

文章编号:1000-582X(2010)10-032-05

## 超声振动辅助磨削脆性材料去除机理

张洪丽<sup>1</sup>, 张建华<sup>2</sup>

(1. 山东交通学院 工程机械系, 山东 济南 250023; 2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**脆性材料塑性去除有利于提高加工表面质量。采用切向、轴向和径向超声振动辅助磨削加工方法,对烧结钕铁硼 NdFeB 永磁材料去除机理进行了试验研究,结合脆性材料去除脆-塑性转变临界条件,分析了不同超声振动辅助方式对材料去除机理的影响。分析得出以下结论:轴向超声振动辅助磨削加工过程中,材料主要以塑性剪切的方式去除;切向超声振动辅助磨削加工过程中,材料主要以塑性方式去除,同时伴有少量沿晶断裂;径向超声振动辅助磨削加工过程中,工件材料主要以断裂破碎的方式去除,而且加工表面残留裂纹。因而,轴向超声振动辅助磨削最有利于实现脆性材料塑性去除。

**关键词:**超声振动;磨削;脆塑性转变;脆性材料;材料去除机理

**中图分类号:**TG661

**文献标志码:**A

## Brittle material removal mechanism of ultrasonic vibration assisted grinding

ZHANG Hong-li<sup>1</sup>, ZHANG Jian-hua<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250023, Shandong, P. R. China

2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** To remove the brittle material in ductile state can help to improve the machined surface quality. Experiments of material removal mechanism for NdFeB are conducted by using tangential ultrasonic vibration assisted grinding, axial ultrasonic vibration assisted grinding and normal ultrasonic vibration assisted grinding. Based on the critical condition of brittle-ductile transition, the effects of different ultrasonic vibration modes on material removal mechanism are analyzed. Results indicate that the material is mainly removed in the form of plastic shear in axial ultrasonic vibration assisted grinding. The material is mainly removed in the form of transgranular fracture, plastic shear and little intergranular fracture in tangential ultrasonic vibration assisted grinding. While in normal ultrasonic vibration assisted grinding, the material is mainly removed in the form of fracture crash and the cracks remain in the machined surface. So axial ultrasonic vibration assisted grinding is the best machining method to realize the ductile grinding on brittle materials.

**Key words:** ultrasonic vibration; grinding; brittle-ductile transition; brittle materials; material removal mechanism

收稿日期:2010-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575127);山东省自然科学基金资助项目(Y2005F10)

作者简介:张洪丽(1976-),女,山东交通学院副教授,博士,研究方向为高效精密复合加工技术及其装备,  
(Tel) 13465938969;(E-mail)hlzhang\_sdjt@163.com。

随着科技与生产的发展,硬脆材料(如 NdFeB 永磁材料、工程陶瓷、光学玻璃等)的应用日趋广泛。由于硬脆材料的脆性较大,加工时在磨粒作用下易发生断裂,因此其加工机理比金属材料加工更为复杂。近几十年来,众多学者对脆性材料去除机理的研究结果表明<sup>[1-5]</sup>,超声振动塑性磨削与普通塑性磨削的材料去除机理不同,超声振动塑性磨削除了使材料剪切破坏外,还使材料在高频振动下发生疲劳破坏,加速材料的去除,故比普通磨削效率更高;实现超声振动塑性磨削的条件不仅与磨削深度有关,还与振幅和频率有关;超声波磨削加工能够综合超声波加工和高速磨削加工的特点,可改善工件的表面质量<sup>[3]</sup>。然而,脆性材料延性域磨削机理复杂,对延性域磨削的条件尚无深入的了解,将此新工艺用于各种硬脆性材料的加工还有许多问题尚未解决。

通过几种不同加工方法对烧结 NdFeB 永磁体材料进行磨削试验,研究难加工材料脆性—延性转化特性及条件,通过扫面电镜对加工表面进行分析,判断材料的去除方式;通过观察磨削表面断面形貌,分析加工表面特征,进一步了解超声振动的施加及其不同施加方式对材料去除机理的影响,以便推动和促进延性域磨削新工艺的应用和发展。

## 1 试验方案与试验结果分析

### 1.1 试验装置与方法

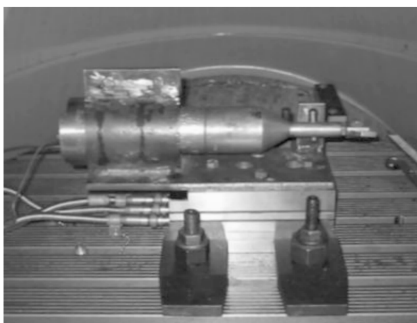
工件材料采用烧结 NdFeB 永磁体材料。

超声振动辅助磨削工装系统如图 1(a)和(b)所示。

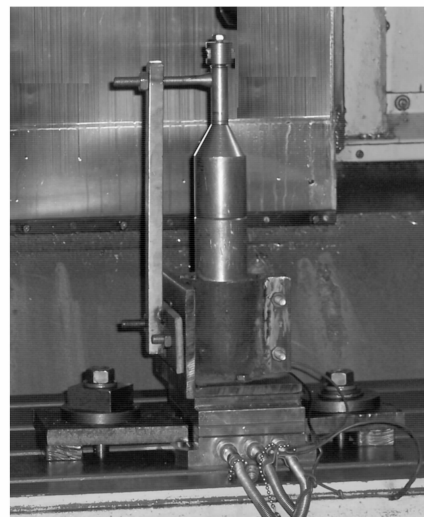
在 4 种加工方式下按表 1 所示方案进行试验,试验共进行 3 次。

表 1 4 种加工方式下材料去除机理试验方案

磨削方法	砂轮	工件	砂轮速度 $v_s /$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	工件进给速度 $v_w /$ ( $mm \cdot min^{-1}$ )	磨削深度 $a_p / \mu m$	振幅 $A / \mu m$	频率 $f / kHz$
无超声振动、切向、轴向和径向超声振动磨削,工件振动,干磨	粒度 200#, 金属结合剂 CBN 砂轮, 浓度 100%, $\Phi 50$ mm	烧结 NdFeB 永磁体材料 20 mm $\times$ 15 mm $\times$ 5 mm	18.3	200	5	5	20.8



(a)切向和径向超声振动辅助磨削



(b)轴向超声振动辅助磨削

图 1 超声振动辅助磨削加工工装系统

### 1.2 试验结果分析

由图 2(a)可以看出,普通磨削时,磨削表面有大面积的破碎区,且破碎区连续,边缘呈脆崩断裂状。断裂沟槽深而宽,断裂边缘有裂纹,破碎区内可以看到完整的晶粒、少量碎晶及磨屑(如图 2(b)所示)。

切向超声振动辅助磨削,磨削表面由微破碎区、

弹性滑擦挤压区及塑性磨削区组成,磨削表面质量较好,如图 3(a)所示。通过观察切向超声振动磨削表面 SEM 照片,并将磨削表面在显微镜下进行面积截取,估算得破碎区占磨削表面约 20% 左右,破碎面积小,沿同一方向呈断续分布,破碎边缘与滑擦挤压区界限不是很明显。断裂破碎沟槽浅而窄,破碎

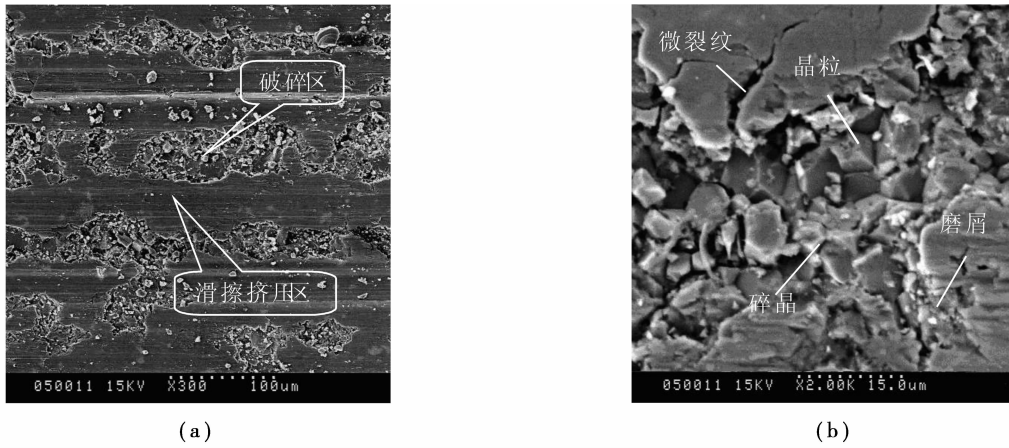


图 2 普通磨削加工表面微观形貌

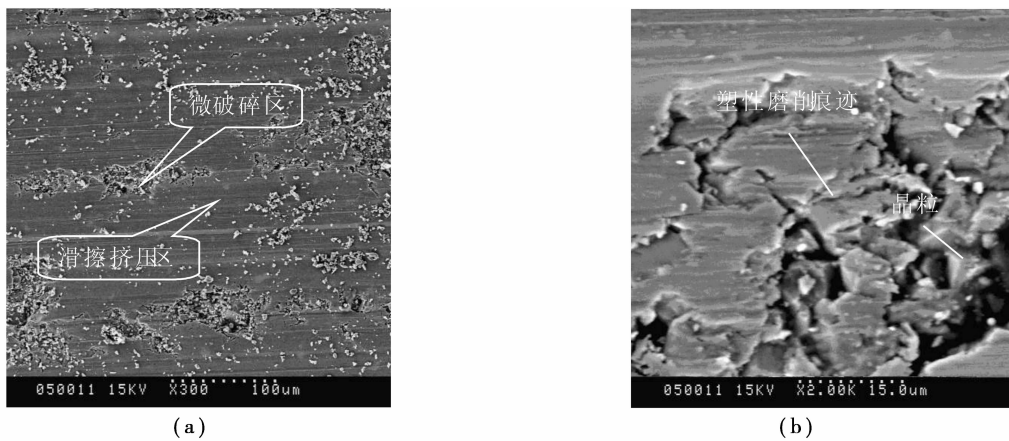


图 3 切向超声振动辅助磨削加工表面微观形貌

区内有塑性磨削痕迹,可以看到个别完整的晶粒(如图 3(b)所示)。加工过程中,材料主要以穿晶断裂、塑性剪切及少量沿晶断裂方式去除。

轴向超声振动辅助磨削时,磨削表面由少量微破碎区、弹性滑擦挤压区及塑性磨削区组成,如图 4(a)所示。通过观察轴向超声振动磨削表面 SEM 照片,并将磨削表面在显微镜下进行面积截取,估算

得破碎区占磨削表面约 18%左右,单个破碎面积较小,错落断续分布,破碎边缘与滑擦挤压区界限不明显;断裂破碎沟槽浅而且较宽,破碎区内有明显的塑性磨削痕迹,基本看不到完整的晶粒(如图 4(b)所示)。加工过程中,材料主要以穿晶断裂与塑性剪切方式去除。



图 4 轴向超声振动辅助磨削加工表面微观形貌

径向超声振动辅助磨削时,磨削表面由大量的微破碎区、弹性滑擦挤压区组成,如图 5(a)所示。破碎区占磨削表面比例较大,单个破碎面积较大,破碎边缘与滑擦挤压区界限不明显;断裂破碎沟槽较

深,可以看到完整的晶粒,破碎边缘内有塑性磨削痕迹(如图 5(b)所示)。这说明径向超声振动辅助磨削加工过程中,材料主要以穿晶脆性断裂方式去除,同时伴随着弹性滑擦现象。

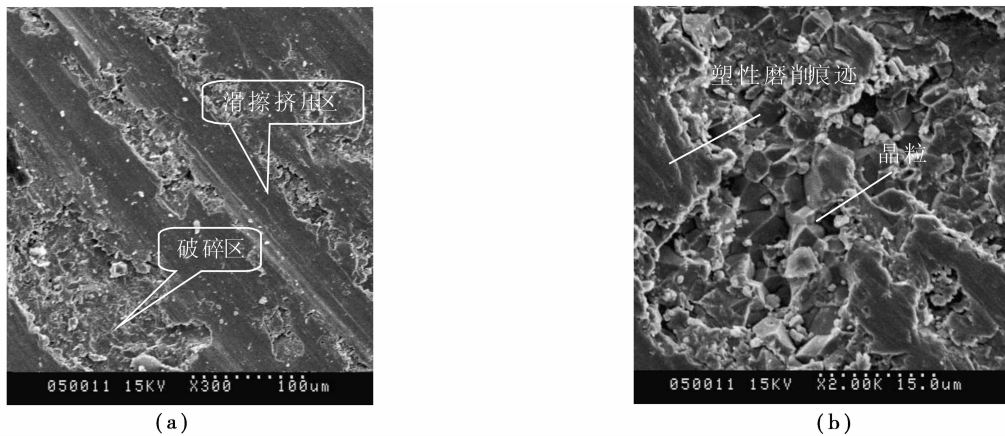


图 5 径向超声振动辅助磨削加工表面微观形貌

## 2 材料去除脆—塑性转变理论分析

### 2.1 脆—塑性转变临界条件

单颗磨粒的临界切削深度  $a_{gc}$  为<sup>[6]</sup>:

$$a_{gc} = \text{ctg}\delta \cdot \sqrt{\frac{2\lambda_0}{\alpha}} \cdot \left(\frac{K_{ld}}{H_v}\right)^2。$$

式中,  $\delta$ —磨粒半顶锥角;

$\lambda_0$ —综合系数,  $(1.0-1.6) \times 10^4$ ;

$\alpha$ —压头的几何因子, 维氏压头,  $\alpha=1.8544$ ;

$K_{ld}$ —材料的动态断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;

$H_v$ —材料的硬度,  $\text{MPa}$ 。

硬脆性材料要获得延性域磨削,磨粒在动态下的切削深度一定要小于静态下材料不发生裂纹和损伤时的临界压痕深度,二者的关系完全由材料的动态断裂韧性  $K_{ld}$  与静态断裂韧性  $K_{lc}$  之间的关系来确定。在精密与超精密加工过程中,为了正确分析硬脆性材料脆—塑性转变的临界条件,一方面需要正确选择工艺参数,另一方面要考虑与硬脆性材料有关的特性参数。显然,当  $K_{ld}$  增大,  $H_v$  减少时,硬脆性材料容易由脆性向塑性磨削状态转变,反之亦然。

在超声振动辅助磨削过程中,超声振动的引入对工件材料具有软化效应,在一定程度上降低了工件材料的硬度  $H_v$ ;同时,超声振动的引入降低了砂轮与工件之间的弹性回让,使加工过程更加稳定,动态冲击作用减小,表现为材料的动态断裂韧性  $K_{ld}$  有所增加。因此,临界切削深度  $a_{gc}$  增大。根据各种加工方式下磨削力的研究结果可知,当材料以相同方式去除时,超声振动的引入有助于磨削力的降低。

根据中位裂纹的产生条件,作用于工件的法向磨削力降低,裂纹不易产生,因而可以适当增加磨削深度,亦即超声振动的引入可以使临界切削深度  $a_{gc}$  增大。

### 2.2 不同超声振动方式对脆—塑性转变临界条件的影响

赵波等人<sup>[7-16]</sup>指出,超声振动塑性磨削与普通塑性磨削的材料去除机理不同,超声振动塑性磨削除了使材料剪切破坏外,还使材料在高频振动下发生疲劳破坏,加速材料的去除。此外,超声振动磨削不仅可以采用较大的磨削用量,还能减少砂轮修整时间。因此,超声振动辅助磨削综合了超声波加工和高速磨削加工的特点,可以降低磨削力,改善工件的表面质量。实现超声振动塑性磨削的条件不仅与磨削深度有关,还与振幅和频率有关。

由图 3 和图 4 可以看出,切向(分离型超声振动辅助磨削)和轴向超声振动的引入有助于材料的去除方式从脆性断裂向塑性剪切转变,而径向超声振动的引入使临界切削深度  $a_{gc}$  减小,使材料更倾向于以脆性断裂的方式去除。试验结果表明:切向(分离型超声振动辅助磨削)和轴向超声振动的引入大大降低了磨削表面的材料破碎率,有利于材料以塑性剪切方式去除;采用 W40CBN 砂轮,磨削深度为  $5 \mu\text{m}$ ,工件进给速度为  $400 \text{ mm/min}$ ,砂轮速度为  $18.3 \text{ m/s}$ ,振幅  $4 \mu\text{m}$ ,频率  $22 \text{ kHz}$  时,磨削表面破碎率约为  $8\%$ (通过观察磨削表面 SEM 照片,并在显微镜下截取破碎面积估算而得),基本上实现了材料的塑性去除。

### 3 结 论

1) 切向超声振动辅助磨削加工过程中, 工件材料主要以穿晶断裂、塑性剪切及少量沿晶断裂的方式去除; 轴向超声振动辅助磨削加工过程中, 工件材料主要以穿晶断裂与塑性剪切的方式去除; 径向超声振动辅助磨削加工过程中, 工件材料主要以断裂破碎的方式去除, 而且加工表面残留裂纹。

2) 满足一定的加工条件时, 可以实现脆性材料的塑性加工; 砂轮粒度微细化、磨削深度微量化是实现材料脆-塑性转变的重要条件; 不同的超声振动辅助方式对材料的去除方式有很大影响。

3) 结合脆性材料脆-塑性转变的临界条件, 证明切向和轴向超声振动有助于材料的去除方式从脆性断裂向塑性剪切转变, 而径向超声振动使临界切削深度  $a_{gc}$  减小, 使材料更倾向于以脆性断裂的方式去除。

#### 参考文献:

- [1] JEREMIAH A C, ERIC R M, BYRON R K, et al. In-process force monitoring for precision grinding semiconductor silicon wafers[J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2005, 7(5-6):430-440.
- [2] 何伟, 郑恒祥. 脆性材料复合裂纹断裂判断依据[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2003, 35(2):92-94.  
HE WEI, ZHENG HENG-XIANG. Fracture criterion of brittle material with compound crack[J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2003, 35(2):92-94.
- [3] FRITZ K, AXEL D, MICHAEL H. Material removal mechanisms in ultrasonics-assisted diamond turning of brittle materials[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2004, 20(4):231-238.
- [4] SIMRANPREET S G, JAGDEV S. Modelling of material removal rate in ultrasonic drilling of alumina ceramic by fuzzy logic[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2009, 2(5-6):552-565.
- [5] ZHAO BO, JIAO FENG, DU BAO-YU. A study of the material removal properties in ultrasonic lapping of ZTA ceramics with fixed abrasives by using an online acoustic emission monitoring system[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2009, 2(4):345-357.
- [6] TAGHI T, BAHMAN A, MOHAMMAD R. Effects of ultrasonic vibration on grinding of 100Cr6 [J]. International Journal of Mechatronics Manufacture System, 2008, 1(4):332-342.
- [7] XIANG DAO-HUI, MA YU-PING, ZHAO BO. Study on critical ductile grinding depth of nano ZrO<sub>2</sub> ceramics by the aid of ultrasonic vibration[J]. Key Engineering Materials, 2006, 304-305:232-235
- [8] ZHAO BO, GAO GUO-FU, WU YAN, et al. Research on micro characteristics of surface and subsurface layer in two-dimensional ultrasonic grinding nano-composite ceramics [J]. Key Engineering Materials, 2008, 375-376: 395-400
- [9] SUZUKI K, UEMATSU T, IWAI M, et al. A new complex grinding method for ceramic materials combined with ultrasonic vibration and electrodischarge machining[J]. Key Engineering Materials, 2007, 329: 439-444.
- [10] ZHAO MING-LI, ZHAO BO, WANG YU-QING, et al. High efficient mechanism of material removal in two-dimensional ultrasonic grinding from the locus perspective [J]. Key Engineering Materials, 2009, 416: 609-613.
- [11] 吴雁, 孙爱国, 朱训生, 等. 微-纳米复合陶瓷超声振动磨削的塑性-脆性转变特征研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(1): 113-117.  
WU YAN, SUN AI-GUO, ZHU XUN-SHENG, et al. Brittle-ductile transition of micro-nano composite ceramics using ultrasonic vibration grinding[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2007, 39(1): 113-117.
- [12] ZHANG JIAN-HUA, REN SHENG-FENG, HU YU-JING, et al. Study on normal grinding force in ultrasonic aided grinding of sintered Nd-Fe-B permanent magnet [J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2008, 13(2-4):114-123.
- [13] JAVAD A, HASSAN B, MOHAMMAD H M. Study on ultrasonic vibration effects on grinding process of alumina ceramic (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2008, 41: 785-789.
- [14] HAN HUANG, LING YIN. Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime [J]. International Journal of Abrasive Technology, 2007, 1(1):78-93.
- [15] LI XIAO-PING, CAI MIN-BO, LIU KUI, et al. Characteristics of ductile mode chip formation in nanoscale cutting of brittle materials[J]. International Journal of Abrasive Technology, 2007, 1(1):37-58.
- [16] ZHENG JIAN-XIN, XU JIA-WEN. Basic experimental research on the NC-contour evolution ultrasonic assisted grinding ceramic blade surface [J]. Key Engineering Materials, 2008, 359-360: 369-373.

(编辑 张小强)