

# 基于单颗磨粒划擦的铰珩毛刺形貌研究

黄建中,杨长勇,高绍武,徐九华

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**搭建了单颗磨粒划擦试验平台,开展了单颗磨粒铰珩试验研究。以毛刺高度和根部厚度作为毛刺尺寸评价指标,分析了切削深度、切削速度和进给速度对毛刺形貌的影响规律。试验结果显示:切削深度对于毛刺尺寸影响最大,切削速度和进给速度对于毛刺尺寸影响较小。毛刺尺寸随切削深度的增大而增大,切削速度和进给速度的增加,毛刺尺寸变化不明显。

**关键词:**铰珩;单颗磨粒划擦;侧边毛刺;塑性变形

**中图分类号:**TG506 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0039-04

## Experimental Study of Morphology of Abrasive Reaming Based on Single-grit Scratching

HUANG Jianzhong, YANG Changyong, GAO Shaowu, XU Jiuhua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing

University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, a single-grit scratching test platform is built, which is used to make a study of single grit abrasive reaming. The burr height and root thickness are taken as the burr size evaluation index. The effects of cutting depth, cutting and feed speeds on burr morphology are studied. Experiment results show that the cutting depth has the greatest influence on the burr size and the cutting and feed speeds have little effect on the burr size. The burr size increases with the increase of the cutting depth, and its change is not obvious with the increase of the cutting and feed speeds.

**Keywords:** abrasive reaming; single-grit scratching; side burr; plastic deformation

## 0 引言

航空发动机燃油喷嘴是燃烧室的重要部件之一,用来实现燃油雾化,保证燃油稳定燃烧<sup>[1]</sup>。喷嘴的材料一般为马氏体不锈钢,硬度高,加工时易黏附,刀具磨损快,加工难度大<sup>[2]</sup>。铰珩精加工喷嘴孔的过程中,不可避免会产生毛刺,影响使用功能,而去毛刺工艺复杂,不仅会增加加工成本,甚至可能造成塌边等二次损伤。研究毛刺形貌影响规律,能够为抑制毛刺产生、提高加工质量提供研究的基础。

影响毛刺形貌的因素有多种,LU Jiapeng<sup>[3]</sup>等研究了切削速度、刀刃半径、刀具前角和切削深度等参数对于钛合金切削边缘处毛刺的影响规律。LEKKALA Ravi<sup>[4]</sup>等研究了微铣削过程中速度、进给速度、切削深度、刀具直径等多个变量对于工件出口和顶部毛刺的影响规律。孙伟<sup>[5]</sup>等利用仿真研究了单颗磨粒成屑的过程,从侧面研究了毛刺。前期的研究表明,铰珩加工过程中,磨粒的切削深度、刀具转速和进给速度等都对毛刺有重要影响。

WU Xian<sup>[6]</sup>等通过微切削的方法对无氧铜进行试验,研究了单晶材料的取向和多晶材料的晶粒尺寸对切削力和毛刺形成的影响。AZIZ Muhammad<sup>[7]</sup>等利用一种钻和磨相结合的新刀具,研究了孔加工中的毛刺影响因素。铰

珩过程中,多颗磨粒参与材料的去除,每颗磨粒的作用过程难以直接观测。前一颗磨粒微切削残留的划痕会被后面的磨粒覆盖或是去除,难以清晰地观测到每颗磨粒对于毛刺的影响,尤其是孔的出入口处。这些作用于边缘部分的磨粒对于毛刺的最终状态有着重要影响,因此研究单颗磨粒对于毛刺形貌的作用规律非常重要。

单颗磨粒划擦是研究单颗磨粒微切削过程的重要方法之一。根据磨粒与工件相对运动方式的不同,单颗磨粒微划擦的方法主要有钟摆法和划擦法两种<sup>[8]</sup>,其中钟摆法是将单颗磨粒固定在摆杆顶端或法兰盘圆周上,通过回转中心转动,磨粒以一定的线速度切削工件的方式开展试验,试验参数选取范围较大,能同时探究多个试验变量的影响规律。本文采用钟摆式,通过超精密磨床进行单颗磨粒微切削试验。探究磨粒切削深度、切削速度和进给速度对于毛刺形貌的影响规律,为实现毛刺的控制提供依据。

## 1 试验原理

铰珩是一种多颗磨粒共同作用的连续低速微切削工艺,可以作为精密孔加工的最后道工序,能够实现较低表面粗糙度和高一致性。铰珩刀具由前后导向部分、切削锥部分、光整部分、倒锥部分和刀杆构成<sup>[9]</sup>。切削锥部分去除工件材料,达到所需的加工尺寸,再通过光整部分的

**基金项目:**南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170509)

**作者简介:**黄建中(1991—),男,博士研究生,主要研究方向为高效精密加工技术。

微刃摩擦抛光作用,降低表面粗糙度。

由于铰珩加工工艺特点,难以直接进行孔的单颗磨粒铰珩加工试验。将工件内孔展开成一个平面,可以将铰珩刀具上磨粒的螺旋型轨迹转化成沿切削速度方向和进给方向合成方向的斜向运动,这样既保留了铰珩加工的特点,又简化了试验过程。前期的研究表明,对毛刺起重要影响的是磨粒切入和切出时的状态,即工件侧边,因此试验主要关注工件侧边毛刺的形貌及其形成,磨粒轨迹如图1所示。

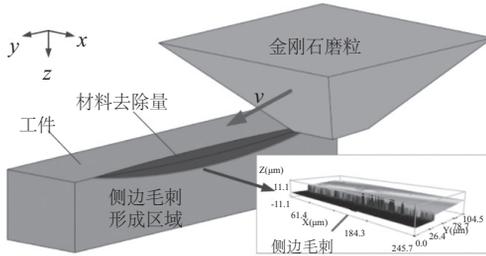


图1 磨粒轨迹示意图

选用形状规则四棱台金刚石磨粒,以控制切削刃型。磨粒粒度为35/40目(尺寸约为420~500 $\mu\text{m}$ ),用Ag-Cu-Ti合金钎料将磨粒钎焊在45钢的芯轴上。为了便于观测和调整磨粒切削姿态,参考了文献[10]中的单颗磨粒微切削试验用的节块装置及砂轮,如图3所示。将钎焊后的金刚石磨粒的芯轴置于节块内,通过底部的螺栓预紧,而后将装配的节块置于HIROX KH-7700型数字式三维视频显微镜下,通过旋转芯轴的角度,确保磨粒以规则的前后刀面进行切削,最后将节块固定在砂轮基体上。

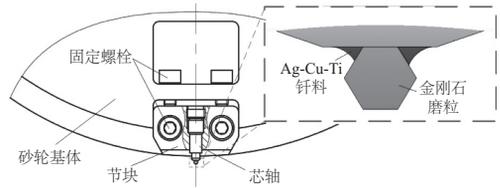


图3 单颗磨粒划擦用砂轮示意图

## 2 试验条件与方案

### 2.1 试验条件

相对于一般磨削,铰珩速度低,刀具每转进给较小,切深小,一般仅有微米级。为满足上述要求,搭建了单颗磨粒划擦试验系统,如图2所示。单颗磨粒划擦试验在超精密磨床(WAZA415X-NC, XKNC型)上进行,该精密磨床参数见表1。

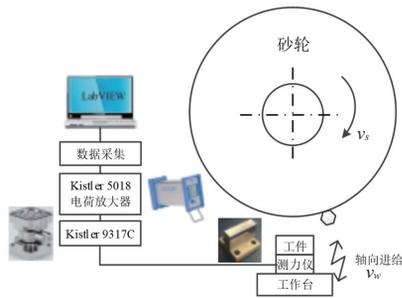


图2 单颗磨粒划擦试验系统

表1 WAZA415X-NC, XKNC型超精密磨床参数

项目	参数	
工作台(前后)	精度光栅尺/ $\mu\text{m}$	0.1
	连续速度/(mm/min)	80、160、240、320、400
砂轮	精度光栅尺/ $\mu\text{m}$	0.1
	转速/(r/min)	0~3 600 无极变速
	电动机	2.2 kW, 4p

试验中利用KISTLER 9317C型压电测力仪进行精准对刀并采集信号,利用KISTLER 5018型功率放大器放大信号,最后利用LabVIEW软件搭建的测力分析平台,对采集的信号进行分析和处理。

### 2.2 试验方案

试验工件选用航空发动机燃油喷嘴常用材料4Cr13马氏体不锈钢(淬火态,HRC52~54),其参数见表2<sup>[11]</sup>。

表2 4Cr13马氏体不锈钢质量分数

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
质量分数/(%)	0.35~0.45	$\leq 0.60$	$\leq 0.60$	12.00~14.00	$\leq 0.60$	$\leq 0.030$	$\leq 0.030$

工件上表面尺寸为25mm $\times$ 8mm,采用60#刚玉砂轮进行粗磨,再分别用600#、1500#及2500#的SiC砂轮对工件上表面及2个侧面进行精磨。经粗糙度仪检测,2个侧面表面粗糙度为Ra0.12 $\mu\text{m}$ ,上表面表面粗糙度为Ra0.03 $\mu\text{m}$ 。

砂轮转动方向和工作台运动方向如图4所示。试验中因为工件上表面存在一定的平面度偏差,单次切深2 $\mu\text{m}$ 不断向下进给,当划痕扩展到工件上表面边缘时,开始按照表3给出的加工参数进行试验。

表3 试验参数表

试验条件	参数
切削深度 $a_p$ / $\mu\text{m}$	1 3 5
砂轮转速 $v_s$ /(m/s)	3 4 5
进给速度 $v_w$ /(mm/min)	80 160 240
每转进给 $f$ /(mm/r)	0.18 0.31 0.23 0.37 0.55

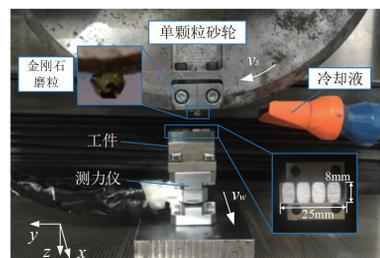


图4 单颗磨粒划擦试验装置

### 3 分析与讨论

#### 3.1 毛刺表征

随着切深增加,磨粒与工件的接触区域逐渐增大,实际接触弧长也不断增大,将材料推挤到工件边缘,断裂部分形成切屑,残留部分形成毛刺。

通过 SENSOFAR S NEOX 型三维光学轮廓仪对毛刺进行观测,结果如图 5 所示。从侧边对工件进行形貌观测,可以清晰地观测到毛刺。

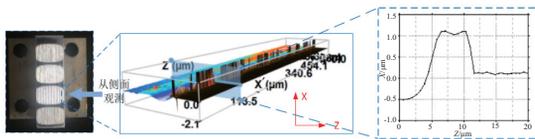


图 5 侧边毛刺测量装置

评价毛刺的指标有多种,包括毛刺高度、毛刺厚度、毛刺硬度、毛刺体积和毛刺截面积等(图 6<sup>[12]</sup>)。本文采用毛刺高度  $h_0$  和毛刺根部厚度  $b_r$  两个特征值,对实际观测到的毛刺形貌进行表征,如图 7 所示。

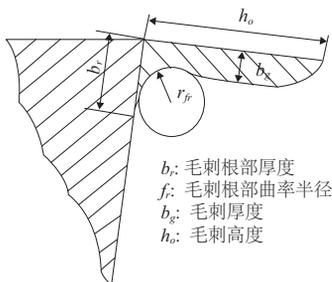


图 6 毛刺特征示意图

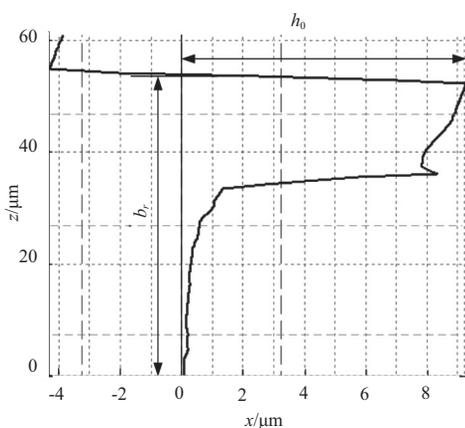


图 7 毛刺形貌表征示意图

#### 3.2 累计切削深度影响

试验结果表明,累计切削深度对于侧边毛刺具有重要影响,如图 8 所示。当累计切深不断增加,毛刺尺寸逐渐增加,其中毛刺高度  $h_0$  增长明显,累计切深从  $8 \mu\text{m}$  增大到  $35 \mu\text{m}$  时,  $h_0$  呈现线性增长。累计切深  $7.3 \mu\text{m}$  时  $h_0$  为

$3.95 \mu\text{m}$ ; 累计切深  $35.1 \mu\text{m}$  时毛刺高度为  $19.98 \mu\text{m}$ , 相比于累计切深  $7.3 \mu\text{m}$  时增加了 4 倍。当累计切深不断增大时,磨粒与工件的接触面积不断增加,磨削弧长增大,法向力也不断增加,磨粒切入工件后的塑性变形量不断增加,更多的材料参与整个变形过程,当材料剪切滑移使得磨粒前刀面的材料达到断裂强度时,材料形成切屑被去除,材料断裂后残留形成毛刺。累计切深越大,塑性变形量越大,最终材料断裂后残留形成的毛刺高度  $h_0$  越高。

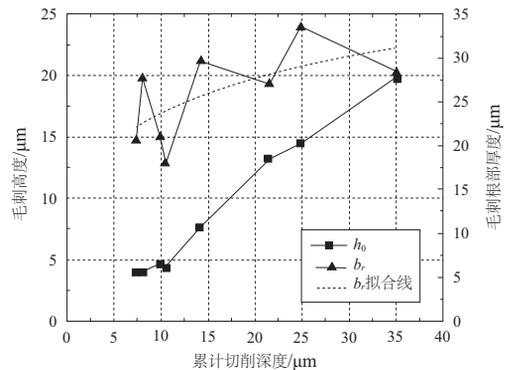


图 8 毛刺高度与毛刺根部厚度(累计切削深度)

累计切深对于毛刺根部厚度  $b_r$  影响相对复杂,利用 Origin 进行拟合,可以看出随着切深的增加,  $b_r$  呈现增加的趋势,但由于试验中切宽无法控制,磨粒存在磨损等因素的影响,导致试验中的毛刺根部厚度存在一定波动。当累计切深大时,形成的材料变形量较大,材料被挤压在边缘处形成较高的堆积厚度,最终形成毛刺时,毛刺根部厚度较厚。

#### 3.3 切削速度影响

切削速度  $v_c$  对于毛刺尺寸影响不明显,如图 9 所示。当切深为  $3.5 \mu\text{m}$ 、速度由  $3 \text{ m/s}$  增长到  $5 \text{ m/s}$  过程中,形成的毛刺高度  $h_0$  没有明显变化;当累计切深达  $22 \mu\text{m}$ ,速度范围在  $3 \sim 5 \text{ m/s}$  之间,  $h_0$  稳定在  $14 \mu\text{m}$  左右。速度波动时,毛刺根部厚度  $b_r$  变化不明显。当切深为  $3.5 \mu\text{m}$ ,速度变化时,  $b_r$  也稳定在  $8.5 \mu\text{m}$ ;当累计切深增大到  $22 \mu\text{m}$  时,  $b_r$  小幅波动。

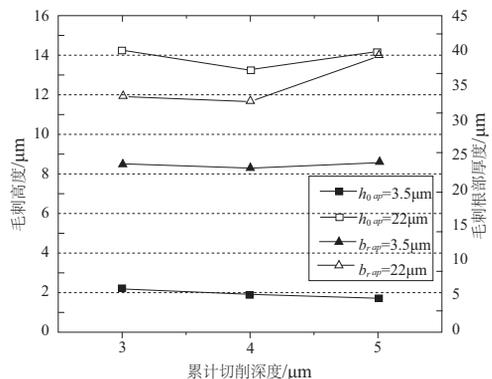


图 9 毛刺高度与毛刺根部厚度(切削速度)

单颗磨粒划擦试验中,速度较低,对温度影响较小,造成的材料软化效应可以忽略不计。当切削速度  $v_c$  增大时,磨粒前刀面与工件接触面积变化不大,磨削弧长并没有明

显增加,切削力没有大幅度增加,磨粒切入工件造成的塑性变形量增加很小,最终形成的毛刺高度和根部厚度差异较小。

### 3.4 进给速度影响

磨粒进给速度  $v_w$  会对毛刺的形成造成一定的影响,但对毛刺尺寸影响不明显,如图 10 所示。当累计切深为  $26\ \mu\text{m}$ 、进给速度  $v_w$  为  $80\ \text{mm}/\text{min}$ 、每转进给  $f$  为  $0.18\ \text{mm}/\text{r}$  时,毛刺高度  $h_0$  为  $15.25\ \mu\text{m}$ ,毛刺根部厚度  $b_r$  为  $24.5\ \mu\text{m}$ ;当  $v_w$  增大到  $240\ \text{mm}/\text{min}$  时,  $h_0$  和  $b_r$  均小幅度减小;当累计切深为  $28\ \mu\text{m}$  时,随着转速增加,  $h_0$  逐渐增大,  $b_r$  小幅度减小。

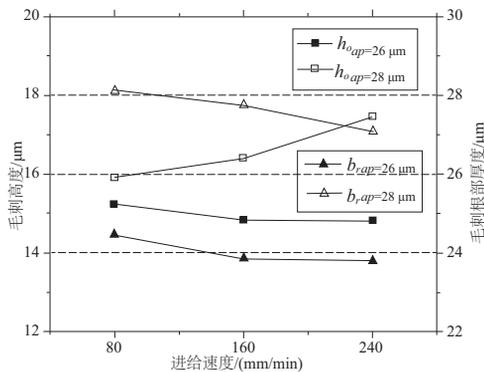


图 10 毛刺高度与毛刺根部厚度(进给速度)

$h_0$  和  $b_r$  变化原因有两方面:一是  $v_w$  增大时,每转进给量增加,相邻两道划痕的间距增大,但由于磨粒从入口切入时位置难以控制,最终导致切出位置也不固定,这就使得虽然进给量增加,但对侧边毛刺尺寸影响有一定偶然性;二是进给速度增加,磨粒与工件的接触面积不会发生较大的变化,磨削弧长不会明显增加,对毛刺形成有重要影响的塑性变形量也没有发生较大的变化。因此试验中  $v_w$  变化时,毛刺的尺寸没有发生明显的改变。

## 4 结语

通过单颗磨粒划擦试验,对较珩过程中毛刺的形成过程进行了分析。通过单因素试验,研究了切削深度、切削速度和进给速度对于毛刺高度和根部厚度的影响规律,结论如下:

1) 切削深度对于毛刺尺寸有明显影响,随着切削深度的增加,毛刺高度  $h_0$  呈线性增长,增幅非常明显,累计

切深  $35.1\ \mu\text{m}$  时毛刺高度相比于累计切深  $7.3\ \mu\text{m}$  时增长了 4 倍左右。毛刺根部厚度  $b_r$  呈增长趋势。

2) 切削速度和进给速度对于毛刺尺寸影响较小。随着切削速度的增加,毛刺高度  $h_0$  几乎不变,切深为  $4\ \mu\text{m}$ ,速度由  $3\ \text{m}/\text{s}$  增长到从  $5\ \text{m}/\text{s}$  过程中,  $h_0$  稳定在  $1.9\ \mu\text{m}$  左右,毛刺根部厚度  $b_r$  几乎不变。当累计切深为  $26\ \mu\text{m}$ ,进给速度从  $80\ \text{mm}/\text{min}$  增大到  $240\ \text{mm}/\text{min}$ ,  $h_0$  稳定在  $15.25\ \mu\text{m}$ ,毛刺根部厚度  $b_r$  略有增长。

### 参考文献:

- [1] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [2] 任敬心, 康仁科, 王西彬. 难加工材料磨削技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2011: 233-235.
- [3] LU J, CHEN J, FANG Q, et al. Finite element simulation for Ti-6Al-4V alloy deformation near the exit of orthogonal cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9/10/11/12): 2377-2388.
- [4] LEKKALA R, BAJPAI V, SINGH R K, et al. Characterization and modeling of burr formation in micro-end milling[J]. Precision Engineering, 2011, 35(4): 625-637.
- [5] 孙伟, 赵恒华, 杨世彬. 基于 LS-DYNA 的单颗磨粒超高速磨削成屑动态研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(2): 57-60.
- [6] WU X, LI L, HE N, et al. Investigation on the influence of material microstructure on cutting force and burr formation in the micro cutting of copper[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(1/2/3/4): 321-327.
- [7] AZIZ M, ONKURA H. Advanced burr-free hole machining using newly developed micro compound tool[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2012, 13(6): 947-953.
- [8] 言兰. 基于单颗磨粒切削的淬硬模具钢磨削机理研究[D]. 长沙:湖南大学, 2010.
- [9] ARUNACHALAM S, GUNASEKARAN A, O'SULLIVAN J M. Analysing the process behaviour of abrasive reaming using an experimental approach[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(8): 1311-1325.
- [10] 戴晨伟. 单层钎焊超硬磨粒砂轮地貌演变与磨粒切厚分布研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [11] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 第 1 卷[M]. 北京:中国标准出版社, 2001: 619-624.
- [12] AURICH J C, DORNFIELD D, ARRAZOLA P J, et al. Burrs—Analysis, control and removal[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, 58(2): 519-542.

收稿日期:2018-10-10