

文章编号 1004-924X(2015)07-2031-12

高速精密磨削 9CrWMn 冷作模具钢的 磨削力和比磨削能

王 艳^{1,2*}, 徐九华², 杨 路²

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 南京航空航天大学 机电工程学院, 江苏 南京 210016)

摘要:分析了高速精密磨削 9CrWMn 冷作模具钢的机理, 采用 DEFORM 软件对高速磨削模具钢 9CrWMn 过程进行了磨削力仿真。使用高精度高速平面磨床对模具钢 9CrWMn 进行了高速精密磨削试验, 并在线测量了多种工况下的磨削力。结果表明: 在其他两组工艺参数不变时, 随着工件进给速度增加, 磨削力特别是法向磨削力会增大近 45%; 法向磨削力和切向磨削力随着砂轮的线速度上升而下降, 法向磨削力下降近 33%; 磨削深度对磨削力影响较大, 大的磨削深度对法向磨削力的影响尤其显著, 可使法向磨削力增大近 100%。分析了磨削工艺参数对比磨削能的影响规律, 结果显示: 随着磨削深度和工件进给速度的增大, 比磨削能呈比较明显的下降趋势, 符合磨削加工中的尺寸效应; 随着砂轮线速度的增大, 比磨削能呈上升趋势。最后, 对高速磨削前后工件表面的微观形貌进行了对比分析, 磨削力试验结果和仿真理论分析相一致。

关键词:高速磨削; 冷作模具钢 9CrWMn; 磨削力; 比磨削能; 在线测量

中图分类号: TG580.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.2031

Grinding force and specific grinding energy of high speed grinding of 9CrWMn cold work die steel

WANG Yan^{1,2*}, XU Jiu-hua², YANG Lu²

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: yanwang909909@163.com

Abstract: The high speed grinding mechanism for 9CrWMn cold work die steel was analyzed, and DEFORM software was used to simulate the grinding force in high speed grinding processing of 9CrWMn cold work die steel. A series of high speed grinding experiments were conducted on a Computer Numerical Control(CNC) high speed grinding machine (BLOHM PROFIMAT MT-408) to measure grinding forces on line under different working conditions. It demonstrates that as the workpiece feed rate increases, the grinding forces especially the normal force increase nearly 45%. Both normal and tangential forces decrease with going up the wheel velocity and the normal force decreases nearly

收稿日期: 2014-11-05; 修订日期: 2014-12-30.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB724403)

33%。The cut depth has a larger effect on the grinding forces, especially the normal grinding force increases nearly 100%。The influence of processing parameters on the specific grinding energy was investigated. It shows that with increasing grinding depth and workpiece feed rate, specific grinding energy decreases obviously, in accordance with the size effect in grinding process. Moreover, with increasing the wheel velocity, the specific grinding energy increases. At last, the microtopographies of a workpiece surface before and after high speed grinding were compared. The experimental results are well consistent with simulation analysis results.

Key words: high speed grinding; cold work die steel 9CrWMn; grinding force; specific grinding energy; measurement on line

1 引言

高速磨削加工技术是一种通过极大地提高磨削速度来达到提高材料去除率、加工精度和加工质量的高新磨削加工技术,它通常采用超硬磨料砂轮和能可靠实现高速运动的高精度、高自动化、高柔性的制造设备完成加工,是一种高效、经济的现代加工制造技术。该技术可大大提高加工生产率和工件表面质量,并能实现黏性金属和脆性金属等难加工材料的高效加工,极大地缩短产品的生产制造周期,大幅度降低加工成本。

20 世纪 90 年代以来,人们逐渐认识到高速磨削所带来的技术优势和经济效益,开始充分注意和重视高速磨削技术,使其在实验研究的基础上得到了迅速的发展^[1-3]。20 世纪 30 年代初,德国物理学家萨洛蒙(Carl. J. Salomon)通过分析总结大量切削实验,并根据其物理延伸,首先提出了高速及超高速加工的概念,他发表了具有深远意义的著名的 Salomon 曲线,开创性地假设了切削加工可以越过切削温度非常高的曲线驼峰区域。该理论指出在极高的切削速度下,切削加工可以越过切削过程中产生的高温死谷,使刀具可以在超高速区进行高速切削,而不致于损伤工件与刀具,从而能够极大地减少切削工时,大幅度提高机床生产效率。

磨削力是高速磨削加工过程中一个极为重要的物理量,磨削过程中的很多基本特征都可以通过磨削力来反映。它是评价砂轮锋利度和工件材料可磨削性的一个重要指标。磨削力与工件材料的显微结构、砂轮特性及磨削用量、金属材料去除机理等都有着非常直接的关系,它还会直接影响砂轮耐用度、磨削工件表面粗糙度以及比磨削能

等相关物理量。因此,分析研究不同磨削用量和工艺条件对磨削力的影响规律有着非常最要的意义。国内一些学者也对磨削力展开过研究:天津大学的牛文铁、徐燕申^[4]对工程陶瓷缓进给磨削的磨削力进行了实验研究;湖南大学的肖鹏^[5]研究了钛合金的高速磨削工艺参数对磨削力及表面完整性的影响,但对于冷作模具钢的超高速磨削工艺,国内外的相关研究甚少。

本文以国家 973 项目“超高速磨削机理与磨粒有序排布砂轮(2009CB724403)”课题为背景,在分析冷作模具钢 9CrWMn 超高速磨削机理的基础上对磨削力进行了在线检测和影响因素分析,最后研究了磨削工艺参数对比磨削能的影响规律。

2 高速精密磨削加工机理分析

高速磨削加工过程中的磨削速度很高,磨屑产生的时间极短。与普通低速磨削相比,高速磨削在极短的时间内以极高的应变率完成磨屑的塑性变形,故其成屑机理与普通低速磨削有很大的差别:宏观表现为磨削工件表面弹性变形减弱;磨沟两侧由于塑性变形而产生的隆起高度变小;磨屑产生过程中耕犁滑擦的间距变小,磨削工件表面粗糙度值随之降低;磨削工件表层加工冷作硬化层变浅;工件表面层残余应力减小。此外,高速磨削过程中,磨粒在立体氮化硼(CBN)砂轮高速磨削加工弧区上的移动速度以及工件进给速度均大幅度提高,加上磨屑的应变率较高,温度响应较为滞后,使得磨削工件表面温度较低,所以能够穿越容易发生烧灼的磨削工艺参数区域,从而大幅度扩展了磨削用量的取值范围。

通过引入切屑几何参数可以分析以高砂轮线

速度为特征的高速/超高速磨削对材料切削加工性能的影响^[6],其中一个参数就是最大未变形切屑厚度 h_{\max} 。单颗磨粒与工件材料的干涉如图1所示, l_c 为磨削区的接触弧长, l_i 为磨削接触弧上任意点距离磨粒切入点的距离。由图1可以看出:待切削材料层的厚度 h 不断由小变大,假设磨屑的截面积为三角形时, h_{\max} 可由式(1)表示为^[7]:

$$h_{\max} = \left[\frac{3}{C \tan \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v_w}{v_s} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a_p}{d_{\text{eq}}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

式中: C 为单位面积的有效磨粒数; θ 为压射冲头或磨粒锥顶半角; v_w 为工作台速度; v_s 为砂轮线速度; a_p 为磨削深度; d_{eq} 为砂轮当量直径。

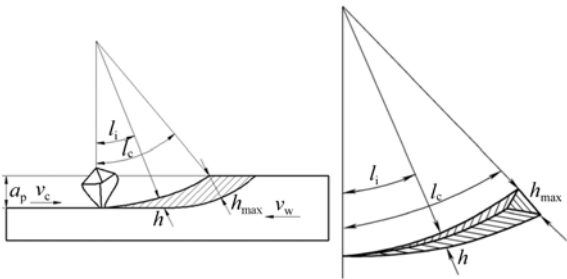


图1 单颗磨粒与工件材料的干涉

Fig. 1 Interference between single abrasive grain and workpiece

由式(1)可知: h_{\max} 与 a_p 、 v_w 成正比,与 v_s 成反比。因此,可以通过提高 v_s 来减少 h_{\max} ,降低磨削力,从而提高工件表面质量,防止砂轮磨损。

2 高速精密磨削冷作模具钢的试验工艺装置

试验选用的9CrWMn冷作模具钢广泛用于制造冲裁用的模具(落料冲孔模、修边模、冲头、剪刀)、冷镦模、冷挤压模、压弯模及拉丝模等,其硬度高、一般大于58~59 HRC(洛氏硬度);且抗压屈服强度敏感。为防止由于冲击、重载荷、偏心弯曲载荷、应力集中等引起模具破裂和折断,材料要具有一定的强度和韧性。冷作模具一般需承受交变载荷作用,为抵抗疲劳破坏,需要其具有良好的抗疲劳性。另外,还需具有对可能发生冷焊的抵抗能力,即抗咬合黏结能力。

高速磨削试验在德国BLOHM公司产的高速平面精密磨床(PROFIMAT MT 408)上进行,该机床兼有高速和深切磨削的功能,并配置了先进的高压大流量喷射冷却系统,磨床转速达8 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,主轴电机的功率达45 kW,机床采用M5000动平衡系统对砂轮进行动平衡,冷却液出口压力为1.5 MPa,最高砂轮线速度为175 m/s,砂轮线速度无级可调,工作台往复运动的速度为15~25 000 mm/min。采用圣戈班公司生产的CBN砂轮,其型号为B151VSS1427HSNV300,最大砂轮线速度为140 m/s,砂轮外径为400 mm,内径为127 mm,宽度为10 mm,浓度为300% CBN,磨料粒度为120/160 #。为了增加冷却液的压力,采用特制的冷却液喷嘴装置,喷嘴口为20 mm×20 mm的方形,距离砂轮中心线100 mm,和水平线成10°的倾斜角。磨削时浓度为3%的水基冷却液以2 MPa的高压喷射到磨削加工区域。磨削工件采用15×15×10的冷却模具钢9CrWMn,其机械性能如表1所示^[8]。

表1 9CrWMn的机械性能参数

Tab. 1 Mechanical characteristics of 9CrWMn

参数名称	数值
密度(g/cm^3)	7.93
弹性模量(MPa)	2 600
硬度(HRC,淬火后)	65
断裂韧性(J/cm^2)	5

磨削方式为高速切入式逆磨,直接磨削面为15×10的表面,为了排除偶然因素的影响,每道工序均做两遍,剔除明显有出入的实验数据。测力试验装置系统原理图如图2所示。装置实物照片如图3所示。

图3中的测力装置采用KISTLER三相压电晶体测力仪,用以测量磨削过程的磨削力。整个测力仪由3部分组成:瑞士KISTLER 9272型三向压电式测力仪、KISTLER5070A10100型电荷放大器以及相应的数据采集与处理系统。

图4为平面逆磨方式的磨削力示意图。由图4可知,平面逆磨方式的磨削力可分为法向磨削力 F_n 、切向磨削力 F_t 及轴向磨削力 F_a 3个分力。其中: F_t 沿砂轮切向, F_n 沿砂轮径向, F_a 沿砂轮

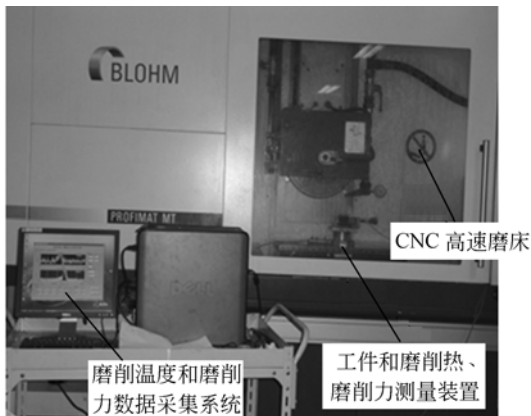


图 2 高速磨削测力装置原理图

Fig. 2 Block diagram of measurement device for high speed grinding force

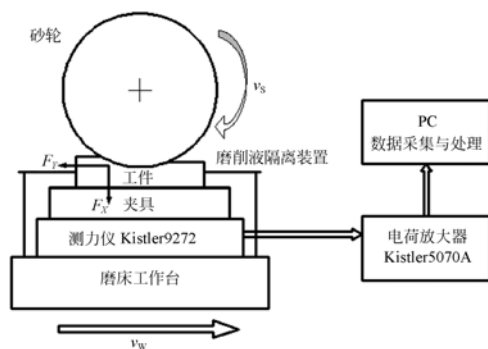


图 4 平面逆磨方式磨削力示意图

Fig. 4 Framework of reverse surface grinding force

向摇摆,一般情况下轴向磨削力较小,所以本试验中将其忽略不计。两组磨削力的关系可用下式表达:

$$\begin{cases} F_n = F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi \\ F_t = F_x \sin \varphi + F_y \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varphi = \frac{2}{3} \arccos \left(1 - \frac{2a_p}{d_{eq}} \right)$

从图 4 和式(2)可以看出,磨削力作用点的位置(φ 角的大小)对磨削过程中的切向力和法向力有影响。研究表明^[5], φ 角的大小与磨削深度有关,当磨削深度较小时, φ 角的值很小,水平磨削力 F_y 和切向磨削力 F_t 以及垂直磨削力 F_x 和法向磨削力 F_n 的数值基本一致;当磨削深度较大时, φ 值变大,水平磨削力 F_y 和切向磨削力 F_t 以及垂直磨削力 F_x 和法向磨削力 F_n 的数值则有较大区别。由于实验中采用的磨削深度都较小,且砂轮的直径远远大于磨削深度,故 φ 值很小。因此,本文中的法向磨削力 F_n 和切向磨削力 F_t 分别用实验测得的垂直磨削力 F_x 和水平磨削力 F_y 代替。

在模具钢高速磨削试验中,主要测量的是切向磨削力 F_t 和砂轮对工件的法向作用力 F_n 。为了保证磨削过程中所测得的磨削力方向的正确性,应避免测量值出现偏差。在工作台与其上放置的测力仪、夹具与工件强磁力吸合之前,用千分表测量测力仪、工件与工作台的平行度和垂直度,不断调整测力仪和工件的摆放位置,直至平行度和垂直度的误差跳动在 $0 \sim 3 \mu\text{m}$ 以内。

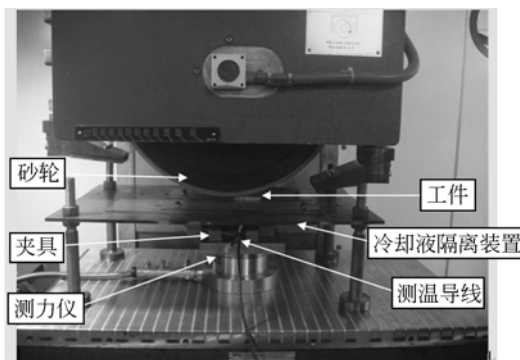


图 3 高速磨削模具钢测力装置实物照片

Fig. 3 Experimental photo of measurement equipment for high speed grinding force

轴向,这 3 个分力相互垂直。法向磨削力 F_n 主要影响砂轮和磨削工件之间的接触变形、工件表面粗糙度以及工件表层质量;而切向磨削力 F_t 主要与磨削时的机床功率消耗和砂轮磨粒磨损的状态有关;轴向磨削力 F_a 则通常影响砂轮旋转时的纵

3 基于 DEFORM 的磨削力仿真分析

采用 DEFORM 软件对高速磨削模具钢 9CrWMn 的加工过程进行了磨削力仿真分析,并利用网格细化及网格自适应技术优化了计算结果。

因 DEFORM 材料库中没有 9CrWMn 材料,因此仿真前需重新添加。查阅材料手册可得 9CrWMn 的物性参数如下:导热率 λ 为 $43(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 、泊松比为 0.29、比热 C 为 $532(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 、弹性模量 E 为 $220 \times 105 \text{ MPa}$ 。

用 Johnson & Cook 模型描述 9CrWMn 的本构关系:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \right) \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right]^\alpha \left[D_0 \exp[k(t - t_b)^\beta] - E \left[\frac{t - t_{\text{room}}}{t_{\text{melt}} - t_{\text{room}}} \right] \right] \quad (3)$$

式中: $A=1\ 200$, $B=891$, $C=0.02$, $D_0=1$, $E=1$, $n=0.2$, $t_{\text{room}}=20^\circ\text{C}$, $t_{\text{melt}}=1\ 345^\circ\text{C}$; $\alpha = \beta = t_b = k = 0$

将以上的 9CrWMn 物性参数及本构方程输入 Deform 中完成新材料 9CrWMn 的定义。

仿真计算时的边界条件设置如下:环境温度 为 20°C ;磨粒与工件的摩擦系数为 0.2;磨粒与工件的热交换系数为 5 N/sec/mm/C ;磨削表面冷却液的对流换热系数为 $10\ 000(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ 。

取 $v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$ 进行建模和计算,得到第 100 个模拟步的应力云图和应力等值线图分别如图 5~6 所示。由图可以看出,工件应力以磨粒为中心均匀分布,应力大小由近及远逐渐递减。

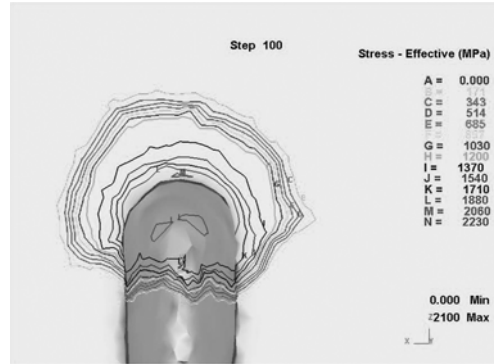


图 6 $v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$ 时第 100 步应力等值线图

Fig. 6 Stress contour map of the 100th step ($v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$)

为更准确地分析磨削过程中的应力情况,此处以仿真的第 100 个载荷步为例,分别对工件 X、Y、Z 方向的应力情况进行单独研究。以磨粒中心为原点将工件沿 YOZ 平面剖切开,并在 Viewport 菜单下用双窗口同时显示剖切位置的一 Y 方向视图以及 +X 方向视图,Z 方向的应力等值图如图 7 所示。由于应力是矢量,所以有正负之分,

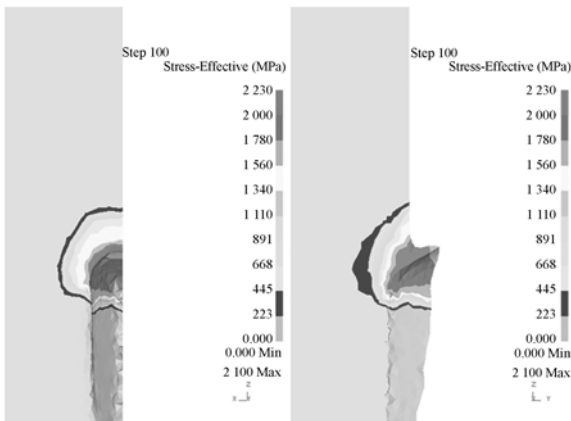


图 5 $v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$ 时第 100 步应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of the 100th step($v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$)

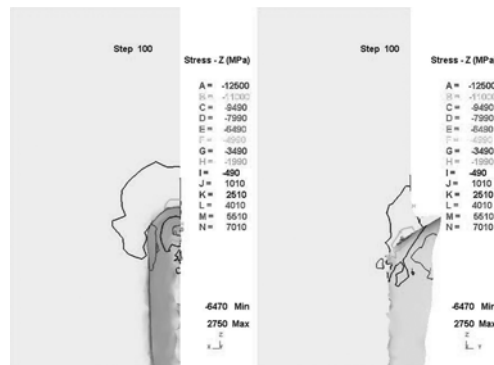


图 7 $v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$ 时第 100 步 Z 方向应力等值线图

Fig. 7 Stress contour map of the 100th step at Z direction($v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$)

但正负只表示方向,并不代表应力的大小。拉应力为正值,方向背离所在截面;压应力为负值,方向指向所在截面。从图中可以看出:

(1)在磨粒旋转运动的作用下,其切线方向上的工件材料因挤压作用承受压应力,尖端接触部分压应力约为 $-2\ 690\ \text{MPa}$,根部压应力约为 $-310\ \text{MPa}$ 。

(2)在工件内应力的影响下,受压应力材料附近的区域承受相反的拉应力,大小约为 $310\ \text{MPa}$ 。

(3)在磨粒的旋转运动以及之前残余应力的作用下,磨粒两侧工件材料因摩擦力的影响而承受拉应力,大小为 $310\sim 2\ 070\ \text{MPa}$ 。

图 8 为 X 方向的应力等值线图,从图中可以看出:

(1)在磨粒旋转运动的作用下,其切线方向上的工件材料被磨粒挤向两侧,尖端接触部分的压应力约为 $-2\ 630\ \text{MPa}$,根部的压应力大小约为 $-443\ \text{MPa}$ 。

(2)在工件内应力的影响下,受压应力材料附近的区域承受相反的拉应力,大小约为 $443\ \text{MPa}$ 。

(3)在工件材料变形影响下,磨粒两侧材料承受拉应力,大小约为 $443\sim 1\ 740\ \text{MPa}$ 。

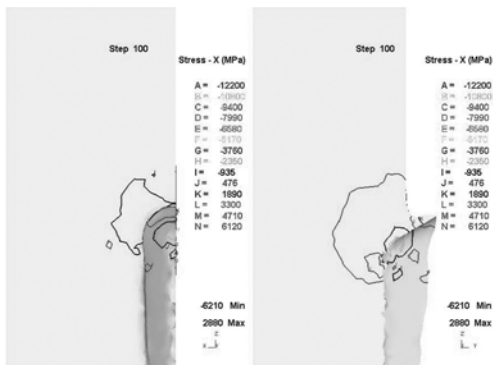


图 8 $v_s=120\ \text{m/s}$, $v_w=4\ \text{m/min}$, $a_p=0.01\ \text{mm}$ 时第 100 步 X 方向应力等值线图

Fig. 8 Stress contour map of the 100th step at X direction ($v_s=120\ \text{m/s}$, $v_w=4\ \text{m/min}$, $a_p=0.01\ \text{mm}$)

图 9 为 Y 方向的应力等值线图,从图中可以看出:

(1)在磨粒旋转运动作用下,其切线方向上接触磨粒的工件材料被向上挤压,尖端接触部分的压应力大小为 $-2\ 860\sim -398\ \text{MPa}$ 。

(2)在工件内应力的影响下,受压应力材料附近的区域承受相反的拉应力,大小约为 $398\ \text{MPa}$ 。

(3)在磨粒根部挤压以及之前残余应力的作用下,磨粒两侧工件材料受向下的拉应力,大小约为 $398\sim 2\ 070\ \text{MPa}$ 。

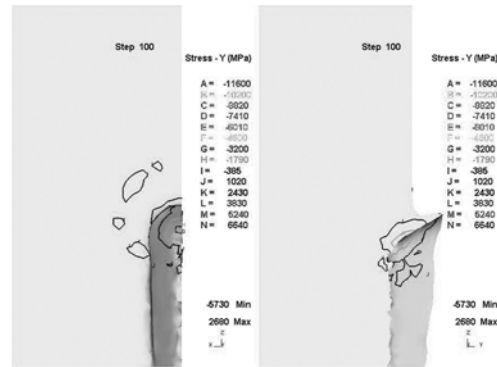


图 9 $v_s=120\ \text{m/s}$, $v_w=4\ \text{m/min}$, $a_p=0.01\ \text{mm}$ 时第 100 步 Y 方向应力等值线图

Fig. 9 Stress contour map of the 100th step at Y direction ($v_s=120\ \text{m/s}$, $v_w=4\ \text{m/min}$, $a_p=0.01\ \text{mm}$)

综上所述,在磨粒旋转运动作用下,其切线方向上工件材料被向上方(即 $+Z$ 、 $+Y$ 方向)两侧挤压;在挤压区域周围的工件材料受到内应力影响(即 $-Z$ 、 $-Y$ 方向),不会随之运动;磨粒两侧工件材料受到工件变形、磨粒根部挤压以及之前残余应力的作用,应力方向指向前方工件内部(即 $+Z$ 、 $-Y$ 方向)。

再以 $v_s=120\ \text{m/s}$, $v_w=4\ \text{m/min}$, $a_p=0.01\ \text{mm}$ 条件下高速磨削模具钢 9CrWMn 为例,选取该次试验 100 步的 3 个方向载荷分量数据,分别按一次导数拟合,得到 X 方向载荷曲线如图 10 所示,Y 方向载荷曲线如图 11 所示,Z 方向载荷曲线如图 12 所示。

从图中可以发现:在磨削初期(即磨粒刚开始接触的阶段),磨粒挤压工件使之发生弹性变形,所以 X 方向、Y 方向和 Z 方向的载荷分量均呈线性增大;随着磨粒的逐渐切入,工件材料达到屈服极限,开始发生塑性变形,故 Y 方向和 Z 方向磨削力增加变缓,最终在某一稳定值附近波动;而此时 X 方向分量,也就是轴向磨削力随着接触区域

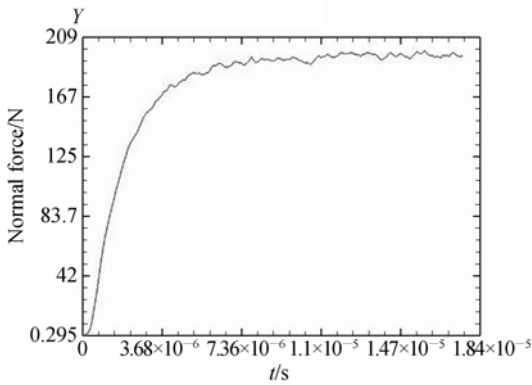


图 10 $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm 时的法向力

Fig. 10 Normal force at $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm

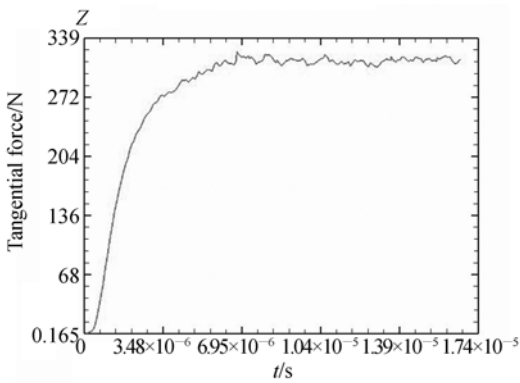


图 11 $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm 时的切向力

Fig. 11 Tangential force at $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm

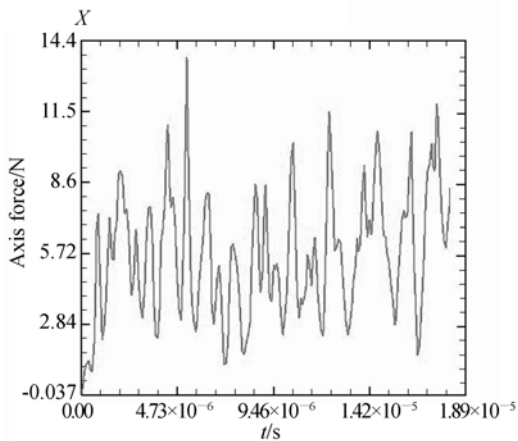


图 12 $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm 时的轴向力

Fig. 12 Axial force at $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm

节点数的变化而变化,当节点被挤压到一起时 X 方向载荷增大;当工件材料被切离,节点减少后, X 方向载荷又会突然下降。

4 高速精密磨削冷作模具钢磨削力的测定和分析

为了保证测量的准确性,每种工况下的磨削力测定试验都做 3 次,取平均值作为最终结果。Klocke and Baus^[9]发现在高速磨削过程中,测得的磨削力很大程度上受冷却液冲击的影响,实际上是磨削力和冷却液诱导力的总和。因此有必要从测得的磨削力中去除冷却液诱导力的影响。本试验在相同的工况和磨削参数下完成两个磨削循环试验,在第一个周期,砂轮切割工件,所以测力包括磨削力和冷却液诱导力。在第二个周期,碰到工件表面无切削。因此,测得的力只是冷却液的贡献。从第一轮力的测量值中减去第二轮测得的空磨的磨削力,获得最后的磨削力。

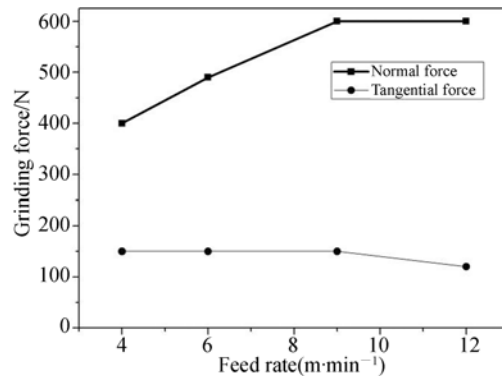


图 13 磨削力与工件进给速度的关系 ($v_s = 90$ m/s and $a_p = 0.06$ mm)

Fig. 13 Relationship between grinding force and workpiece feed rate ($v_s = 90$ m/s and $a_p = 0.06$ mm)

采用图 3 的测力试验装置在线测量了高速磨削冷作模具钢 9CrWMn 的磨削力,试验结果如图 13~18 所示。图 13~15 显示切削速度和切削深度不变时,随着工件进给速度的增加,未变形切屑厚度 h_{max} 增加,导致磨削力特别是法向磨削力上升。

图 16 显示所测得的法向磨削力和切向磨削

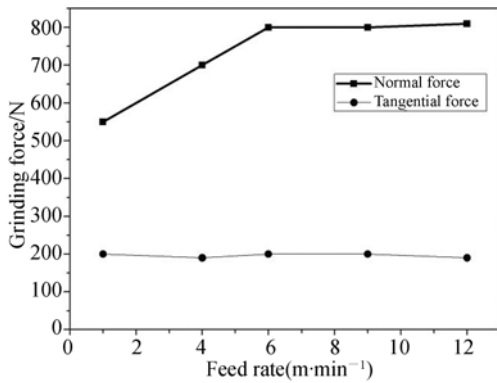


图 14 磨削力与工件进给速度的关系 ($v_s = 100$ m/s and $a_p = 0.06$ mm)

Fig. 14 Relationship between grinding force and workpiece feed rate ($v_s = 100$ m/s and $a_p = 0.06$ mm)

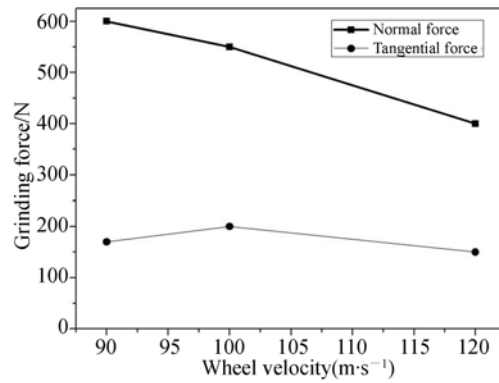


图 16 磨削力与砂轮线速度的关系 ($v_w = 4$ m/min and $a_p = 0.04$ mm)

Fig. 16 Relationship between grinding force and wheel velocity ($v_w = 4$ m/min and $a_p = 0.04$ mm)

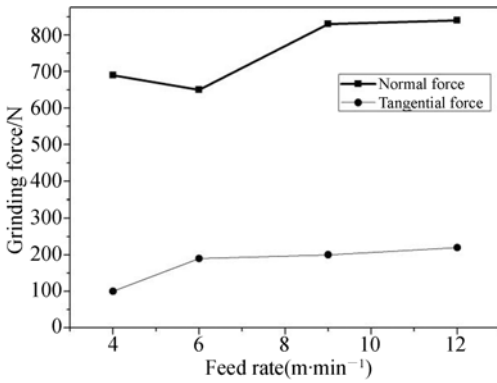


图 15 磨削力与工件进给速度的关系 ($v_s = 120$ m/s and $a_p = 0.04$ mm)

Fig. 15 Relationship between grinding force and workpiece feed rate ($v_s = 120$ m/s and $a_p = 0.04$ mm)

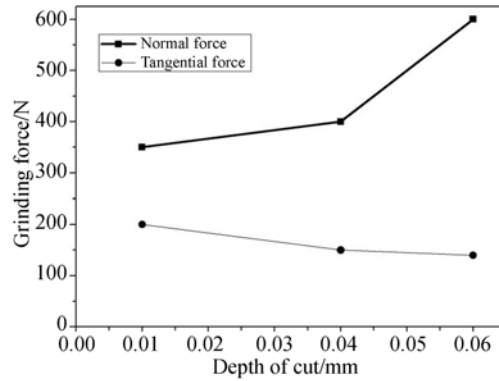


图 17 磨削力与磨削深度的关系 ($v_s = 120$ m/s and $v_w = 4$ m/min)

Fig. 17 Relationship between grinding force and depth of cut ($v_s = 120$ m/s and $v_w = 4$ m/min)

力随着砂轮线速度的上升而下降。根据公式(1)可知,增加砂轮线速度 v_s 会导致最大未变形切屑厚度 h_{max} 下降,从而导致磨削力下降。图 17、图 18 显示了磨削力随着磨削深度变化的情况。由图可知,磨削深度对磨削力的影响较大,而且大的磨削深度对法向磨削力的影响尤其显著。根据公式(1)可以看出:磨削深度 a_p 会引起最大未变形切屑厚度 h_{max} 上升,从而导致磨削力上升。图 17 为 $v_s = 120$ m/s, $v_w = 4$ m/min, $a_p = 0.01$ mm 工况下所测得的法向和切向磨削力值。由图可知,其与图 5~6 仿真计算的值非常接近,由此可以证明仿真计算的正确性。

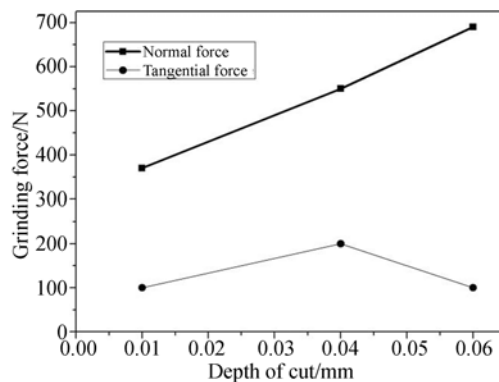


图 18 磨削力与磨削深度的关系 ($v_s = 100$ m/s and $v_w = 4$ m/min)

Fig. 18 Relationship between grinding force and depth of cut ($v_s = 100$ m/s and $v_w = 4$ m/min)

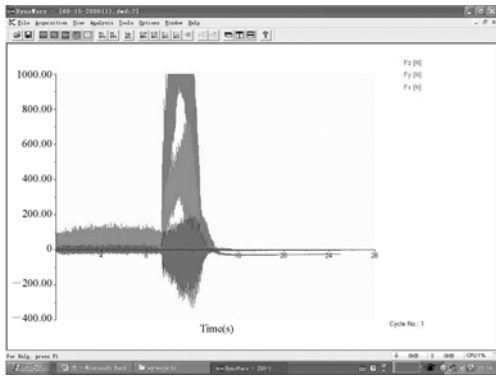


图19 Kistler测力仪测得的磨削力曲线

Fig. 19 Grinding force curves measured by Kistler

为了比较高速磨削和低速缓进给深磨削的区别,做了一组低速缓磨深切深($v_s = 60$ m/s, $v_w = 1.5$ m/min, $a_p = 2$ mm)的对比试验,结果如图19所示,测得的磨削力达1 000 N,远远大于高速磨削条件的磨削力。由此可见高速磨削主要是侧重工件表面的表面质量,而低速缓磨深切深磨削讲究的是磨削的高效率。

5 高速精密磨削冷作模具钢的比磨削能分析

比磨削能指去除单位体积金属材料所需要的磨削能量,其主要由成屑比能、耕犁比能和滑擦比能组成。比磨削能的大小与砂轮切向磨削力有着密切关系,其值可以通过式(4)计算^[10]:

$$e_s = \frac{F_t v_s}{v_w a_p b}, \quad (4)$$

式中: v_s 为砂轮线速度(mm/s); F_t 为切向磨削力(N); v_w 为工件进给速度(mm/s); a_p 为磨削深度(mm); b 为工件宽度(mm)。最后得出的比磨削能 e_s 的单位为J/mm³。

磨削加工中比磨削能随磨削深度或平均切屑截面积的减小而增大,这就是尺寸效应。对于尺寸效应产生的原因,学者间存在不同的认识。Pashlty等^[11]应用工件的加工硬化理论来解释尺寸效应,Shaw认为尺寸效应主要是由金属材料内部的缺陷所引起的。从金属物理学的角度来看,可以认为小体积金属包含位错缺陷的概率较小,故薄的未变形切屑厚度对应高的流动应力,但将位错理论应用于金属切削时,却表现为剪切区具

有极高的位错密度,这一点也可以通过透射显微镜观察精磨切屑得到证实^[13]。有研究人员从材料去除时所受的力、切削层的塑性变形、裂纹扩展到断裂这一过程,应用断裂力学原理对尺寸效应进行了分析^[12]。金滩等指出,磨削中的尺寸效应在一定程度上与材料的应变率强化效应有关。他认为尺寸效应是应变硬化、应变率强化造成的热软化及材料缺陷等多因素共同作用的结果,在某些条件下,应变率效应起主导作用^[10-11]。

利用图3的测力试验装置测量高速磨削冷作模具钢9CrWMn的磨削力值,通过式(2)计算得到各种工艺参数对比磨削能的影响如图20~22所示。由图20可以看出,9CrWMn冷作模具钢的比磨削能 e_s 随着磨削深度的增大呈比较明显的下降趋势,且下降趋势逐渐变缓,最终逐渐趋于稳定,这与磨削加工中的尺寸效应相吻合。究其原因在于:一方面,在砂轮线速度 v_s 及工件进给速度 v_w 一定的情况下,随着磨削深度的增加,最大未变形切屑厚度 h_{max} 增大,同时,以崩碎级方式去除工件材料的磨粒数目也大大增多,去除单位体积材料所需的能量下降,因此比磨削能减小;另一方面,当磨削深度增加时,剪切区中的剪应变、剪应变率减小,热软化作用增强,金属的剪切流动应力减小,金属的比切削能减小。砂轮上的磨粒一般都存在顶端钝圆,在不同的磨削参数条件下,磨粒顶端钝圆的影响程度有所不同。未变形切屑厚度越小,即相当于增大了磨粒的负前角,其影响越显著。由于顶端钝圆的存在,当未变形切屑厚度越小时,磨粒的实际负前角会增大,即当 γ_0 减小时,金属的剪切流动应力略有增大,故磨削加工中的比切削能将增大。

图21显示了随工件进给速度 v_w 的变化比磨削能 e_s 的变化情况。从图中可以看出,随工件进给速度 v_w 的增加, e_s 呈明显的下降趋势,且下降趋势逐渐变缓。这说明在砂轮线速度 v_s 和磨削深度 a_p 一定的情况下,随着 v_w 的增大,砂轮磨粒的最大未变形切屑厚度 h_{max} 变大,通过成屑方式去除的材料逐渐减少,而更多的工件表面材料会以滑擦和耕犁的方式被去除,所需的成屑能减少,因而比磨削能逐渐变小并且减小的趋势趋于缓慢。

从图22中可以看出,随着砂轮线速度 v_s 的

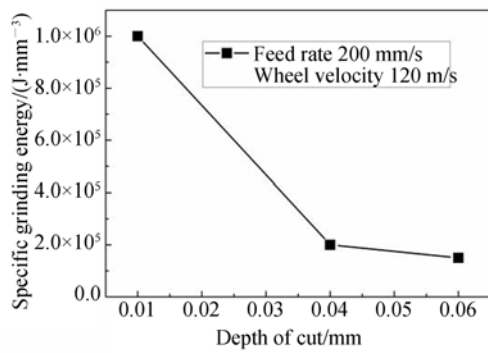


图 20 磨削深度对比磨削能的影响

Fig. 20 Influence of depth of cut on specific grinding energy

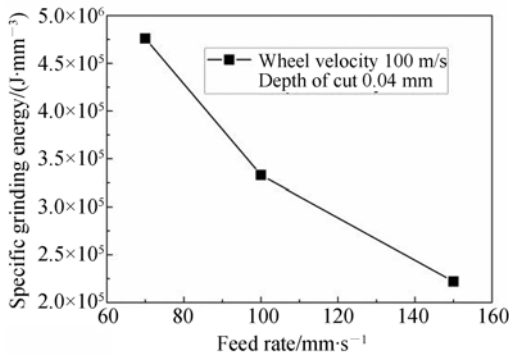


图 21 工件进给速度对比磨削能的影响

Fig. 21 Influence of workpiece feed rate on specific grinding energy

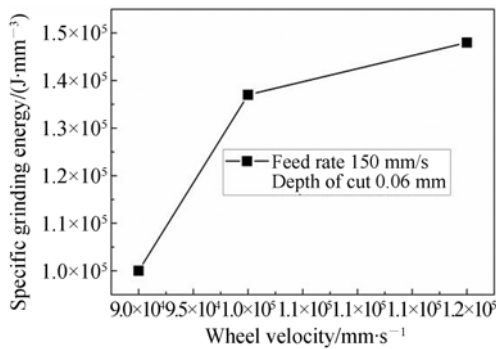


图 22 砂轮速度对比磨削能的影响

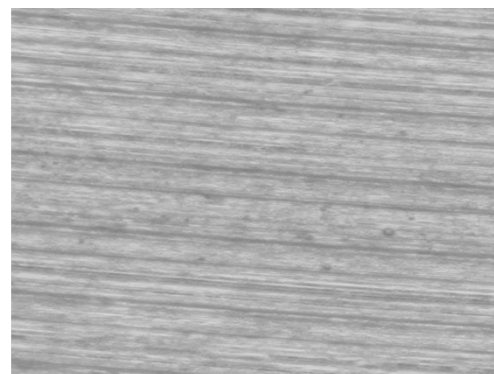
Fig. 22 Influence of wheel velocity on specific grinding energy

增大,比磨削能呈上升趋势。这是因为,保持磨削深度 a_p 与工件进给速度 v_w 不变时,随着砂轮线速度 v_s 的增大,单颗磨粒的最大未变形切屑厚度 h_{max} 减小,金属材料的剪应变效应和剪应变率效应增强,而热软化效应减弱,从而使金属材料的剪

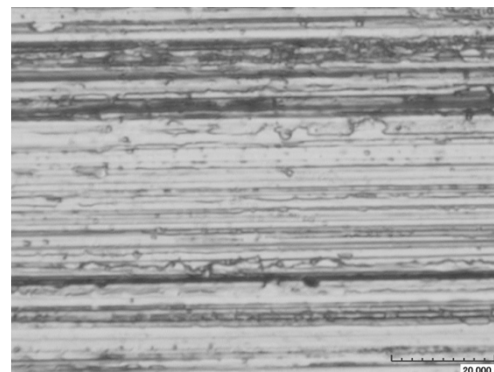
切流动应力增大,去除单位体积材料所需要的能量增加,比磨削能升高。

6 高速精密磨削前后的工件表面微观形貌分析

微观形貌是评价磨削工件表面完整性的一个重要指标,微观形貌能反映出磨粒与工件的相互作用状态及金属材料的去除方式。观察表面微观形貌是研究磨削表面质量的一种最直接的研究方法。在磨削力的作用下,磨削工件表面层将产生塑性变形。在塑性变形过程中,晶格将产生滑移、畸变和歪扭,从而使晶粒破碎、拉长等,这些变化将影响工件的使用性能。因此,观察、分析磨削加工的工件表层微观组织对于研究工件的表面完整性具有重要意义。本试验对陶瓷结合剂 CBN 砂轮在高速磨削和低速缓磨深切深两种不同磨削用量条件下的工件表面的微观形貌进行观察分析。用 Hirox KH-7700 三维视频显微仪观察分析显微组织和形貌。



(a) 原始加工表面
(a)Original machining surface



(b) $v_s=120 \text{ m/s}$, $v_w=4 \text{ m/min}$, $a_p=0.01 \text{ mm}$

图 23 是磨削 9CrWMn 冷作模具钢后的组织

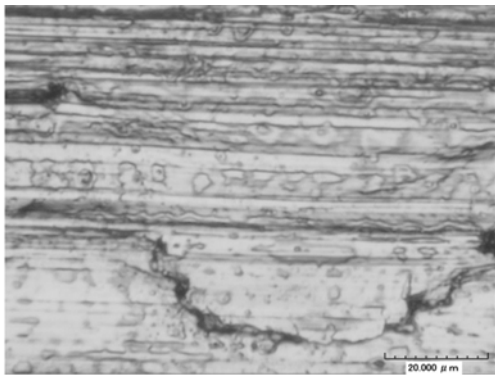
(c) $v_s=60$ m/s, $v_w=1.5$ m/min, $a_p=2$ mm

图 23 磨削前后的工件表面形貌 (mag: 3500 \times)
Fig. 23 Workpiece surface morphology before and after grindings

形貌。图 23(a)是磨削前的原始表面形貌。图 23(b)是高速磨削后的工件表层微观组织,相比原始组织而言,磨削后的晶粒沿着磨削方向被拉长,使晶格扭曲、滑移,晶粒被拉长呈纤维化组织。图 23(c)显示低速缓磨深切深磨削中,表面残余应力受抛光效应、热效应和热容量变化的影响。然而,当磨削温度达到热损伤点时,产生残余应力的主要原因是塑性变形,图示的裂纹深度为 100~300 μm 。由此可见:高速磨削时砂轮速度对损伤层的影响不大,一般而言只产生较小的破坏层,故表面质量光洁和磨削力较小,即如图 23(b)所示。

参考文献:

- [1] 毛淑芳,龚智伟. CBN 砂轮的高速、超高速磨削技术[J]. 精密制造与自动化,2005(1):32-33.
MAO S F, GONG ZH W. High and ultrahigh speed grinding technologies of CBN wheels [J]. *Precise Manufacturing & Automation*, 2005(1): 32-33. (in Chinese)
- [2] 徐少红. 高速磨削加工工艺及应用[J]. 电加工与模具,2007,(s2):34-31,75.
XU SH H. High speed grinding technologies and application [J]. *Electromachining & Mould.*, 2007, (s2):34-31,75. (in Chinese)
- [3] 赵恒华,孙顺利,高兴军,等. 超高速磨削的比磨削

7 结 论

本文在分析 9CrWMn 冷作模具钢的高速磨削机理的基础上,采用 DEFORM 软件对高速磨削模具钢 9CrWMn 的加工过程进行了磨削力仿真分析,并在高精度高速平面磨床上对其进行了高速精密磨削试验,在线测得的多种工况下的磨削力的试验结果和仿真实理论分析相一致。试验结果表明:(1)在切削速度和切削深度不变时,随着工件进给速度的增加,未变形切屑厚度 h_{max} 增加,导致磨削力特别是法向磨削力增大了近 45%;(2)法向磨削力和切向磨削力随着砂轮线速度的上升而下降,法向磨削力下降近 33%;(3)磨削深度对磨削力的影响较大,大的磨削深度对法向磨削力的影响尤其显著,法向磨削力增大了近 100%,磨削深度引起的最大未变形切屑厚度 h_{max} 上升,从而导致磨削力上升。

9CrWMn 冷作模具钢比磨削能 e_s 的变化趋势为:(1)随着磨削深度的增大,比磨削能呈比较明显的下降趋势,且随着磨削深度的增加,比磨削能下降趋势渐缓,最终趋于稳定;(2)随着工件进给速度的增加,比磨削能呈明显的下降趋势,且下降趋势逐渐变缓;(3)随着砂轮线速度的增大,比磨削能都呈上升趋势。

最后对陶瓷结合剂 CBN 砂轮在高速磨削和低速缓磨深切深两种不同磨削用量条件下的工件加工表面的微观形貌进行了分析和对比。

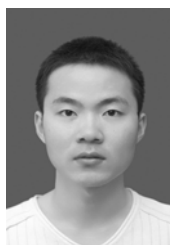
- 能研究[J]. 中国机械工程,2006,17(5):453-456.
ZHAO H H, SUN SH L, GAO X J, *et al.*. Study on specific grinding energy of ultra high speed grinding [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006,17(5):453-456. (in Chinese)
- [4] 牛文铁,徐燕申. 工程陶瓷缓进给磨削磨削力的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2003,134(2):24-26.
NIU W T, XU Y SH. Experimental study on grinding force of engineering ceramics in creep-feed grinding [J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2003,134(2):24-26. (in Chinese)
- [5] 肖鹏. 钛合金 TC4 超高速磨削表面完整性的研究[D]. 湖南:湖南大学机械与运载工程学院,2009.

- XIAO P. *Study on the surface integrity of titanium alloy TC4 in ultra high speed grinding process* [D]. Hunan: HNU College of Mechanical and Vehicle Engineering. (in Chinese)
- [6] KLOCKE F, BRINKSMEIER E, EVANS C, *et al.*. High speed grinding: Fundamental and state of art in Europe, Japan and USA [J]. *Annals of CIRP*, 1997, 46(2):715-724.
- [7] HWANG T W, EVANS C J, MALKIN S. An investigation of high speed grinding with electroplated diamond wheels [J]. *Annals of CIRP*, 2000, 49(1):245-248.
- [8] 安继儒, 田龙刚. 金属材料手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008:1.
AN J R, TIAN L G. *Handbook of Metal Materials* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:1. (in Chinese)
- [9] KLOCKE F, BAUS A, BECK T. Coolant induced forces in CBN high speed grinding with shoe nozzles [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2000, 49(1):241-244.
- [10] 金滩, 蔡光起. 材料的应变率强化与磨削加工中的尺寸效应[J]. 中国机械工程, 1999, 10(12): 1401-1403.
- JIN T, CAI G Q. Strain rate strengthening of workpiece material and the size effect involved in grinding [J]. *China Mechanical Engineering*, 1999, 10(12): 1401-1403. (in Chinese)
- [11] 杨海, 孙月明, 程耀东. 磨削中的尺寸效应. 磨料磨具与磨削, 1993, 78(6): 17-20.
YANG H, SUN Y M, CHENG Y D. Size effect in grinding [J]. *Abrasives Engineering*, 1993, 78(6):17-20. (in Chinese)
- [12] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
LI B M, ZHAO B. *Modern Grinding Technology* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003.
- [13] 马尔金 S. 磨削技术理论与应用 [M]. 蔡光起, 阮亚东, 宋贵亮译. 沈阳: 东北大学出版社, 2002.
MA E J. *The Theory and Application of Grinding* [M]. CAI G Q, GOWG Y D, SONG G L, translate, Shenyang: Northeastern University Press, 2002.

作者简介:



王 艳(1969—),女,江苏镇江人,博士,教授,1992年于扬州大学获得学士学位,1998年于上海交通大学获得硕士学位,2006年于浙江大学获得博士学位,南京航空航天大学机电学院博士后,主要从事磨削加工和特种加工技术的研究。E-mail: yanwang909909@163.com



杨 路(1987—),男,江苏宿迁人,博士研究生,2010年于江南大学获得博士学位,2010年保送进入南京航空航天大学机电学院硕博连读,主要从事磨削技术的研究。E-mail: yang5718457@126.com



徐九华(1979—),男,安徽马鞍山人,教授,博士生导师,1986年、1989年、1992年于南京航空学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事难加工材料高性能切削/磨削技术、超硬磨料工具技术、抗疲劳制造技术、超精密加工技术研究。E-mail: jh xu@nuaa.edu.cn