刘春生,李德根. 不同截割状态下镐型截齿侧向力的实验与理论模型[J]. 煤炭学报,2016,41(9):2359 - 2366. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0178

Liu Chunsheng,Li Degen. Experimental research and theoretical model on lateral force of conical pick under different cutting conditions[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(9):2359 - 2366. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0178

# 不同截割状态下镐型截齿侧向力的实验与理论模型

刘春生[1],李德根[2]

(1. 黑龙江科技大学 机械工程学院,黑龙江 哈尔滨　150022;2. 黑龙江科技大学 学报编辑部,黑龙江 哈尔滨　150022)

**摘　要:** 为建立不同截割状态下镐型截齿侧向力的数学模型,依据截割机理与力学原理分析截齿的截割工况及侧向力的力学特征,在不同的截割状态下,采取截割侧向力与碾挤压附加侧向力有条件叠加的方法,建立了侧向力数学模型;对不同倾斜角和切削厚度截齿侧向力的载荷谱进行频域频谱分析和时域分解,利用最小二乘法反求侧向力模型中的关联性系数,综合修正理论模型。结果表明:侧向力由截割和碾挤压附加侧向力构成,侧向力模型可以综合反映截齿参数、煤岩性质和工作参数的量化关系;实验验证了理论模型的本构关系和定量的准确性,侧向力高频载荷随机变化程度与倾斜角关联性小,低频载荷幅值的主要成分 0 Hz 稳态值与倾斜角成正比关系。该研究为解决工作机构轴向力平衡等问题,改善设备稳定性提供有效的分析方法和基础。

**关键词:** 采煤机;镐型截齿;载荷谱;侧向力;力学模型

**中图分类号:** TD421.6　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253 - 9993(2016)09 - 2359 - 08

# Experimental research and theoretical model on lateral force of conical pick under different cutting conditions

LIU Chun-sheng[1],LI De-gen[2]

(1. *School of Mechanical Engineering,Heilongjiang University of Science & Technology,Harbin*　150022,*China*;2. *Editorial Department of Journal,Heilongjiang University of Science & Technology,Harbin*　150022,*China*)

**Abstract:** This paper is a targeted effort to develop a mathematical model on the lateral force of conical pick under different cutting conditions. The cutting conditions and characteristics of lateral force of conical pick were analyzed based on cutting mechanism and mechanics principle. The lateral force model was established by the conditional superposition method of cutting lateral force and grinding extrusion additional lateral force. The lateral force load spectrum for different slope angles and cutting thicknesses was decomposed in frequency domain and time domain. The comprehensive theoretical model was modified by the correlation coefficient of lateral force model reversed by using least squares. The results show that the lateral force is formed by cutting and grinding extrusion additional lateral force. The lateral force model can comprehensively reflect the cutter tooth parameters,coal and rock properties and working parameters of quantitative relations. The experiments verify the theoretical model of the constitutive relationship and the accuracy of quantification. The random variation of lateral force high frequency load is less correlated with tilt angle. The main component 0 Hz steady state values of low frequency load amplitude and tilt angle were positively correlated. This re-

**收稿日期:** 2016-02-21　　**修回日期:** 2016-04-20　　**责任编辑:** 许书阁
**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(51274091)
**作者简介:** 刘春生(1961—),男,山东牟平人,教授。E - mail: liu_chunsheng@163.com。**通讯作者:** 李德根(1982—),男,吉林长春人,编辑。E - mail: lidegen1982@126.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

search may provide an effective analysis method and basis for solving such problems as the axial force balance working mechanism and improving the stability of the equipment.

**Key words:** shearer; conical pick; load spectrum; lateral force; mechanical model

镐型截齿在采煤机滚筒上布置,尤其端盘处镐型截齿的姿态具有多样性,相对镐型截齿截割阻力和推进阻力,侧向力呈现出不同的状态,其大小和方向的变化规律,尚未给出准确的数学描述[1]。由于镐型截齿侧向力大小和变化规律的不确定性,对镐型截齿的自回转、摩擦磨损及偏磨和工作寿命有着决定性影响;镐型截齿侧向力是滚筒轴向力的主要构成,工作机构整体的不平衡轴向力影响着采煤机的振动及其工作稳定。目前,对镐型截齿截割阻力研究的较多,Evans. I[2]建立了镐型截齿沿直线截割煤岩的截割阻力公式,指出镐型截齿的截割阻力随半锥角和切削深度变化的情况。牛东民[3]从断裂力学角度分析了刀具切削力的变化规律,建立了力学模型。Okan Su 等[4]利用 PFC3D 模拟单轴抗压强度实验,获取刀具截割岩石的切削力,应用回归分析的方法研究了切削力的平均峰值。Jerzy Rojek 等[5]采用数值方法模拟了岩石切割过程,获得三向载荷的平均力。王春华等[6]研究了截割参数及煤本构模型对煤塑性区及最大剪应力等的影响。李晓豁等[7]分析镐型截齿受力情况,获得截割断面不同位置镐型截齿随机载荷的数学模型。刘春生等[8-11]通过镐型截齿的平面截割实验和旋转截割实验,给出镐型截齿截割阻力的实验理论模型及其特征。而侧向力的理论与实验研究相对较少,对采煤机滚筒轴向力的内在关系及定量描述不是很明确。即使在相同的截割条件下,因煤质脆性与韧性的不同,镐型截齿侧向力在大小和方向上相差也很大,因此,研究侧向力关联性特征,大小及变化规律的数学描述非常必要。

## 1 镐型截齿截割状态

影响侧向力的变化规律与大小的主要因素:镐型截齿参数与布置姿态(齿尖锥角、镐型截齿切向安装角、轴向倾斜角),煤岩性质(截割阻抗、截槽两侧的崩落角、煤岩构造),工作参数(切削厚度、镐型截齿排列重复截割等),在这些参数中,轴向倾斜角对侧向力大小和方向的随机性变化有着决定性影响。文中所研究的是位于端盘处零度镐型截齿和角度镐型截齿,由于研究单个镐型截齿两侧的侧向力,压张效应对其截割阻抗影响很小,故不计煤壁的压张效应对其影响。

### 1.1 对称截割

镐型截齿轴向倾斜角 $\theta=0°$ 时,镐型截齿工况如图 1 所示。

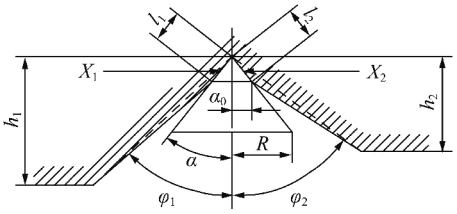



图 1 对称截割工况

Fig. 1 Symmetry cutting condition

图 1 中,$X_1$,$X_2$ 为垂直镐型截齿轴线方向的两侧侧向力,kN;$h_1$,$h_2$ 为截槽两侧切削厚度,m;$\varphi_1$,$\varphi_2$ 为截槽两侧崩落角,(°);$a_0$ 为镐型截齿齿尖在煤岩体上张应力区等效圆半径,m;$l_1$,$l_2$ 为齿尖两侧作用于煤岩体区域锥线长度,m;$R$ 为镐型截齿硬质合金头直径,m;$\alpha$,$\alpha'$ 分别为镐型截齿齿尖半锥角和等效尖半锥角,$\alpha'=\alpha+\Delta\alpha$,(°)。

镐型截齿齿尖等效锥角 $\alpha'$ 与安装角 $\beta_0$ 有关,$\beta_0$($\beta$)为镐型截齿安装角,即镐型截齿切向速度方向与镐型截齿轴线夹角,$\beta_0+\beta=90°$,(°)如图 2 所示。

$$\tan\alpha'=\frac{R}{H_2}=\frac{R}{H_1\sin\beta_0},\tan\alpha=\frac{R}{H_1}$$

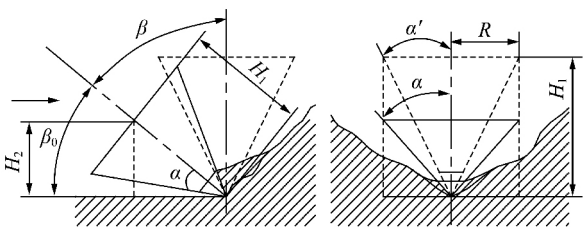



图 2 $\alpha'$ 与 $\alpha$ 的关系

Fig. 2 Relationship between $\alpha'$ and $\alpha$

则有

$$\tan\alpha'=\tan\alpha\frac{1}{\sin\beta_0}$$

由图 1 可见,当 $h_1=h_2$,$\alpha'<\varphi$ 时,即对称截割工况,其特点:两侧截槽崩落基本对称,$\varphi_1=\varphi_2$,$l_1=l_2$,侧向力均值(数学期望):

$$\sum X=\sum(X_1-X_2)\approx 0$$

当 $h_1>h_2$,$\varphi_1\leqslant\varphi_2$,$\alpha'<\varphi$ 时,截槽两侧崩落不完全对称,略有差别,则 $l_1\geqslant l_2$,$X_1\geqslant X_2$,侧向力均值:

$$\sum X=\sum(X_1-X_2)\geqslant 0$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

其均值的方向与 $X_1$ 相同。

### 1.2　非对称截割

镐型截齿轴向倾斜角 $\theta \neq 0°$时，镐型截齿工况如图 3 所示。

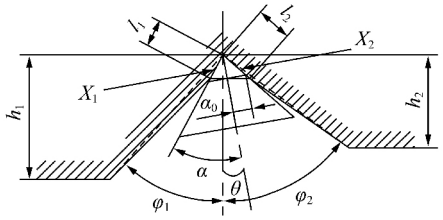



图 3　切削截割工况

Fig. 3　Cutting conditions

#### 1.2.1　切削截割

由图 3 可见，当 $\theta > 0°$，且 $\theta \leqslant \varphi_2 - \alpha'$，有两种截割状态，一种是两侧切削厚度相同，$h_1 = h_2$；另一种是两侧切削厚度相同 $h_1 \neq h_2$。

当 $h_1 = h_2$ 时，因 $\theta > 0°$，一般 $\varphi_1$ 要略大于 $\varphi_2$，$l_2 \geqslant l_1$，截槽两侧崩落一般不够对称，镐型截齿两侧侧向力 $X_1$ 和 $X_2$ 的均值:

$$\sum X = \sum (X_2 - X_1) > 0$$

其方向为 $X_2$ 的方向。

当 $h_1 \neq h_2$，若 $h_1 > h_2$，$\theta > 0°$时，$\varphi_1$ 和 $\varphi_2$，$l_1$ 和 $l_2$ 的大小存在不确定性，侧向力均值:

$$\sum X = \sum |X_2 - X_1| > 0$$

其方向也有着不确定性，取决于 $\theta$ 和 $\Delta h = h_1 - h_2$ 相对大小，由于 $h_1$ 越大，$\varphi_1$ 随之减小，而 $\theta$ 越大，$l_2$ 越大，2 者对侧向力的影响方向相反。

#### 1.2.2　碾挤压截割

由图 4 所示，当 $\theta > 0°$，且 $\theta > \varphi_2 - \alpha'$，同样有两种截割状态，即 $h_1 = h_2$ 或 $h_1 \neq h_2$。

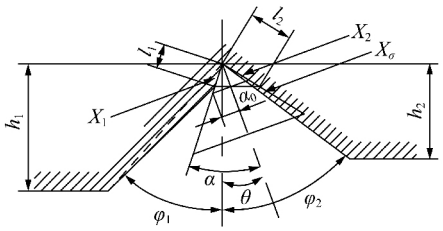



图 4　碾挤压截割工况

Fig. 4　Cutting condition under grinding extrusion

在这种截割工况下，侧向力 $X_1$ 和 $X_2$ 与 $\theta \leqslant \varphi_2 - \alpha'$工况相同。当 $\theta > \varphi_2 - \alpha'$时，由于镐型截齿齿尖的圆锥面与崩落截槽有重叠，故产生附加侧向力 $X_\sigma$，随 $\theta$ 增大，硬质合金头锥面单侧与崩落槽产生挤压作用增强，产生附加侧向力，即镐型截齿总侧向力:

$$\sum X = \sum (X_2 - X_1) + X_\sigma$$

由上述分析侧向力有两部分构成，一是截割过程中形成不对称密实核($l_1$，$l_2$) 产生侧向力，其载荷具有随机性、频率范围大的交变特点，幅值随倾斜角度 $\theta$ 增大而增大。二是 $\theta > \varphi - \alpha'$时重叠的挤压效应，镐型截齿齿尖锥面与煤岩崩落槽侧壁产生碾挤压，侧向力呈现稳态特征(零频、稳态值为主)，即附加稳态侧向力。

## 2　侧向力模型

### 2.1　镐型截齿侧向力

由上述对不同截割工况的分析，侧向力是在截割过程中，镐型截齿齿尖挤压煤岩形成不对称密实核产生的，依据力学原理和破碎理论，假设破碎载荷的大小决定于 $a_0$ 范围内煤岩均达到抗压强度时的作用力，推导出侧向力的理论数学模型，再利用截割试验的载荷谱，修正模型中的关联性系数，侧向力计算简图如图 5 所示。

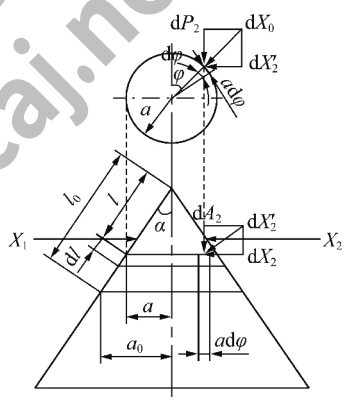



图 5　侧向力计算简图

Fig. 5　Calculation diagram of lateral force

(1) $\theta = 0°$，$h_1 = h_2$。

当 $\theta = 0°$，$h_1 = h_2 = h_0$ 时，由图 3 和图 4 可见，则有作用在镐型截齿齿尖力单元锥弧面积 $a\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}l$ 上力。

$$\mathrm{d}X_\sigma = \sigma_y a\mathrm{d}\varphi\mathrm{d}l$$

式中，$\sigma_y$ 为煤岩抗压强度，$\mathrm{N/m^2}$。

$$l_0 = \frac{a_0}{\sin\alpha}, l = \frac{a}{\sin\alpha}$$

$$\mathrm{d}X_2' = \mathrm{d}X_\sigma \sin\varphi$$

则有镐型截齿截割侧向力:

$$\mathrm{d}X_2 = \mathrm{d}X_2'\cos\alpha = \sigma_y \cos\alpha \sin\alpha l \sin\varphi \mathrm{d}\varphi \mathrm{d}l$$

在作用张应力区半径 $a_0$ 范围内，进行积分可得

$$X_2 = \sigma_y \cos\alpha \sin\alpha \int_0^{\pi} \sin\varphi \mathrm{d}\varphi \int_0^{l_0} l\mathrm{d}l = \sigma_y a_0^2 \frac{\cos\alpha}{\sin\alpha} \quad (1)$$

当 $\theta = 0°$时，侧向力的均值相等，即 $X_1 = X_2$，且方向相反，$X = X_1 - X_2 \approx 0$。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

(2) $\theta\neq0°$,$h_1=h_2$。

当 $\theta\neq0°$,$h_1=h_2=h_0$ 时,镐型截齿齿尖作用圆发生变化,如图 6 所示,可求出 $a_0$ 的等效值 $a_0\{a_1,a_2\}$[1],则有

$$a_1'=\frac{a_1''\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)},a_1''=a_2''$$

$$a_2'=\frac{a_0}{\cos\theta},a_2''=a_0(1-\tan\theta\tan\alpha)$$

$$a_1=\frac{a_1'+a_1''}{2},a_2=\frac{a_2'+a_2''}{2}$$

即

$$a_1=\frac{a_0}{2}(1-\tan\theta\tan\alpha)\left[1+\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]$$

$$a_2=\frac{a_0}{2}\left(\frac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)$$

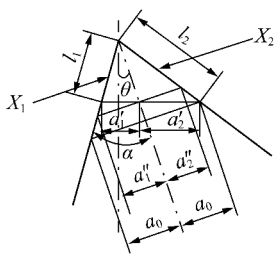



图 6 轴向倾斜齿尖受力状态

Fig. 6 Tooth stressed state under axial oblique conical pick

故由式(1)可得镐型截齿两侧侧向力:

$$\begin{cases}X_1=\sigma_y a_1^2\dfrac{\cos\alpha}{\sin\alpha}\\ X_2=\sigma_y a_2^2\dfrac{\cos\alpha}{\sin\alpha}\end{cases}\tag{2}$$

由式(2)得镐型截齿侧向力:

$$X=X_2-X_1=\sigma_y\frac{\cos\alpha}{\sin\alpha}\frac{a_0^2}{4}\left\{\left(\frac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\times\tan\alpha\right)^2-(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\right\}\tag{3}$$

当考虑到切向安装角 $\beta_0>0°$ 时,一般(Tex translation failed),则有等效半径 $a_0\{a_{\beta_0}\}$,$a_{\beta_0}=a_0/\cos\beta_0$,$a_{\beta_0}$ 与 $\beta_0$ 的大小有关,$\beta_0$ 增大 $a_0$ 增大,$a_{\beta_0}<R$。依据截割比能耗最小等原则[1],则有截割侧向力:

$$X=\frac{\sigma_y a_0^2}{4\tan\alpha\cos^2\beta_0}\left\{\left(\frac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)^2-(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\right\}\tag{4}$$

(3) $\theta\neq0°$,$h_1\neq h_2$。

当 $\theta\neq0°$,$h_1\neq h_2$ 时,通过实验分析,侧向力与截割阻抗 $A\{\sigma_y\}$ 和切削厚度 $h\{h_1,h_2\}$ 成正比,式(4)是在特定切削厚度 $h_0(a_0)$ 下推导出的,因此截割侧向力的一般形式:

$$X=\frac{\sigma_y a_0^2}{4\tan\alpha\cos^2\beta_0}\left\{\left(\frac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)^2\frac{h_2}{h_0}-(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\frac{h_1}{h_0}\right\}\tag{5}$$

## 2.2 附加侧向力

当 $\theta>\varphi_2-\alpha'$ 时,如图 7 所示。碾挤压力 $\varphi_\sigma(\theta)$ 大小来源于镐型截齿硬质合金齿尖锥面线与煤岩崩落截槽重叠挤压结果,$\varphi_\sigma(\theta)$ 与重叠面积 $S$,$\sigma_y$ 成正比,则

$$\varphi_\sigma(\theta)=\sigma_y S$$

式中,$S$ 为齿尖锥体与崩裂槽重叠面积,$S\approx0.5L_z^2(\alpha'+\theta-\varphi_2)$,m。

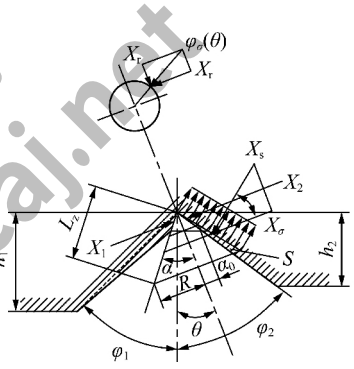



图 7 附加侧向力

Fig. 7 Additional lateral force

由图 7 可知,考虑到摩擦力,为简化计算,则令挤压形成径向力 $X_r$ 和侧向挤压力 $X_s$ 相等 $X_s\approx X_r$,则

$$X_s^2+X_r^2=\varphi_\sigma^2(\theta)$$

$$X_s=\frac{1}{2\sqrt{2}}L_z^2(\alpha'+\theta-\varphi_2)\sigma_y$$

垂直镐型截齿轴线方向的侧向力:

$$X_\sigma=X_s\cos\alpha$$

$$X_\sigma=\frac{\sigma_y}{2\sqrt{2}}L_z^2(\alpha'+\theta-\varphi_2)\cos\alpha\tag{6}$$

附加侧向力方向为镐型截齿倾斜方向,$\theta$ 越小、$\varphi$ 越大、$\alpha'$ 越小,则附加侧向力越小。

## 2.3 侧向力模型

镐型截齿总侧向力由两部分构成,截割侧向力和碾挤压附加侧向力,在特定条件下叠加则有侧向力:当 $\theta\leqslant\varphi_2-\alpha'$ 时,见式(5),当 $\theta>\varphi_2-\alpha'$ 时,由式(5)和(6)可得

$$X=\frac{\sigma_y a_0^2}{4\tan\alpha\cos^2\beta_0}\left\{\left(\frac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)^2\frac{h_2}{h_0}-\right.$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

$$(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\frac{h_1}{h_0}\Bigg\}+\frac{\sqrt{2}\sigma_y}{4}L_z^2(\alpha'+\theta-\varphi_2)\cos\alpha \tag{7}$$

式(7)中 $\sigma_y R^2$ 反映了截割阻力大小,研究结果表明截割阻力与截割阻抗和齿尖当量接触面积成正比,则有 $\sigma_y R^2 \approx K_A \frac{A}{A_0}$,并令 $a_0 = KR$, $K<1$,而 $L_z = R/\sin\alpha$,将其各关系代入式(5)和(7),可得

$$X=\begin{cases}\dfrac{K_A A}{4A_0\tan\alpha}\dfrac{K^2}{\cos^2\beta_0}\Bigg\{\left(\dfrac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)^2\dfrac{h_2}{h_0}-(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\dfrac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\dfrac{h_1}{h_0}\Bigg\} & (\theta\leqslant\varphi_2-\alpha')\\ \dfrac{K_A A}{4A_0\tan\alpha}\Bigg\{\dfrac{K^2}{\cos^2\beta_0}\Bigg\{\left(\dfrac{1}{\cos\theta}+1-\tan\theta\tan\alpha\right)^2\dfrac{h_2}{h_0}-(1-\tan\theta\tan\alpha)^2\left[1+\dfrac{\cos\alpha}{\cos(\alpha-\theta)}\right]^2\dfrac{h_1}{h_0}\Bigg\}+\dfrac{\sqrt{2}(\theta+\alpha'-\varphi)\cos\theta}{\sin\alpha}\Bigg\} & (\theta>\varphi_2-\alpha')\end{cases} \tag{8}$$

式(8)可综合反映镐型截齿侧向力大小和方向与相关参数的定量关系。

## 3　侧向力实验载荷谱

实验条件: $\alpha = 42.5°$, $\beta_0 = 50°$, $h_1 = h_2$, $h_0 = 20$ mm, $A_0 = 0.18 \sim 0.2$ kN/mm。根据实验[8]测得的崩落角 $\varphi$ 和切削厚度规律 $h = h_0\sin(4.27t)$,在 $h = 5 \sim 30$ mm 范围内,近似按线性拟合出: $\varphi = 80 - h - 0.33\theta$。

实验得到不同倾斜角 $\theta = 0°, 5°, 10°, 15°$ 的镐型截齿侧向载荷曲线,如图 8 所示。

为了探求镐型截齿侧向载荷的特征,对其进行 FFT 处理[12],如图 9 所示。镐型截齿的侧向载荷幅值主要集中在低频区域,且随着镐型截齿倾斜角度的增加侧向载荷低频段幅值随之增加,特别是频率为 0 Hz的直流分量部分,是侧向力的主要成分(稳态载荷),随着倾斜角度的增大,近似于线性增大,与理论分析是一致的; 而高频段幅值对镐型截齿倾斜角度的变化敏感度较弱,其幅值主要集中在 0.2 kN 以内。采用统一分解尺度对镐型截齿侧向载荷进行高通与低通的滤波处理,分别得出镐型截齿侧向载荷在时域上高频曲线,如图 10 所示,低频实验曲线及其拟合曲线,如图 11 所示。

由图 8 ~ 11 可以看出,与理论分析截割工况是吻合的,侧向力的高频成分基本不随镐型截齿倾斜角 $\theta$ 的改变而改变,其低频成分随 $\theta$ 的增大而有规律地增大,且 $\theta = 0°$时,侧向力幅值 $A$ 的期望值接近于 0。

理论模型中的 $K_A$ 和 $K$ 系数反映镐型截齿与煤岩相互作用的综合因素,可根据图 8,10,11 的旋转截割实验载荷谱,利用实验数据 $(\theta_m, h_i, F_{\theta_{mi}})$ $(i = 1, \cdots, n-1, n;\ m = 0, 1, 2, 3)$ 来估计式(8)中参数 $K_A$, $K$,

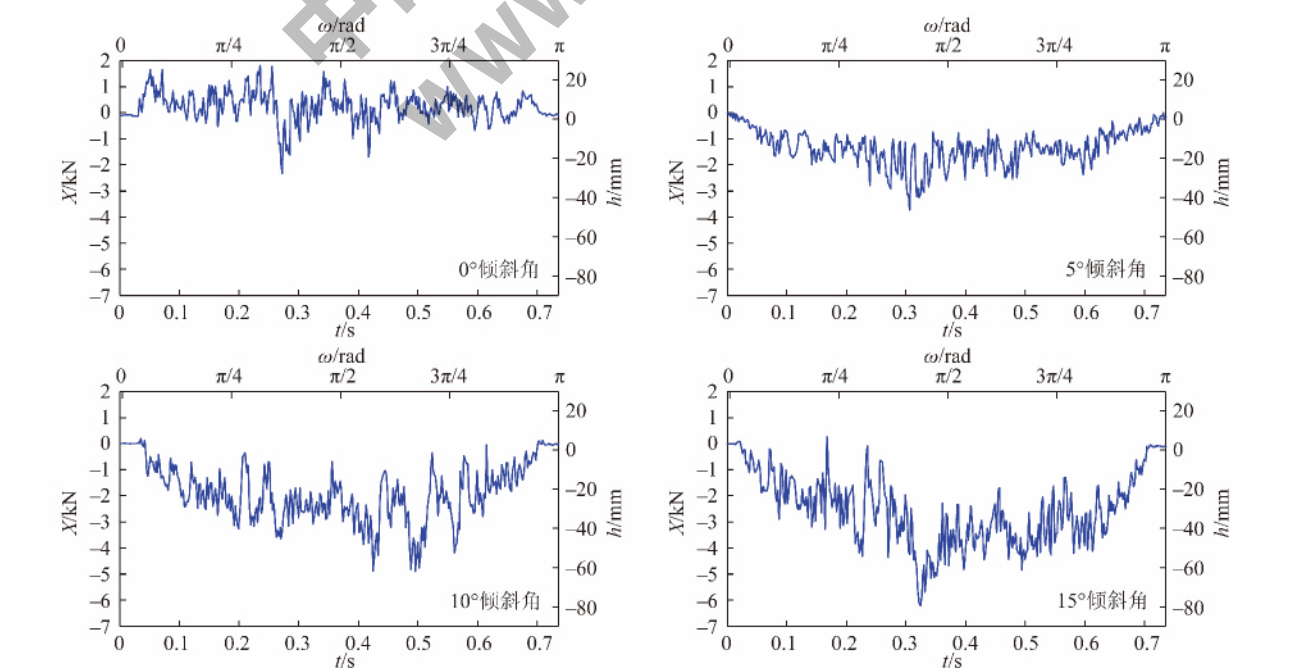



图 8　不同倾斜角的实验侧向载荷谱

Fig. 8　Lateral load under different rotation angle in experiments

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

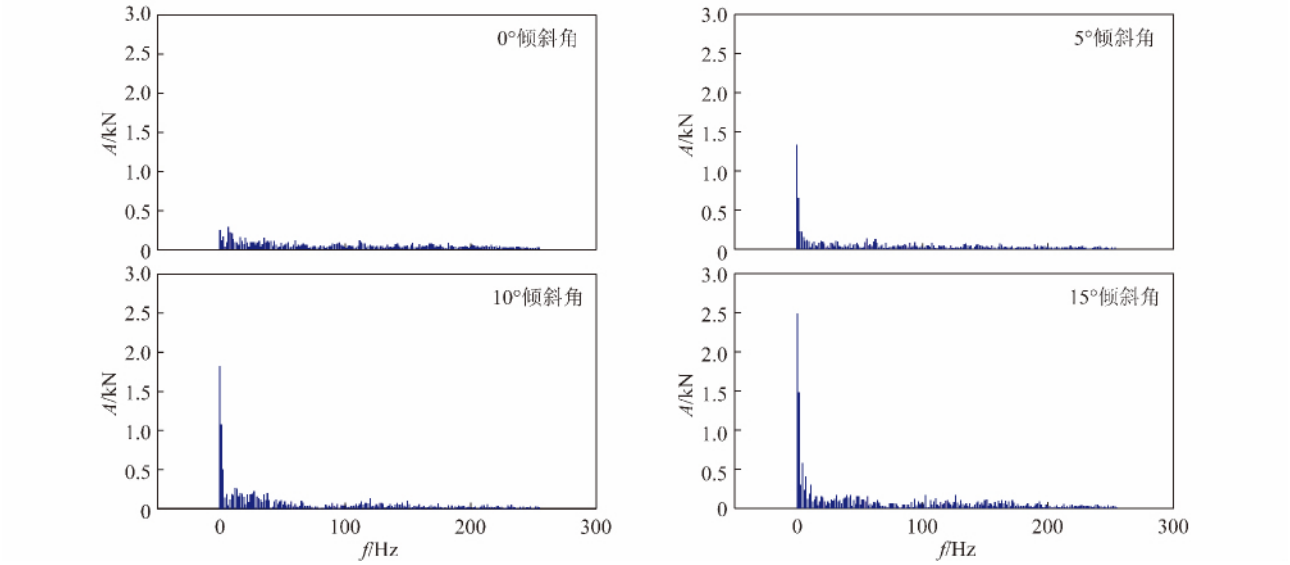



**图 9 镐型截齿侧向载荷幅频特性**

Fig. 9 Lateral load amplitude frequency characteristics

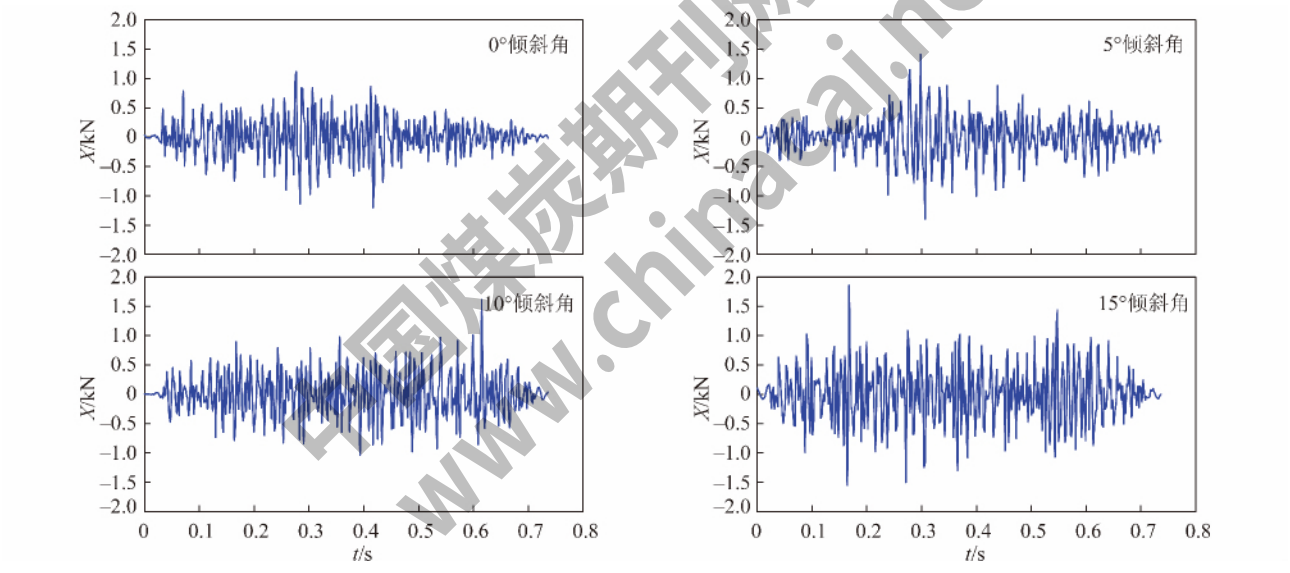



**图 10 高频段镐型截齿侧向载荷谱**

Fig. 10 Lateral load spectrum of conical pick under high frequency

参数估计的原则是使 $\sum_{m=0}^{\theta_m}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{\theta_m i}^2$ 误差平方和最小，即采用最小二乘法算法反求出 $K_A$ 和 $K$。在给定 $\theta_m$，切削厚度 $h_i=0\sim h_0$，$h_i=\Delta h i$，$i=1,\cdots,n-1,n$，$n=h_0/\Delta h$，截割实验侧向力载荷谱 $F_{i\theta}$，则有

$$\Delta\varepsilon_i=\sum_{i=1}^{n_1}\left(X_{\theta_m i}-F_{\theta_m i}\right)^2\big|_{\theta\leqslant\varphi_2-\alpha}+\sum_{i=n_1+1}^{n}\left(X_{\theta_m i}-F_{\theta_m i}\right)^2\big|_{\theta>\varphi_2-\alpha}$$

在不同倾斜角 $\theta_m$ 下，$m=0,5,10,15$，则有

$$Q(K_A,K)=\sum_{m=0}^{\theta_m}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_{mi}^2=\sum_{m=0}^{\theta_m}\left\{\sum_{i=1}^{n_1}\left(X_{\theta_{mi}}-F_{\theta_m i}\right)^2\big|_{\theta\leqslant\varphi_2-\alpha}+\sum_{i=n_1+1}^{n}\left(X_{\theta_m i}-F_{\theta_m i}\right)^2\big|_{\theta>\varphi_2-\alpha}\right\}\min \tag{9}$$

求得 $K_A=0.47$，$K=3.57$，代入式(8)，即有镐型截齿侧向力数学模型。图 12 为理论与实验侧向力变化规律曲线，图 12(a) 为侧向力随镐型截齿倾斜角度 $\theta$ 的变化规律，其最大误差为 6.7%。图 12(b) 为侧向力随切削厚度 $h$ 的变化规律，其最大误差为 7.2%，理论模型与实验结果是吻合的，2 者变化规律具有一致性。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

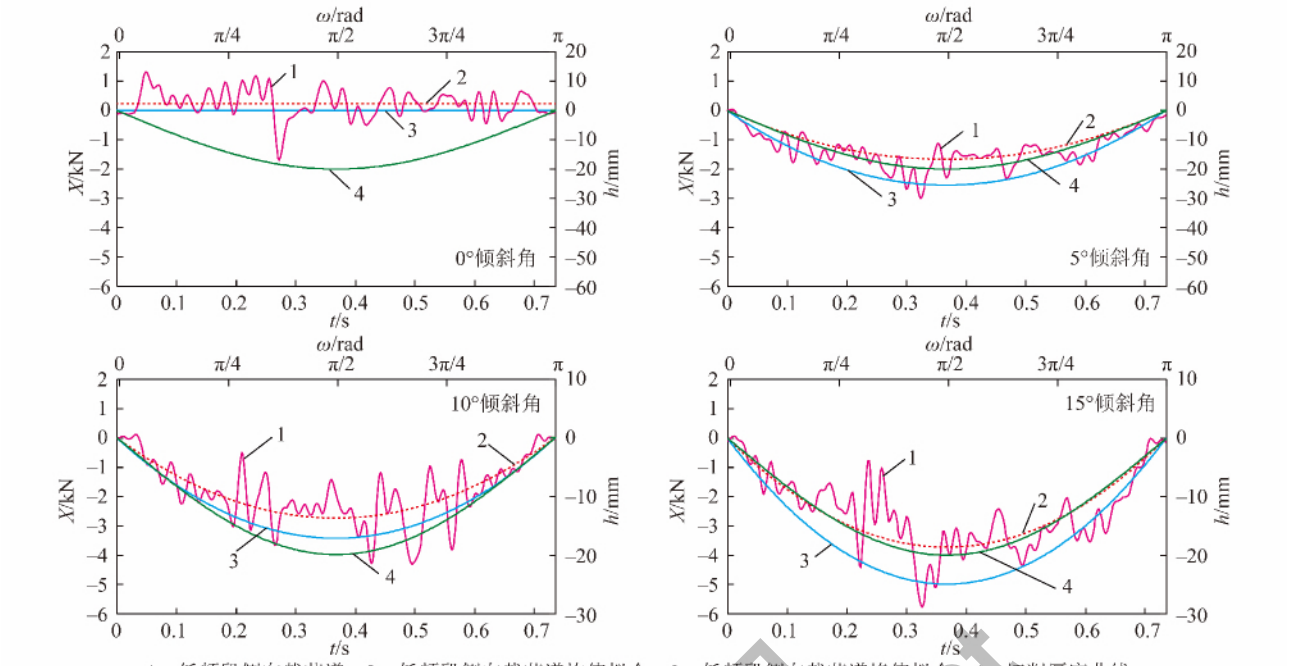



**图 11　低频段镐型截齿侧向载荷谱**

Fig. 11　Lateral load spectrum of conical pick under low frequency

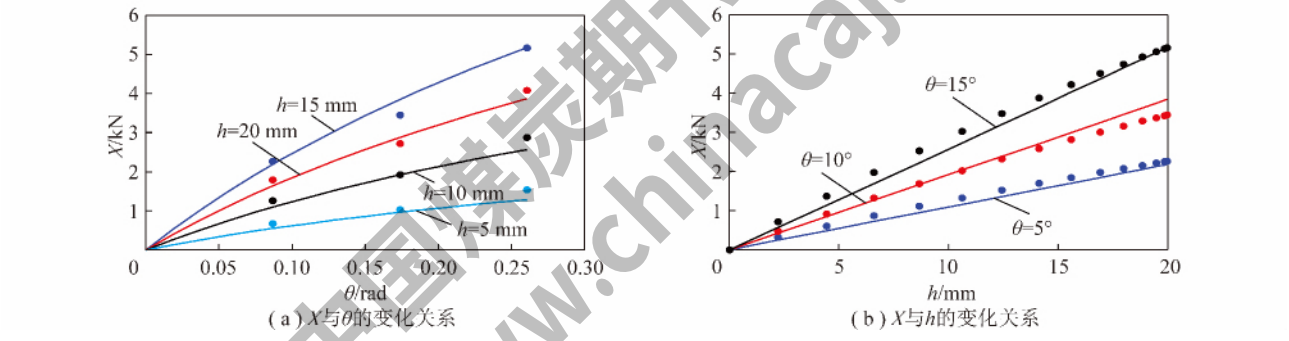



**图 12　理论与实验侧向力曲线**

Fig. 12　Lateral force curves of theory and experiment

## 5　结　　论

(1) 在截槽两侧切削厚度和镐型截齿倾斜角不同的条件下，分析了镐型截齿不同工况下侧向力特征，阐述了截割侧向力和碾挤压附加侧向力作用条件，得到了侧向力大小和方向的变化规律。

(2) 建立了基于不同工况下，截割侧向力和附加侧向力的理论模型，模型可以综合反映出镐型截齿及布置参数、煤岩性质和工作参数定量影响规律的数学描述，针对煤岩截割破碎的特点及存在不确定因素，引入实验待定的综合系数。

(3) 通过镐型截齿侧向力实验载荷谱的频谱分析和时域信号分解，进一步揭示了侧向力的特性，载荷的幅频与倾斜角呈正比关系，表征出 0 Hz 直流分量的核心作用，而载荷的随机高频波动特征与倾斜角的关联性不大。

(4) 通过实验载荷谱，采用最小二乘算法反求侧向力综合影响系数，修正了理论模型，同时，验证了理论模型与实验数据有着很好的吻合度，为进一步研究镐型截齿的其他方向上载荷模型、工作机构载荷的数学模型及总体载荷平稳与平衡提供了有效的理论与实验方法。

## 参考文献:

[1] 刘春生，于信伟，任昌玉. 滚筒式采煤机工作机构 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社，2010.

[2] Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science，1984，2(1)：67－71.

[3] 牛东民. 煤炭切削力学模型的研究 [J]. 煤炭学报，1994，19(5)：526－529.
Niu Dongmin. Mechanical model of coal cutting [J]. Journal of China Coal Society，1994，19(5)：526－529.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

[4] Okan Su,Nuri Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2011,48:434 - 442.

[5] Jerry Rojek,Eugenio Onate,Carlos Labra,et al. Discrete element simulation of rock cutting [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science,2011,48:996 - 1010.

[6] 王春华,丁仁政,李贵轩,等. 截齿截割煤体变形破坏过程模拟试验 [J]. 煤炭学报,2006,31(1):121 - 124.
Wang Chunhua,Ding Renzheng,Li Guixuan,et al. Smiulation experimental on the deformation and destruction course of coal body under the function of pick cutting [J]. Journal of China Coal Society,2006,31(1):121 - 124.

[7] 李晓豁,葛怀挺. 连续采煤机截齿随机载荷的数学模型 [J]. 中国工程机械学报,2006,4(3):262 - 264.
Li Xiaohuo,Ge Huaiting. Mathematical model of stochastic pick loads for a continuous miner [J]. Chinese Journal of Construction Machinery,2006,4(3):262 - 264.

[8] 刘春生,任春平,李德根. 修正离散正则化算法的截割煤岩载荷谱的重构与推演 [J]. 煤炭学报,2014,39(5):981 - 986.
Liu Chunsheng,Ren Chunping,Li Degen. Reconstruction and deduction of cutting coal and rock load spectrum on modified discrete regularization algorithm [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(5):981 - 986.

[9] 刘春生. 采煤机截齿截割阻力曲线分形特征研究 [J]. 煤炭学报,2004,29(1):115 - 118.
Liu Chunsheng. Fractal characteristic study of shearer cutter cutting resistance curves [J]. Journal of China Coal Society,2004,29(1):115 - 118.

[10] 刘春生,靳立红. 基于截槽非对称条件镐形截齿的截割力学模型 [J]. 煤炭学报,2009,34(7):983 - 987.
Liu Chunsheng,Jin Lihong. The cut mechanical model of pick-shaped cutter under conditions of dissymmetrical slotting [J]. Journal of China Coal Society,2009,34(7):983 - 987.

[11] 刘春生,王庆华,李德根. 镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型 [J]. 煤炭学报,2015,40(11):2623 - 2628.
Liu Chunsheng,Wang Qinghua,Li Degen. Fractal characteristic and specific energy model of conical picks cutting resistance spectrum [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(11):2623 - 2628.

[12] 刘春生,韩飞,任春平,等. 基于最大似然估计 - Hilbert 法的截齿侧向载荷特征识别 [J]. 黑龙江科技大学学报,2015,25(3):299 - 303.
Liu Chunsheng,Han Fei,Ren Chunping,et al. Feature recognition of side load on conical pick cutting coal based on aximum likelihood estimation with Hilbert transformation [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology,2015,25(3):299 - 303.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net