

## 温度对金刚石刀具影响的理论模型和实验分析

董国军, 董 申, 孙 涛

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为减小大型金属反射镜在金刚石车削中, 刀具的热变形对加工精度的影响, 研究了金刚石刀具在温度影响下的热变形规律, 结合俄罗斯在热力学方面的研究成果, 根据金刚石晶体和刀体的热膨胀系数和导温系数的不同, 建立了刀具变形量随温度变化的理论计算模型, 并采用高精度的热像仪和电感测微仪记录刀具的温度变化和变形量, 发现当温度从 23.4 升高到 32.1 时, 刀具变形量达到 1.48  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 金属反射镜; 金刚石车削; 热膨胀系数; 导温系数

中图分类号: TG707

文献标志码: A

文章编号: 1672-6030(2008)02-0125-05

## Theoretical Model and Experimental Analysis of the Temperature Impacting on the Diamond Tools

DONG Guo-jun, DONG Shen, SUN Tao

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The machining accuracy is always impacted by the thermal deformation of the cutting tools in the diamond turning of the large metallic mirrors. To solve this problem, the rules of the thermal deformation to temperature of the diamond tool were studied. In consideration of the different thermal expansion coefficients and thermal diffusivities of the diamond crystal and the tool carrier, the theoretical calculation model of the thermal deformation was established according to certain temperature change, and some research achievements made by Russian scientists were referenced. The changes of the deformation and temperature of the tool were measured and recorded by the commercialized precise thermal imager and inductance micrometer. And the results indicate that the tool deformation reaches about 1.48  $\mu\text{m}$  as the temperature rises from 23.4 to 32.1.

**Key words:** metallic mirror; diamond turning; coefficient of thermal expansion; thermal diffusivity

当代的超精密加工技术在 20 世纪 60 年代初开始于美国, 采用单刃金刚石车刀镜面切削铝合金和无氧铜, 40 年来取得了惊人的成就。尤其是近些年来加工精度从 0.1  $\mu\text{m}$  提高到 0.01  $\mu\text{m}$ , 超精密加工技术正从亚微米级向纳米级发展。

在超精密加工技术领域, 英国克兰菲尔德技术学院所属的克兰菲尔德精密工程研究所 (CUPE) 享有较高声誉, 它是当今世界上精密工程的研究中心之一, 是英国超精密加工技术水平的代表。CUPE 的纳米加工中

心 (nanocentre) 进行超精密车削, 加工工件的形状精度可达 0.1  $\mu\text{m}$ <sup>[1]</sup>。

目前, 我国超精密加工设备的研制落后于世界发达国家。近年来, 北京机床研究所、中国航空精密机械研究所、哈尔滨工业大学和中国国防科技大学等已分别开展超精密机床的研制工作。中国航空精密机械研究所研制的非球面曲面超精密加工机床 2003 年交付验收, 车削加工样件的面形精度 PV 值为 0.3  $\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>, 但实现机床商品化还有一定困难, 加工精度与国外同类

收稿日期: 2007-12-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50575058); 中俄 2008—2009 年度 (NSFC-RFBR) 协议项目。

作者简介: 董国军 (1974—), 男, 博士研究生。

通讯作者: 董国军, dgjhit@yahoo.com.cn.

型相比差距较大,还不能满足国防工业的需要。

大型金属反射镜的应用首先是在军事和空间领域.1989年,NASA Kuiper 空间观测站中 Cassegrain 红外望远镜使用了直径 18.5 cm 的铝反射镜作为摆动的次镜,整体镜重仅 0.5 kg,轻量化 70%。铝反射镜的双曲反射面和安装基面均由精密金刚石车床加工完成。干涉仪检测结果表明面形精度为 633 nm,在超过 90% 口径范围内表面粗糙度估计在 8 nm<sup>[3]</sup>。

在超精密加工中,关于热变形的研究与应用非常广泛.日本在超精密加工中对温度影响的研究取得了丰硕成果,使得其在中小型超精密加工中始终位于世界先进行列,创造了极大的经济价值;另外,德国物理技术研究所(PTB)、英国国家实验室(NPL)、俄罗斯科学院的高温研究所以及中国台湾成功大学等研究人员都在热变形领域进行了理论和应用研究,并取得了有价值的成果<sup>[4]</sup>。

对切削加工中的热变形问题,其温度场是非均匀非稳定的,热变形规律复杂,国内外的研究成果较少。乌克兰的等<sup>[5]</sup>研究了在金刚石车削大型铜镜过程中热变形对加工的影响。至于如何保证被金刚石车削的大型金属反射镜的面形精度 PV 值在 0.2 ~ 0.1 μm,国内外在此方面还没有报道。

本文模拟了金刚石车削中车刀的升温过程,测量了金刚石车刀受温度影响的变形量,并建立理论模型进行计算。

## 1 实验过程和结果

### 1.1 实验设备

实验设备有天然单晶金刚石车刀及刀架,热像仪 IR928,电感测微仪 DCB-5B,点式电加热器和秒表。

热像仪 IR928 具有的测温功能如下。

- (1) 全屏任意点测温功能:十字交叉点任意移动测温。
- (2) 最大温度自动搜索功能:靶面最高温度自动搜索。
- (3) 多点分析:可同时进行 4 点温度分析。
- (4) 区域分析:可同时对选定的 4 个区域进行最高温、最低温、平均温分析。
- (5) 任意线分析:可对图像上任意直线进行温度分析。
- (6) 等温线分析功能:将图像中某一段温度范围的区域用相同的颜色突出显示。

(7) 无需人为校温:内置自动校温系统使测量的温度更加准确稳定。

图 1 和表 1 分别为热像仪的主机外形和其主要技术指标,实验中选用的测温档为 F1 档。



图 1 IR928 热像仪主机外形示意

表 1 热像仪 IR928 技术指标

系统类型	非制冷焦平面
光谱范围/μm	8 ~ 14
测温范围/	- 20 ~ 500
温度分辨率/	0.06
空间分辨率/mrad	1
测温档/	F1: - 20 ~ 125 F2: 0 ~ 500

图 2 和图 3 分别为所选用的电感测微仪 DCB-5B 及 DBC-8ZP/B 型测微仪测头图片。

电感测微仪 DCB-5B 具有的技术参数如表 2 所示,在实验中选用第 1 档作为测温档。



图 2 电感测微仪 DCB-5B



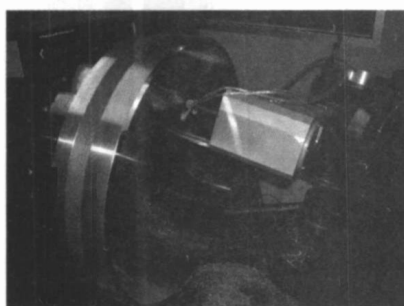
图 3 DBC-8ZP/B 型测微仪测头

表 2 电感测微仪 DGB-5B 的技术参数

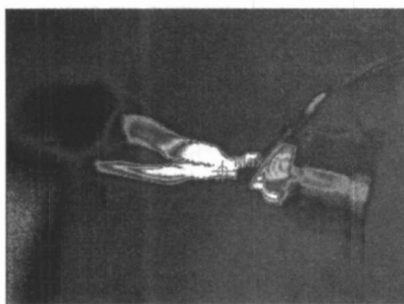
测量范围	刻度值/ $\mu\text{m}$	示值误差/ $\mu\text{m}$
第 1 档 $\pm 3$	0.1	0.06
第 2 档 $\pm 10$	0.5	0.25
第 3 档 $\pm 30$	1	0.5
第 4 档 $\pm 100$	5	2.5
第 5 档 $\pm 300$	10	5

## 1.2 实验方法

图 4(a) 为金刚石车削铝的球面镜照片,图 4(b) 为热像仪在加工时的温度记录.由于金刚石车削切削深度和进给量都非常小,并且为单点加工,故只有刀尖的局部接触工件,切削热从刀尖部位向刀体逐渐扩散,温度沿着刀体逐渐降低,从图 4(b) 中可以看出,装夹车刀刀架部位的温度为室温.



(a) 球面镜加工照片

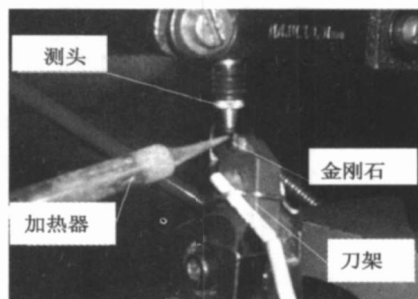


(b) 球面镜加工热像仪温度跟踪照片

图 4 实际加工过程

由于在实际加工中无法对刀具的变形量进行实时测量,故采用图 5 所示的办法,通过用点式电加热器对金刚石刀尖进行加热来模拟金刚石车刀在无切削液时实际刀具的升温过程(图 5(a)),用热像仪实时记录温度变化(图 5(b)),测微仪记录刀具的变形量,并同时记录升温的时间.整个实验过程在室温恒定为 23.4 的超精密加工车间中进行,基本可以消除外界对温度的影响.

从图 5(b) 中可以看出,温度在金刚石车刀上的扩散区域和图 4(b) 中观察的结果相同,所以可以近似认为模拟的情况相同.



(a) 模拟升温实验照片



(b) 模拟升温热像仪温度跟踪照片

图 5 模拟实验过程

## 1.3 实验结果

对金刚石车刀伸长量进行模拟升温实验,测量结果如表 3 所示,是多次实验的平均值.

表 3 金刚石车刀伸长量测量结果

时间/s	温度/	测微仪读数/ $\mu\text{m}$
34	25.1	0.2
68	26.8	0.5
116	29.2	1.0
150	30.9	1.5
174	32.1	2.0
206	33.7	2.4
254	36.1	3.0

## 2 理论计算模型

在精密测试技术、精密加工及机械设计中,温度变化引起机械零部件热变形计算常采用的公式为<sup>[6]</sup>

$$L = L_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (1)$$

式中: $L$  为被测对象的尺寸,mm;  $L_0$  为材料的平均热膨胀系数,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta t$  为温度差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta L$  为热变形量,mm. 该传统公式在机械精度要求较低时可使用,高精度时该公式的计算结果和实际变形量相差很大.因此,考虑到刀具温度分布不均匀性的特点,结合俄罗斯热力学专家<sup>[7]</sup>关于物体温度分布不均匀的变形量的计算方法,建立了金刚石刀具的热变形计算模型,即

$$(y, \tau) = \rho_p \cdot f(y, \tau) \quad (2)$$

$$f(y, \tau) = \exp\left[-\frac{y^2}{4\tau}\right] - \frac{y\sqrt{\tau}}{\sqrt{4}} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{\sqrt{4\tau}}\right)\right] \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\alpha_1} + \frac{h_2}{\alpha_2}} \quad (4)$$

$$d_t = \epsilon \cdot (\rho_p - T) \cdot \int_0^l f(y, \tau) dy \quad (5)$$

式中:  $\rho_p$  为切削温度;  $y$  为从金刚石车刀至刀架的距离;  $\tau$  为升温时间;  $f(y, \tau)$  为  $y$  和时间  $\tau$  的函数;  $\alpha$  为材料的导温系数;  $\alpha_1$  为单晶金刚石线膨胀系数;  $\alpha_2$  为刀体线膨胀系数;  $\epsilon$  为金刚石刀具和刀架的线膨胀系数;  $d_t$  为变形量;  $T$  为室温;  $h_1$  为刀头长度;  $h_2$  为刀体长度;  $l$  为有效受热长度, 等于  $h_1$  和  $h_2$  之和。

图6是温度从车刀刀尖向刀体扩散的示意图, 该函数能够较好地反映出车刀温度分布的不均匀性。

图7为金刚石车刀热变形计算示意图, 刀头材料为天然单晶金刚石(长度为  $h_1$ ), 刀体材料为45号钢(长度为  $h_2$ )。

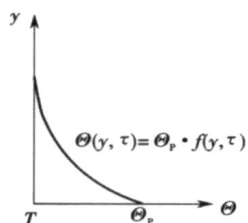


图6 金刚石车刀的温度变化示意

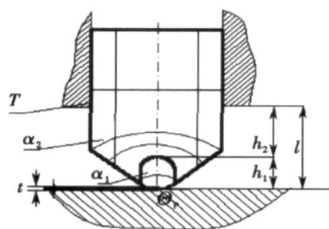


图7 金刚石车刀热变形计算示意

表4为刀具和测微仪测头的基本参数, 依次是线膨胀系数、导温系数、金刚石和玛瑙长度  $h_1$  以及刀具和测微仪有效受热长度  $h_2$ 。虽然玛瑙测头的导温系数很小, 但是从图5测微仪测头的温度分布中可以看出, 实际受温度影响的区域还包括从测头至测微仪测头装夹部位, 经测量其有效受热长度  $h_2$  为15 mm, 所以

在计算中把这部分的热变形量也考虑在内。

表4 刀具和测微仪测头的基本参数

材料	参数			
	$\alpha / (10^{-6})$	$\lambda / (W/m \cdot K)$	$h_1 / mm$	$h_2 / mm$
刀具(金刚石)	$0.91 \times 10^{-6}$	0.830	4.0	34.5
测头(玛瑙)	$6.50 \times 10^{-6}$	0.004	1.4	15.0

在模拟升温实验中, 金刚石车刀伸长量的理论计算结果见表5。其中:  $d_{t1}$  为刀具变形量;  $d_{t2}$  为测微仪测头变形量。

表5 金刚石车刀伸长量的理论计算结果

时间/s	温度/°C	$d_{t1} / \mu m$	$d_{t2} / \mu m$	总和
34	25.1	0.22	0.05	0.27
68	26.8	0.50	0.11	0.61
116	29.2	0.97	0.19	1.16
150	30.9	1.28	0.51	1.79
174	32.1	1.48	0.68	2.16
206	33.7	1.86	0.81	2.67
254	36.1	2.33	0.98	3.31

### 3 结果讨论

图8为金刚石车刀随温度变化的变形量的理论计算值与实际测量值的比较。从图8中可以看出, 在温度为25.1°C时, 变形量的测量值为0.2 μm, 理论计算值为0.27 μm, 误差为35%; 在温度为30.1°C时, 变形量的测量值为1.2 μm, 理论计算值为1.34 μm, 误差为11.7%; 在温度为32.1°C时, 变形量的测量值为2.0 μm, 理论计算值为2.16 μm, 误差为8%。从结果的比较来看, 当测量值为0.2 μm时, 误差达到了35%, 分析认为, 测微仪的精度较低是造成对细微变形量测量时误差大的主要原因。

当温度从23.4°C升高到32.1°C时, 去除测微仪测头受温度影响的变形量, 刀具实际变形量达到1.48 μm, 对加工大型金属反射镜的面型精度影响很大。

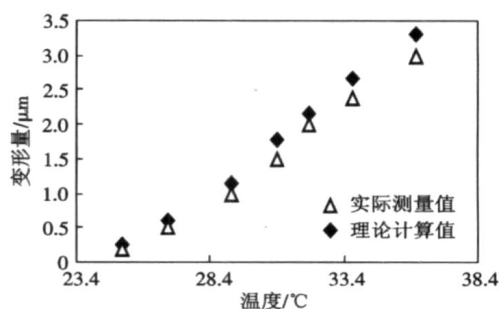


图8 变形量的理论计算和实际测量值的比较

## 4 结 语

笔者采用点式电加热器对金刚石刀尖进行加热来模拟金刚石车刀在无切削液时实际刀具的升温过程,研究金刚石刀具在温度影响下的热变形规律,建立理论模型来计算金刚石车刀对温度的变形量.虽然实验数据和理论计算存在一定误差,但笔者认为该理论模型能够比较准确地反映车刀的热变形规律,可以为未来加工大型金属反射镜面形精度的提高提供参考.

## 参考文献:

- [1] 袁哲俊,王先逵.精密和超精密加工技术[M].北京:机械工业出版社,1999:1-3.  
Yuan Zhejun, Wang Xiankui. *Precision and Ultra-Precision Machining Technology*[M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 1-3 (in Chinese).
- [2] 罗松保,张建明.非球面曲面的超精密加工与测量技术的研究[J].制造技术与机床,2003(9):58-61.  
Luo Songbao, Zhang Jianming. Research on ultraprecision machining and measuring technology for aspherical surface [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2003 (9): 58-61 (in Chinese).
- [3] Downey C H, Abbott R S, Arter P I, et al. The chopping secondary mirror for the Kuiper airborne observatory[C]// *Proceedings of Precision Engineering and Optomechanics*. San Diego, CA, USA, 1989: 329-342.
- [4] 苗恩铭.精密零件热膨胀及材料精确热膨胀系数研究[D].合肥:合肥工业大学仪器科学与光电工程学院,2004.  
Miao Enming. Research on Thermal Expansion of Precision Mechanical Parts and Material Precise Coefficient of Thermal Expansion [D]. Hefei: School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Hefei University of Technology, 2004 (in Chinese).
- [5] , , [J]. , 1989, 5: 38-41.
- [6] GB4339-1999 金属材料热膨胀特性参数的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.  
GB4339-1999 The Testing of Thermal Expansion Parameters of Metal Material [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999 (in Chinese).
- [7] , [M]. M : 1990: 288.