

硬脆材料的缓进给半塑性化磨削*

张耀辉 柯宏发 文晓希 徐荣葆

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 分析了用缓进给方法实现硬脆材料半塑性化磨削的机理, 提出了衡量半塑性化磨削效果的破碎率指标, 介绍了实验方法和实验结果, 对实验结果进行了分析比较。实验结果表明, 在普通磨床上可实现硬脆材料的半塑性化磨削, 采用缓进给磨削方法可以显著地提高半塑性化磨削的效果。

关键词 硬脆材料, 半塑性化磨削, 缓进给磨削

分类号 TG580.6

Semi-Ductile Regime Grinding of Hard-Brittle Material by Creep Feed Method

Zhang Yaohui Ke Hongfa Wen Xiaoxi Xu Rongbao

(Department of Mechatronic Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract In this paper, the semi-ductile regime grinding mechanism by creep feed method is analysed. A new fracture ratio is defined to measure the effect of semi-ductile regime grinding. The experimental method and the experimental equipment are presented. The experimental results are analysed and compared. The experimental results show that the semi-ductile regime grinding of hard-brittle material can be carried out in a universal grinding machine tool, and the grinding effect can be improved remarkably by the creep feed method.

Key words hard-brittle material, Semi-ductile regime grinding, Creep feed grinding

硬脆材料在航空、航天、光学、电子等工业领域具有广泛的应用前景。如航空和火箭发动机的热障涂层、固体火箭发动机的热结构件、战术导弹上用于机动目标探测和跟踪的非球面光学零件、激光陀螺的反射腔体以及电子工业中的半导体元器件等, 都是由硬脆材料制成的。

硬脆材料的传统加工方法是由粗磨成型、精磨、研磨、抛光等工序组成。由于加工时硬脆材料以脆性断裂的形式被去除, 亚表面有破坏层, 研磨和抛光的材料去除量很小, 不足以去除亚表面破坏层, 而且研磨和抛光仅能降低表面粗糙度数值, 不能提高零件的形状和位置精度, 并且生产率很低。

针对上述硬脆材料加工方法的缺陷, 人们一直探索新的加工方法, 幻想着像加工塑性金属材料那样加工硬脆材料。近年来, 在日本和美国出现了一种硬脆材料的超精密加工技术——塑性化磨削 (Ductile-Regime Grinding) 技术^[1], 使这个幻想变成了现实。实验表明, 当单个磨粒的磨削厚度 a_c 小于某一个临界值 a_{c0} 时, 硬脆工件材料的去除将以塑性方式进行。这样, 塑性化加工可以获得极小的表面粗糙度数值, 极高的形位精度, 并且无亚表面破坏层, 其生产率也比传统的加工方法高出许多倍。

塑性化磨削可省掉研磨、抛光等工序, 并且可比传统的方法提高零件的形位精度。但是, 塑性化磨削对机床的刚度、运动精度、低速运动的平稳性以及加工环境等提出了苛刻的要求, 而且在一般情况下没有必要对零件提出如此高的要求。因此, 在很多情况下采用半塑性化磨削^[2] (Semi-ductile Regime

* 校预研项目资助

1997年12月3日收稿

第一作者: 张耀辉, 男, 1960年生, 副教授

Grinding) 或半塑性化磨削加抛光的加工方法即可满足要求。本文介绍利用缓进给磨削的思想, 在普通磨床上用金刚石砂轮对氮化硅陶瓷和微晶玻璃进行半塑性化磨削的方法和实验结果。

1 用缓进给方法实现硬脆材料半塑性化磨削的机理分析

加工硬脆材料时, 材料的去除方式取决于单个磨粒的加工尺度 (Scale of Machining)、工件材料的缺陷尺寸和缺陷密度。如果单个磨粒切削刃引起的应力场中在特征滑移面方向的剪应力 τ 大于某一临界值 τ_c , 即 $\tau > \tau_c$, 则材料以剪切滑移的塑性变形方式被去除; 如果单个磨粒切削刃引起的应力场中在垂直于特征断裂面方向的拉应力 σ 大于某一临界值 σ_c , 即 $\sigma > \sigma_c$, 则材料以微脆性断裂的方式被去除。材料的最终去除方式取决于 $\tau > \tau_c$ 和 $\sigma > \sigma_c$ 中哪一个占支配地位, 或哪一个超前^[3]。

当加工尺度大于微米量级时, 单个磨粒切削刃引起的应力场尺度将大于材料内部的微裂纹 (包括晶界、杂质等) 和位错这两种缺陷的尺度。随着加工尺度增大, 应力场增大, 应力场中的微裂纹数目增多, σ_c 急剧下降, 而 τ_c 却对微裂纹缺陷不敏感, 因此, 在这种情况下, 材料将主要以微脆性断裂方式被去除, 属于微脆性断裂磨削。

当加工尺度在微米到亚微米量级时, 单个磨粒切削刃引起的应力场尺度减小, 应力场中将主要存在位错缺陷, 微裂纹缺陷大量减少, σ_c 迅速增大, 而 τ_c 则没有明显的变化, 因此, 材料的去除将从微脆性断裂向塑性变形迁移, 属于半塑性化磨削。

当加工尺度在亚微米到纳米量级时, 单个磨粒切削刃引起的应力场尺度进一步减小, 致使应力场内既不包括微裂纹缺陷, 也不包括位错缺陷, σ_c 和 τ_c 均达到理想材料的理论强度。理论分析和实验表明, 在这种情况下, 材料的塑性变形将先于裂纹的产生和微脆性断裂^[3], 可实现塑性化磨削。

由上述分析可知, 对于给定的工件材料, 磨削时材料的去除方式主要取决于单个磨粒切削刃引起的应力场的尺度大小。在其它条件一定的情况下, 单个磨粒切削刃引起的应力场的尺度大小将取决于单个磨粒的切削厚度。磨削平面时, 单个磨粒的最大切削厚度为^[4]:

$$a_{cgmax} = \frac{2v_w}{v} \sqrt{\frac{f_r}{d_t}} \quad (1)$$

式中: a_{cgmax} —单个磨粒的最大切削厚度 (mm); v 、 v_w —分别为砂轮、工件的速度 (m/min);

f_r —径向进给量 (mm); m —砂轮每毫米圆周上的磨粒数 (1/mm); d_t —砂轮直径 (mm)。

由式 (1) 可知, 在选定机床和砂轮后, 工件的切向进给速度 v_w 和径向进给量 f_r 是决定单个磨粒最大切削厚度的主要因素。以前人们在研究塑性化磨削时对减小 f_r 比较重视, 但是, 减小 v_w 比减小 f_r 对减小 a_{cgmax} 更有利。故本文实验研究用缓进给磨削的思想实现硬脆材料的半塑性化磨削。

2 实验方法和实验结果

2.1 实验方法

实验在 M7120A 平面磨床上进行, 实验装置如图1所示。图中, 1为陶瓷基结合剂金刚石砂轮。粒度 250#, 浓度100%, 直径 $\phi 200$ mm; 2为试件, 本实验中所用试件材料为微晶玻璃; 3为微进给夹具, 用来保证小而准确的径向进给量 f_r ; 4为机床电磁吸盘。

在其它条件一定的情况下, 改变工件的切向进给速度 v_w , 研究 v_w 对硬脆材料磨削过程的影响, 用缓进给磨削的思想实现硬脆材料的半塑性化磨削。

2.2 实验结果及分析

在砂轮转速为 3000r/min、径向进给量 $f_r = 1\mu\text{m}$ 的情况下, 改变工件的切向进给量 v_w , 对微晶玻璃进行磨削实验, 已加工表面的显微照片分别如图2所示。

由图2可以看出, 降低工件的切向进给速度 v_w 时, 可使已加工表面的光滑长条磨痕明显增加, 材料塑性去除的比例增

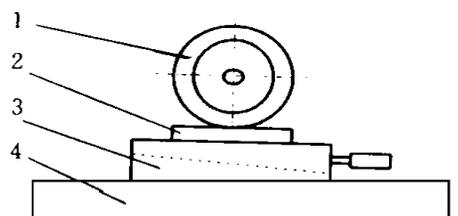
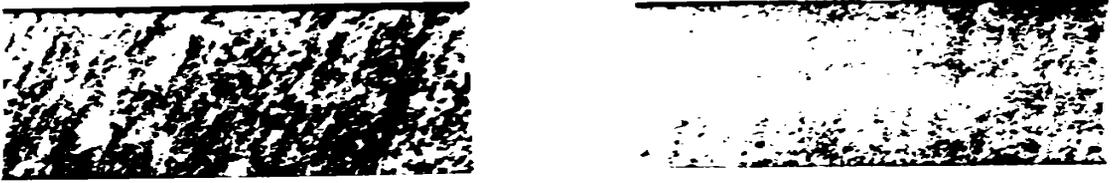


图1 实验装置

(a) $v_w = 1.67 \text{ m/min}$ (b) $v_w = 0.16 \text{ m/min}$ 图2 微晶玻璃的显微照片 ($\times 200$)

大, 半塑性化磨削的效果明显改善。

硬脆材料半塑性化磨削时, 已加工表面既有由于塑性变形而形成的光滑长条磨痕, 又有由于微脆性断裂而形成的凹坑。一般用破碎面积率来衡量半塑性化磨削的效果, 但其测量比较困难, 只能大概估计。为此, 本文定义平行于 v_w 方向的表面粗糙度 R_{ap} 和垂直于 v_w 方向的表面粗糙度 R_{av} 的比值 r 为破碎率。即

$$r = \frac{R_{ap}}{R_{av}} \times 100\% \quad (2)$$

显然, 当工件材料完全以微脆性断裂方式去除时, 破碎率 r 接近100%。当微脆性断裂方式去除比例减小、塑性变形方式去除比例增加时, 破碎率 r 将减小。

为了比较工件切向进给速度 v_w 对半塑性化磨削的影响, 用轮廓仪对不同 v_w 下的已加工表面粗糙度 R_a 进行了测量。分别沿平行于 v_w 方向和垂直于 v_w 方向进行测量, 测量结果及计算的破碎率 r 值如表1所示。

表1 不同 v_w 时的破碎率 r

工件材料	$v_w / (\text{m/min})$	$R_{ap} / \mu\text{m}$	$R_{av} / \mu\text{m}$	$r / \%$
微晶	1.67	0.622	0.818	76.0
玻璃	0.16	0.408	0.786	51.9

由表1可以看出, 磨削微晶玻璃 v_w 从1.67 m/min 降至0.16 m/min 时, 破碎率从76.0% 降至51.9%, 可见, v_w 是影响半塑性化磨削效果的一个重要因素。

3 结论

通过上述理论分析和磨削实验, 可以得出下述结论:

(1) 工件的切向进给速度 v_w 是影响单个磨粒切削厚度的一个主要因素, 降低 v_w (采用缓进给磨削方法) 可以显著地提高半塑性化磨削的效果。

(2) 半塑性化磨削的效果可以用由平行于 v_w 方向的粗糙度 R_{ap} 与垂直于 v_w 方向的粗糙度 R_{av} 的比值而定义的破碎率 r 来衡量, r 值越小, 微脆性断裂去除方式所占比例越小, 半塑性化磨削效果越好。

(3) 只要合理选择加工条件, 在普通磨床上进行硬脆材料的半塑性化磨削是可行的。

参考文献

- Bifano T G. Ductile-Regime Grinding: A New Technology for Machining Brittle Materials. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113 (5): 184~189
- Zhong Z W, Venkatesh V C. Semi-Ductile Grinding and Polishing of Ophthalmic Aspherics and Spherics. Annals of the CIRP, 1995, 44 (1): 339~342
- Shimada Shoichi et al. Brittle-Ductile Transition Phenomena in microindentation and Micromachining. Annals of the CIRP, 1995, 44 (1): 523~526
- 周泽华. 金属切削原理. 上海: 上海科学技术出版社, 1984