中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

邹梦麒,刘初升,武继达,等. 张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响[J]. 煤炭学报,2018,43(2):571-577. doi:10.13225/j. cnki. jccs. 2017. 0797

ZOU Mengqi,LIU Chusheng,WU Jida,et al. Influence of tensional amount on dynamic parameters of unilateral driven flip-flow screen surface[J]. Journal of China Coal Society,2018,43(2):571-567. doi:10. 13225/j. cnki. jccs. 2017. 0797

张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响

邹梦麒,刘初升,武继达,王振乾

(中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:为解决传统筛分设备在处理潮湿细粒煤炭时存在严重堵孔的问题,设计了一种单边驱动式弛张筛。根据单边驱动式弛张筛的结构和筛面弛张原理,建立了弛张筛筛面的动力学模型,研究了正、负两种张紧量对筛面动力学参数的影响。借助 Matlab 软件绘制出筛面中点的位移、速度、加速度特性曲面,将正、负两种张紧量对筛面动力学参数的影响加以对比分析。利用 ANSYS Workbench 软件对不同张紧量的筛面进行瞬态动力学分析,研究筛面中点的位移、速度、加速度最大时,筛面上各点的位移、速度、加速度分布情况。研究结果表明:随张紧量的增加,筛面的挠度减小,速度、加速度增加。当筛面张紧量选取在 2 mm 左右时,筛面加速度能够达到 50 g,筛分效果比较理想。

关键词:单边驱动式弛张筛;筛面张紧量;动力学参数;瞬态动力学分析

中图分类号:TD452 **文献标志码**:A **文章编号**:0253-9993(2018)02-0571-07

Influence of tensional amount on dynamic parameters of unilateral driven flip-flow screen surface

ZOU Mengqi,LIU Chusheng,WU Jida,WANG Zhenqian

(*College of Mechanical and Electronic Engineering,China University of Mining and Technology,Xuzhou* 221116,*China*)

Abstract:In order to solve the problem of serious clogging that the traditional screening equipment has in sieving the moist fine coal,a kind of unilateral driven flip-flow screen (UDFS) was designed. Based on the structure and principle of the UDFS,a dynamic model of the UDFS surface was established,and the effects of the positive and negative tension on the dynamic parameters of the screen surface were studied. Then,the displacement,velocity and acceleration characteristics of the mid-surface were plotted using Matlab software,and the influence of tension amount on the dynamic parameters of the screen surface were compared and analyzed. Finally,the transient dynamics analysis of the screen surface with different tensions were carried out using ANSYS Workbench software. In addition,the distribution of displacement,velocity and acceleration of the screen surface were studied when the displacement,velocity and acceleration of the mid-surface were the largest. The results illustrate that with the increase of tension,the deflection of the screen surface decreases,the velocity and acceleration increase. When the screen surface tension is selected at about 2 mm,the acceleration can reach 50 g,and the screening effect is ideal.

Key words:the unilateral driven flip-flow screen;tension of the screen surface;dynamic parameters;transient dynamics analysis

收稿日期:2017-06-12 **修回日期**:2017-09-01 **责任编辑**:许书阁

基金项目:国家自然科学基金委-辽宁联合基金重点资助项目(U1508210);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:邹梦麒(1992—),男,河南信阳人,硕士研究生。E-mail:1303878357@ qq. com

通讯作者:刘初升(1963—),男,安徽芜湖人,教授,博士生导师。E-mail:liuchusheng@126. com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

作为潮湿细粒物料的干法深度筛分设备[1-2]，弛张筛[3-4]在煤炭筛分领域内有着至关重要的作用[5-7]。为此，“关于煤炭工业“十三五”洗选加工和煤化工发展的指导意见”中提出了“鼓励煤炭企业在动力煤洗选方面，积极优先使用高效的干法选煤技术装备”。而目前，国内自主开发设计的弛张筛目前仍处于理论研究和中间试验阶段，无论是生产技术、研发进程，还是加工工艺均与国外的弛张筛产品存在一定差距[8]。为了解决这些问题，近年来，国内众多学者开展了有关弛张筛的研究工作。为了满足煤炭行业生产的需求[9]，提高潮湿细粒煤炭的筛分效率[10]，中国矿业大学刘初升教授发明了一种单边驱动式弛张筛[11]。

通过分析单边驱动式弛张筛的工作原理可以发现，弛张筛的筛面动力学主要由两类构件完成：一类是由机械结构实现的；另一类则是通过弹性筛面张紧量实现的。对于张紧量对弛张筛筛面动力学参数影响的问题，国内有些学者对其进行了研究。翟宏新等[12-14]基于 3 种筛面的理论模型，研究了张紧量对筛面动力学参数的影响，但是着重研究的是负张紧量对筛面动力学参数的影响；李君[15]基于简支梁模型的筛面研究了张紧量对筛面动力学参数的影响，也仅仅是通过公式进行理论分析；董海林[16]利用 ANSYS 软件研究了不同筛面张紧量对筛面动力学参数的影响，但是只研究了筛面中点的位移、速度、加速度的变化，未对筛面各点的变形情况进行深入的研究。

针对以上研究中存在的不足，本文利用三段相切圆弧的筛面模型来研究张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响关系，并绘制出位移、速度、加速度动力学特性曲面进行对比分析，最后通过有限元仿真的方式进行验证，为单边驱动式弛张筛的设计和研制提供一定的理论基础。

1 单边驱动式弛张筛的结构与筛面弛张原理

单边驱动式弛张筛是在集中驱动式弛张筛的基础上改进而来的，其结构如图 1 所示。主要由电动机、传动轴、连杆、浮动筛框、固定筛框、悬挂杆、机架、双向减震装置、弹性基座和筛网等部件组成，其固定筛框通过高强度螺栓安装在机架上，浮动筛框通过悬挂杆悬挂在机架横梁上。与集中驱动式弛张筛相比，由于单边驱动式弛张筛的传动轴只带动一个筛框的运动且固定筛框安装在机架上，故其具有结构简单，运行平稳，噪声小，工作效率高，能耗低等优点。

单边驱动式弛张筛在工作时，电动机通过胶带传动将动力传递至传动轴，进而通过连杆驱动浮动筛框

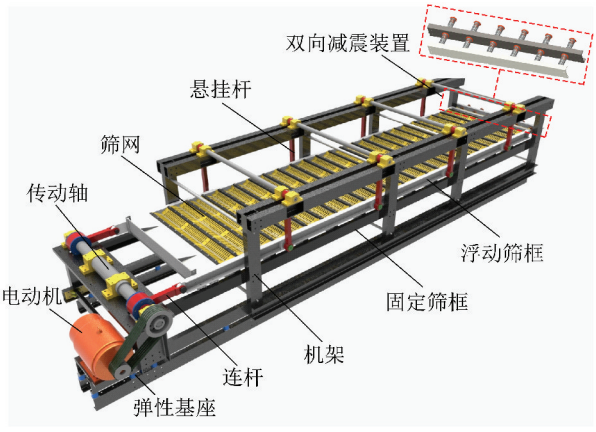


图 1 单边驱动式弛张筛结构

Fig. 1 Unilateral driven flip-flow screen structure

做近似的往复直线运动。而弛张筛的筛面一般采用可伸缩的聚氨酯材料制成，在筛分过程中，筛网交替地拉紧和松弛，使物料不断的在筛面上进行弹跳运动，利于物料透筛，从而避免出现筛面堵孔和筛面黏糊的情况[17]。其弹性筛面的工作示意如图 2 所示。

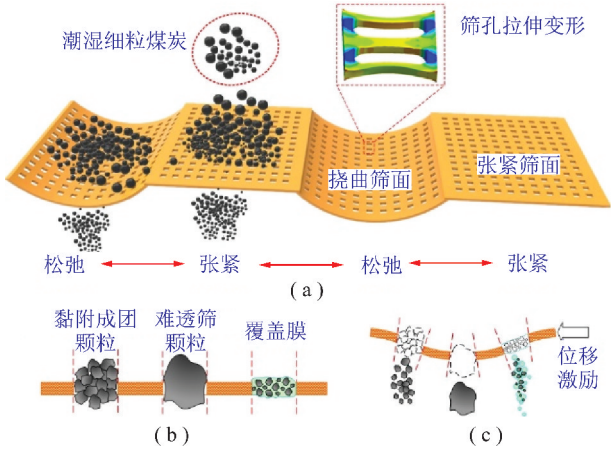


图 2 弛张筛弹性筛面工作示意

Fig. 2 Work diagrammatic sketch of the flip-flow screen elastic screen surface

2 张紧量对筛面动力学参数影响的理论研究

张紧量是指弛张筛两支撑架之间的最大距离 L 与筛面长度 l 之间的差值，用 Δl 表示，即

$$\Delta l = L - l \tag{1}$$

为了研究张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响，建立如图 3 所示的弛张筛弹性筛面理论模型。这种模型的筛面是由三段相切的圆弧组成的[18-19]，中间大圆弧的半径为 R，两边小圆弧的半径为 r，筛面长度为 l，筛面振幅为 h，两横梁之间的距离为 a，曲柄回转角速度为 ω，O_1O_2，O_1O_3 与竖直方向的夹角为 α，曲柄长度为 e。

由弛张筛的工作原理可知：两横梁之间的实时距

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

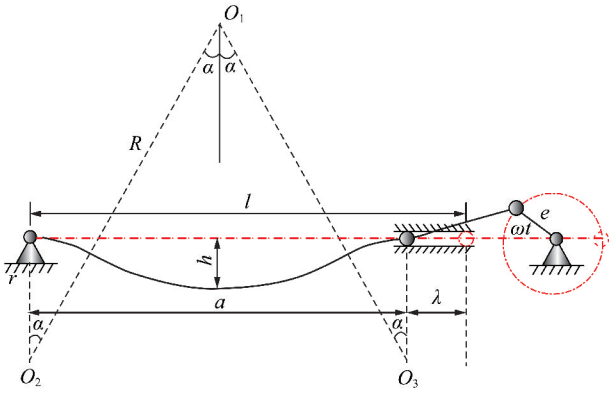


图 3　弛张筛弹性筛面理论模型

Fig. 3　Theoretical model of the elastic screen surface

离 a 随曲柄的转动不断地发生变化。

当筛面处于松弛状态时,筛面的长度 l 一直大于两横梁之间的距离 a;当筛面处于张紧并被拉伸状态时,两横梁之间的距离 a 大于筛面的长度 l,但是由于筛面处于被拉伸的状态,在这个过程中,筛面中点的位移一直为 0,而筛面中点的速度、加速度只在筛面被拉直的瞬间发生突变,达到最大值;故在对筛面运动的基础理论进行研究时,一般只考虑 $l \geqslant a$ 的情况。

根据图 3 的筛面模型,可以得到如下所示的几何关系:

$$\begin{cases} l = 2\alpha(R + r) \\ a = 2(R + r)\sin\alpha \\ h = (R + r)(1 - \cos\alpha) \end{cases} \tag{2}$$

将 $\sin\alpha$ 和 $\cos\alpha$ 进行麦克劳林展开得:

$$\begin{cases} \sin\alpha = \alpha - \dfrac{\alpha^3}{3!} + \dfrac{\alpha^5}{5!} - \cdots + (-1)^{k-1}\dfrac{\alpha^{2k-1}}{(2k-1)!} + R_n(\alpha) \\ \cos\alpha = 1 - \dfrac{\alpha^2}{2!} + \dfrac{\alpha^4}{4!} - \cdots + (-1)^k\dfrac{\alpha^{2k}}{(2k)!} + R_n(\alpha) \end{cases}$$

故可取:

$$\begin{cases} \sin\alpha \approx \alpha - \dfrac{\alpha^3}{6} \\ \cos\alpha \approx 1 - \dfrac{\alpha^2}{2} + \dfrac{\alpha^4}{24} \end{cases} \tag{3}$$

将式(3)代入式(2)可得:

$$\begin{cases} l = 2\alpha(R + r) \\ a = 2(R + r)\left(\alpha - \dfrac{\alpha^3}{6}\right) \\ h = (R + r)\left(\dfrac{\alpha^2}{2} - \dfrac{\alpha^4}{24}\right) \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可知:

$$\begin{cases} \dfrac{a}{l} = 1 - \dfrac{\alpha^2}{6} \\ \dfrac{h}{l} = \dfrac{\alpha}{4} - \dfrac{\alpha^3}{48} \end{cases} \tag{5}$$

根据式(5),消除 α 后可得:

$$\frac{h}{l} = \frac{\sqrt{6\left(1 - \dfrac{a}{l}\right)}}{4}\left(\frac{1}{2} + \frac{a}{2l}\right) \tag{6}$$

将式(6)两边同时平方,可得

$$\left(\frac{h}{l}\right)^2 = \frac{3}{32}\left(1 - \frac{a^2}{l^2}\right)\left(1 + \frac{a}{l}\right) \tag{7}$$

整理后可得:

$$h^2 = \frac{3}{32}(l^2 - a^2)\left(1 + \frac{a}{l}\right) \tag{8}$$

又因为筛面移动端的位移为 $e(1 + \cos\omega t)$,所以:

$$a = L - e(1 + \cos\omega t) \tag{9}$$

由式(9)可知:

$$1 + \frac{a}{l} = 1 + \frac{L}{l} - \frac{e}{l}(1 + \cos\omega t) \approx 2 \tag{10}$$

将式(10)代入式(8)得:

$$h \approx \frac{\sqrt{3}}{4}\sqrt{l^2 - a^2} \tag{11}$$

将式(9)与式(1)代入式(11)得到筛面中点的位移表达式为

$$h = \frac{\sqrt{3}}{4}\sqrt{\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos\omega t) - e^2(1 + \cos\omega t)^2} \tag{12}$$

依次对式(12)求一次和二次导数,得到筛面中点的速度和加速度表达式如下:

$$v = \frac{\sqrt{3}}{4}\frac{e\omega\sin\omega t(e + e\cos\omega t - L)}{\sqrt{\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos\omega t) - e^2(1 + \cos\omega t)^2}} \tag{13}$$

$$a = \frac{\sqrt{3}}{4}\left\{\frac{e\omega^2(e - L) + e^2\omega^2\cos 2\omega t}{\sqrt{\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos\omega t) - e^2(1 + \cos\omega t)^2}} - \frac{[e\omega\sin\omega t(e + e\cos\omega t - L)]^2}{[\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos\omega t) - e^2(1 + \cos\omega t)^2]^{\frac{3}{2}}}\right\} \tag{14}$$

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

令

$$A = [\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos \omega t) - e^2(1 + \cos \omega t)^2]^{1/2}$$

$$B = [\Delta l^2 - 2\Delta lL + 2eL(1 + \cos \omega t) - e^2(1 + \cos \omega t)^2]^{3/2}$$

由式(12)~(14)可知:

当张紧量 Δl 为负时, Δl^2, $-2\Delta lL$ 均为正,随张紧量的减小,A 的增大速率小于 B 的增大速率。因此,筛面中点的最大挠度 h 增大,最大速度 v 和最大加速度 a 减小。

当张紧量 Δl 为正时, Δl^2 为正, $-2\Delta lL$ 为负,随张紧量的增加, $-2\Delta lL$ 减小速度远大于 Δl^2 的增大速度,因此,筛面中点的最大挠度 h 减小,最大速度 v 和最大加速度 a 增大。

3 张紧量对筛面动力学参数影响的图形分析

仅通过理论研究只能得到张紧量的变化对筛面动力学参数的影响趋势,为了揭示单边驱动式弛张筛弹性筛面本身的动力学特性,还需要绘制出弹性筛面各动力学参数的特性曲面进行更为直观的研究。

令 $e=12.5$ mm, $L=250$ mm, $n=550$ r/min,选取张紧量 Δl 与时间 t 为自变量,筛面中点的位移、速度、加速度为因变量,根据式(12)~(14),在 Matlab 中进行计算和作图,得到 1 个周期内筛面中点位移、速度、加速度特性曲面如图 4~6 所示。

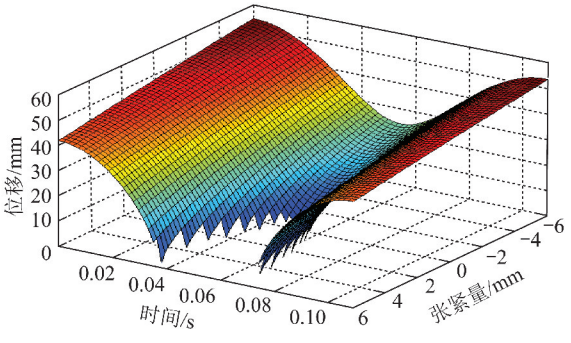


图 4 位移特性曲面

Fig. 4 Displacement characteristic surface

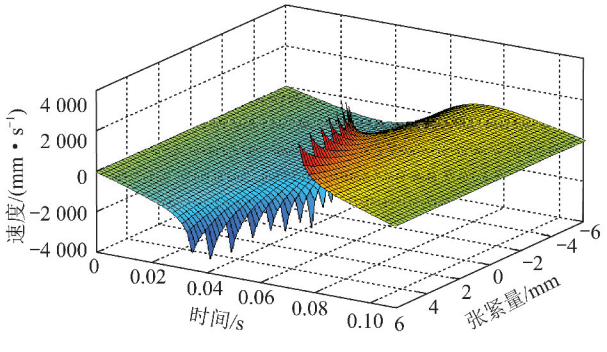


图 5 速度特性曲面

Fig. 5 Velocity characteristic surface

由图 4~6 可知,在每一个周期里,位移特性曲面和加速度特性曲面具有对称性,速度特性曲面则具有反对称性。

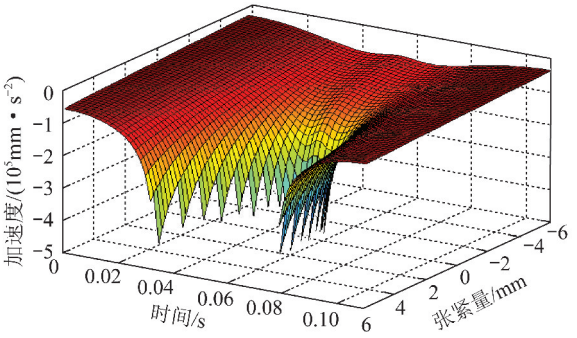


图 6 加速度特性曲面

Fig. 6 Acceleration characteristic surface

(1)当张紧量为 0 时,在前半个周期里,弛张筛筛面的移动端与固定端从相距最近处开始远离,筛面由松弛开始变得张紧,筛面中点的位移开始逐渐减小,速度与加速度开始负向增大;在 $t=0.0545$ s 时,速度发生突变,由负向最大突变成正向最大;在后半个周期里,弛张筛筛面移动端与固定端又从相距最远处开始靠近,筛面又由张紧开始变得松弛,筛面中点的速度由正向最大开始减小,加速度由负向最大开始减小,而位移则开始逐渐增大。

(2)当张紧量为正时,筛面在半个周期之前就已经被拉紧,直到筛面再次回到松弛状态,在这个时间段内,筛面的位移一直为 0。随张紧量的增加,筛面中点由位移最大到位移为 0 的所需的时间逐渐减小;而筛面的速度与加速度则在筛面被拉直的瞬间发生突变,瞬间达到最大值。

(3)当张紧量为负时,虽然筛面中点的位移、速度、加速度都有所减小,但是其变化趋势与张紧量为 0 时变化趋势基本相同。

由图 6 可知,当筛面的张紧量为正值时,在筛面被拉直的瞬间,筛面中点的加速度发生突变,能够达到 50 g,有利于潮湿细粒物料的筛分。

4 张紧量对筛面动力学参数影响的有限元分析

由于在张紧量对筛面动力学参数影响的理论分析过程中,所建立的筛面理论模型并不一定完全符合实际筛面的大挠度变形[20],且弛张筛在工作过程中,弹性筛面上各点的运动相当于弹性体振动,在理论分析中并未将这一因素考虑在内。而基于 ANSYS

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

Workbench 的瞬态动力学能够根据筛面的实际工作情况来施加约束与载荷,对真实物理系统进行模拟。因此,对单边驱动式弛张筛的筛面进行有限元分析能够更加准确的研究张紧量对筛面动力学参数的影响。

在 ANSYS Workbench 中,可以通过改变位移载荷的方式来调节筛面的张紧量。本文选取筛面的张紧量分别为 4,2,0,-2,-4 mm,并利用 Mooney-Rivlin 模型[21]来描述弛张筛弹性筛面。然后对不同张紧量的筛面进行瞬态动力学分析,得到筛面在运动过程,筛面中点的位移、速度、加速度最大时,筛面上各点的位移、速度、加速度分布情况如图 7 ~9 所示。其中,图 7 ~9(a)Δl 为 4 mm;(b)Δl 为 2 mm;(c)Δl 为 0;(d)Δl 为-2 mm;(e)Δl 为-4 mm。

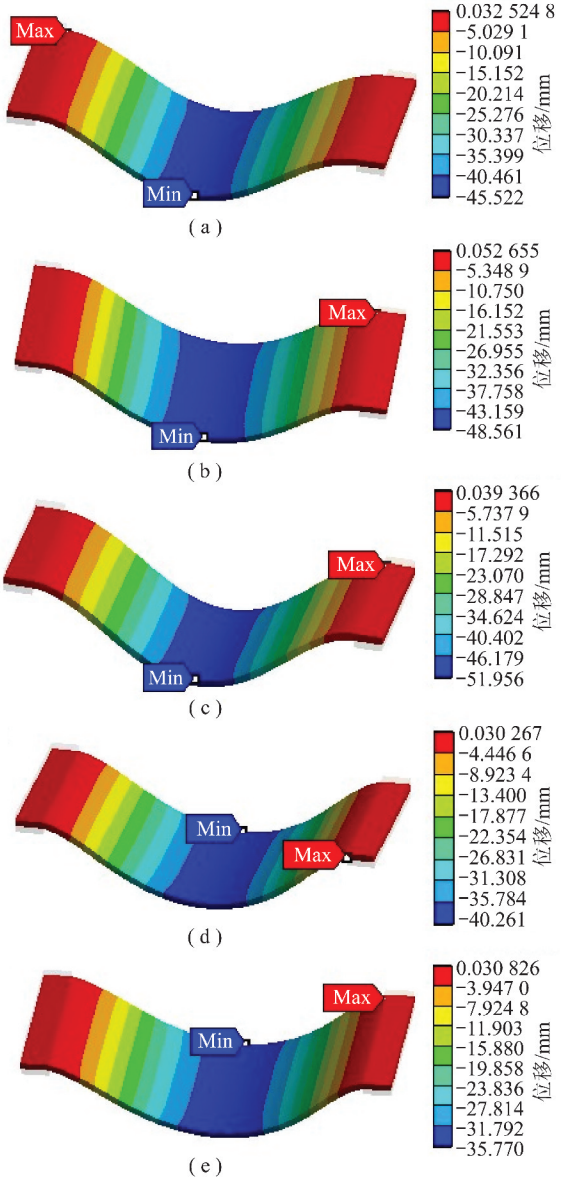


图 7　位移分布云图

Fig. 7　Displacement distribution

图 7 为筛面中点的位移最大时,在不同张紧量下,筛面上各点的位移分布情况。可知,筛面上各点的位移由中间向两边逐渐减小,且随张紧量的减小,筛面上各点处的最大挠度值开始增大。由于当筛面的张紧量为负值时,筛面本身处于弯曲状态,筛面上各点处的初始挠度值并不为 0,而最大位移值是最终挠度值与初始挠度值之差。因此,图 7(d)中筛面中点的最大位移值为 40.261 mm,图 7(e)中筛面中点的最大位移值为 35.77 mm。

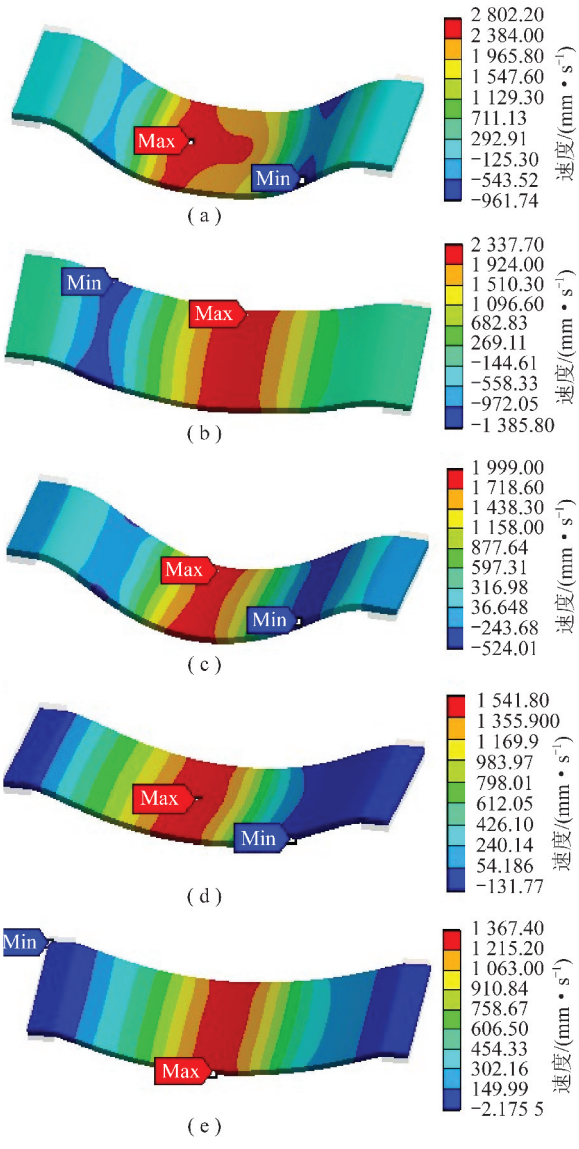


图 8　速度分布云图

Fig. 8　Velocity distribution

图 8 为筛面中点的速度最大时,在不同张紧量下,筛面上各点的速度分布情况。可知,随张紧量的增加,筛面上各点处的最大速度值都呈现着增加的趋势。当筛面的张紧量为 0 时,筛面中点的速度为 1 999 mm/s,与理论分析结果相差不大;当筛面的张紧量为正值时,速度的增加速率开始变快,说明张紧量越大筛分效果越好。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

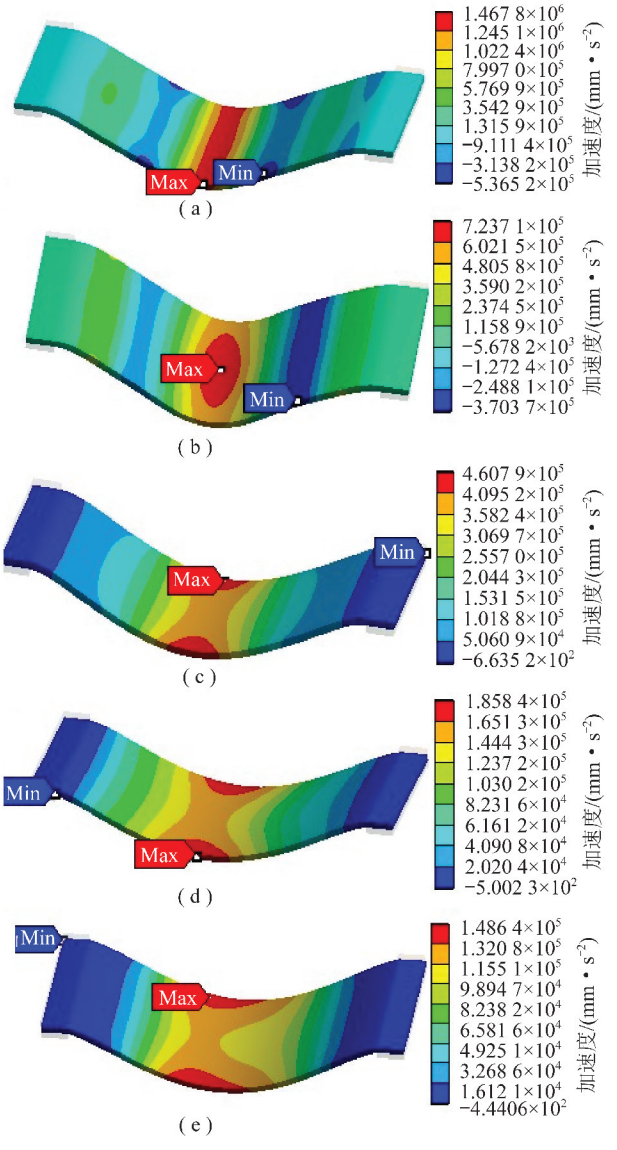


图 9 加速度分布云图

Fig. 9 Acceleration distribution

图 9 为筛面中点的加速度最大时,在不同张紧量下,筛面上各点的加速度分布情况。可知,当张紧量为正值时,随筛面张紧量的增大,筛面上的正向最大加速度与负向最大加速度之间的距离逐渐减小,说明张紧量越大,筛面上各点的波动也就越大,越利于潮湿细粒物料的筛分,但是张紧量太大又会导致筛面的加速度过大,以致容易出现筛面撕裂等情况;当张紧量为负值时,筛面中点处的加速度太小,不利于潮湿细粒物料的筛分。

为了便于观察,在完成筛面的瞬态动力学分析之后,将分析所得结果列入表 1 中,进行对比分析。

可知,张紧量对筛面的动力学特性的影响还是比较明显的。当张紧量为负值时,筛面上的速度与加速度大幅度减小;当张紧量为 0 时,虽然筛面中点的最大加速度达到了 46 g,但是最大加速度却出现在筛面的边缘,中间处的最大加速度只有 35 g 左右,并且筛面上其他点处的加速度值更小,大部分处于 10 g ~ 20 g;当张紧量为 2 mm 时,筛面加速度分布在 40 g ~ 60 g 的点较多;当张紧量为 4 mm 时,筛面上各点的加速度都远超于 50 g,加速度过大,一方面容易造成筛面撕裂,减小筛面使用寿命,另一方面导致物料抛射过高,降低筛分效率。

表 1 不同张紧量下筛面中点的最大位移、速度、加速度

Table 1 Maximum displacement, velocity and acceleration of the midpoint of the screen surface under different tension

张紧量/mm	最大位移/mm	最大速度/(mm·s^{-1})	最大加速度/(mm·s^{-2})
4	45.522	2 802.2	1.47×10^6
2	48.561	2 337.7	7.24×10^5
0	51.956	1 999.0	4.60×10^5
-2	40.261	1 541.8	1.86×10^5
-4	35.770	1 367.4	1.49×10^5

综合以上分析可知,筛面的张紧量选取在 2 mm 左右时,有利于潮湿细粒物料的筛分。

5 结 论

(1)针对传统筛分设备在处理潮湿细粒煤炭时所面临的难题,研制了一种新型单边驱动式弛张筛,并详述了其结构和弹性筛面工作原理。

(2)通过理论研究、图形分析、有限元仿真的方式对该弛张筛的筛面动力学进行了研究。研究结果表明,当该弛张筛张紧量选取在 2 mm 左右时,筛面加速度能够达到 50 g,有利于潮湿细粒物料的筛分。

(3)通过对该弛张筛筛面动力学的研究,得到筛面张紧量对单边驱动式弛张筛筛面动力学参数的影响关系,为单边驱动式弛张筛的设计和研制提供了一定的理论依据。

参考文献(References):

[1] ZHAO Yuemin, YANG Xuliang, LUO Zhenfu, et al. Progress in developments of dry coal beneficiation[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(1): 103-112.

[2] NIKHIL Gupta. Evaluation of pneumatic inclined deck separator for high-ash Indian coals[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2016, 3(2): 198-205.

[3] ZHENG Gangfeng, ZHU Jinbo, XIA Wandong, et al. Banana flip-flow screen benefits coal preparation[J]. Filtration and Separation, 2016, 53(4): 38-41.

[4] MATHEWSON D, NORRIS R, DUNNE M. Tailings dewatering, dry screening and water clarification for reduced water usage[A]. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series[C].

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

2006,315-322.

[5] 王峰,王皓. 筛分机械[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

[6] 刘初升,赵跃民. 干法筛分理论及应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

[7] 赵跃民,刘初升,张成勇. 煤炭干法筛分理论与设备的进展[J]. 煤,2008,17(2):15-18.
ZHAO Yuemin, LIU Chusheng, ZHANG Chengyong. Progressing of coal screening theory and equipment[J]. Coal,2008,17(2):15-18.

[8] 石焕,程宏志,刘万超. 我国选煤技术现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2016,44(6):169-174.
SHI Huan,CHENG Hongzhi,LIU Wanchao. Present status and development trend of China's coal preparation technology[J]. Coal Science and Technology,2016,44(6):169-174.

[9] ZHAO Yuemin, LIU Jiongtian, WEI Xianyong, et al. New progress in the processing and efficient utilization of coal[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2011,21(4):547-552.

[10] LI Zhanfu, TONG Xin. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen[J]. International Journal of Coal Science & Technology,2015,2(4):299-305.

[11] 刘初升,邹梦麒,武继达,等. 一种单边驱动式摇摆筛[P]. 中国专利:CN201610911919.5,2016-10-19.

[12] 翟宏新,叶大银. 橡胶筛面对弛张筛基础动力学的影响[J]. 矿山机械,2005,33(10):61-63.
ZHAI Hongxin, YE Dayin. Influence of elastic deck components on basis dynamics of flip-flow screen[J]. Mining & Processing Equipment,2005,33(10):61-63.

[13] 宁晓波,翟宏新,杨汉生. 筛面张紧量对弛张筛橡胶筛面动力学参数的影响[J]. 矿山机械,2009,37(19):107-109.
NING Xiaobo,ZHAI Hongxin, YANG Hansheng. Influence of tensional amount on dynamic parameters of elastomeric sieving plate of flip-flow screen[J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(19):107-109.

[14] 叶大银,翟宏新. 基于简化几何模型的筛面张紧量对弛张筛筛面动力学的影响[J]. 煤矿机械,2007,28(1):63-64.
YE Dayin,ZHAI Hongxin. Study of Influence of deck tensional amount on dynamical parameters of flip-flow screen deck based on simplified geometrical model[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 28(1):63-64.

[15] 李君,方代正,黄绍服. 张紧量对弛张筛运动的影响[J]. 煤矿机械,2007,28(7):54-56.
LI Jun, FANG Daizheng, HUANG Shaofu. Influence of elastic stretching on move of flip-flow screen[J]. Coal Mine Machinery, 2007,28(7):54-56.

[16] 董海林,夏云飞,刘初升,等. 张紧量对弛张筛筛面动力学参数的影响[J]. 选煤技术,2012,6(3):23-27.
DONG Hailin,XIA Yunfei,LIU Chusheng,et al. Influence of tensional amount on dynamic parameters of surface of flip-flow screen[J]. Coal Preparation Technology,2012,6(3):23-27.

[17] ZHAO Yuemin, LIU Chusheng, FAN Maoming, et al. Research on acceleration of elastic flip-flow screen surface[J]. International Journal of Mineral Processing,2000,59(4):267-274.

[18] ZHANG Jinwen,HUANG Yayu,CHEN Zhaohui. The basic dynamics study of flip-flow screen and particles based on MATLAB[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,444-445:1340-1344.

[19] 武继达. 振动式弛张筛动力学特性及疲劳寿命分析[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
WU Jida. Dynamic characteristics and fatigue life analysis on the vibrating flip-flow screen[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2016.

[20] 彭利平,刘初升,董海林,等. 弛张筛面大挠度非线性变形分析与实验[J]. 煤炭学报,2014,39(5):976-980.
PENG Liping,LIU Chusheng,DONG Hailin,et al. Analysis and experiment on the large nonlinear deformation of a flip-flow screen[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(5):976-980.

[21] CHARLTON D J. A review of methods to characterize rubber elastic behavior for use in finite element analysis[J]. Rubber Chemical and Technology,1994,67(3):481-503.