

人造多晶金刚石刀具加工表面 微观纹理的实验研究*

王立江

(吉林工业大学, 长春 130022)

韩荣久 马文生

(长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130021)

摘要 讨论了用人造多晶金刚石刀具(PCD)进行超精密切削加工的表面形貌, 重点讨论了微观纹理特征。

关键词: 多晶金刚石; 微观纹理; 超精密加工

1 引言

在不到三十年的时间里, 单点金刚石超精密切削加工技术得到了迅速发展, 已经成为一种实用的工艺技术, 成为现代超精密加工的基本手段^[1], 作为刀具的金刚石是碳的同素异形体, 其硬度极高, 是自然界最硬的材料。过去一直使用的是天然金刚石, 科学技术的发展使得金刚石可以人工合成, 如美国 GE 公司人工合成了人造金刚石, 只是颗粒较小, 并用它制造了多晶金刚石(Polycrystalline Diamond, 简称 PCD)刀具。这种刀具是在硬质合金基体上烧结一层约为 0.5mm 厚的人造金刚石微粉形成的复合刀片。它的重要意义在于: (1) 人造的 PCD 复合刀片由于其基底是硬质合金, 故兼有金刚石的高硬度和硬质合金的较高强度。刀具的韧性、焊接性、导电性等性能都优于天然单晶金刚石, 这对刀具的制造、刃磨和使用都是有利的; (2) 天然单晶金刚石在地壳内的储量十分稀少, 仅为黄金储量的 1/750, 其中能用于制造刀具的宝石级金刚石就更少了。PCD 刀具的出现给刀具材料提供了一个新的来源, 而且资源丰富价格低廉, 约为天然单晶金刚石的 1/10; (3) 国内外目前在超精密加工中唯一采用天然单晶金刚石作刀具, 仅在精密加工时才采用 PCD 刀具。那么, PCD 刀具能不能用于超精密加工, PCD 刀具能不能代替天然金刚石刀具是人们所关注的问题。我们课题组在国家自然科学基金委员会的资助下, 用 PCD 刀具进行超精密切削实验, 得到 $Ra \leq 0.01 \mu m$ 的成果。实验获得成功, 具有一定的实用价值。国内外关于用 PCD 刀具进行精密特别是超精密加工研究的报导还不多见, 本文从加工表面微观纹理的角度来探讨 PCD 刀具加工的特征和一些规律。

切削实验是在引进的 MSG—325 型数控金刚石车床上进行的。该机床的床身由天然花岗石制成,底座由三个空气弹簧支撑,主轴运动误差 $<0.05\mu\text{m}$,导轨直线度在 300mm 范围内小于 $0.2\mu\text{m}$ 。控制系统分辨率为 $0.01\mu\text{m}$ 。切削试件粗糙度的测量是在英国产 Form Talysurf 表面测量仪上进行的。采用的刀具分别是颗粒度为 $60\mu\text{m}$ 的 PCD60、颗粒度为 $20\mu\text{m}$ 的 PCD20 和天然单晶金刚石刀具。后者是为了与 PCD 刀具对比而用于实验的。同时,单晶金刚石也可以看成是颗粒度很大的 PCD。实验中采用烃基冷却液喷雾冷却。

2 不同切削用量的微观纹理

本实验是用 PCD60 刀具切削硬铝,其部分结果示于图 1。

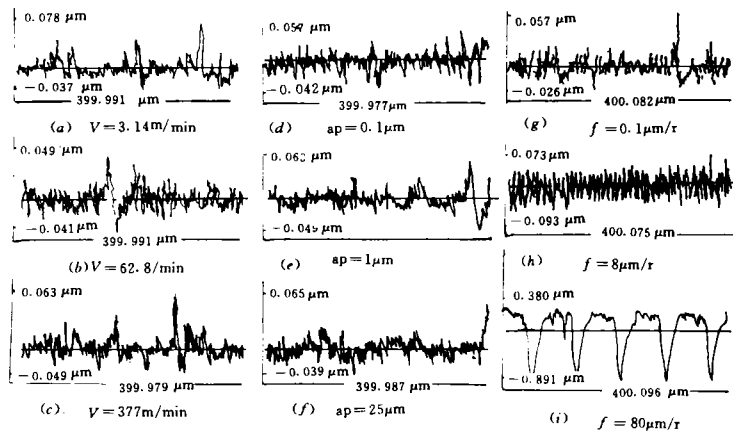


图 1 不同切削用量的微观纹理

2.1 改变切削速度 V

固定切削深度 $a_p = 5\mu\text{m}$,进给量 $f = 5\mu\text{m}/\text{r}$,取 $V = 3.14, 6.28, 62.8, 125.6, 188.5, 251.3, 314, 377\text{m}/\text{min}$ 。对所加工的试件经测量 R_a 的变化极小,仅在 $0.008 \sim 0.010\mu\text{m}$ 之间波动。取其三个不同数量级的 $V = 3.14, 62.8, 377\text{m}/\text{min}$ 的微观纹理曲线,列于图 1 的(a)、(b)、(c)。可见,虽然曲线各异,但没有本质上的区别。由于在 MSG—325 型机床上用金刚石刀具加工有色金属试件时, V 对粗糙度和微观纹理的影响作用极小,故在以下的实验中可不必顾及 V 的变化而采用平面镜试件,只固定机床主轴的转数 $n = 1000\text{r}/\text{min}$ 。

2.2 改变切削深度 a_p

固定 $f = 5\mu\text{m}/\text{r}$,取 $a_p = 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 15, 25\mu\text{m}$ 。其测量结果 R_a 也是在 $0.008 \sim 0.010\mu\text{m}$ 之间波动。基本上不变。取三个不同数量级的 $a_p = 0.1, 1, 25\mu\text{m}$ 的微观纹理曲线列于图 1 的(d)、(e)、(f),同样是没有本质区别。

2.3 改变进给量 f

固定 $a_p = 5\mu\text{m}$,取 $f = 0.1, 0.2, 0.5, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 80\mu\text{m}/\text{r}$ 。测量结果 R_a 的变化很大。 $f = 0.1\mu\text{m}/\text{r}$ 时, $R_a = 0.007\mu\text{m}$; $f = 80\mu\text{m}/\text{r}$ 时, $R_a = 0.30\mu\text{m}/\text{r}$ 的微观纹理曲

线,列于图 1 的(g)、(h)、(i),差别是十分明显的。(g)与(a)~(f)的曲线类同,而(h)已有明显区别,(i)更是完全不同了。

由以上实验结果得知,在切削用量三要素中, V 和 a_p 对微观和粗糙度的影响可以忽略不计,而 f 的影响很大,故以下的研究只改变 f 。

3 精密与超精密加工表面微观的特征

此实验是用 PCD60 和天然单晶金刚石刀具车削硬铝平面镜。因定 $a_p=5\mu\text{m}$,取 $f=0.1、1、3、5、7、10、15、20、25、30、40、60\mu\text{m}/\text{r}$ 。图 2 是 PCD60 刀具切削的粗糙度 Ra 值(以纳米表示)和部分微观纹理曲线。为了对比,还测量了天然单晶金刚石刀具切削的 Ra 值(以纳米表示)并给出了与图 2 相同的部分微观纹理曲线,见图 3。

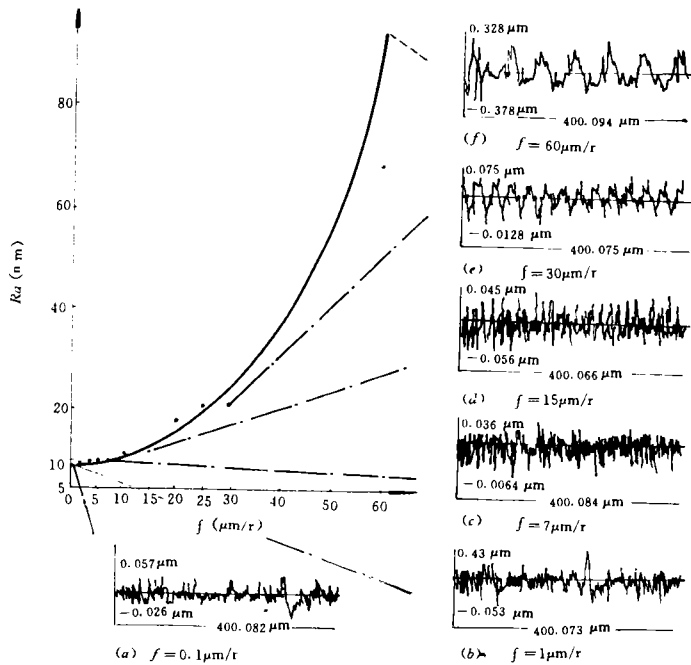


图 2 PCD60 刀具切削的 $Ra-f$ 及微观纹理曲线

现分析如下:

(1)PCD 刀具迄今为止仅用于精密加工,文献[2][3]还明确指出,超精密加工只能采用天然单晶金刚石刀具。而本文实验却证明,PCD 也能加工出 $Ra<0.01\mu\text{m}$ 的超精密表面。只是能达到这一界限的进给量值不同而已,PCD 为 $7\mu\text{m}/\text{r}$ (见图 2),天然单晶金刚石为 $15\mu\text{m}/\text{r}$ (见图 3)。上文在改变 V 和 a_p 的实验中,当取 $f=5\mu\text{m}/\text{r}$ 所得到的所有实验点,以及改变 f 中的 $f<7\mu\text{m}/\text{r}$ 时得到的实验点,共 23 个实验点,其 Ra 的值都 $\leq 0.01\mu\text{m}$ 。所以,用 PCD 可以进行超精密加工不是一种偶然现象。

(2)由微观纹理曲线可见,用 PCD60 切削时 $f\leq 7\mu\text{m}/\text{r}$ 的曲线和用天然单晶金刚石切削时 $f\leq 15\mu\text{m}/\text{r}$ 的曲线在本质上相近。其共同特点是没有出现峰距等于进给量、峰高近乎相等

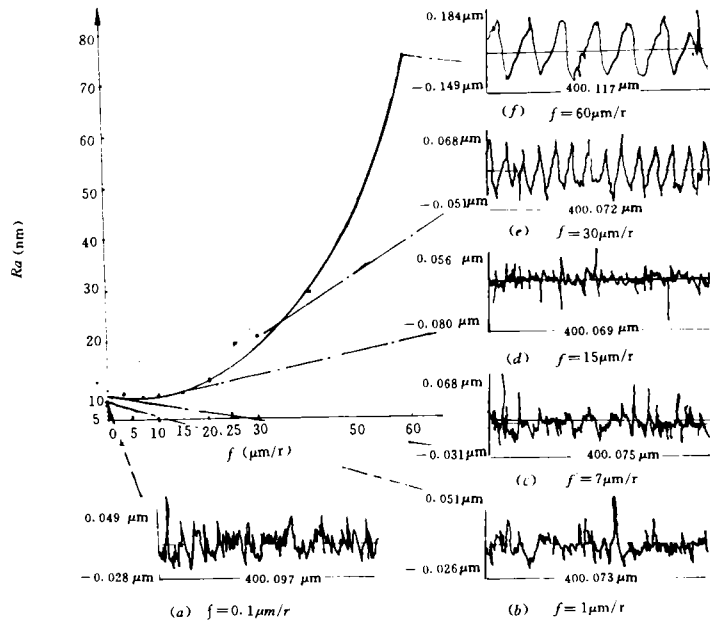


图3 天然单晶金刚石刀具切削的 Ra - f 及微观纹理曲线

的周期规律,而进给量较大的其它纹理却是与进给量直接有关的周期性曲线。见图2及图3,当 $f \leq 60 \mu\text{m}/\text{r}$ 时,都是7个峰多一点,峰距约为 $60 \mu\text{m}$; $f = 30 \mu\text{m}/\text{r}$ 时,都是13个峰多一点,峰距约为 $30 \mu\text{m}$; $f = 15 \mu\text{m}/\text{r}$ 时,PCD60加工的曲线仍然有进给量的周期性,是26个峰多一点,峰距约为 $15 \mu\text{m}$ 。而天然单晶金刚石加工的却没有明显的进给量周期性,峰高的差别较大。进给量的周期性在图1的(h)、(i)中也得到证实(其 Ra 分别为 0.021 和 $0.301 \mu\text{m}$,都未达到 $Ra \leq 0.01 \mu\text{m}$ 的超精密水平)。由于进给量对 Ra 的影响很大,故只有消除它的影响作用才能达到超精密加工时粗糙度的要求。文献[4]对 $f = 2.2, 5.1, 16, 36, 100, 200 \mu\text{m}/\text{r}$ 等6种进给量作过加工铝镁合金的实验,得出“在切削厚度薄到一定程度(也就是进给量小到一定程度)之后,残留面积对加工表面粗糙度的影响将会消失。而影响粗糙度的主要因素,是由其它原因造成的各种波长的波纹”的结论。也证明进给量很小时,这一要素对粗糙度的影响作用能够消失。只有这时, Ra 值才有可能达到超精密的水平。

4 超精密加工微观纹理的细化分析

我们对一些金刚石刀具加工的微观表面作进一步的细化处理时,发现了一些规律,即当 $f = 2 \mu\text{m}/\text{r}$ 时,峰距都为 $2 \mu\text{m}$ 。图4(a)、(b)是PCD60加工硬铝的表面, f 分别为 0.2 和 $0.5 \mu\text{m}/\text{r}$; (c)、(d)是用PCD20加工紫铜的表面, f 分别为 1 和 $2 \mu\text{m}/\text{r}$; (e)、(f)是用天然单晶金刚石刀具加工无氧铜的表面, f 分别为 0.5 和 $2 \mu\text{m}/\text{r}$ 。它们的曲线全宽与峰数之比分别为 $18.035/9$ 、 $18.034/9$ 、 $18.033/9$ 、 $8.542/4$ 、 $27.542/14$ 、 $18.033/9$,即峰距都是 $2 \mu\text{m}$,说明有一种共同的因素决定了其细化纹理的峰距。而此实验是采用了不同的刀具、不同的试件材料和不同的进给量,唯一不变的是在同一台机床上进行的。可以推断,这一规律的出现取决于机床和测试系统因素,而与刀具、切削条件及试件材料无关。

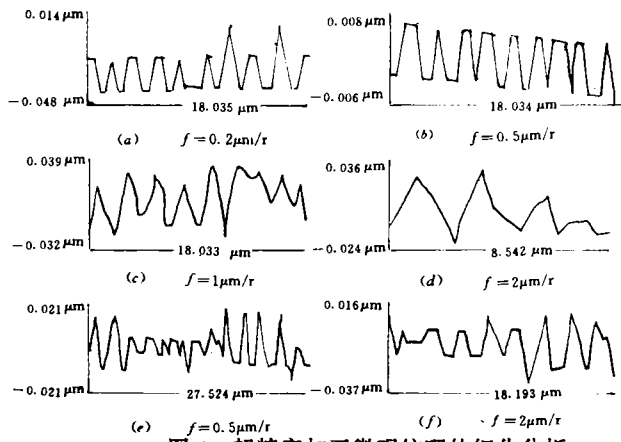


图4 超精密加工微观纹理的细化分析

5 PCD 颗粒度与微观纹理的关系

为分析 PCD 颗粒度与微观纹理的关系,本文采用 PCD20 刀具,以 $f=60, 40, 20, 10 \mu\text{m}/\text{r}$ 加工硬铝,其细化曲线示于图 5(a)、(b)、(c)、(d)。可见,每个进给时所跨越的峰数分别为 3、2、1、0.5。这正好和进给量与颗粒度的比值 $\frac{60}{20}, \frac{40}{20}, \frac{20}{20}, \frac{10}{20}$ 相当。当进给量小于颗粒度时,每个进给量被一个颗粒所包容,其峰数都应该是 1。而一个进给量跨数个峰是 PCD 的多晶作用的结果,即试件表面是由数个金刚石颗粒形成的,这对粗糙度是不利的。因此,要想用 PCD 加工粗糙度很小的超精密表面,应该采用颗粒度大的 PCD,这时的试件表面将由一个颗粒形成,与单晶金刚石形成工件表面的情况接近。而由多颗粒形成的表面不可能达到 $Ra \leq 0.01 \mu\text{m}$ 的超精密水平。

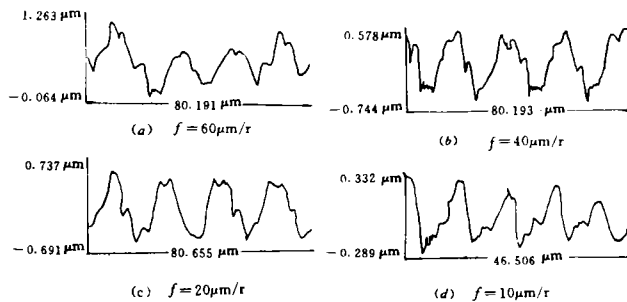


图5 颗粒度与微观纹理的关系

6 结 束 语

本文用三种金刚石刀具,对不同有色金属材料以及采用不同的切削用量,进行了切削加工的实验研究,得出以下结论:

(1)在金刚石刀具切削中,切削速度和切削深度对其表面微观纹理和粗糙度的影响很小,

主要起作用的是进给量。在精密加工时,试件表面的微观纹理呈峰高近乎相等、峰距等于进给量的周期性曲线;而超精密加工微观纹理却不是与进给量有关的周期性曲线,而是消除了进给量影响的非周期性曲线。

(2)通过对微观纹理的细化分析发现,在 $f \leq 2\mu\text{m}/r$ 时的峰距都约等于 $2\mu\text{m}$,这是机床和测试系统因素所决定的。另外,还观察到PCD的多颗粒特征在微观纹理上的反映。因此,在进行超精密加工时,应采用颗粒度大的PCD刀具。

(3)仔细观察所有的微观纹理曲线,即使是具有周期性规律的,也没有纹理完全相同的两个周期(见图1(i)、图2(f)、图3(f)等等)。这时,虽然刀具、机床、切削条件各因素都一致,但是由于工件材料的微观不均匀性和切削过程中的弹、塑性变形以及切削运动的微观不稳定性等因素,导致了微观纹理的不一致性。

(4)我们的大量实验多次重复证实,人造多晶金刚石刀具在一定的进给量范围内,也可以加工出 $Ra \leq 0.01\mu\text{m}$ 的超精密表面,与天然金刚石刀具一样能达到纳米级的加工水平。因此,价廉、韧性又较好的人造多晶金刚石刀具的适用范围比天然单晶金刚石刀具更加宽广。

参 考 文 献

- [1] 袁哲俊、周明,工具技术,1994,(2):2—7
- [2] Frederick J., Cutting Tool Engineering,1982,(10):21—22
- [3] 鸿野雄一郎,1983,(12):31—34
- [4] 陈永诤、卢文祥、陈日曜,华中工学院学报,13(1985),147—150

Experimental Research for Surface Micro Texture Manufactured with PCD Tool

Wang LiJiang

(*Depa. of Mechanical Engineering,
Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

Han Rongjiu, Ma Wensheng

(*Changchun Institute of Optics and Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021*)

Abstract

In this paper, surface texture is described, especially for the micro texture, which produced by means of ultra-precision machining with PCD tool.

Key words: Polycrystalline diamond, Micro texture, Ultra-precision machining