂层材料	前角	后角	刀尖圆弧半径
硬质合金	PVD	6°	8°	0.18mm

2.1 刀具失效形式

图3为刀具失效时的磨损形貌。可见,随着切削距离的增大,在刀具的前刀面和后刀面都出现了大面积的磨损,切削刃也逐渐破损。根据分析,在加工过程中刀具的主要失效形式有月牙洼磨损和切削刃破损两种形式。

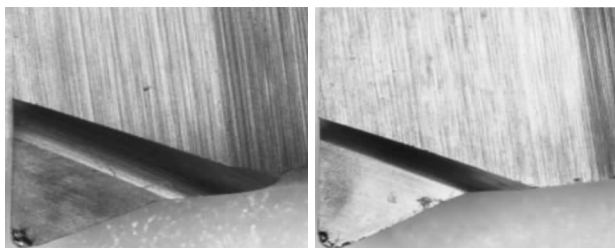
(1) 月牙洼磨损

图3中,受热应力集中和接触疲劳作用的影响,在前刀面处出现了月牙洼现象。铍材在切削过程中产生的切屑毛边和毛刺并不会随着切削温度的升高而逐渐变形和软化。随着切削过程的进行,切屑毛边和毛刺会周而复始地以锯齿状撞击刀具的前刀面和切削刃,尤其在前刀面和刃口处,因承受着交变应力使涂层产生了疲劳应力,进而产生了裂纹。随着

切削距离的增大和切削温度的升高,空气中的 C、H、O 等元素浸入切削界面,刀具表层产生脆性相变,使刀具表层形成裂纹,在切屑的冲击下使涂层逐渐剥落,产生机械磨损。由于刀具基体硬度小于涂层硬度,随着切削的进行使前刀面出现了月牙洼。

(2) 切削刃的破损

由于铍材的高温强度高,容易产生加工硬化,而且铍材含有很多由于铍氧化后形成的氧化铍构成的硬质点,再加上切屑毛边和毛刺周而复始的撞击,使切削刃受到不规则的、非周期性的冲击和疲劳作用。同时在镗削过程中,刀杆的振动加剧了切削刃的磨损。前刀面的月牙洼和后刀面的沟槽磨损,都会使切削刃的厚度逐渐变薄,使切削能力减弱,进而导致切削刃破损。



(a) 月牙洼磨损 (b) 崩刃

图3 镗刀刀具破损

2.2 刀具磨损机理

图4为刀具前后刀面的磨损图。与一般车刀磨损形式较为相似,精密回转体加工中镗刀的磨损主要出现在前后刀面。根据不同的磨损机理主要分为粘结扩散磨损和沟槽磨损。

(1) 粘结扩散磨损

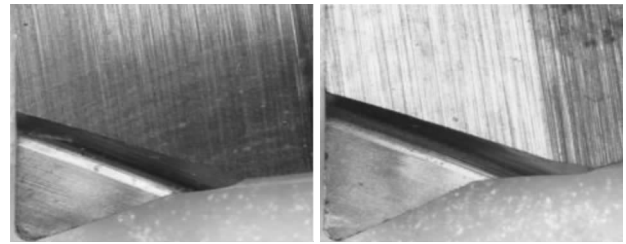
在镗刀切削铍材时,由于切屑和刀具前后刀面不断相互摩擦,在切削热和切削力综合作用下,刀具和工件之间出现局部焊粘结点。在切削过程中,切削热集中在前刀面,同时刀具涂层的抗热振能力和韧性逐渐变差,在切削冲击过程中容易在涂层表面产生裂纹。切削过程中形成的切屑在粘结物上产生塑性变形,粘结点存在使工件和刀具产生断续接触,正向压力减小,易在粘结面上产生拉应力,造成刀具裂纹扩展,并随切屑不断被带走。

由于刀具的切削速度较高,粘结物不稳定,在冲击作用下,粘结层脱落并带走部分刀具材料,在刀具前刀面和后刀面上产生凹坑现象,形成粘结磨损。随着粘结物不断出现与消失,最后达到刀具的磨钝标准。此外,在刀具和切屑的相互接触、摩擦过程中,部分原子在亲和力作用下相互溶解和扩散,改变刀具表面元素组成,降低其强度,在前后刀面形成刀

具的扩散磨损。

(2) 沟槽磨损

加工过程中,加工表面上常含有各种硬质点颗粒、切屑毛边以及在工件待加工表面形成的切削毛刺,在不断刮擦刀具后刀面过程中,产生沟槽磨损。



(a) 前刀面磨损 (b) 后刀面磨损

图4 刀具磨损

3 刀具磨损试验设计

为了更好地控制回转体零件的加工,保证零件的加工精度,需要开展工艺试验研究刀具的磨损变化规律、加工参数对刀具磨损的影响规律和最小切削厚度。

通过模仿回转体零件实际加工过程,采用镗内孔开展工艺试验,刀具与工件都采用与实际零件加工相同的型号与材料,采用 HARDING Elite 42 数控车床。工艺试验如图5所示,工艺样件为长20mm、内孔直径为15mm的铍环。

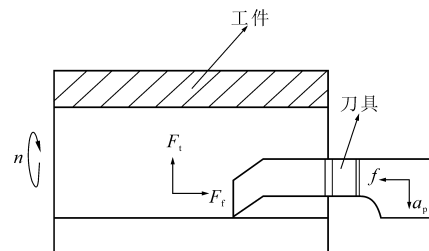


图5 工艺试验

根据实际零件加工过程中加工参数的变化,转速范围选择 700 ~ 900r/min,切削速度范围选择 302 ~ 628mm/s,进给量取值范围为 0.02 ~ 0.15mm/r,根据不同工序选择切削深度为 0.015 ~ 0.05mm。此外,为了减少切削力的变化对刀具磨损的影响,试验中保证每次刀具伸出刀架的距离为 25mm。具体试验参数见表2。

表2 工艺试验参数

	f (mm/r)	a_p (mm)	V_c (mm/s)
1	0.02	0.015	302
2	0.08	0.03	455
3	0.15	0.05	628

在刀具磨损试验中,主后刀面磨损不太严重,采

用基恩士激光共聚焦显微镜对镗刀副后刀面的磨损带进行观测和拍照,并用专业图像分析软件测量副后刀面磨损 VB 值(见图6)。由于副后刀面的磨损带非常不均匀,靠近刀尖位置的磨损最严重,并向远离刀尖的两个方向逐渐减小直至为零,磨损带总体呈现不对称的抛物线状。所以在测量时,对副后刀面磨损最大部位测量3次后,取平均值作为该参数的副后刀面最大磨损 VB 值。为了研究刀具磨损的变化规律,排除加工时间对刀具磨损的影响,每次单因素试验都选用新刀具以固定加工参数加工5min后测量 VB 值。

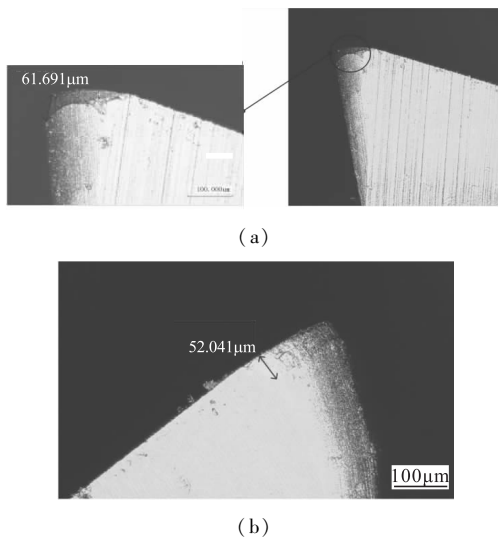


图6 后刀面磨损量 VB 量化

4 刀具磨损试验分析

4.1 刀具磨损曲线

根据刀具的一般磨损曲线规律,在刀具初期磨损阶段和后期剧烈磨损阶段,测量的间隔时间比刀具稳定磨损阶段短,测量次数更多,直至测量到 VB 值大于所选择的磨钝标准为止。此外,为了在研究中避开刀具磨损的初期和急剧期,使刀具的磨损状态处在平稳磨损期,开展了以 $V_c = 620\text{mm/s}$, $a_p = 0.015\text{mm}$, $f = 0.02\text{mm/r}$ 为加工参数的刀具磨损试验(见图7)。该刀具在1min内经历了初期磨损阶段, VB 值变化较大;切削时间1~8min内, VB 值缓慢增加,属于稳定磨损阶段;切削8min后, VB 值急剧上升,刀具开始剧烈磨损,此阶段刀具发生急剧磨损,一般在精镗阶段需避免刀具在该阶段的使用。

4.2 加工参数对刀具磨损的影响

由图8可知,刀具磨损随着切削速度的增大而增大。这主要是因为由于切削速度的增大使切削温度上升,从而使刀具涂层强度下降,刀具磨损逐渐增

加。较高的切削速度同时增加了刀具与工件之间的接触长度,造成磨损较大。在较高的切削速度下,刀具主要磨损形式是粘接磨损。

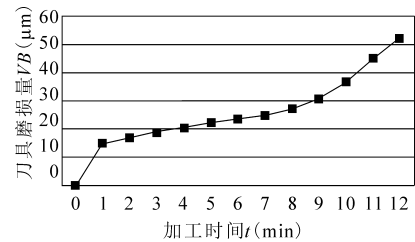


图7 刀具磨损曲线

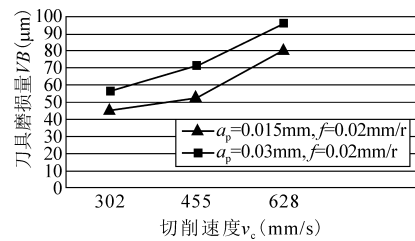


图8 切削速度对刀具磨损的影响

由图9可知,刀具磨损随着切削深度的增大而增加。单位时间内的材料去除量随着刀具切削深度的增加而增大,使切削力增大,最终导致刀具磨损增加。切削深度的增加还会使刀具与工件的实际接触面积增大,导致磨损区域的扩大。

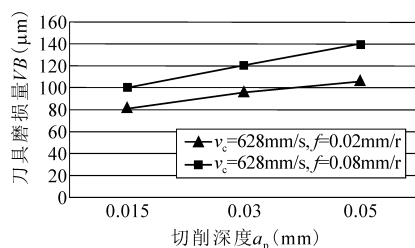


图9 切削深度对刀具磨损的影响

由图10可知,随着进给速度的增大,相同时间内的材料去除量增大使刀具与工件接触长度增加,刀具磨损增加。此外,在高切削速度下,进给速度的增加也会使切削温度升高,降低刀具涂层强度,加快刀具磨损。

通过上述切削速度、切削深度和进给速度对刀具磨损的影响分析可知,切削速度对刀具磨损的影响最大,其次是进给速度,最后是切削深度,说明加工中的温度影响是刀具磨损的最主要原因。

4.3 最小切削厚度

伴随着切削厚度的逐渐减小会产生尺度效应,尺度效应是一种特殊的现象,有别于宏观切削中随着切削用量的减小而单位切削力或切削能耗减小的现象。尺度效应的产生一般有两种情况,一是当加

工参数小于或接近于刃口钝圆半径时,另一种是当加工参数接近材料晶粒尺寸范围时^[6,7]。

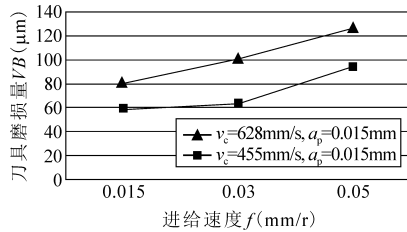


图10 进给速度对刀具磨损的影响

要确定是否达到最小切削厚度,除了查看是否产生切屑以外,通常应研究切削深度对单位切削力的影响。铍材为硬脆性材料,当切削厚度较小时,耕犁起主要作用,此时已经达到最小切削厚度,但是由于在加工表面的滑擦作用依然会产生碎屑,可以采用研究单位切削力的变化来确定最小切削厚度。单位切削力 F_u 可以表示为切削力 F_t 与工件-刀具接触的垂直面积比值,单位切削力的计算公式为

$$F_u = F_t / t u w \quad (1)$$

式中, w 为切削层的宽度; $t u$ 为切削层的厚度。

为了研究刀具补偿中最小切削厚度的影响规律,开展最小切削厚度试验。在实际加工中, $VB = 80.421 \mu\text{m}$ 是精镗工序中的磨损标准,该磨损情况下,将确定的最小切削厚度作为刀具补偿临界值。试验方案见表3。

表3 最小切削厚度试验方案

切削速度 (mm/s)	进给速度 (mm/r)	切削厚度 (mm)					
		0.015	0.01	0.008	0.006	0.004	0.002
615	0.02						

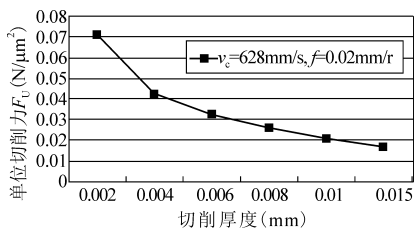


图11 单位切削力与最小切削厚度的关系

由图11可知,随着切削厚度的减小,单位切削力急剧增大。当切削厚度小于0.004mm时,单位切削力急剧上升,尺度效应开始产生,说明此时的切削厚度(0.004mm)已经基本达到该条件下的最小切削厚度。产生此现象的原因主要是,在微变形过程

中,材料中晶粒各向异性在应力作用下自由变形,则晶粒中最易滑移的滑移系将优先滑移,由于晶体间的变形不协调使得晶粒周围产生几何位错,从而增大材料内部的位错密度,对材料产生强化作用,增大材料在切削加工过程中的单位切削力。

5 结语

铍材薄壁回转体精密零件尺寸精度要求高,加工难度大,尤其是刀具磨损会对该零件的加工质量和加工精度产生影响。通过开展刀具磨损试验,研究了刀具磨损形式、刀具磨损影响规律和最小切削厚度等。主要获得如下结论:

(1) 精镗刀具在 $V_c = 628\text{mm/s}$, $a_p = 0.015\text{mm}$, $f = 0.02\text{mm/r}$ 加工参数条件下,1~8min内属于稳定磨损阶段;

(2) 精镗加工时,切削速度对刀具磨损的影响最大,其次是进给速度与切削深度;

(3) 精镗刀具在 $V_c = 628\text{mm/s}$, $f = 0.02\text{mm/r}$ 参数加工下的最小切削厚度为 $4\mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 中国有色金属学会第三届学术会议. 中国有色金属学会第三届学术会议论文集——战略研究综述部分[C]. 长沙:中南工业大学出版社,1997.
- [2] 胡卫平,王兆元,陈昭晰. 关于铍加工的综述[J]. 惯导与仪表,2001(2):46-48.
- [3] 钟景明,李志年,王战宏,等. 惯性器件用铍材研究及其应用进展[J]. 粉末冶金工业,2018,28(1):1-6.
- [4] 王锐,王长青,赵春阳. 国外铍材应用与加工进展[J]. 导航与控制,2015,14(1):13-19.
- [5] 张鸿金. 加强铍材研究贡献航天事业[C]. 中国有色金属工业企业管理现代化成果、优秀论文专集,2003:30-31.
- [6] Petch N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. J. Iron Steel Inst., 1953, 174:25-28.
- [7] Ashby M F. Work hardening of dispersion-hardened crystals[J]. Phil. Mag, 1966, 14(132):1157-1178.

第一作者:陈晓磊,工程师,北京航天控制仪器研究所,100039 北京市

First Author: Chen Xiaolei, Engineer, Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China