机电与自动化

基于刨煤机单刨刀截割试验的截割阻力模型研究

刘芮葭,Chu Viet Dung,Nguyen Viet Tuyen
(辽宁工程技术大学 机械工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要: 根据刨煤机刨刀截割煤岩阻力谱以及截割机理,辨识出刨头破碎煤岩的所受截割阻力,提出了基于单刨刀截割阻力、刨刀截割规律及运行参数来确定刨头瞬时截割阻力方法,建立刨头截割阻力试验-理论综合模型,给出了截割阻力模型算法。结果表明:当煤岩阻抗为225 N/cm、崩落角为30°、刨刀数量为14把时,刨头上的刨削阻力达到最大96.86 kN,变差系数达到最小0.509 53,载荷波动较小,有利于刨头刨削煤体,理论分析与试验结果基本吻合,截割阻力的特征和量值均有很好的复合度,单刨刀截割试验可反映出煤岩破碎的内在规律。

关键词: 刨煤机;刨刀;截割;载荷谱;正交试验
中图分类号: TD421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)06-0216-06

Study on cutting resistance model of single plow cutter test based on coal plough

Liu Ruijia,Chu Viet Dung,Nguyen Viet Tuyen
(*School of Mechanical Engineering,Liaoning Technical University,Fuxin* 123000,*China*)

Abstract: According to the resistance spectrum of coal and rock cutting resistance spectrum with the cutters of the coal plough as well as the cutting mechanism,the cutting resistance of the plough head breaking the coal and rock was identified. Based on the cutting resistance of a single plough cutter,the cutting law of the plough cutter and operation parameters provided,the instantaneous cutting resistance method of the plough head was determined,the cutting resistance test and theoretical comprehensive model of the plough head was established and the algorithm of the cutting resistance model was provided. The results showed that when the impendence of the coal and rock was 225 N/cm,the caving angle was 30° and the number of the plough cutters was 14,the ploughing resistance of the plough head would reach 96.86 kN in max and the variation coefficient would be 0.509 53 in min. A load fluctuation would be less and would be favorable for the plough head to plough the coal. The theoretical analysis and the test results were fitted basically. The cutting resistance features and value all would have a good composition and the test of single plough cutter could reflect the internal law of the coal and rock breaking.

Key words: coal plough; plough cutter; cutting; loading spectrum; orthogonal test

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

0 引 言

刨煤机是利用刨头上的刀群在一定牵引力作用下,连续循环冲击作业来实现采煤的[1-2]。目前,国内外学者对刨煤机的相关研究进行了大量工作[3-6]。如张强等[7]针对滑行刨煤机能耗和载荷波动问题,采用遗传算法NSGA-II对滑行刨煤机刨头的多目标可靠性进行了优化。此外,张强等[8]创建以刨煤机刨削机构比能耗最小为目标的优化模型,借助人工鱼群算法进行参数优化,该算法获得的最优解只能得到系统的满意解域。刨煤机的破煤岩刀具一般是刨刀,截割阻力是采掘机械设计和研究载荷的前提。刘春生等[9]基于试验的方法对采煤机单齿截割阻力进行了研究。以往给出的计算方法

收稿日期: 2016-01-02;**责任编辑:** 赵 瑞 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.036
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5150041043);辽宁"百千万人才工程"培养经费资助项目(2014921070)
作者简介: 刘芮葭(1974—),男,辽宁阜新人,副教授,博士。E-mail:liuruijia9333@163.com
引用格式: 刘芮葭,Chu Viet Dung,Nguyen VietTuyen. 基于刨煤机单刨刀截割试验的截割阻力模型研究[J]. 煤炭科学技术,2016,44(6):216-221.
Liu Ruijia,Chu Viet Dung,Nguyen Viet Tuyen. Study on cutting resistance model of single plow cutter test based on coal plough[J]. Coal Science and Technology,2016,44(6):216-221.

是假设破碎煤岩服从一定分布规律,计算破碎过程中的载荷谱,实际上机械破煤岩是一个动态复杂过程,刨刀截割试验的载荷谱将真实地记录破碎过程中的动力学信息,文献[10-12]中提出的截割阻力谱可视为随机信号,截割阻力上的每一次波峰都是对应一次能量的释放,载荷谱的不规则与其分离煤岩粒度分布不均匀性有关,是一种煤岩破碎机理的反映。因此,基于上述分析,笔者提出了以单刨刀截割阻力试验载荷谱为基础,采用试验与理论相结合的算法,以预测整个刨头的截割阻力。

1　刨削阻力理论分析

1.1　刨头刨刀的刨削阻力

根据煤炭的破碎机理,即"密实核"学说中所得出的刨削深度与刀间距关系理论可知: 如果刨削深度不变,刀间距增大,即刨削断面增大,煤的块度增大,可破落更多的煤,但当刀间距增大到一定程度时,刨槽间的互相影响消失,煤壁上出现许多棱条,此时刨槽之间的煤脊已不能被破碎,故超过最佳刀间距的已无实用价值,煤不能自行剥落; 如果刀间距太小,刨削断面小,频繁地重复刨削,将出现大量的粉尘,且增加单位能耗。由于刨煤机刨煤深度的改变相应的引起煤层崩落角的变化。单刨刀截割煤岩试验,没有考虑到刨刀的排列及刨刀角度的影响,刨煤机刨头实际刨削煤岩过程中,是在特定的刨刀排列及刨刀角度下进行的,刨削煤岩的效果是不同的。对于实际刨刀的往复刨削情况,设刨头刨刀刨削深度为 h ,则刨煤机单循环刨削下来的煤体积 V 为

$$V = HhL_b \tag{1}$$

式中: H 为刨煤机一次循环采高; L_b 为刨头运行距离。

$$Z = Z_0[1 + f_1 k_u(1 + 1.8S_1)] = 1.1A\frac{0.35b + 0.3}{(b + h\tan\varphi)k_6} + \frac{1}{k_1k_2k_3k_4k_5\cos\beta} \tag{2}$$

式中: Z 为单个刨刀刨削力; Z_0 为平均刨削阻力; f_1 为截割阻抗系数; k_u 为压等力和锐利刨刀截割力比值; S_1 为刨刀磨损后在切削平面上投影面积; A 为煤岩阻抗; b 为刨刀宽度; k_1 为外露自由表面系数; k_2 为截角的影响系数,当截角为 40°、50°、60°、70°、80°、90°时,对应的值分别为 1.06、1.0、0.9、0.96、1.03、1.05; k_3 为刨刀前刃面形状系数; k_4 为刨刀排列方式系数; k_5 为地压系数,一般取 1,但在顶板坚硬、矿压显现、利用地压采煤时,取 1.1 ~ 1.3; k_6 为考虑煤的脆塑性系数; φ 为煤岩崩落角; β 为刨刀相对刨头牵引方向安装角度。

$$W_1 = P_S L_b = NZL_b = \left(\frac{H}{t} + 1\right) ZL_b \tag{3}$$

式中: W_1 为刨削阻力做功; P_S 为刨削力,$P_S = NZ$; N 为刨头截线条数量,$N = H/t + 1$,取整; t 为刨刀间距,$t = b + 2h\tan\varphi$。

1.2　刨刀截割阻力谱试验理论模型

刨煤机刨削煤岩是伴随着小块煤岩至大块崩落的重复过程,在单刨刀的最大刨削阻力(大块煤崩落时)设定为 $Z_{0,\max}$ 的试验条件下,其计算式如下:

$$Z_{0,\max} = A_0 h_0 \tag{4}$$

式中: A_0 为试验煤岩的截割阻抗; h_0 为试验条件下的刨削深度。

模拟刨头上单把刨刀的最大截割阻力,假设为第 i 把刨刀,则

$$Z_{i,\max} = A_i h'_{i,\max} \tag{5}$$

式中: A_i 为考虑到刨刀某 i 工况条件下实际煤岩刨削阻抗; $h_{i,\max}$ 为最大刨削深度,$A_i = KA_{1i}$; K 为工况系数; A_{1i} 为模拟某工况条件下所设定的刨刀刨削煤岩的阻抗,则式(4)与式(5)之间的关系为

$$Z_{i,\max} = \frac{A_i}{A_0}\frac{h_{i,\max}}{h_0}Z_{0,\max} \tag{6}$$

模拟刨头整体的最大截割阻力为

$$W_1 = \sum_{i=1}^{N} ZL_b = \sum_{i=1}^{N} Z_{i,\max}L_b = \sum_{i=1}^{N}\frac{A_i}{A_0}\frac{h'_{i,\max}}{h_0}Z_{0,\max}L_b \tag{7}$$

2　刨刀随机载荷的模拟仿真

2.1　煤岩硬度对随机载荷影响

选取 3 组煤岩阻抗 A_1 =150、225、350 N/cm,在刨煤深度 h =6 cm,煤岩崩落角 φ =30°时对上述刨头进行模拟,得到刨头上的随机载荷曲线,如图 1 所示。

随着煤岩硬度、煤层可刨强度的增加,刨头刨削阻力、进刀阻力和侧向阻力的均值均线性增加,当 A 由 150 N/cm 增加到 225 N/cm、再次增加到 350 N/cm时,刨头受到的刨削阻力、进刀阻力和侧向阻力分别增加了 0.56、0.71、0.32 倍,煤岩硬度对进刀阻力的影响最大,刨削阻力次之,侧向阻力最小,这与进刀阻力的方向和性质有关,进刀阻力与煤壁垂直、与刨刀进刀方向相反,所以影响最大; 通过对图 1 刨头随机载荷分析可知,A = 225 N/cm 时,三向载

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

荷的变差系数分别为 0.518 86、0.309 78、0.192 79，与其他 2 种情况相比都要小，说明该种情况下刨头受力均匀、载荷波动最小，振动较小，磨损最少。

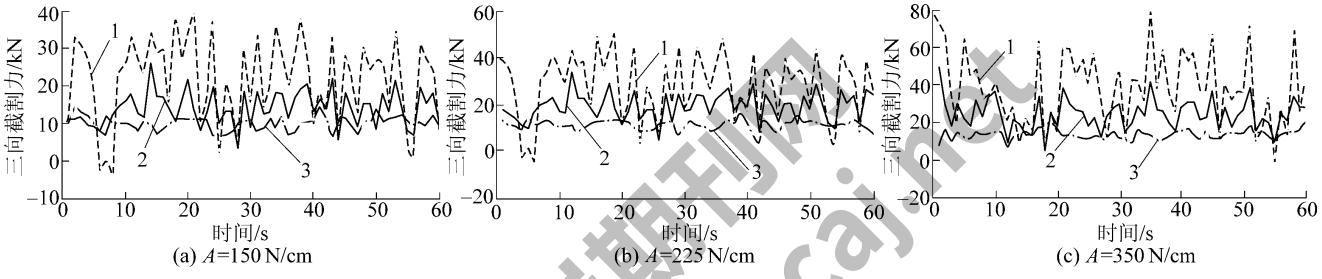
2.2　煤岩崩落角对随机载荷的影响

选取 $A=225$ N/cm，$h=6$ cm，根据经验得知，煤岩崩落角 φ 选取范围为 20°～60°，因此选取 3 组 φ 分别为 30°、36°、45°时，模拟得到的刨头随机载荷模拟曲线如图 2 所示。

刨头的随机刨削阻力和进刀阻力与煤层崩落角呈反比例关系，随着 φ 由 30°依次增加到 36°再增加到 45°，刨削阻力和进刀阻力载荷均值分别降低了 0.18、0.24 和 0.18、0.21；变差系数却分别增加了 0.005 4、0.018 0 和 0.012 8、0.039 9；说明崩落角不仅影响刨削阻力和进刀阻力载荷的大小，还影响其载荷波动、受力是否均匀、稳定，这主要是由于刨削阻力和进刀阻力是刨煤机刨煤的主要载荷。煤层崩落角对侧向阻力没有影响，上述模拟时的微小差异是由于载荷的随机性引起的，与崩落角无关，这与侧向阻力方向和性质是密切联系的。其中当 $\varphi=30°$ 时，刨头上的刨削阻力最大，变差系数最小，载荷波动较小，有利于刨头刨削煤体。

2.3　刨刀数量对随机载荷的影响

选取刨刀数量 m 分别为 11、14、17，在 $A=225$ N/cm，$h=6$ cm，$\varphi=30°$ 时，模拟得到滑行式刨煤机刨头不同刨刀数量的随机载荷曲线分别如图 3 所示。

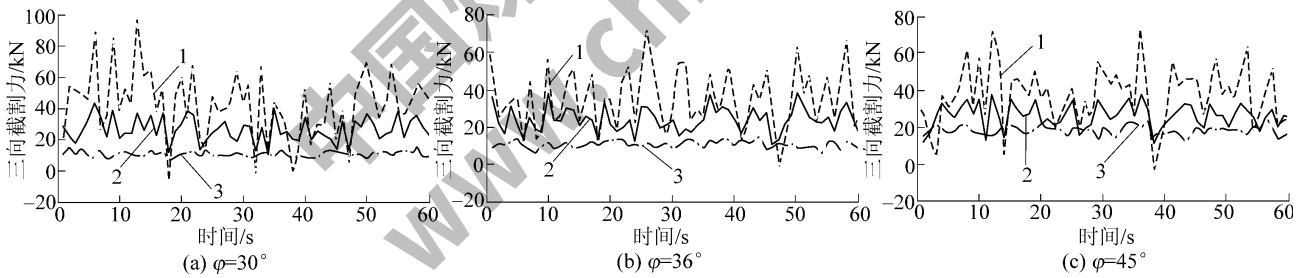


(a) A=150 N/cm　(b) A=225 N/cm　(c) A=350 N/cm

1、2、3—刨头的刨削阻力、进力阻力、侧向阻力

图 1　不同煤岩阻抗 A 下的刨头随机载荷模拟曲线

Fig. 1　Simulated curves of random loads on plough with different coal impedances A

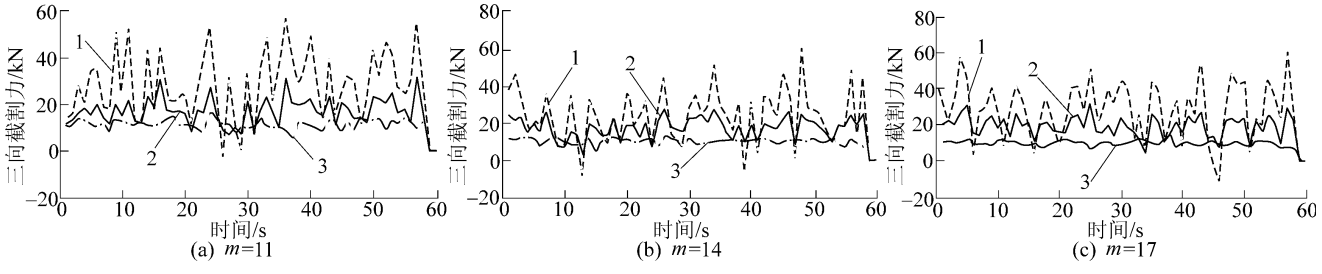


(a) φ=30°　(b) φ=36°　(c) φ=45°

1、2、3—刨头的刨削阻力、进力阻力、侧向阻力

图 2　不同煤岩崩落角 φ 下的刨头随机载荷模拟曲线

Fig. 2　Simulated curves of random loads on plough with different caving angles φ



(a) m=11　(b) m=14　(c) m=17

1、2、3—刨头的刨削阻力、进力阻力、侧向阻力

图 3　不同刨刀数量 m 的刨头随机载荷曲线模拟

Fig. 3　Simulated curves of random loads on plough with different plane cutter quantity m

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

从图 3 可知,在工况参数一定、刨头的其他结构参数不变的情况下,不同时刻处于工作区内的刨刀数量的变化同样引起刨头随机载荷的变化。随着刨刀数量的增加,刨头的刨削阻力、进刀阻力和侧向阻力均值逐渐增大,刨刀数量由 11、14 把增加到 17 把,其刨头的刨削阻力和进刀阻力均值分别增加了 0.11、0.05 和 0.09、0.08,侧向阻力几乎没有变化,这说明刨刀数量的变化对刨头侧向力没有影响,对刨削阻力和进刀阻力的影响也很小。当刨刀数量为 17 时,刨头各向载荷的变差系数最小,分别为0.566 73、0.362 08、0.250 36,波动最小,受力均匀,但是刨刀数量过多,会引起刨削产生的粉尘也越多。同时还有刨头高度、刨刀宽度、刨槽宽度、刀体强度等影响因素。

3　刨刀随机载荷测试试验分析

3.1　单刨刀随机载荷的辨识

刨煤机破碎是刨刀强力切入煤岩的运动结果,煤岩被刨削后形成不规律的沟槽,刨削载荷谱记录众多参数组合下的煤岩破碎机理演化信息,煤岩的刨削试验条件与实际刨刀及安装切削角相同,进行单刨刀标定工作,设计一种能够在线测试截割力的传感器。加载测试及刨刀传感测试如图 4 所示,其中应变片 1 测试侧向阻力,应变片 3 测试进刀阻力,应变片 2、4 测试刨削阻力,且应变片与三向载荷的转换关系见式(8)。为便于试验研究将测试刨刀加工成实际刨刀,试验条件为刨刀宽度 b_p = 20 mm,刨削角 σ = 50°,前刃面的楔角 α_k = 120°,刨削刃形状为矩形。工作面参数为: 刨削厚度 h = 6 cm,刨削宽度 b = 6 cm,刨刀间距 t = 9 cm,刨削速度设定为 1.17 m/s,顺序式刨削。在假设煤壁上进行煤壁截割,其力学性质和破碎特点分别为最大等效应力 σ_{max} = 140 MPa,破碎应力 $\overline{\sigma_p}$ = 10 MPa,选取刨头上第 4 把刨刀作为测试齿,如图 4 所示,图中 F_x 为进刀阻力,F_z 为侧向阻力,F_y 为刨削阻力。刨刀试验测试分析系统如图 5 所示。

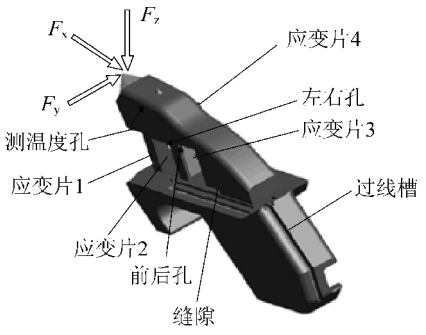


图 4　刨刀传感测试示意

Fig. 4　Sensing test schematic diagram of plow cutter



图 5　刨刀试验测试分析系统

Fig. 5　Test analysis system of plow cutter

$$F = 1\,145.55x + 1\,718.3y + 2\,863.9z \quad (8)$$

式中: F 为刨刀三向力; x 为应变片 1 输出的信号; y 为应变片 3 输出的信号; z 为应变片 2、4 的输出信号。

由于试验条件的限制,采用假煤壁对刨刀截割阻力进行测试,试验用煤壁试样配比见表 1,其物理性能参数见表 2。

表 1　试验室煤壁试样参数

Table 1　Coal wall parameters of laboratory

试件类别	水灰比	坍落度/mm	含气量/%	凝土配合比/(kg·m^{-3})			
				水	水泥	细骨料	粗骨料
f0.4	1.19	70	1.0	72	60	177	245
f0.8	0.92	88	1.0	72	78	174	240
f1.2	0.74	70	1.0	72	97	170	235

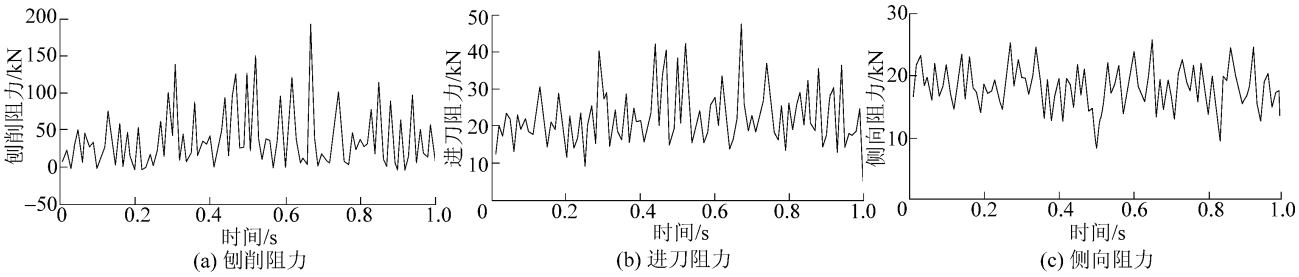
表 2　试验用煤壁试样的物理性能及其参数

Table 2　Physical property and parameters of coal wall for experiment

试件类别	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)	摩擦因数	静弹模量/(10^4MPa)	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
f0.4	40	4.015	16.54	12.1	65.1	2.6	1.023	0.225	2 004
f0.8	80	4.121	18.31	15.9	70.2	2.8	5.826	0.275	2 112
f1.2	120	6.213	19.72	16.3	72.5	3.2	7.541	0.312	2 480

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

通过分析得到刨刀刨削硬质包裹体的三向随机载荷如图 6 所示，其统计值见表 3。



(a) 刨削阻力　(b) 进刀阻力　(c) 侧向阻力

图 6　单刨刀的三向随机载荷

Fig. 6　Three directional random loads of single plow cutter

表 3　刨刀随机载荷统计值

Table3　Statistical values of plow cutter random loads

统计值	刨削阻力	进刀阻力	侧向阻力
最大值/kN	195.020 4	47.344 2	26.243 8
最小值/kN	−4.283 8	0	0
均值/kN	37.552 5	22.184 5	18.043 8
均方差/kN	39.706 6	7.901	3.944 1
变差系数	1.057 4	0.356 15	0.218 58

由上述测试结果可知，刨刀的三向载荷随时间变化，其大小、方向无规律，具有很大的随机性；刨刀的刨削阻力、进刀阻力、侧向阻力均值依次降低，其载荷波动（用变差系数表示）也呈上述规律，即刨削阻力及其波动最大，侧向阻力及其变化最小，由于硬质包裹体的大小、数量以及空间分布是随机的，加之煤体刨削过程的崩落效果，致使刨刀上的载荷随机变化；因刨刀从工作面上落煤主要由刨削力决定，所以在三向载荷中刨削阻力最大，而侧向阻力是刨刀侧面与煤壁摩擦产生的，该力较小。

3.2　可控因素水平表

为了找出刨头截割煤壁时载荷波动较小的煤岩阻抗、崩落角及刨刀数量的最佳组合方式，以及对理论分析进行试验验证，选取煤岩阻抗、崩落角及刨刀数量作为研究变量。利用正交试验法，对三因素三水平试验，且不考虑交互作用，可用 L9（3^4）安排试验，A 为煤岩阻抗、B 为崩落角、C 为刨刀数量，设计方案见表 4。采用正交试验的方法来模拟各误差因素的影响。借助正交表可以选出具有代表性的试验，对以较少的试验次数所获得的数据进行统计分析，可以得到满意结果。

表 4　正交试验设计

Table 4　Orthogonal array experimental design

试验号	A	B	C
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	1	2	2
5	2	2	3
6	3	2	1
7	1	3	3
8	2	3	1
9	3	3	2

3.3　试验结果分析

经过测试，得到在不同刨削参数下的刨刀最大刨削阻力、最小刨削阻力及均值、均方差、变差系数，试验结果见表 5。

表 5　刨刀试验测试结果

Table 5　Test results of plow cutter

刨削阻力	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	试验 6	试验 7	试验 8	试验 9
最大值/kN	56.792 1	96.86	79.992	39.399 8	73.082 4	50.452 7	60.523 9	58.541 4	61.665 2
最小值/kN	−4.168 4	−8.276 2	−1.318 2	−3.798 7	−0.632 09	−4.481 8	−11.480 9	−8.609 3	−9.932 4
均　值/kN	23.287 8	42.607 6	35.811 6	22.903 7	34.909 7	29.212 2	28.116 4	26.241 3	25.843 8
变差系数	0.587 86	0.509 53	0.522 15	0.527 04	0.512 27	0.518 66	0.566 73	0.521 6	0.596 51

由表 5 可知：正交试验中第 2 组试验（煤岩阻抗 225 N/cm、崩落角为 30°、刨刀数量为 14 把），刨头上的刨削阻力最大，变差系数最小，载荷波动较小，有利于刨头刨削煤体，理论分析与试验验证结果基本吻合。

4　结　　论

1）研究表明单一刨刀刨削阻力的方差有瑞利

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

分布的统计规律,采用试验的方法对刨削阻力进行求解,避免传统刨削阻力公式的复杂性及精度等问题,充分利用试验的刨削阻力载荷谱的特征对工作状态的刨煤机刨刀进行辨识。

2) 针对刨刀刨削煤岩动态的破碎特征,给出刨头载荷的算法,很好地辨识出刨煤机刨头在不同煤岩阻抗、不同崩落角、不同刨刀数量下刨头的受力状态和幅值大小。

3) 基于正交试验条件和方法,统计出刨头在第 2 组试验(煤岩阻抗 = 225 N/cm、崩落角为 30°、刨刀数量 14 把) 时,刨头上的刨削阻力达到最大 96.86 kN,变差系数达到最小 0.509 53,载荷波动较小,有利于刨头刨削煤体,理论分析与试验验证结果基本吻合。

参考文献(References) :

[1] 康晓敏,李贵轩. 随机动载荷作用下刨煤机刨链疲劳寿命预测[J]. 煤炭学报,2010,35(3):503 – 509.
Kang Xiaomin,Li Guixuan. Prediction of fatigue life of coal plow chain under stochastic dynamic load [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(3):503 – 509.

[2] 张　强. 基于遗传算法的刨煤机系统多目标模糊可靠性优化[J]. 科技导报,2012,30(12):53 – 55.
Zhang Qiang. Fuzzy muli – objective reliability optimization of plow based on genetic algorithms [J]. Science & Technology Review,2012,30(12):53 – 55.

[3] Zhang Qiang,Xu Manjiang. Study on fatigue life of plow bit under different planning parameters [J]. Strength of Materials,2014,46(2):262 – 269.

[4] Zhang Qiang,Li Shouju,Cao Juan. Experimental research on pressure control of soil chamber in shield tunneling [J]. Journal of Coal & Science Engineering(China) ,2013,19(3):414 – 420.

[5] Zhang Qiang,Li Shouju. Topological optimization of pick structure based on LS – DYNA [J]. Disaster Advances,2012(4):187 – 193.

[6] 张　强,宋秋爽,袁　智. 基于熵权的刨煤机适刨性灰色关联多级模糊综合评价[J]. 科技导报,2012,30(8):55 – 60.
Zhang Qiang,Song Qiushuang,Yan Zhi. Plow plane multi – level fuzzy evaluation based on gray level correlation decision model and entropy value law [J]. Science & Technology Review,2012,30(8):55 – 60.

[7] 张　强,付云飞,宋秋爽,等. 基于 NSGA – Ⅱ不完全概率信息刨头多目标模糊可靠性优化[J]. 工程设计学报,2012,19(1):25 – 30.
Zhang Qiang,Fu Yunfei,Song Qiushuang,*et al*. Multi – objective optimization reliability design for incomplete probability information plow head base on NSGA – Ⅱ [J]. Chinese Journal of Engineering Design,2012,19(1):25 – 30.

[8] 张　强,付云飞,宋秋爽,等. 基于人工鱼群算法刨煤机比能耗最低参数优化[J]. 广西大学学报: 自然科学版,2012,37(2):241 – 247.
Zhang Qiang,Fu Yunfei,Song Qiushuang,*et al*. Parameter optimization of lowest energy consumption for plow based on artificial fish school algorithm [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition,2012,37(2):241 – 247.

[9] 刘春生,李德根. 基于单齿截割试验条件的截割阻力数学模型[J]. 煤炭学报,2011,36(9):1565 – 1570.
Liu Chunsheng,Li Degen. Mathematical model of cutting force based on experimental conditions of single pick cutting [J]. Journal of China Coal Society,2011,36(9):1565 – 1570.

[10] 康晓敏,李贵轩,郝志勇. 以极小化单位能耗为目标优化刨削深度[J]. 煤矿机械,2004,25(9): 42 – 44.
Kang Xiaomin,Li Guixuan,Hao Zhiyong. Ploughing depth optimize of minimizing energy consumption as the goal [J]. Coal Mining Machinery ,2004,25(9): 42 – 44.

[11] 康晓敏,李贵轩,郝志勇. 以输送机货载断面积均匀化为目标优化刨削深度[J]. 矿山机械,2005,33(2) 14 – 16.
Kang Xiaomin,Li Guixuan,Hao Zhiyong. To set off the conveyor cargo area even as the objective to optimize planing depth [J]. Mining Machinery,2005,33(2):14 – 16.

[12] 李晓豁,刘　霞,焦　丽. 不同工况下滑行式刨煤机的动态仿真研究[J]. 煤炭学报,2010,35(7) :1202 – 1207.
Li Xiaohuo,Liu Xia,Jiao Li. Dynamic simulation of sliding coal plow under different working conditions [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(7):1202 – 1207.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net