

潮湿细粒煤炭弹性筛分理论与实践

赵跃民

摘要 本文系统地回顾了潮湿细粒煤炭干法筛分理论及应用的现状,分析了潮湿细料煤炭筛分的粘附力学模型和非线性运动规律,创立了潮湿细粒煤炭干法筛分新理论,突破了传统干物料、单颗粒透筛、刚性筛面和颗粒线性运动的理论。在此基础上进一步研究了潮湿细料煤炭弹性筛面筛分机的筛分机理,建立了琴弦概率筛、聚氨酯筛面振动筛、弛张筛、梯流筛、弹性杆筛等筛分机的筛面动力学方程,给出了筛分机的工艺参数设计公式,建立了潮湿细粒煤炭弹性筛分技术体系,研制出系列的新型潮湿细粒煤炭筛分机,在全国煤炭、电力、化工等领域95家企业应用167台,取得了显著的经济效益和社会效益。

一、前言

煤炭是我国主要能源,2004年全国煤炭产量已超过19亿吨,约占我国一次能源的70%左右,其中动力煤约占85%,动力煤入选率约为17%。由于煤炭的加工利用程度低,造成了资源浪费和严重的燃煤大气污染。选煤是洁净煤炭生产最经济、有效的办法,筛分是选煤的关键环节,我国大部分矿区动力煤-13mm细粒含量一般占70%以上,其中-6mm含量高达60%以上、灰分较低,可作为优质动力煤直接供应电厂。但现有原煤筛分技术的分离粒度只能达到13mm,如采用筛选和洗选联合加工工艺,即筛选出-6mm细粒级煤直接供应电厂等用户,粗粒级煤炭进一步洗选加工,可提高精煤产率约8%。因此,如采用-6mm原煤深度筛分技术,每吨煤可增加利润约8元,全国每年可新增利润130亿元以上。原煤筛分不仅能降低选煤生产成本、优化煤炭产品结构、提高经济效益,而且能节约能源,节约运力,减少大气污染。

由于原煤综采等现代化采煤技术的采用,入筛原煤细粒含量增大,加之井下防尘喷水、煤层渗水以及管理等方面原因,使入筛原煤水分增高(外在水分大于7%),导致潮湿煤炭干法深度筛分(6mm以下)时堵孔严重,筛分难以进行。潮湿煤炭干法深度筛分是我国煤炭生产中迫切需要解决的关键技术,是世界性难题。

针对普通振动筛只能解决25mm原煤筛分局限,国内外在潮湿煤炭干法深度筛分技术上进行了深入的研究,开发了潮湿细粒煤炭筛分机,主要有概率筛、等厚筛、弛张筛、琴弦筛、螺旋筛等,代表性的是概率筛和等厚筛。Mogensen提出了概率筛分原理,发展了大筛孔、大倾角的概率筛;Burstlein提出了等厚筛分原理,研制的等厚筛实现了原煤的薄层筛分,概率筛和等厚筛都有助于克服筛孔堵塞,有效地解决了13mm原煤筛分问题,但对潮湿煤炭6mm筛分时作用有限,堵孔依然严重,筛分效率低下;螺旋筛筛分效率低;弛张筛虽能有效地进行6mm筛分,但结构复杂、材质昂贵、制造成本高,没能在我国推广应用;琴弦筛的技术关键是筛丝与筛分机的匹配设计,但由于缺乏弹性筛面动力学模型和优化设计公式,实际应用中筛丝振幅小,没能发挥其技术优势,堵孔仍然严重。

传统的筛分机不能进行6mm以下潮湿煤炭有效筛分,必须研究新的筛分理

安全科普知识

- ◆ 不断发展的三维地震勘探技术
- ◆ 钻探勘查技术
- ◆ 中国煤炭能源新产业发展现状
- ◆ 中国煤炭煤质特征
- ◆ 中国煤炭煤质特征1
- ◆ 中国煤炭分类国家标准中各类煤
- ◆ 怎样做好煤矿新工人安全教育培训
- ◆ 我国煤矿职业危害的防治对策
- ◆ 数字解读山西煤炭
- ◆ 数字化矿井筑起安全保障线

[更多>>](#)

专家答疑

- ◆ 主巷道的风力
- ◆ 煤矿启封密闭的安全技术措施
- ◆ 主井的防腐处理
- ◆ 上隅角瓦斯治理
- ◆ 请问有没有办法让烟煤变成无烟煤
- ◆ 烟煤变无烟煤
- ◆ 请问缺失挥发份的值怎么计算
- ◆ 证件
- ◆ 皮带断带的问题
- ◆ 抽出式局部风机的用途

[更多>>](#)

论，开发新型筛分设备，解决我国潮湿煤炭的深度筛分问题。因此有必要系统地研究和总结物料粘附模型、筛面动态特性和对透筛的影响，建立弹性筛面设计计算公式。

二、潮湿细料物料筛分的基本理论研究

利用表面物理化学理论研究潮湿细粒煤炭在外在水分和表面张力作用下的团聚过程、堵孔机理及其与筛分机运动参数之间的关系。发现细颗粒煤炭在筛分过程不断团聚、最终形成覆盖膜堵孔；为了克服堵孔，我们从覆盖膜弹性振动的角度研究覆盖膜的破裂过程，建立了覆盖膜弹性振动方程并给出了方程和基频的解析解。利用高速摄影方法研究不同筛孔尺寸上的覆盖膜共振情况，找出各种尺寸下覆盖膜的基频，验证了覆盖膜弹性振动方程和基频表达式的正确性，给出了覆盖膜断裂判据，指出促使覆盖膜断裂可通过两条途径达到：一是直接采用大振幅、大振动强度筛分工艺来强化覆盖膜断裂，二是使覆盖膜达到共振而断裂。激发覆盖膜共振是使覆盖膜断裂最经济有效的办法，一种简单的方法是直接将筛分机的工作转速设计为覆盖膜的基频，从而实现潮湿煤炭深度筛分大振幅、大振动强度的筛分工艺。但理论计算和实验结果表明，覆盖膜的基频与筛分机入料的物理和化学性质有关，如煤种、水分、灰分、粒度分布等，即使将同一矿区煤炭在同一台筛分机上进行筛分，不同筛孔上所形成的覆盖膜基频也可能存在很大差异。传统的筛分机只能以单一频率作用于覆盖膜，难以克服整个筛面的堵孔，因此必须寻找多频成分的振荡筛面。为了研究覆盖膜破裂受哪些因素的影响，我们建立覆盖膜的动力学模型。如图1所示。为研究方便，我们将覆盖膜的振动分为随筛分机的刚性振动和自身弹性振动两种且互不耦合。其运动方程为：

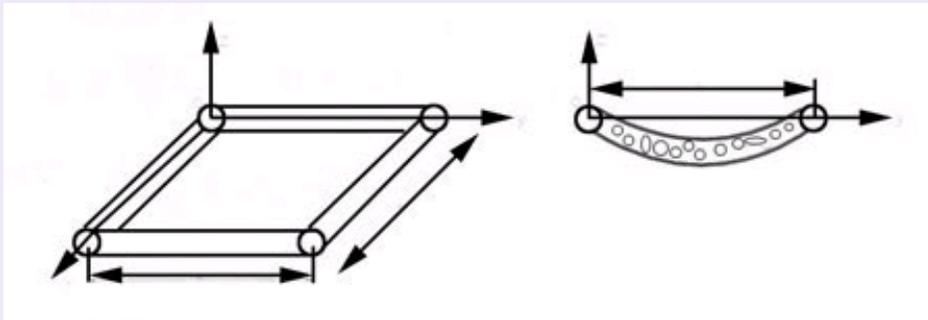


图1 覆盖膜粘附力学模型

$\rho \cdot Z \cdot t^2 = T \cdot (Z \cdot \chi^2 + Z \cdot y^2) + p \cdot A \cdot \omega^2$ (1) 其中 ρ 是覆盖膜的密度， T 是颗粒间的粘附力，其受迫振动的基频成份为：

$$Z = P \cdot A \cdot \omega^2 \cdot l, \quad l^2 - \omega^2 \sin^2 \pi \chi \alpha \sin^2 \pi y b \sin \omega t \quad (2)$$

覆盖膜的破坏是用其变形量大小来衡量的。当变形量大于一定值时，覆盖膜断裂。我们从实验中发现，覆盖膜频率较低。如表1所示。覆盖膜基频与筛分机频率 ω 相比很小。因此一阶振幅(由(2)式可知)近似为 $-\rho A$ ；要破坏覆盖膜可使 $\omega \cdot l = 1$ 或增大振幅 A ，使覆盖膜的伸长长度达到破裂。

表1 各种筛孔尺寸下的覆盖膜基频

筛孔尺寸 (mm)	3	6	9	12

三、弹性筛面筛分机的设计方法

为了克服堵孔问题，在设计上方面可使筛面产生大振幅，但必须保证筛分机的可靠性，所以要采用了弹性材料作筛面，如琴弦、聚氨脂、橡胶、悬臂梁结构等。在此我们给出它们的弹性动力学模型及筛面参数设计公式。

1. 琴弦筛面动力学模型及参数设计公式

琴弦筛筛分潮湿细料物料时能有效地克服堵孔，一方面是其开孔率高，另一方面组成筛面的琴弦在筛分过程中能产生弹性振动，则有效地阻止了堵孔。弹性振动振幅如能增大则能增加覆盖膜的变形，在此我们研究琴弦筛的筛面动力学特性，其力学模型如图(2)所示，筛丝振动方程为：图2琴弦筛筛面动力学模型

其中 T_0 为张紧力， ρ 为筛丝密度， S 为筛丝截面积， m 为筛丝粘附的物料质量， A 为筛分机的振幅， ω 是其工作的圆频率，筛丝的一阶弹性振动的解为：

$$2y \quad t^2 - \alpha^2 \quad 2y \quad t^2 = A\omega^2 \sin(\omega t - \psi) - \frac{m}{\rho S} \omega^2 \quad (3)$$

因工作圆频率 ω 由筛分工艺条件决定的，不可随意变动。如要求增大振幅可使 $\omega_1 = \omega$ ，即产生共振以达到增大筛丝弹性振动振幅的目的，由 $\omega_1 = \omega$ 及 ω_1 的表达式，可在筛面进行安装时适当张紧，最优张紧力的公式为⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾：

$$\lambda_n = 0.8 \sim 1.2$$

$$\omega = \lambda_n \pi \sqrt{\frac{T_0}{\rho S + m}}$$

其中 l 为筛丝长度，按上述张紧力公式设计的琴弦概率筛在工业生产过程中取得应用。应用表明取得了良好的筛分效果。且具有功耗小、动应力低、可靠性高优点。

2. 聚氨脂、橡胶筛面动力学模型及克服堵孔的机理

将橡胶、聚氨脂弹性筛面改装到振动筛上去，取得了较好的效果，这类弹性筛面其动力学模型属平面问题。其力学简图如图3所示。其振动方程为：

$$D \quad 4 + (\rho A + \rho m) \ddot{x} = (\rho A + \rho m) A \omega^2 \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

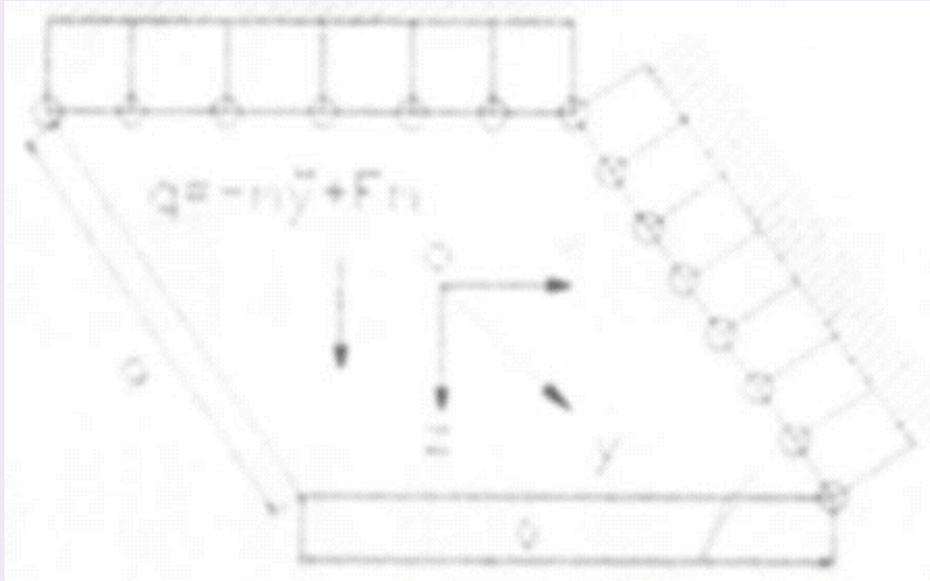


图3弹性筛面动力学模型

其中E为筛面弹性模量，h为筛面厚度， μ 为泊松比， ρA 为筛面单位面积的质量， ρ_m 为粘附到筛面上物料的单位面积的质量，q为激振力， $q = \rho A Z + F_m$ ， F_m 为物料非线性冲击力。 Δ 为哈密顿算子。为方便起见，只考虑物料附着在筛面上一起振动的一种状态。筛面的一阶弹性振动解为：

$$z = \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \sum_{m=1, 3, 5, \dots}^{\infty} A_{nm} \sin n\pi x \sin m\pi y \sin(\omega t - \varphi) \quad (5)$$

$$n = 30\pi D \rho A + \rho_m \{ (1a)^2 + (1b)^2 \} \quad (6)$$

从(5)式可知，振动筛筛面在振动过程中，弹性筛面自身也在作弹性振动，这样就有效地增大了筛孔覆盖膜的长度，促使覆盖膜断裂，保持开孔状态，提高筛分效率。同时对难筛分颗粒落入筛孔而言，由于筛孔反复变形，搓揉难筛颗粒，使得其上的细小颗粒透筛，同时将大颗粒挤出筛孔，减轻了堵孔。式(6)为筛面参数设计公式。

3. 梯流筛筛面动力学模型及参数设计公式

(8, 9) 梯流筛筛面是由一根根可视为悬臂梁的筛条组成，由于筛振动引起悬臂梁产生弹性振动。悬自由端振幅大于两端固定或铰支梁的最大振幅。这种大弹性振动能有效地减轻堵孔，因此在设计中就尽量增大其弹性振动。其动力学模型、结构简图及运动方程式如下：

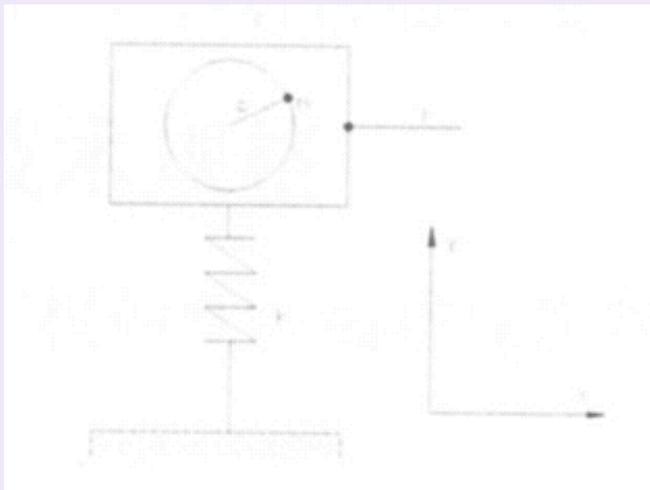


图4梯流筛筛面动力学模型

$$4y \quad x^4+1a^2 \quad 2y \quad t^2=F\sin\omega t \quad (7)$$

筛条自由端振幅为:

$$y(l, t) = (F/48EI) (\sin\omega t - \omega\omega_1 \sin\omega_1 t) \quad (8)$$

$$\omega_1 = (1.875)^2 EI \rho l^4$$

其中 $a = EI / \rho$, $F = \rho A \omega^2$, ρ 为筛条单位长度的量, E 为弹性模量, I 为筛条的惯性矩, A 为筛分机的振幅, ω 为筛分机的工作圆频率, ω_1 为筛条弹性振动的固有频率。为了增大筛分机工作过程中筛条振幅, 将筛分机工作圆频率设计为 ω_1 , 即 $\omega = \omega_1$ 。按中等载荷筛分条件下直径为 4mm 计, 筛分机工作转速在此 87.73-15.13 rad / s 时, 筛条长度应为 (200-155) mm, 这正是现在梯流筛的筛条设计参数。

4. 弹性杆筛设计思路

通过对弹性筛面动力学的进一步分析, 提出弹性碰撞多频振荡筛面, 设计出弹性杆筛。弹性杆筛的筛杆在筛板框架孔中属于自由梁状态, 筛杆在筛分机激励力作用下做高强度复杂运动, 这种运动除随筛体主振频率振动外, 还包括附加筛杆与框架壁发生的弹性碰撞振动和自身旋转运动, 筛杆与框架壁发生的弹性碰撞可用 $\delta(t)$ 函数描述, 其频谱连续布满整个实数域。这种连续频率成分的振动波, 其中必有某一振动波频率和覆盖膜基频重合引起覆盖膜共振破坏了筛面覆盖膜, 同时弹性杆筛面的高强度复杂运动合成增强了物料松散, 大大增强了筛面自清理能力, 克服了筛面堵孔, 提高了筛分效率和处理量。弹性杆筛面为框架式结构, 使用寿命长, 筛杆更换方便, 筛框可重复使用, 大大降低了设备维护工作量和运行成本。中国矿业大学研制的弹性杆筛, 它的筛面是由刚性杆插入具有装入孔的模块筛面, 如图 5 所示。

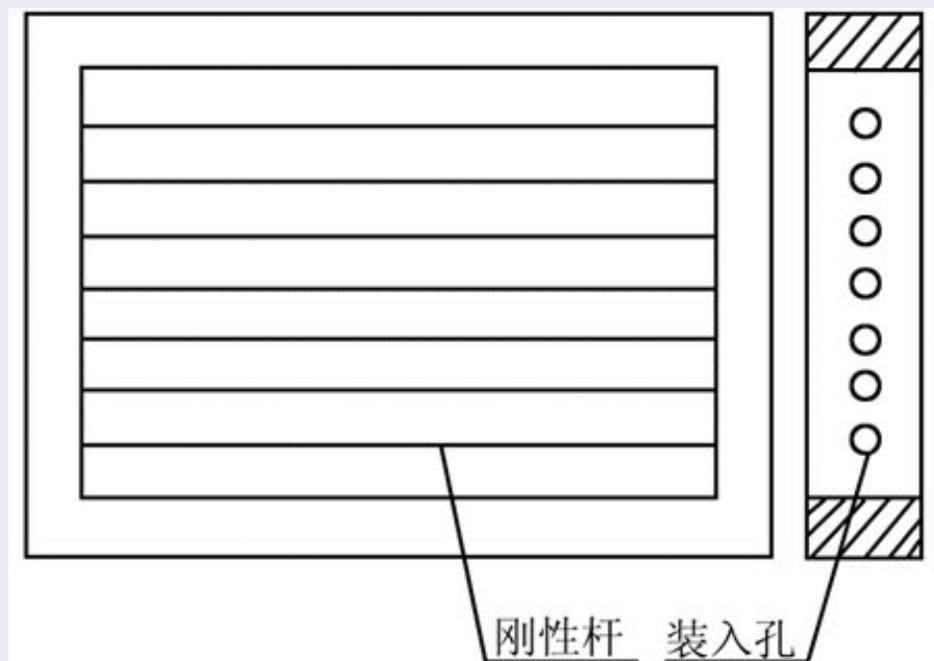


图5弹性杆筛面组成示意图

四、弹性筛面筛分机的主要技术规格

中国矿业大学生产的具有自主知识产权的潮湿细粒煤炭筛分机主要技术规格如下：

型号	层数	入料粒度 (mm)	筛孔尺寸 (mm)	处理量 (t/h)	单振幅 (mm)	频率 (Hz)	外型尺寸 (mm)
STKB1020	1	0~200	6×13	14~30	3~5	16	1960×1720 ×1810
STKB1855	1	0~200	6×13	85×100	3~5	16	5650×3010 ×2060
2STKB2450	2	0~200	上层：13× 25	25~40	3~5	16	1960×1720 ×1810
			下层：6× 13				
2STKB2450	2	0~200	上层：13× 50	180~220	3~5	12	5010×3980 ×3070
			下层：6× 13				
QGS2020	3	0~80	上层：6× 13	160~320	4~5.5	13	2060×2200 ×3600
			中层：20× 40				
			下层：8× 13				
ZQGS1520	3	0~300	上层：30× 60	200~300	4~5.5	13.76	1960×1953 ×568
			中层：25~ 40				
			下层：6× 13				
CWS3600	1	<100	0.5~25	120~160	3.5~4.5	12.2	6610×5450 ×2780

五、应用情况

1998年，淮北矿业集团张庄研石热电厂使用2STKB1540型多自由度弹性振动筛，代替原设计的2SJ2-1. 486×50型节肢振动筛。2STKB1540型多自由度弹性振动筛利用弹性杆在多自由度空间内的碰撞振荡效应，能达到自清洗的目的，从而有效地消除了筛面上的物料粘结。近年来的运行实践表明使用的2STKB1540型振动筛，不但能保证电厂正常生产运行，而且具有明显的经济效益和社会效益。

多自由度弹性碰撞杆筛板在陈四楼矿选煤厂近几年的生产实践表明：这种筛板由于能多自由度运动，使筛板具有自清理功能，煤粒不易粘到筛板上，既

提高了深度筛分的筛分效率,又减轻了工人劳动强度。筛板(弹性杆)寿命在4个月以上,并且更换弹性杆筛丝非常方便,解决了深度筛分的难题。

QGS琴弦概率筛1995年在郑州煤电集团芦沟煤矿使用,年筛选原煤45万,选出-6mm粉煤27万吨,灰分降低至16%以下,产品直接供应电厂等用户,解决了长期困扰郑州矿区煤炭加工上的技术难题,年直接经济效益125.09万元。

中国矿业大学研制的新型系列弹性筛面筛分机,获8项国家专利,在全国煤炭、电力、化工等领域95家企业应用167台,取得了显著的经济效益和社会效益。

六、结论

本文建立了潮湿细粒煤炭粘附堵孔力学模型、弹性筛面力学模型以及物料非线性运动理论,创立了潮湿细粒煤炭深度筛分技术体系,开发出系列潮湿细粒煤炭筛分设备,解决了潮湿煤炭深度筛分堵孔的世界性难题。

(1)建立了潮湿细粒煤炭的粘附模型,给出了堵孔覆盖膜弹性振动方程、基频表达式及断裂判据,提出了实现大振幅、大振动强度筛分工艺的有效途径。

(2)研究了颗粒在大振幅、大振动强度下的非线性运动规律,发现颗粒在筛面上运动存在周期分叉、倍周期分叉、混沌运动规律,给出颗粒出现混沌运动的振动强度判据:提出了触网概率的概念,建立了粒群随机透筛的仿真模型,创立了粒群透筛理论,给出了弹性筛面筛分机工艺参数优化的理论依据。

(3)基于筛面刚性与弹性耦合振动研究其振动规律,提出了弹性筛面筛分机动力学模型和优化设计公式,建立了潮湿细粒煤炭弹性筛面筛分机的弹性动态设计方法。

(4)创立了潮湿细粒煤炭深度筛分技术体系,开发出系列弹性筛面筛分机,它们具有筛面振动强度大、自清洗能力强、不堵孔、筛分机整体动应力低、可靠性和筛分效率高等优点。本文感谢国家自然科学基金重点项目(90210035)和国家杰出青年科学基金项目(50025411)的财政支持。

参考文献:

(1)赵跃民等,潮湿细料物料的透筛粘附模型,(J),中国矿业大学学报,2000.4,E120-123。

(2)马华宁,聚氨指弹性体在选矿中的应用与发展前景,(J)国外金属选矿,1994,1,p72-32。

(3)马连福,新型聚氨脂筛面的试验和研究,(J),矿山机械,1991,9,P27-31。

(4)Dietz, 25, Years of polyurethane screen panels in mineral processing, Aufbereitungs Technik, 1994, 35(8), P404-411。

(5)赵跃民、刘初升,干法筛分理论及应用,(M),北京:科学出版社,

1993, 9.

(6) 赵跃民, 潮湿细料煤炭干法筛分的研究, (D), 徐州, 中国矿业大学, 1991。

(7) 赵跃民、刘初升, 弹性筛面动力学及物料筛分机理的研究, (J), 中国有色多属学报, 1999. 12, Vo19, P129-132。

(8) 叶大武, 我国选煤炭现状及技术改造, (J), 选煤技术, 1999. 4, No, 2, P1-2。

(9) 梁晓东、佟大光、王风文等, 圆运动梯流棒条筛的应用研究, (J), 选煤技术, 1999, 6, No. 3, P12-13。

(10) 刘初升、赵跃民, 弛张筛筛面动态特性及其工艺参数的研究, (J), 中国矿业大学学报, 2000, 3, p290-292。

(11) 陈国平、陈祥恩、胡参军, 多[自由度](#)弹性碰撞杆筛板在选煤厂的应用, (J), 选煤技术, 1999, 8, P18~19。

(12) 丁辉, 多自由度弹性振动筛的应用实践, (J), 煤炭加工与综合利用, 2000, 6, P32~33

(13) 张成勇, 多自由度弹性碰撞筛分法简介, (J), 中国矿业大学学报, 1997, 4, p36

[作者简介] 赵跃民, 中国矿业大学副校长. 教授.

[版权声明](#) [商铺介绍](#) [理事会章程](#) [广告招商](#) [CCTE网站联盟](#) [友情链接](#) [帮助中心](#)

主办单位: 煤矿与煤炭城市发展工作委员会

协办单位: 北京嘉诚禾力广告有限公司

联系地址: 北京市海淀区恩济庄18号院4号楼 邮政编码: 100036

电话: 010-88124838 88127046 传真: 010-88127046

E-mail: master@mtsbxxn.com mtsbxxn@163.com

网站备案号: 京ICP备05035317号

