

Study on Indentation Fracture Mechanics of Sintered NdFeB Material

Lijun Li*, Jiehua Li, Jian Cao, Shuang Zhang, Minglong Xi

College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei
Email: *2010423895@qq.com

Received: Mar. 9th, 2017; accepted: Mar. 27th, 2017; published: Mar. 30th, 2017

Abstract

Based on the single diamond abrasive grinding model and the space problem in higher elastic-plastic mechanics, this paper divides the force in the process of grinding into normal component and tangential component. The theoretical model of the abrasive grains of NdFeB monolithic diamond is established. And then it is equivalent to a single diamond abrasive indentation test, and we observed that the indentation is Pasteurian crack. Finally, the removal mechanism of NdFeB material grinding material is demonstrated by experiments, and the morphological changes and the formation and expansion process of the material are described in detail. This study provides a theoretical basis for the grinding parameters of NdFeB materials and the choice of processing methods.

Keywords

NdFeB, Grinding, Cracks

烧结钕铁硼材料压痕断裂力学机理研究

李立军*, 李杰华, 曹 剑, 张 爽, 席明龙

三峡大学机械与动力学院, 湖北 宜昌
Email: *2010423895@qq.com

收稿日期: 2017年3月9日; 录用日期: 2017年3月27日; 发布日期: 2017年3月30日

摘 要

本文根据单金刚石磨粒磨削模型和高等弹性力学中的空间问题, 把磨削加工的过程中的力分为法向分力和切向分力, 建立钕铁硼材料单金刚石的磨粒磨削的理论模型。然后将其等效成单金刚石磨粒的压痕试验, 观察到其压痕均为巴氏裂纹。最后, 通过实验论证了钕铁硼材料磨削加工材料去除机理, 对材料受载后其形貌变化和裂纹的形成及扩展过程进行了详细阐述。此次研究为钕铁硼材料磨削参数和加工方式的选择提供理论依据。

*通讯作者。

关键词

钕铁硼, 磨削, 裂纹

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大量的学者对 Nd-Fe-B 永磁材料矫顽力、工作温度方面的研究有了一定成果, 对烧结 Nd-Fe-B 永磁材料制备过程和表面处理手段均进行了细致深入的研究, 并取得了较好的成果。但对衔接材料制备和表面处理两个阶段的机械加工领域, 研究的相对较少。脆性固体的压痕断裂一直是材料学者的研究内容之一, 而由于永磁材料本身磁性和弹性的相互耦合作用, 会引起材料力学性能的各向异性, 导致在机械加工过程中磁体内部产生很大的内应力和隐性裂纹, 这不仅是烧结 Nd-Fe-B 材料加工性能差的重要原因之一, 磨削是目前烧结 Nd-Fe-B 材料普遍应用的加工方法, 烧结 Nd-Fe-B 材料的压痕过程和磨削过程具有相似之处, 把磨粒与工件的相互作用简化为局部小范围的压痕过程, 本文是对烧结 Nd-Fe-B 永磁材料断裂机制的研究, 基于压痕断裂力学理论建立数学模型, 通过计算得到 Nd-Fe-B 永磁材料在压痕载荷下各点的应力分布情况, 运用损伤力学理论对材料总体损伤模式到裂纹扩展模式的转化进行合理的解释。从而进一步的研究材料的去除过程, 以及烧结 Nd-Fe-B 材料表面缺陷和材料强度。

2. 烧结 Nd-Fe-B 材料单金刚石磨粒磨削模型

根据 Boussinesq 理论[1], 单金刚石磨粒磨削过程中, 磨粒和烧结 Nd-Fe-B 材料表面之间的相互作用可以简化为图 1 和图 2 所示的半空间体在边界上受集中力的空间问题, 即著名的 Boussinesq 问题[1]。在如图 1 所示的球形极坐标系统中, Boussinesq 问题可以表达为式(1):

$$\delta_{ij} = \frac{P}{2\pi R^2} \cdot f_{ij}(\theta) \cdot g_{ij}(\mu) \quad (1)$$

其中 O 点为磨粒与材料的接触点, 在磨削方面大都使用压痕断裂力学模型和切削加工模型来近似处理, R 为磨削应力场中任意一点与坐标点的距离; θ 为 R 与 z 轴之间的夹角, R 在 xoy 平面的投影 a 与 x 轴的夹角为 ψ , 为了方便计算, 将磨削力分解为法向磨削力 P 和切向磨削力 Q 。令烧结 Nd-Fe-B 材料的 poisson 系数为 μ , 在 Boussinesq 应力场集中法向载荷作用下, 烧结 Nd-Fe-B 材料表面承受的单个磨粒切削时, 材料内任一点处的应力状态:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{P}{2\pi r^2} [(1-2\mu) + 2(2-\mu)\cos\theta] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{P}{2\pi r^2} \cdot \frac{(1-2\mu)\cos^2\theta}{1+\cos\theta} \\ \sigma_{\psi\psi} &= \frac{P}{2\pi r^2} (1-2\mu) \left(\cos\theta - \frac{1}{1+\cos\theta} \right) \\ \sigma_{r\psi} &= \frac{P}{2\pi r^2} (1-2\mu) \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta}{1+\cos\theta} \\ \sigma_{r\theta} &= 0 \\ \sigma_{\psi\theta} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

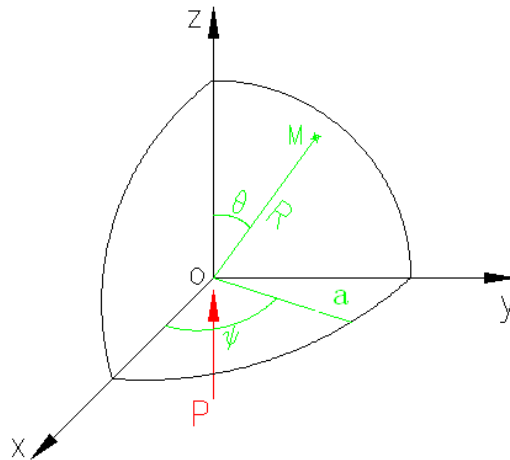


Figure 1. Curve: Boussinesq stress field concentrated normal load

图 1. Boussinesq 应力场集中法向载荷

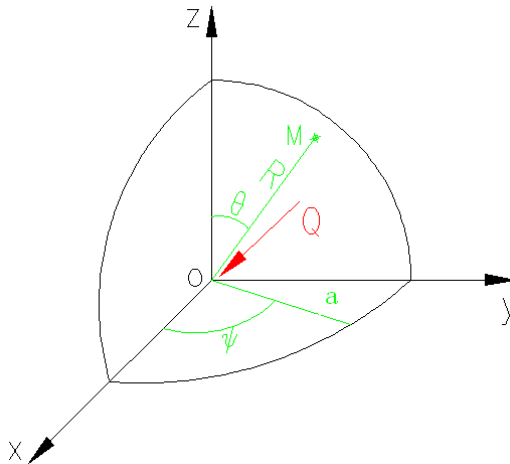


Figure 2. Curve: Boussinesq stress field concentrated tangential load

图 2. Boussinesq 应力场集中切向载荷

为了便于求解，其中在 $Oxyz$ 笛卡尔直角坐标系各分力表达式为式(2)， μ 为泊松比，式(2)描述了在外加法向集中载荷 P 一定时，应力场中任意一点的应力与该点到接触点的距离的平方成反比，而正比于一个独立的矢量角函数 $f_{ij}(\theta) = \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta}{1 + \cos\theta}$ ，在 $r=0$ 处，Boussinesq 场产生奇异，应力趋于无穷大，材料断裂，产生裂纹或破碎，该数学模型从理论上描述了磨削加工过程中单个磨粒法向挤入材料时，材料内部各处的应力分布情况[2]。

perrott 利用点接触模型将加载区的应力分布进行了精确计算并绘制了应力等值线分布图，如图 3 和图 4 所示，图 3 表述了静态加载过程的应力等值线分布，在压痕周围 13° 的表面区域内存在拉应力；图 4 表述了静态卸载过程的应力等值线分布，在压痕周围 19° 的表面区域内存在拉应力。从应力等值线分布图可以看出在一次完整压痕实验过程中，压痕周围 19° 范围内容易产生裂纹或破碎。

针对 Boussinesq 问题，Yoffe 对球形极坐标系中弹塑性压痕模型应力场进行了近似求解[3]式(3)，其中， $B = \frac{6E \cdot \delta V}{5\pi}$ ，是关于材料的弹性模量 E 、硬度 HV 、最大加载力 P_{\max} 和压痕体积 dV 的函数，其描

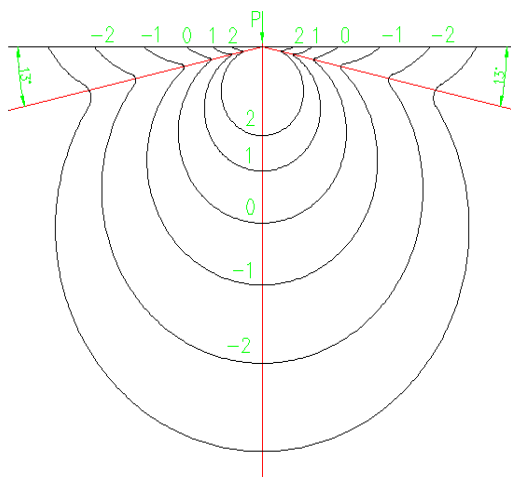


Figure 3. Curve: Stress distribution of stress in static loading process

图 3. 静态加载过程的应力等值线分布

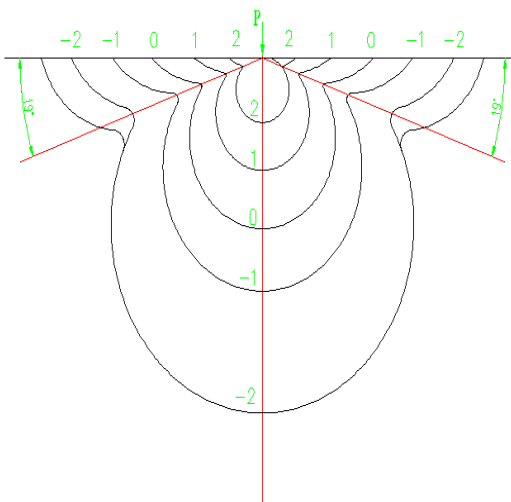


Figure 4. Curve: Stress distribution of stress in static unloading process

图 4. 静态卸载过程的应力等值线分布

述的是压痕附近一定尺寸内局部弹性应力场的强度。

$$\begin{aligned}
 \sigma_{rr} &= \frac{P}{4\pi r^2}(1-7\cos\theta) + \frac{B}{r^3}(19\cos^2\theta-7) \\
 \sigma_{\theta\theta} &= \frac{P}{4\pi r^2} \cdot \frac{\cos^2\theta}{1+\cos\theta} - \frac{B}{r^3}\cos^2\theta \\
 \sigma_{\psi\psi} &= \frac{P}{4\pi r^2} \left(\cos\theta - \frac{1}{1+\cos\theta} \right) + \frac{B}{r^3}(2-3\cos^2\theta) \\
 \sigma_{r\psi} &= \frac{P}{4\pi r^2} \cdot \frac{\sin\theta \cdot \cos\theta}{1+\cos\theta} + \frac{B}{r^3}\sin\theta \cdot \cos\theta \\
 \sigma_{r\theta} &= 0 \\
 \sigma_{\psi\theta} &= 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Perrott 和 Yoffe 已经求解了集中法向载荷作用下弹塑性材料内部应力状态的分布, 如果材料受到集中切向载荷 Q 的作用, 如图 2 所示, 求解过程与法向载荷求解类似, 其圆柱坐标系下通式可以表达为式(4):

$$\sigma_{ij,Q} = \frac{Q}{\pi R^2} [g_{ij}(\theta, \psi, \mu)] \quad (4)$$

式中 g_{ij} 是一个与角度变量 θ 和 ψ 以及泊松比 μ 有关的函数, 便于数学工具 matalab 的应用, 通过转换, 求出笛卡尔坐标系下切向载荷产生的各应力分[4]式(5), 应力场中任意一点的各分力值反比于该点到接触点的距离的 5 次方, 并成一定函数关系, 该数学模型从理论上描述了磨削加工过程中单个磨粒切向挤入材料时, 材料内部各处的应力分布情况。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[\frac{x}{R^3} - \frac{3x}{R(R+z)^2} + \frac{x^3}{R^3(R+z)^2} + \frac{2x^3}{R^2(R+z)^3} \right] - \frac{3x^3}{R^5} \right\} \\ \sigma_y &= \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[\frac{x}{R^3} - \frac{x}{R(R+z)^2} + \frac{xy^2}{R^3(R+z)^2} + \frac{2xy^2}{R^2(R+z)^3} \right] - \frac{3xy^2}{R^5} \right\} \\ \sigma_z &= \frac{3Q}{2\pi} \frac{xz^2}{R^5} \\ \sigma_{xy} &= \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\mu) \left[\frac{-y}{R(R+z)^2} + \frac{x^2y}{R^3(R+z)^2} + \frac{3x^2y}{R^2(R+z)^3} \right] - \frac{3x^2y}{R^5} \right\} \\ \sigma_{xz} &= \frac{3Q}{2\pi} \frac{xyz}{R^5} \\ \sigma_{yz} &= \frac{3Q}{2\pi} \frac{x^2z}{R^5} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, Q 为切向载荷, 其他参数值与应力集中法向载荷场相同。

3. 模拟磨削去除的过程

烧结 Nd-Fe-B 材料的压痕过程与其磨削加工过程有共同之处, 故烧结 Nd-Fe-B 材料压痕断裂力学可作为磨削加工理论的基础。又因为烧结 Nd-Fe-B 材料的高硬度和高脆性, 在烧结 Nd-Fe-B 材料磨削方面大多数研究都使用了压痕断裂力学模型和切削加工模型来近似处理[5]。对烧结 Nd-Fe-B 材料磨削加工去除基于以下几种去除机理如: 晶粒出去、剥落、脆性断裂、破碎等脆性出去方式、粉末化去除和塑性成形去除方式等[6] [7]。

根据压痕断裂力学模型, 只要压头上所受的力超过一临界值, 就会产生裂纹, 材料便以断裂方式去除。如图 5 所示, 研究表明, 产生中央径向裂纹的临界载荷为[8]

$$P^* = 54.5 \frac{T}{Z^2 V^4} \frac{K_c^4}{H^3} \quad (6)$$

式中, T 为常数, 普通维氏压头 $T = 2\pi$; Z 和 V 为常数, $Z \approx 1$, $V \approx 0.2$; K_c 为 Nd-Fe-B 材料的断裂韧性; H 为材料的硬度。

如图 5 中横向裂纹的长度 C_l 用简单的样板原理建立模型[9], 如果用 h 表示自由表面到裂纹表面的距离, 若 $C_l \gg h$, 则横向裂纹大小[6]为

$$C_l = C' \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

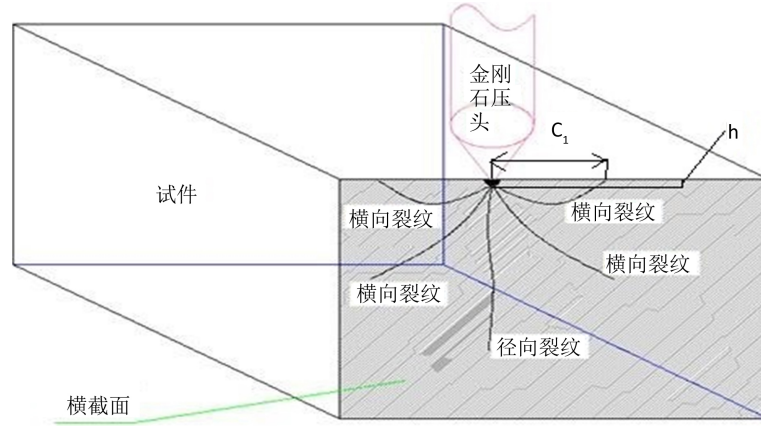


Figure 5. Curve: Indentation physical model and crack propagation model of rare earth permanent magnet material

图 5. 稀土永磁材料压痕物理模型及裂纹扩展模型

$$P_0 \equiv \frac{Y_0}{A^2} (\cos J)^{-\frac{2}{3}} \frac{K_c^4 E}{H^3 H} \quad (8)$$

$$C^l \equiv \left[Y_1 (\cot J)^{\frac{5}{6}} A^{-\frac{1}{2}} (K_c H)^{-1} E^{\frac{3}{4}} \right]^{\frac{1}{2}} P^{\frac{5}{8}} \quad (9)$$

式中, P_0 为塑性变形区与弹性区域的平均接触压力; Y_0 Y_1 和 A 为常数。

对于接触载荷 ($P \gg P_0$), 由式(7)可简化为 $P \propto C_l^{\frac{5}{8}}$, 这与中央/径向裂纹的公式 ($P \propto C_l^{\frac{3}{2}}$) 相似。

产生的横向裂纹的最小临界值载荷 P_l^* 为[8]

$$P_l^* = Y \left(\frac{K_c^4}{H^3} \right) f \left(\frac{E}{H} \right) \quad (10)$$

式中, Y 为量纲常数; $f \left(\frac{E}{H} \right)$ 为衰减函数。

将 P_l^* 值与单磨粒平均载荷相比较, 可以用来预测磨削过程是横向脆性断裂过程还是塑性切除过程。从式(10)看出, 产生裂纹的载荷临界值与 Nd-Fe-B 材料硬度和韧性有关, 当载荷低于这一临界值时, 横向裂纹就不会出现, 磨粒与工件界面将产生塑性流动[8] [10]。

4. 实验验证

选用 OTM-650 型号的数控铣床作为法向集中载荷和切向集中载荷的施加装置, 金刚石压头选用洛氏圆锥金刚石压头 HRC-3 型号, 测试设备采用 kistler9272 型测力仪, 选用超景深三维显微系统—VHX-2000C 数码显微系统, 来观察不同受力下, Nd-Fe-B 材料的表面形貌, 材料是进行消磁后进行试验, 选取具有代表性的法向集中载荷值 120 N、250 N、290 N、330 N、480 N 进行压痕实验。恒定载荷保持时间 30s, 由于此类型实验重复性差, 为保证每组实验观察到明显实验结果, 各种载荷下重复取 3~6 个压痕, 观察其压痕表面形貌后进行压痕纵截面剖开并抛光观察, 直到后续纵截面抛光观察到明显径向裂纹即可终止该组实验。在超景深三维成像显微镜下观察到不同法向集中载荷引入压痕的表面形貌, 如图 6、图 7、图 8、图 9 分别为四个区域特征性压痕表面形貌。

由图 6 可以看出, 120 N 法向集中载荷引入的压痕, 很难观察到扩散的裂纹, 材料几乎只发生弹塑性变形; 图 7 和图 8 可以明显看到垂直对称分布的 4 条主裂纹, 主裂纹与压痕之间不连续, 存在一定间

距；图 9 可以明显看到垂直对称分布的 4 条主裂纹和压痕周围的大块破碎缺口，破碎缺口尖锐区也有裂纹向外延伸，4 条主裂纹与压痕间有一定距离。将压痕纵向剖开并抛光，观察压痕截面裂纹形貌，限于文章篇幅，选取具有代表性的一组压痕纵截面裂纹形貌，如图 9 所示。

由图 10 和图 11 可以看出法向集中载荷作用下压痕纵截面裂纹是以小圆弧形式向压痕两侧的材料表



Figure 6. Curve: Speciation of indentation surface under 120 N normal loading

图 6. 120 N 法向载荷下压痕表面形貌

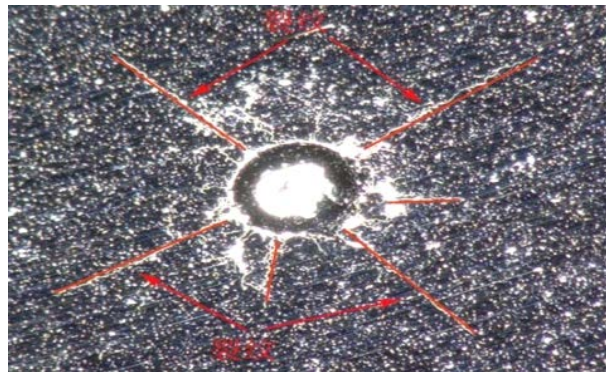


Figure 7. Curve: Speciation of indentation surface under 250 N normal loading

图 7. 250 N 法向载荷下压痕表面形貌

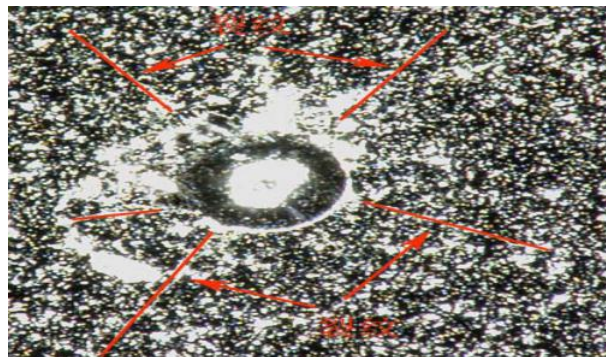


Figure 8. Curve: Speciation of indentation surface under 290 N normal loading

图 8. 290 N 法向载荷下压痕表面形貌

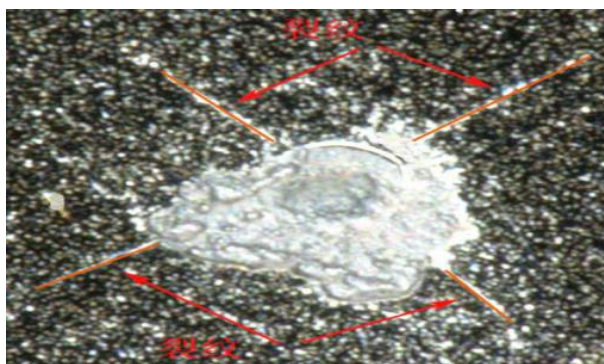


Figure 9. Curve: Speciation of indentation surface under 330 N normal loading

图 9. 330 N 法向载荷下压痕表面形貌

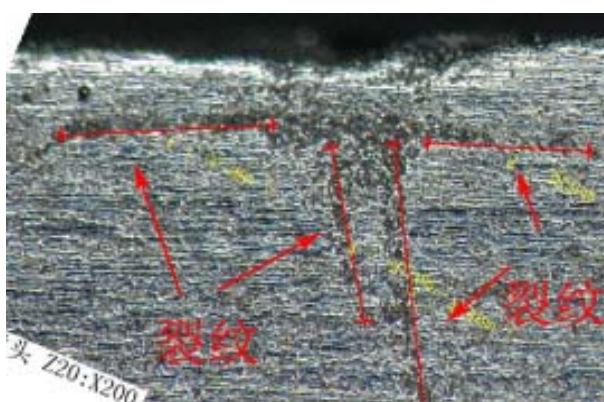


Figure 10. Curve: Vertical speciation of indentation under 250 N normal loading

图 10. 250 N 法向载荷下压痕纵截面形貌

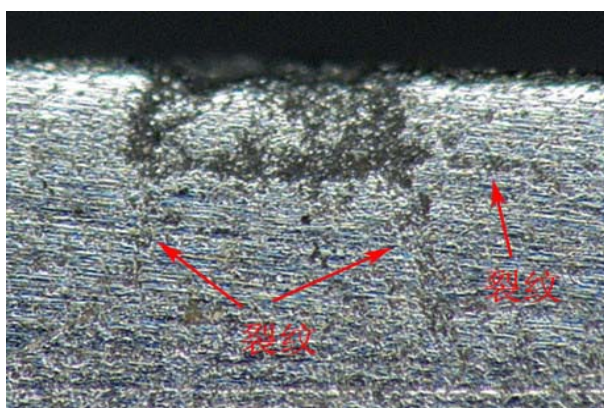


Figure 11. Curve: Vertical speciation of indentation under 290 N normal loading

图 11. 290 N 法向载荷下压痕纵截面形貌

面扩展，材料表层以下纵向裂纹在压痕处并非为连续的大圆弧。通过实验观察，压痕表面形貌裂纹和压痕纵截面裂纹都跟巴氏裂纹(Palmqvist crack)相符，烧结 Nd-Fe-B 材料在 0 到 180N 的法向集中载荷作用下，压痕过程中在材料表面形成的裂纹都是巴氏裂纹(Palmqvist crack)，也就是说横向没有裂纹，进行是塑性流动。而当载荷过大时，就发生脆性碰碎的现象和出现粉末。

5. 结论

本章首先建立了笛卡尔坐标系, 建立钕铁硼材料在磨削加工中去除模拟模型为单磨粒磨削去除, 分别建立法向力磨削模型和切向力磨削模型, 主要分析了法向力磨削现象和理论计算。其次介绍了本次试验的实验理念和实验操作方法, 然后基于该实验方法验证了现有研究结果关于烧结 Nd-Fe-B 永磁材料在 80 N 到 120 N 的法向集中载荷作用下, 压痕过程中在材料表面形成的裂纹都是巴氏裂纹(Palmqvist crack)的结论。

本文从理论上推导出表面受力的理论计算公式, 根据理论计算得出集中法向载荷作用下弹塑性材料内部应力状态的分布。然后根据压痕断裂力学模型理论分析得出, 产生的横向裂纹的最小临界值载荷 P_1^* , 在实验中得出的结果与理论计算的值相近。

在 Nd-Fe-B 材料加工中, 其目标就是在不损伤材料的机械性和磁性能的前提下, 尽可能地提高材料的去除性能和加工效率。在本文中可以认为, 此材料的去除机理中, 一般有脆性断裂去除、以及塑性成形去除等三种方式。

上述研究方法, 主要从 Nd-Fe-B 材料的压痕断裂角度出发, 分析磨削裂纹的产生对磨削后表面质量的影响, 尚未考虑材料本身磁性的变化。因此, Nd-Fe-B 材料优化磨削加工方式的全面细致研究工作有待在此基础上进一步完成。

基金项目

湖北省科技厅自然科学基金项目(2014CFB685)。

参考文献 (References)

- [1] 于爱兵, 田欣利, 韩建华, 等. 应用压痕断裂力学分析陶瓷材料的磨削加工[J]. 硅酸盐通报, 2002(1): 58-61.
- [2] Perrott, C.M. (1977) Elastic-Plastic Indentation: Hardness and Fracture. *Wear*, **45**, 293. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(77\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(77)90021-7)
- [3] Conway, J.C. and Kirchner, H.P. (1980) The Mechanics of Crack Initiation and Propagation Beneath a Moving Sharp Indenter. *Journal of Materials Science*, **15**, 2879-2883. <https://doi.org/10.1007/BF00550558>
- [4] 张红丽, 张建华. 超声振动辅助磨削脆性再磨去除机理[J]. 重庆大学学报, 2010(10): 32-36.
- [5] 周志雄, 熊志庆. 陶瓷材料磨削裂纹成因分析[J]. 机械设计与制造, 2005(5): 108-109.
- [6] 邓朝晖, 张璧, 孙宗禹, 等. 陶瓷材料去除机理的研究进展[J]. 中国机械工程, 2002(18): 1608-1611.
- [7] 赵永娟, 潘玉田. 钕铁硼材料的功率超声珩磨加工试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(10): 109-112.
- [8] 卞平艳, 赵波, 李瑜. 超声激励 ZTA 陶瓷压痕裂纹扩展特性试验研究[J]. 人工晶体学报, 2013(9): 1945-1949.
- [9] 陈平, 马天寿, 韩强, 等. 基于微米压痕实验研究页岩力学特性[J]. 石油勘探与开发, 2015(5): 662-670.
- [10] 姜胜强, 谭援强, 等. 陶瓷材料预压应力加工的力学模型[J]. 硅酸盐学报, 2013(6): 738-744.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：met@hanspub.org