

# Vit1 块体金属玻璃微铣削表面粗糙度试验研究\*

王志勇<sup>1,2</sup>, 王攀<sup>1</sup>, 符加彬<sup>1</sup>

(1 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004; 2 河北省重型智能制造装备技术创新中心, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 为研究金属玻璃的微铣削表面粗糙度, 采用直径为 0.5 mm 的双刃硬质合金微铣刀, 在 Vit1 块体金属玻璃表面加工微尺度沟槽结构; 以试件表面粗糙度  $Ra$  值为衡量指标, 利用三因素五水平正交试验方法分析主轴转速、进给速度和铣削深度对微铣削表面质量的影响。试验结果表明: 主轴转速对表面质量影响最为显著, 而进给速度影响较小。对影响表面质量及形貌的原因进行了深入分析, 其结果对研究 Vit1 块体金属玻璃的微铣削加工机理具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 微铣削; Vit1 块体金属玻璃; 表面粗糙度

中图分类号: TG136+.4 文献标志码: A 文章编号: 1671-3133(2020)04-0023-04

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2020.04.005

## Experimental study on surface roughness in micro-milling of Vit1 bulk metallic glasses

Wang Zhiyong<sup>1,2</sup>, Wang Pan<sup>1</sup>, Fu Jiabin<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China;

2 Heavy-duty Intelligent Manufacturing Equipment Innovation Center of Hebei

Province, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

**Abstract:** To study the influencing factors of micro-milling surface roughness of metallic glasses, two-edged alloy micro-milling tool with 0.5 mm diameter was used to process a micro-scale groove structure on the surface of Vit1 block metal glass. Setting the surface roughness  $Ra$  of the test piece as the measurement standard, three-factor and five-level orthogonal experiment method was used to analyze the effects of spindle speed, feed rate and axial of cut on the quality of micro-milling surface. The results show that the spindle speed has the most significant effect on the surface quality, while the feed rate has little effect. Moreover, the reasons that affect the surface quality and morphology were further analyzed. And the results may provide some reference for the micro-milling mechanism of Vit1 bulk metallic glass.

**Keywords:** micro-milling; Vit1 bulk metallic glasses; surface roughness

## 0 引言

金属玻璃也称非晶合金, 是采用现代快速凝固冶金技术合成的一类兼有一般金属和玻璃特性的新型合金材料, 其因具有优良的力学、物理和化学性能而在航空航天、微型精密机械等领域具有重要的应用前景<sup>[1-2]</sup>。国内外学者对金属玻璃的材料制备、力学性能以及切削性能等进行了广泛研究<sup>[3]</sup>。由于非晶合金具有高硬度和室温脆性等特点, 导致其机械切削成形加工难度较大。目前, 对金属玻璃的切削加工研究还处于初级阶段, 其相关的报道仅限于对切削加工中

的切削热、切削力等切削性能的研究, 还有诸多问题有待研究与解决<sup>[4-5]</sup>。

微铣削加工技术通常是指工件加工特征尺寸在 0.01~1 mm, 并且微铣刀直径在 1 mm 以下的微机械切削加工技术<sup>[6]</sup>。目前对单晶硅、铜、铝和钛合金以及多晶高温合金等材料的微铣削已有研究<sup>[7-9]</sup>, 但关于金属玻璃的微铣削在国内尚未见报道。受微加工尺度效应和非晶合金不易加工等特点的影响, 金属玻璃的微铣削具有很多不同于其宏观及传统切削加工的特征。

在微加工过程中, 表面的加工质量相对其微小的

\* 国家自然科学基金资助项目(U1660111)

尺寸不容忽视,评定零/部件表面加工质量的一个重要参数就是表面粗糙度。本文以非晶合金 Vit1 块体金属玻璃为研究对象,利用正交试验方法对其进行微铣削试验研究,分析铣削深度、进给速度(每齿进给量)和主轴转速对表面粗糙度的影响规律,给出合理的加工工艺方案,并对影响其表面粗糙度的原因进行分析。

## 1 Vit1 块体金属玻璃微铣削试验

### 1.1 试验设备与仪器

本文试验是在日本 NanoWave 公司生产的 MTS5R 型精密数控微铣床上进行的,如图 1 所示。该机床的  $X$  轴和  $Y$  轴行程均为 50 mm,  $Z$  轴行程为 30 mm; 主轴采用高速电主轴,最高转速为 80 000 r/min,进给分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$ ,定位精度为  $0.5 \mu\text{m}$ ,主轴径向跳动小于  $0.1 \mu\text{m}$ ,最高进给速度为 6 000 mm/min,最低进给速度为  $0.1 \text{ mm/min}$ ;  $Z$  轴重复定位精度为  $0.1 \mu\text{m}$ ; 采用 Form Talysurf i60 型粗糙度轮廓仪对加工后的表面粗糙度进行测量; 采用日本 OLS3100 型激光共聚焦显微镜对加工后表面形貌进行观测。

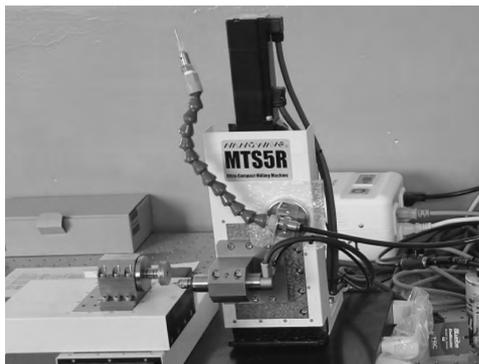


图 1 MTS5R 型精密数控微铣床

### 1.2 试验材料与刀具

铣刀采用日本日进工具(NS Tool)、型号为 MXH225 的 TiAlN 涂层硬质合金双刃平头微铣刀,如图 2 所示。该微铣刀螺旋角为  $25^\circ$ ,直径为 0.5 mm; 试件材质为 Vit1 块体金属玻璃( $\text{Zr}_{41.2} \text{Ti}_{13.8} \text{Cu}_{12.5} \text{Ni}_{10} \text{Be}_{22.5}$ ,简称 Vit1 BMGs),外形为圆饼形,直径为 26.5 mm,厚度为 7.9 mm。试件采用阶梯轴进行装夹,轴的右侧通过过盈配合连接试件,轴的左侧通过弹簧锥套装夹在工作台上。试件装卡与加工现场如图 3 所示。

### 1.3 试验方案

试验采用正交试验方法,取铣削深度  $a_p$ 、每齿进

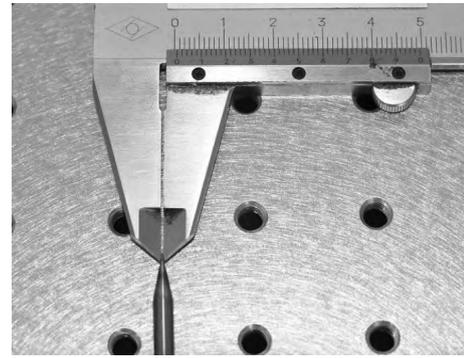


图 2 硬质合金双刃平头微铣刀

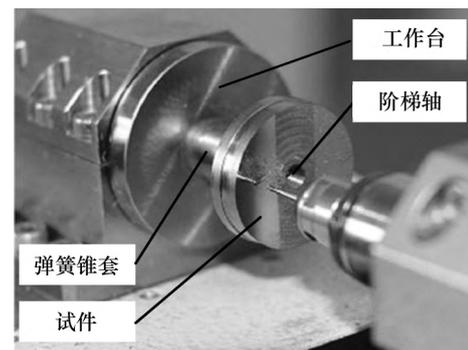


图 3 试件装卡与加工现场

给量  $f_z$  和主轴转速  $n$  共 3 个参数作为研究因素,采用三因素五水平正交表进行试验。精密微铣削因切削尺度参数较小,要综合考虑机床实际性能、加工条件及微铣刀几何参数和材料特征。表 1 所示为微铣削正交切削参数因素水平表。

表 1 微铣削正交切削参数因素水平表

水平	铣削深度(A)	主轴转速(B)	每齿进给量(C)
	$a_p / \mu\text{m}$	$n \times 10^3 / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$f_z / (\mu\text{m} \cdot \text{z}^{-1})$
1	2	5	0.5
2	4	10	1
3	6	20	2
4	8	30	3
5	10	40	4

在正式进行微槽铣削之前需对待微铣削试验区域进行平整处理,消除定位误差。本试验采用直径为 0.5 mm 的双刃平头微铣刀对试验区域表面进行平整加工,切削参数为: 主轴转速  $n = 40\ 000 \text{ r/min}$ , 单次走刀铣削深度  $a_p = 2 \mu\text{m}$ , 每齿进给量  $f_z = 1 \mu\text{m/z}$ , 铣削宽度  $a_e = 0.1 \text{ mm}$ 。在不换刀的情况下,用修平后的平面进行铣削深度的设定,则可保证铣削深度的准确性(见图 3)。在共聚焦显微镜下放大成像后,三维扫描获取其表面的形貌。沟槽底面加工形貌如图 4 所示。

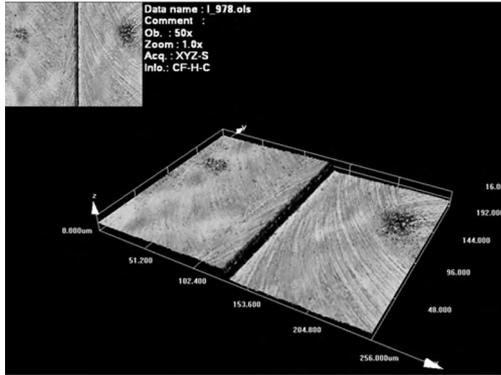


图 4 沟槽底面加工形貌

## 2 试验结果与分析

通过激光共聚焦显微镜对加工后的微槽底面进行检测,运用共聚焦逐层扫描获取样品各个二维图像和焦平面的纵向空间坐标,经计算机处理,将各个焦平面的显微图像叠加,获取样品表面的三维形态,对加工表面进行观察。图 4 中所示为表面质量较差的第 24 组,在共聚焦显微镜下对微槽底部区域进行 50 倍放大后,三维扫描获取其表面的形貌,可见沟槽底部比较光整且无毛刺产生,但因残留着微铣刀切削刃划过的痕迹而影响表面粗糙度。

根据表 1 中的参数,对 Vit1 块体金属玻璃进行微铣削的铣削试验,用 Taylor Hobson 粗糙度轮廓仪测量沟槽底部平面的表面粗糙度  $Ra$  值,取 3 次实测的均值作为试验结果。微铣削正交试验表如表 2 所示。

表 2 中  $A_i$ 、 $B_i$  和  $C_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 分别为因素 A、B 和 C 的第  $i$  个水平;  $k_{ij}$  为某一因素  $j$  在同一参数水平  $i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 下的加工表面粗糙度  $Ra$  值的均值;  $R$  为各因素的极差,即该因素在 5 个水平下的  $k_{ij}$  值的最大值与最小值之差。 $R$  反映了粗糙度  $Ra$  值的变动幅度,  $R$  越大则表明该因素对加工表面的表面粗糙度影响越大。

由表 2 所示可见,在本试验条件下的微铣削加工表面粗糙度  $Ra$  值多数在  $0.1 \mu\text{m}$  左右,只有在铣削深度  $a_p$  为  $10 \mu\text{m}$  (水平 5),每齿进给量  $f_z$  为  $3 \mu\text{m}/z$  (水平 4) 与  $4 \mu\text{m}/z$  (水平 5) 时  $Ra$  值达到  $0.2 \mu\text{m}$  以上。试验结果分析表明:按极差值由大到小依次为主轴转速、铣削深度和每齿进给量,则各因素对加工表面粗糙度  $Ra$  值的影响由大到小依次为主轴转速、铣削深度和每齿进给量,这与宏观铣削时各因素对加工表面粗糙度  $Ra$  值的影响规律不同<sup>[10]</sup>,本试验的最优工艺组合为  $A_1B_3C_1$ 。

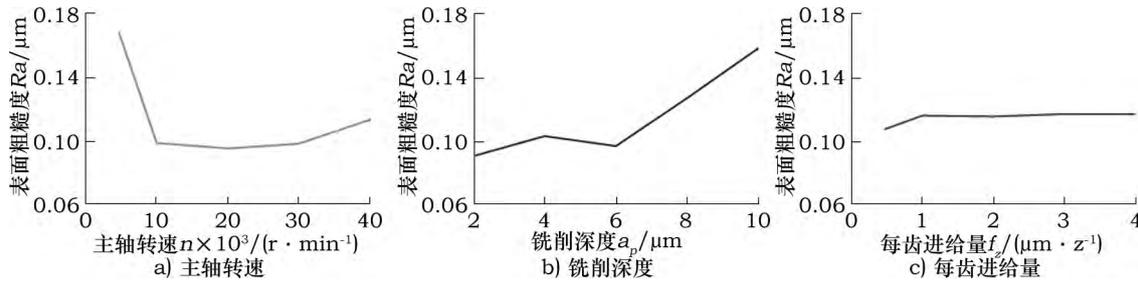
表 2 微铣削正交试验表

试验编号	$a_p$	$n$	$f_z$	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$
1	$A_1$	$B_1$	$C_1$	0.132
2	$A_1$	$B_2$	$C_2$	0.101
3	$A_1$	$B_3$	$C_3$	0.071
4	$A_1$	$B_4$	$C_4$	0.069
5	$A_1$	$B_5$	$C_5$	0.077
6	$A_2$	$B_1$	$C_2$	0.189
7	$A_2$	$B_2$	$C_3$	0.106
8	$A_2$	$B_3$	$C_4$	0.065
9	$A_2$	$B_4$	$C_5$	0.077
10	$A_2$	$B_5$	$C_1$	0.073
11	$A_3$	$B_1$	$C_3$	0.134
12	$A_3$	$B_2$	$C_4$	0.067
13	$A_3$	$B_3$	$C_5$	0.086
14	$A_3$	$B_4$	$C_1$	0.081
15	$A_3$	$B_5$	$C_2$	0.114
16	$A_4$	$B_1$	$C_4$	0.166
17	$A_4$	$B_2$	$C_5$	0.131
18	$A_4$	$B_3$	$C_1$	0.166
19	$A_4$	$B_4$	$C_2$	0.085
20	$A_4$	$B_5$	$C_3$	0.084
21	$A_5$	$B_1$	$C_5$	0.213
22	$A_5$	$B_2$	$C_1$	0.087
23	$A_5$	$B_3$	$C_2$	0.090
24	$A_5$	$B_4$	$C_3$	0.183
25	$A_5$	$B_5$	$C_4$	0.216
$k_{1j}$	0.08 98	0.167 6	0.107 6	
$k_{2j}$	0.102 1	0.098 2	0.115 7	
$k_{3j}$	0.095 8	0.094 8	0.115 6	
$k_{4j}$	0.126 2	0.098 1	0.116 6	
$k_{5j}$	0.157 7	0.113 0	0.117 0	
$R$	0.067 9	0.072 8	0.009 4	
最优水平		$A_1B_3C_1$		
主次因素		$B>A>C$		

根据试验结果(见表 2)绘制主轴转速、铣削深度和每齿进给量与表面粗糙度  $Ra$  值的关系曲线,分析各因素对加工工件表面粗糙度的影响规律。各试验因素与表面粗糙度  $Ra$  值的关系曲线如图 5 所示。

### 2.1 主轴转速对表面粗糙度的影响

由图 5a 所示可知,精密微铣削过程中,随着主轴转速的提高,微细沟槽底部的表面粗糙度  $Ra$  值呈先降后增的趋势;当主轴转速为  $20\ 000 \text{ r}/\text{min}$  时,表面粗糙度  $Ra$  值较小,此后,随着主轴转速的进一步增大,表面粗糙度  $Ra$  值又趋于增大趋势。分析其原因为:在主轴转速开始增加时,切屑与前刀面的接触有效摩擦减小,使变形系数减小,缩短了切屑变形时间,减小了切削力,而且 Vit1 块体金属玻璃在切削中不会产生积屑瘤,所以表面质量有所提高;当主轴转速进一步提高时,切削温度也升高,高温软化了被切削材料,使

图5 各试验因素与表面粗糙度  $Ra$  值的关系曲线

沟槽底部形成高低不平的刀刃划痕,同时较高的主轴转速也会使机床主轴产生的振动加强,使得其表面质量又会变差。

## 2.2 铣削深度对表面粗糙度的影响

由图5b所示可知,随着铣削深度的增加,微铣削沟槽表面粗糙度  $Ra$  值在铣削深度大于  $6\ \mu\text{m}$  以后逐渐增大,这一因素的影响也很显著,主要原因为:由于Vit1块体金属玻璃硬度较大,耐磨性强,导致在切削加工过程中切削热的散热差,当铣削深度增加时,刀屑及刀-件之间的实际接触面积增加,切削力会显著增大,使刀具与工件的摩擦剧烈,切削温度较高而软化了材料;另一方面由于切削力增大,引起刀具变形和产生切削振动,使刀具对加工表面产生严重刮擦从而导致表面质量降低。

## 2.3 每齿进给量对表面粗糙度的影响

由图5c所示可知,随着每齿进给量的增大,微铣削沟槽表面粗糙度  $Ra$  值有缓慢增大的趋势。微铣削沟槽底部的表面粗糙度  $Ra$  值与微铣刀刀刃划过的痕迹高低有直接关系,微铣刀第一刃高速划过后,材料来不及变形和散热又被第二刃划过,这样往复进给,残留下较明显的划痕和残留面积。随着每齿进给量增大而增大了残留面积的高度,造成了表面粗糙度  $Ra$  值的缓慢增大,这与传统铣削理论一致,本试验中每齿进给量变化因素对微铣削沟槽表面粗糙度影响并不显著。

## 3 结语

通过对Vit1块体金属玻璃的微铣削正交试验,得出不同因素对加工表面质量的影响由大到小依次为:主轴转速、铣削深度和进给速度(每齿进给量),铣削深度和主轴转速对表面粗糙度影响接近,二者对表面粗糙度影响都较为显著,而进给速度的影响并不显著,为此微铣削Vit1块体金属玻璃可采用略大的进给速度以提高切削效率。在该试验尺度及切削条件下铣削加工微槽底部不会产生铣削毛刺。

Vit1块体金属玻璃的微铣削加工并非主轴转速

越高对表面质量越好,而是在  $20\ 000\ \text{r}/\text{min}$  左右时,表面粗糙度  $Ra$  值较小。在微铣削加工Vit1块体金属玻璃时,采用主轴转速在  $20\ 000\ \text{r}/\text{min}$  左右,铣削深度  $a_p$  小于  $6\ \mu\text{m}$ ,每齿进给量  $f_z$  在  $2\ \mu\text{m}/\text{z}$  以下的切削参数可获得较好的表面质量。

## 参考文献:

- [1] KUMAR P, KUMAR M, BAJPAI V, et al. Recent Advances in Characterization, Modeling and Control of Burr Formation in Micro-Milling [J]. Manufacturing Letters, 2017, 17(13): 1-5.
- [2] 张艳,王咏萱,赵岩,等.金属玻璃切削加载的形变屈服准则与实验验证[J].高技术通讯, 2017, 27(3): 285-293.
- [3] 赵岩,魏勋利,张艳,等.非晶态合金的零件成形加工技术与形变机理分析[J].高技术通讯, 2014, 24(11): 1176-1186.
- [4] 杨林丰,刘亚俊,谢晋,等.Zr基大块非晶合金低速切削性能试验研究[J].制造技术与机床, 2015(10): 89-92.
- [5] SERBEST E, BAKKAL M, KARIPEIN I, et al. The effect of cuttings speed in metallic glass Grinding [C]//Proceedings of International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies. Paris: AIP Conference Proceedings, 2011: 967-972.
- [6] 陈明君,陈妮,何宁,等.微铣削加工机理研究新进展[J].机械工程学报, 2014, 50(5): 161-172.
- [7] 高奇,巩亚东,周云光,等.单晶镍基高温合金DD98微铣削表面质量试验[J].东北大学学报, 2017, 38(3): 385-389.
- [8] 阴晓铭,于化东,许金凯,等.高速精密微铣削Ti-6Al-4V表面质量影响因素试验研究[J].组合机床与自动化加工技术, 2015(10): 56-60.
- [9] 高奇,蔡明.高速微尺度铣削单晶铝表面粗糙度试验研究[J].组合机床与自动化加工技术, 2016(9): 13-16.
- [10] 张卫国. Vit1块体金属玻璃的切削性能研究[D].秦皇岛:燕山大学, 2012: 82-87.

作者简介:王志勇,副研究员,博士,主要从事精密与超精密加工及高速加工方面的教学与研究工作。

E-mail: wangzy@ysu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-03