

# 磁场方向对磁性磨粒的动力学特性及切缝宽度影响的研究

张 威, 许雪峰, 姚春燕, 李贺杰, 刘 坤

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014)

**摘 要:** 建立不同磁场方向下的磁性磨粒的动力学模型,应用有限元软件COMSOL Multiphysics对磁性磨粒运动进行仿真研究。搭建磨粒吸附观测实验平台,采用高速摄影技术,实验研究磁场方向对磁性磨粒在锯丝表面吸附的影响,实验结果验证仿真研究的正确性。应用传统游离磨粒线锯和不同磁场方向下的游离磨粒线锯对光学玻璃K9进行切割对比实验,结果表明当磁场方向平行于工件进给方向放置时其切缝宽度最小,同时表明游离磨粒线锯切割技术中添加辅助匀强磁场的有效性。

**关键词:** 线锯切割; 磁场; 磨粒; 运动分析; 磁化

**中图分类号:** TK513.5

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着可再生能源的发展,太阳能电池需求越来越多,行业的竞争性也愈加激烈<sup>[1]</sup>。在太阳能电池制造过程中切片加工是首要工序。到目前为止,切片加工的成本依然占太阳能电池制造总成本的20%<sup>[2]</sup>。游离磨粒线锯切割是目前太阳能晶片切片加工的主要方式,它通过高速运动的金属线将磨粒代入切割区域去除材料。近年来,国内外学者基于游离磨粒线锯切割技术的研究取得了一些进展。

王金生等<sup>[3]</sup>实验研究游离磨料多股线锯切割技术,研究表明通过多股线表面形成的很多凹槽可代入更多的磨粒进入切割区域,从而提高线锯切割效率和表面质量,但其切缝宽度要比单根钢丝线的大。Schwinde等<sup>[4]</sup>对多线切割中钢丝线的行为进行研究,研究发现材料去除主要发生在锯丝的正下方,为有效降低切割成本,提出用一种非圆截面锯丝代替现在的圆截面锯丝,从而减小切缝损失,极大提高了材料的利用率。Anspach等<sup>[5]</sup>实验研究一种新型结构线锯切割技术,相对于传统线锯而言,结构线能将更多的大直径磨粒代入切割区域,从而降低了磨浆消耗,提高了线锯切割效率,但是

结构线线锯带来了容易断线、切缝损失大等问题。

由上述分析可知,为降低切割成本,提高磨粒使用率,降低切缝宽度是必要的。本文依托国家自然科学基金项目——游离磨粒线锯切割新方法,研究磁场方向对磁性磨粒的动力学特性及切缝宽度的影响,锯丝置于匀强磁场中会被磁化形成高梯度磁场<sup>[6]</sup>,锯丝通过磁力吸附特定范围内的磁性磨粒,从而增加进入切割区域的磨粒数量。理论分析进入切割区域前锯丝周围磁性磨粒受力情况,建立其运动过程中的力学模型,并利用有限元软件研究磁场方向对磁性磨粒的动力学特性的影响;应用高速摄影技术进行磁性磨粒吸附观测实验研究,与仿真结果进行对比和分析;分别进行传统游离磨粒线锯和不同磁场方向下的磁感应游离磨粒线锯切割对比实验,对比分析其切缝宽度。

## 1 磁性磨粒的动力学分析

磁感应游离磨粒线锯切割示意图如图1所示。本研究将对不同磁场方向时磁性磨粒在进入切割区域前的运动过程进行力学分析,磁性磨粒初始速度 $V_0$ 方向与工件进给方向一致,磁场 $H_0$ 方向与工件进给方向的夹角为 $\beta$ ,如图1b所示。

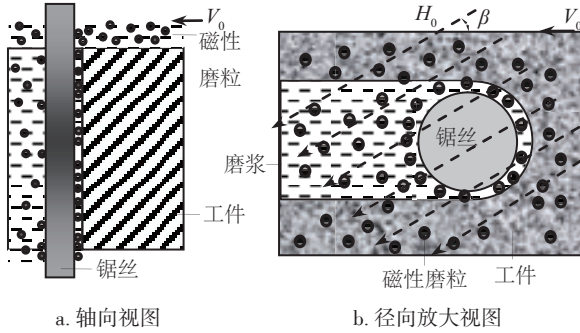


图1 磁感应游离磨粒线锯切割示意图

Fig. 1 Schematic of magnetic induction free abrasive wire sawing

为分析磁性磨粒的受力,在锯丝截面附近区域建立一个简化的二维控制体模型,如图2所示。该模型由一个  $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的正方形和半径  $a=0.2\text{ mm}$  的锯丝组成,以锯丝的横截面圆心  $O$  为坐标原点建立平面直角坐标系,背景磁场  $H_0$  方向与  $x$  轴的夹角为  $\beta$ ,磨粒初始速度  $V_0$  方向与  $x$  轴平行,假设磁性磨粒为球体,本研究中所使用的磁性磨粒为平均半径  $b=10\text{ }\mu\text{m}$  的镀镍碳化硅。 $F_{d\theta}$ 、 $F_{dr}$  分别代表流体曳力的方位角和径向分量; $F_{m\theta}$ 、 $F_{mr}$  分别代表磁力的方位角和径向分量。

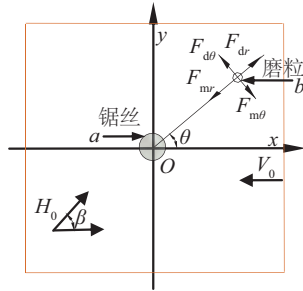


图2 二维控制体内磁性磨粒受力分析示意图

Fig. 2 Schematic of force analysis on magnetic abrasive grain in 2D control volume

当磁性磨粒在流体中运动时,主要会受到磁场力和流体阻力的作用。磁性磨粒所受的磁力可表示为<sup>[7]</sup>:

$$F_m = \frac{1}{2} \mu_0 K V \nabla (H^2) \quad (1)$$

式中,  $F_m$  ——磁力;  $\mu_0$  ——真空磁导率;  $K$  ——磁性磨粒体积磁化率;  $H$  ——锯丝外任一点磁场强度;  $V$  ——磁性磨粒体积,  $V=4\pi b^3/3$ ,  $\nabla$  ——哈密尔顿算符。

根据标量磁位  $u$  与磁场强度  $H$  的关系,锯丝外

任一点  $P(r, \theta)$  的磁场强度分量可表示为:

$$H_r = -\frac{\partial u}{\partial r} = \left(1 + \frac{\mu - \mu_t}{\mu + \mu_t} \cdot \frac{a^2}{r^2}\right) H_0 \cos(\theta - \beta) \quad (2)$$

$$H_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = -\left(1 - \frac{\mu - \mu_t}{\mu + \mu_t} \cdot \frac{a^2}{r^2}\right) H_0 \sin(\theta - \beta) \quad (3)$$

式中,  $\mu$  ——锯丝磁导率;  $\mu_t$  ——流体磁导率。通常,流体的磁导率  $\mu_t$  近似等于真空磁导率  $\mu_0$ 。

根据锯丝外任一点的磁场特性,把式(2)和式(3)代入式(1),得出磁力的径向分量和方位角分量分别为:

$$F_{mr} = -\frac{8\pi\mu_0 K C a^2 b^3 H_0^2}{3r^3} \left( \frac{C a^2}{r^2} + \cos 2(\theta - \beta) \right) \quad (4)$$

$$F_{m\theta} = -\frac{8\pi\mu_0 K C a^2 b^3 H_0^2}{3r^3} \sin 2(\theta - \beta) \quad (5)$$

式中,  $C$  ——比例系数,  $C=(\mu - \mu_0)/(\mu + \mu_0)$ 。

对磁性磨粒吸附起决定作用的是磁力,若磁力的径向分量为负值,则磨粒被吸向锯丝,反之则远离锯丝。由式(4)和式(5)可知,在确定磁性磨粒和锯丝条件下,  $F_{mr}$  和  $F_{m\theta}$  的大小与方向由磁性磨粒所在的位置  $P(r, \theta)$  确定。磁力分区边界线由临界角  $\theta_c$  决定,取  $F_{mr}=0$ ,可得:

$$\theta_c = \frac{1}{2} \arccos\left(-\frac{C a^2}{r^2}\right) + \beta \quad (6)$$

图3为式(6)不同磁场方向时在极坐标中的双曲线,图中的圆表示锯丝,双曲线将锯丝周围分成4个区域,在双曲线对称轴与背景磁场方向平行的2个区域,对顺磁性磨粒产生吸力,  $F_{mr} < 0$ ,将其吸向锯丝表面,对逆磁性磨粒产生斥力,这两个区域称做顺磁区,即A区;在双曲线对称轴与背景磁场方向垂直的两个区域,对顺磁性磨粒产生斥力,  $F_{mr} > 0$ ,使其远离锯丝表面,但对逆磁性磨粒产生吸力,所以这两个区域称做逆磁区<sup>[7]</sup>,即B区。本研究使用的镀镍碳化硅磨粒属于顺磁性磨粒,故其在顺磁区受到吸力吸向锯丝表面,在逆磁区受到斥力远

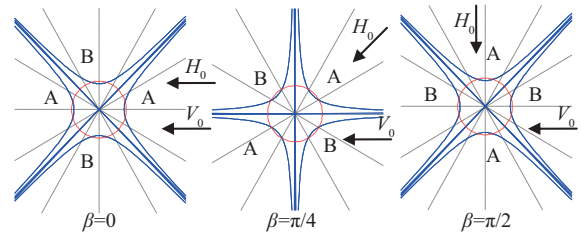


图3 锯丝周围磁力分区

Fig. 3 Magnetic force partitions around the wire

离锯丝表面,且顺磁区随磁场方向变化,从而会使磁性磨粒吸附在锯丝表面上的不同位置。

假设流体为不可压缩的牛顿流体,流体黏度 $\eta$ 是流体物理能参数,与速度梯度无关,同时流体黏度不受温度影响;磨粒与流体初始速度相同。在实际切割过程中,如果流体的雷诺数 $Re < 1$ ,为层流流动,且满足斯托克斯定律,故流体阻力 $F_d$ 计算公式可表示为<sup>[8]</sup>:

$$F_d = -6\pi\eta b(v_p - v_f) \quad (7)$$

式中, $v_p$ 、 $v_f$ ——分别为磨粒和流体的速度。

由牛顿第二定律,可得磁性磨粒的运动方程:

$$F_m + F_d = ma \quad (8)$$

式中, $ma$ ——惯性力,其中 $m$ 为磨粒的质量, $a$ 为磨粒的加速度。对于小颗粒在液体流体中的运动,且流体雷诺数较低,惯性力远小于流体曳力,故惯性力可忽略不计。

式(4)、式(5)和式(7)代入式(8)得到磨粒速度的径向和方位角分量分别为:

$$v_{pr} = v_{fr} - \frac{4\mu_0 K C a^2 b^2 H_0^2}{9r^3 \eta} \left( \frac{C a^2}{r^2} + \cos 2(\theta - \beta) \right) \quad (9)$$

$$v_{p\theta} = v_{f\theta} - \frac{4\mu_0 K C a^2 b^2 H_0^2}{9r^3 \eta} \sin 2(\theta - \beta) \quad (10)$$

假设磁性磨粒为流体中自由运动的质点,根据由速度定义的流函数 $\Psi$ ,其在每个磁性磨粒的轨迹上为一定值,可得<sup>[9]</sup>:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = v_{pr} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial r} = -v_{p\theta} \quad (12)$$

基于以上分析,可利用有限元方法来分析磁性磨粒在流体中的动力学行为,先利用式(9)和式(10)通过 COMSOL Multiphysics 来求解磁性磨粒的运动速度,再利用所求得的结果代入式(11)和式(12)求流函数得到相应的流线,在定常情况下,流线即为磁性磨粒的迹线<sup>[10]</sup>,表示磁性磨粒受磁场力和流体阻力共同作用下在锯丝附近的运动轨迹。

## 2 磁性磨粒的动力学特性数值仿真研究

### 2.1 仿真条件设置

为了分析磁性磨粒的动力学行为,在有限元软件 COMSOL 中建立如图 2 所示的二维分析模型,假设流体不可压缩,整个流动过程是稳态,流体场选

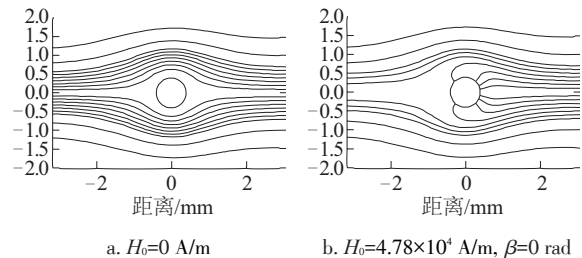
用层流模型,入口边界条件设置为速度入口,出口为压力出口,其余为壁面。采用三角形网格,为了得到更精确的计算结果,对锯丝附近的网格进行了局部加密,仿真参数设置如表 1 所示。本研究采用的外磁场磁感应强度为 60 mT,对应的外磁场强度为  $4.78 \times 10^4$  A/m。

表 1 仿真参数

性能参数	数值
入口速度 $V_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.003
磨粒半径 $b/\mu\text{m}$	10
真空磁导率 $\mu_0/\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	$1.256 \times 10^{-6}$
出口压力 $p_0/\text{Pa}$	$1.01325 \times 10^5$
磨粒体积磁化率 $K$	0.0728
磁场与 $x$ 轴夹角 $\beta/\text{rad}$	$0, \pi/4, \pi/2$
流体粘度 $\eta/\text{Pa} \cdot \text{s}$	0.04
流体密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1128
匀强磁场 $H_0/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$0, 4.78 \times 10^4$
锯丝磁导率 $\mu/\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	$11.4\mu_0$

### 2.2 仿真结果与分析

图 4 给出了由 COMSOL 得到的磁性磨粒在锯丝附近的运动轨迹仿真结果,在传统游离磨粒线锯切割中,即背景磁场强度为 0 A/m 时,磁性磨粒随流体绕锯丝运动,不会吸附到锯丝上,如图 4a 所示;而在磁感应游离磨粒线锯切割中,在锯丝截面附近一定范围内的磁性磨粒,在磁场力的作用下朝着锯丝运动,然后吸附在锯丝表面,如图 4b~图 4d 所示;且从图 4b 和 4c 可看出,磁性磨粒主要吸附在靠近来流方向的锯丝一侧,可能与磁性磨粒的运动受到锯丝的扰动有关,这与 Briss 等<sup>[11]</sup>的研究结果一致;从图中还可看出,当磁场方向变化时,磁性磨粒吸附在锯丝圆截面上的不同位置,这是因为当磁场方向变化时,顺磁区随磁场方向改变,顺磁区对顺磁性磨粒产生吸力,故磁性磨粒主要在沿磁场方向的





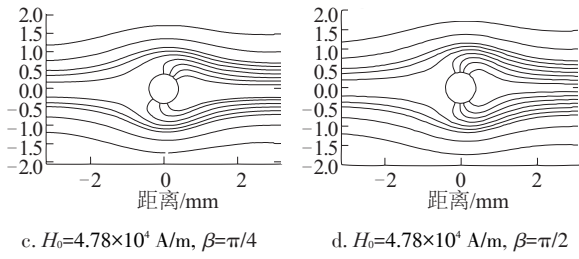


图4 磁性磨粒的运动轨迹仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the trajectory of magnetic abrasive grain

锯丝两侧吸附;在垂直于磁场方向的锯丝两侧,即逆磁区,顺磁性磨粒受到斥力,故不会有磁性磨粒吸附,符合上述理论分析的结果。

### 3 磁场方向对磁性磨粒动力学影响的实验研究

#### 3.1 实验条件

为了进一步研究不同磁场方向下磁性磨粒的动力学特性,本文仿照实际切割设计一实验装置,如图 5a 所示,该装置两侧各放置一块矩形钕铁硼永磁铁,两块永磁铁之间产生近似匀强磁场,且磁场方向可通过与  $x$  轴不同夹角调节;将一半径 0.2 mm 的锯丝置于两块永磁铁所产生的匀强磁场的中间位置,并利用高斯计测得锯丝所在处的磁感应强度为 60 mT,对应的磁场强度为  $4.78 \times 10^4$  A/m,采用 Keyence 公司生产的动态分析三维显微系统 VW-6000/5000 来拍摄不同磁场方向下的磁性磨粒吸附。根据具体实验要求,实验装置采用 3D 打印技术制造,搭建的观测实验平台如图 5b 所示。实验时,由聚乙二醇和镀镍碳化硅磨粒混合而成的磨浆由磨浆入口供入整个装置,为了更清楚地观测磁性磨粒吸附,本文采用的磨粒质量分数为 1%,磨浆通过液体流量计控制流量大小,高速摄影仪镜头的放大倍数为 200 倍。

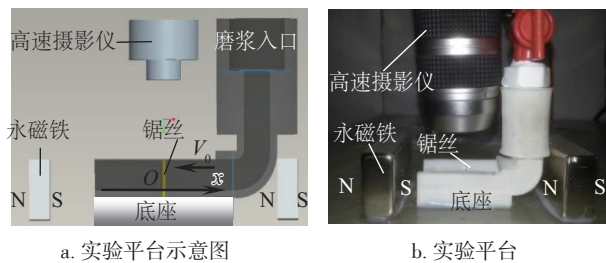


图5 观测实验平台

Fig. 5 Experimental platform of observation

#### 3.2 实验结果与分析

图 6 给出了在高速摄影仪下拍摄的磁性磨粒的吸附结果,在传统游离磨粒线锯切割中,有极少量磁性磨粒由于流体阻力滞留在锯丝表面,但不会有磁性磨粒的大量聚集,如图 6a 所示;而在磁感应游离磨粒线锯切割中,磁性磨粒大量吸附在锯丝表面,如图 6b、6c 和 6d 所示。当磁场方向与  $x$  轴夹角为零或  $\pi/4$  时,磁性磨粒主要吸附在靠近磨浆来流的锯丝一侧,如图 6b 和 6c 所示,这与仿真结果相符合。实验结果还发现,磁性磨粒仅吸附在平行于磁场方向的锯丝两侧,而在垂直于磁场方向的锯丝两侧没有吸附,这是因为当磁场方向变化时,顺磁区总沿磁场方向,顺磁区对顺磁性磨粒产生吸力,故磁性磨粒主要在平行于磁场方向的锯丝两侧吸附;在垂直于磁场方向的锯丝两侧,即逆磁区,顺磁性磨粒受到斥力,故不会有磁性磨粒吸附,验证了仿真结果的正确性。

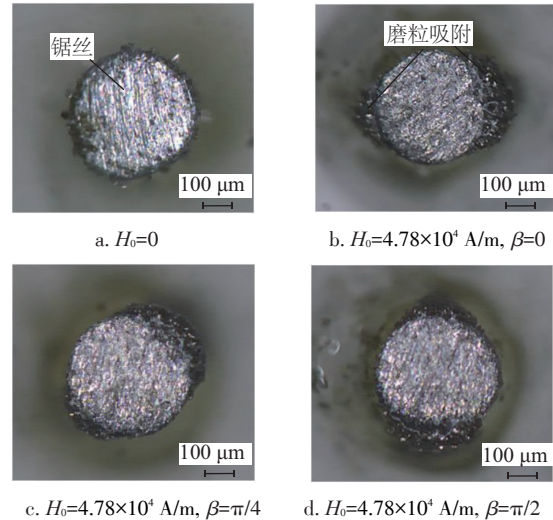


图6 磁性磨粒吸附实验结果

Fig. 6 Experimental results of magnetic abrasive grain adsorption

### 4 磁场方向对切缝宽度影响的实验研究

#### 4.1 实验条件

采用 WXD170 型往复金刚石线旋转点切割机进行切割实验,分别对传统游离磨粒线锯和不同磁场方向下的磁感应游离磨粒线锯切割技术进行切割对比实验,即  $H_0 = 0$  A/m、 $H_0 = 4.78 \times 10^4$  A/m,

$\beta=0$  rad,  $H_0=4.78\times10^4$  A/m,  $\beta=\pi/4$  和  $H_0=4.78\times10^4$  A/m,  $\beta=\pi/2$ , 分别标记为外加磁场条件 a、b、c 和 d, 加工工件为截面尺寸为 30 mm×30 mm 的光学玻璃 K9, 如图 7 所示, 切割实验条件如表 2 所示。

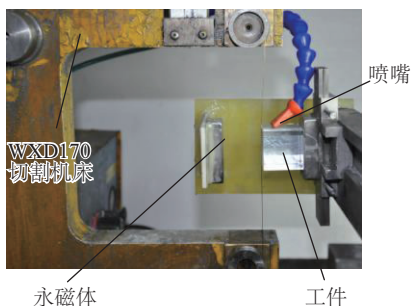


图 7 磁感应游离磨粒线锯切割实验平台

Fig. 7 Experimental platform of magnetic induction free abrasive wire sawing

表 2 线锯切割实验条件

Table 2 Experimental condition of wire sawing

技术指标	参数
锯丝类型	镀铜钢丝线
线锯线速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.0
线锯进给速/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	0.5
锯丝有效长度/m	60
线张力/MPa	0.2
磁性磨粒质量分数/%	30
锯丝直径/mm	0.4

## 4.2 切缝宽度对比结果与分析

分别在每个工件上选取 10 个点在高速摄影仪下放大 200 倍利用其后处理软件测量其切缝宽度, 然后求其平均值, 结果如图 8 所示。从图中可以看出, 在传统游离磨粒线锯切割中, 切缝宽度为 485.112  $\mu\text{m}$ ,

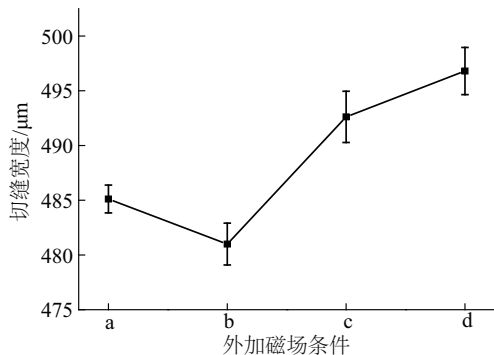


图 8 切缝宽度对比

Fig. 8 Comparison of kerf loss

而在磁感应游离磨粒线锯切割中, 当磁场方向平行于工件进给方向时, 切缝宽度最小为 480.996  $\mu\text{m}$ , 且随着磁场方向的变化, 切缝宽度增大, 当磁场方向垂直于工件进给方向时, 切缝宽度最大为 496.802  $\mu\text{m}$ 。

在游离磨粒线锯切割中, 沿锯丝径向的线锯切割示意图如图 9 所示, 根据锯丝和工件的相对位置, 锯丝周围的切割区域可以划分为切割正面和切割侧面。本研究中, 假设有效磨粒数即为吸附在锯丝表面的磁性磨粒数。锯丝直径和磨粒粒径决定切缝宽度<sup>[12]</sup>, 故切割侧面的有效磨粒数越多, 切缝宽度越大。传统游离磨粒线锯切割示意图如图 9a 所示, 磨粒主要靠锯丝的高速运动代入切割区域, 故进入切割区域的磨粒数很少。在磁感应游离磨粒线锯切割中, 当磁场方向平行于工件进给方向时, 此时逆磁区朝向切割侧面, 磁性磨粒受到斥力, 特别是半径相对大的磁性磨粒受到的斥力大, 难以与锯丝和工件侧面接触, 半径相对小的磁性磨粒受到的磁场力小, 相对容易与锯丝和切缝侧面直接接触, 故进入切割侧面的磨粒更多是半径较小的磨粒, 其切缝宽度最小, 如图 9b 所示; 当磁场方向与工件进给方向夹角为  $\pi/4$  时, 进入切割侧面的有效磨粒数增加, 故其切缝宽度增加, 如图 9c 所示; 当磁场方向与工件进给方向夹角为  $\pi/2$  时, 顺磁区朝向切割侧面, 磁性磨粒大量吸附于切割侧面, 进入切割侧面的有效磨粒数增加, 故其切缝宽度最大, 如图 9d 所示。

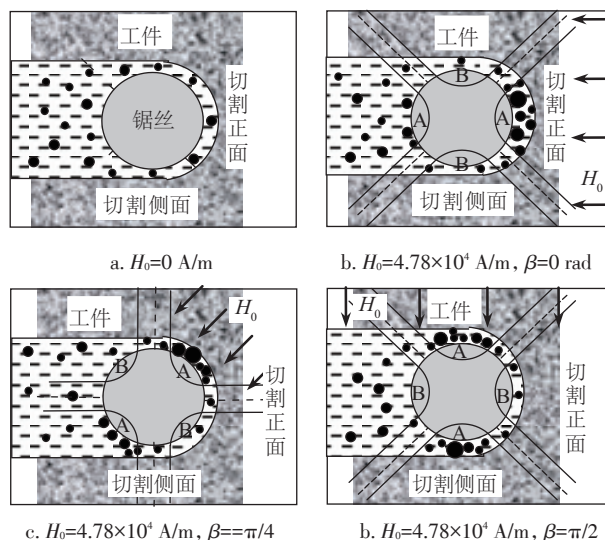


图 9 沿锯丝径向线锯切割示意图

Fig. 9 Schematic of magnetic induction free abrasive wire sawing in wire diameter direction

## 5 结 论

本研究基于磁感应游离磨粒线锯切割新方法,建立了磁性磨粒在进入切割区域前的动力学模型,应用有限元软件 COMSOL Multiphysics 仿真研究了磁场方向对磁性磨粒动力学特性的影响,并在仿真研究的基础上搭建了磨粒吸附观测实验平台,应用 VW-6000/5000 动态三维显微系统对锯丝周围磁性磨粒吸附进行实验研究,结果表明在传统游离磨粒线锯切割中,极少量磁性磨粒由于流体阻力滞留于锯丝表面,但不会有磁性磨粒的大量聚集,而在磁感应游离磨粒线锯切割中,磁性磨粒大量吸附在锯丝表面,且随着磁场方向的变化,磁性磨粒仅吸附在平行于磁场方向的锯丝两侧,即顺磁区,磁性磨粒受到吸力,而在垂直于磁场方向的锯丝两侧,即逆磁区,磁性磨粒受到斥力不会被吸附。上述实验结果验证了仿真结果的正确性。最后还在 WXD170 型往复金刚石线旋转点切割机进行了传统游离磨粒线锯和不同磁场方向下的磁感应游离磨粒线锯切割对比实验,研究了磁场方向对工件切缝宽度的影响。结果表明,当磁场方向平行于工件进给方向时,工件切缝宽度最小,故在磁感应游离磨粒线锯切割中,为了有效降低切缝宽度,提高单位长度硅棒的硅片生产量,磁场方向应与工件进给方向平行放置,也表明了添加辅助匀强磁场用于游离磨粒线锯切割技术的有效性。

### [参考文献]

- [1] 王文昌, 陆 春, 顾 浩. 粘度与表面张力对硅片切割液稳定性能影响的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 387—391.
- [1] Wang Wenchang, Lu Chun, Gu Hao. Study on effect of viscosity and surface tension on stability of cutting fluid for wire saw[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(2): 387—391.
- [2] Fathi M, Mefoued A, Messaoud A, et al. Cost-effective photovoltaics with silicon material[J]. Physics Procedia, 2009, 2(3): 751—757.
- [3] 王金生, 姚春燕, 彭 伟, 等. 游离磨料线锯切割实验研究[J]. 中国工程科学, 2012, 14(11): 94—98.
- [3] Wang Jinsheng, Yao Chunyan, Peng Wei, et al. Experimental study of free abrasive wire sawing for multi-strands wire[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(11): 94—98.
- [4] Shwinde S, Berg M, Kunert M. New potential for reduction of kerf loss and wire consumption in multi-wire sawing[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 136: 44—47.
- [5] Anspach O, Hurka B, Sunder K. Structured wire: from single wire experiments to multi-crystalline silicon wafer mass production[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 131: 58—63.
- [6] 严 密, 彭晓领. 磁学基础与磁性材料[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006, 1—35.
- [6] Yan Mi, Peng Xiaoling. Fundamentals of magnetism and magnetic materials[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006, 1—35.
- [7] 刘树贻. 磁电选矿学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994, 8—120.
- [7] Liu Shuyi. Magnetoelectricity separation[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1994, 8—120.
- [8] Nassauer B, Hess A, Kuna M. Numerical and experimental investigations of micromechanical process during wire sawing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(14): 2656—2665.
- [9] 黄卫星, 李建明, 肖泽仪. 工程流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011, 127—155.
- [9] Huang Weixing, Li Jianming, Xiao Zeyi. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011, 127—155.
- [10] Ritter J E A, Ebner A I D, Daniel K D, et al. Application of high gradient magnetic separation principles to magnetic drug targeting[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2004, 280(2-3): 184—201.
- [11] Birss R, Dennis B, Gerber R. Particle capture on the upstream and downstream side of wires in HGMS[J]. IEEE Transactions on Magnets, 1979, 15(5): 1362—1363.
- [12] Beesley J G, Schönholzer U. Slicing 80 micrometer wafers-process parameters in the lower dimensions[A]. Proceedings of the 22nd European PVSEC[C]. Milan: EPFL Press, 2007, 956—962.

## STUDY ON EFFECT OF MAGNETIC FIELD ORIENTATION ON THE KINEMATIC CHARACTERISTIC OF MAGNETIC ABRASIVE GRAIN AND KERF LOSS

Zhang Wei, Xu Xuefeng, Yao Chunyan, Li Hejie, Liu Kun

*(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)*

**Abstract:** A kinematic model of magnetic abrasive grain under different magnetic field orientations is set up and it is studied by FEM software COMSOL Multiphysics. A direct observation on the adsorption of magnetic abrasive grain is performed at an experimental platform using high speed photography, which verifies the simulation results. Traditional free abrasive wire sawing and magnetic induction free abrasive wire sawing experiments under different orientations are done for optical glass K9. The results show that the kerf loss of K9 is minimum when the magnetic field orientation is parallel to the work-piece feed direction, which also validates the effectiveness of adding uniform magnetic field in free abrasive wire sawing method.

**Keywords:** sawing; magnetic field; abrasives; motion analysis; magnetization