文章编号：1000-1964(2006)01-0099-05

细粒煤压滤滤饼的微观结构分析

石常省[1]，谢广元[2]，张悦秋[2]
(1. 中国矿业大学 环测学院，江苏 徐州 221008；
2. 中国矿业大学 化工学院，江苏 徐州 221008)

摘要：基于过滤理论，探讨了量化滤饼内部结构对拓展过滤理论的可行性，提出了借助扫描电镜分析研究细粒煤压滤滤饼微观结构的新途径. 研究了滤饼的内部空隙率、最大空隙直径、平均空隙面积等因素对压滤滤饼脱水效果的影响. 从量的角度分析了各种因素影响细粒煤滤饼最终水分的原因. 结果表明：当入料粒度由 0.045 mm 逐渐增加到 0.5 mm 过程中，滤饼的孔隙率由 3.87% 逐渐增加到 15.46%，同时孔隙平均面积则由 2.14 μm^2 增加到 8.24 μm^2.

关键词：细粒煤；压滤；水分；微观结构
中图分类号：TD 943　　**文献标识码**：A

Study of the Inner Structure of Fine Coal Filter Cake

SHI Chang-sheng[1], XIE Guang-yuan[2], ZHANG Yue-qiu[2]
(1. School of Environmental Sciences and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The dewatering of fine coal in coal processing is very important. Based on the theories of dewatering, the inner structure of the filter cake was analyzed using the scanning electron microscope. The porosity, the maximal diameter of vacant and the average area of vacant were analyzed in detail. Genuine causes influencing final moisture of the cake were made out. The results show that the porosity of the filter cake increased from 3.87% to 15.46% with the increasing of size of fine coal from 0.045 mm to 0.5 mm, and the average area of the void increased from 2.14 μm^2 to 8.24 μm^2.

Key words: ultra-fine coal; pressure-filtering; moisture content; microcosmic structure

随着采煤和选煤过程机械化程度的提高，原生和次生煤泥量都有所增加，加大了细粒煤脱水的难度. 而细粒煤水分的高低是影响商品煤质量的重要因素. 降低细粒煤的最终水分是煤炭行业急待解决的主要问题之一，是关系到节能、节运、保护环境和充分利用国家资源的重大课题[1-2].

固液分离的同时会伴有工业滤饼的生成，工业滤饼多多少少都具有可压缩性，随着固液分离的进行，滤饼内部的结构也发生着动态变化，改变了滤饼内部的流体通道和滤饼的渗透性. 如此看来，研究可压缩性滤饼的内部结构对优化过滤指标，改善过滤效果有着非常重要的意义和实用价值[3]. 但是大多数的研究工作，还只是处于面上的工作研究. 针对各种影响因素与压滤脱水效果进行定性分析，这仅仅说明了各因素对压滤脱水的影响，不能真正从量的角度解释各种因素对压滤脱水效果的影响作用. 由于压滤脱水是多因素交错影响的复杂过程，同时，在压滤过程中，精煤滤饼的内部结构也在

收稿日期：2005-03-20
基金项目：国家自然科学基金项目(50174053)；国家"九五"科技攻关项目(95-215-01-04-01)
作者简介：石常省(1980-)，男，江苏省徐州市人，博士研究生，从事煤炭深加工和细粒煤脱水方面的研究.
E-mail：scszj@126.com　　Tel：0516-83995486，13913474160

发生着动态变化，传统的压缩渗透模拟装置也就不可能对滤饼的内部结构进行精确的分析，这就限制了滤饼内部结构分析的发展.

随着科学技术的发展，计算机模拟和扫描电镜技术为研究滤饼的内部结构提供了强有力的工具. 由于各种影响因素对过滤效果的影响实质是影响滤饼的内部结构，从而影响了各种过滤指标，只有对压滤滤饼的内部结构进行详细的分析和实验研究，把实验分析量化，才能揭示压滤脱水的实质，为压滤脱水的理论研究打下基础.

1 浮选精煤粒度组成的影响

根据压滤脱水机理及工艺确定的理论依据，为了最大限度的降低微细粒煤的水分，设计了集流体静压力、二维剪切压榨及强气压穿流脱水三位一体的综合压滤脱水工艺[4]. 试验煤样来自大屯选煤厂的浮选精煤. 煤样的湿法筛分化验结果见表 1.

表 1 大屯选煤厂浮选精煤粒度组成

Table 1 Size distribution of flotation clean coal in Datun coal preparation plant

粒级 d/mm	灰分 A/%	含量/%	累计含量/%
0.5～0.25	9.38	21.27	21.27
0.25～0.125	13.65	48.18	69.45
0.125～0.074	19.02	9.56	79.01
0.074～0.045	20.47	5.35	84.36
＜0.045	18.83	15.64	100.00

滤饼的比阻可表示为[5-6]

$$\alpha_{av}=\frac{K_1(1-\varepsilon^2)S_0^2}{\varepsilon^3}. \tag{1}$$

式中：α_{av}为滤层平均体积比阻，$1/m^2$；K_1 为柯兹尼系数，与床层及流体物性有关；S_0^2 为滤饼的比表面积，m^2；ε 为滤饼的孔隙率.

由此可见，滤饼比阻和物料性质、粒度、形状及滤饼孔隙率的大小有关. 其中，物料的粒度组成对滤饼比阻影响最大. 为了更好的研究粒度组成对压滤脱水效果的影响规律，我们暂定义物料细度为物料中小于 0.074 mm 的颗粒量占总量的百分比.

1.1 粒度组成对滤饼水分和固含量的影响

为了进一步研究粒度组成对最终过滤指标的影响，在一定入料浓度和工作压力下，选取 3 种不同粒度组成的浮选精煤进行了压滤脱水试验，实验结果如表 2(物料中小于 0.074 mm 级占总量的百分数称为物料细度).

从表 2 我们可以得出粒度组成和滤饼水分以及滤液固含量之间的关系曲线，见图 1 所示.

表 2 压滤入料粒度组成对脱水效果的影响

Table 2 Effect of size distribution of feed on the dewatering efficiency

入料细度/%	滤饼水分/%	滤液固含量/(g·L^{-1})
42.8	20.37	4.12
63.0	21.56	5.30
75.6	23.87	7.65

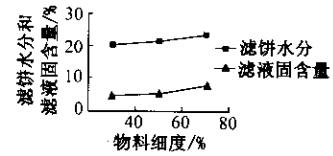


图 1 粒度组成与滤饼水分及滤液固含量之间关系

Fig. 1 The relation between the size consist and the moisture content of filter cake and solid contents in filtered water

结果表明，随着物料细度的增加，滤饼水分明显增加. 由 20.37%增至 23.87%. 小于 0.074 mm 含量占 42.8%左右时，所得滤液浓度较低. 有利于压滤脱水. 当小于 0.074 mm 级含量大于 60.3%时，滤饼水分和滤液固含量明显增加.

1.2 不同粒度细粒煤压滤滤饼结构分析

若通过分级压滤，把各粒级的滤饼进行微观电镜扫描，可以很清楚的比较出粒级对滤饼内部结构的影响作用. 0.5～0.25 mm 粒度级物料滤饼结构的扫描电镜图片见图 2.



图 2 0.5～0.25 mm 滤饼微观结构电镜图像

Fig. 2 0.5～0.25 mm scanning electron microscope picture of microcosmic structure of filter cake

表 3 各粒级滤饼的图像分析结果

Table 3 The analysis of the size fraction of different size fraction

粒级/mm	孔隙率/%	孔隙平均面积/μm^2	孔隙最大面积/μm^2
0.5～0.25	15.46	8.24	29.03
0.25～0.125	12.25	6.54	25.23
0.125～0.074	8.36	5.32	20.38
0.074～0.045	5.63	3.76	15.46
－0.045	3.87	2.14	9.27

由表 3 可以得到各粒级滤饼的孔隙率、孔隙平均面积和孔隙最大面积的柱状直观图 3.

可见，滤饼孔隙率、孔隙平均面积及最大面积

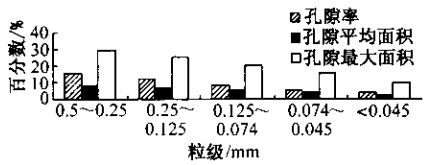


图 3　各粒级物料滤饼孔隙尺寸分布

Fig. 3　Distrituting picture of vacant dimension of different size fraction

与其粒度组成密切相关. 滤饼物料粒度越细，滤饼孔隙率越小，粗粒度物料比细粒度物料具有更大的孔隙面积和孔隙率. 正是因为不同粒级物料滤饼的孔隙率、孔隙面积、孔隙尺寸分布等微观结构参数的不同，导致不同粒级物料的过滤性能存在差异，细粒含量高的滤饼水分难以脱除，滤饼最终水分偏高. 因此细粒含量高的煤泥滤饼水分较高.

物料粒度对过滤速率的影响是多方面的[7]，而最主要的是影响滤饼的孔隙状态，或者说，滤饼的孔隙大小及孔隙率取决于滤饼的物料粒度及组成. 组成滤饼的物料粒度越小，滤饼孔隙率越小. 此外，物料越细，过滤介质被堵塞几率也越大，过滤速率就会降低. 同时，物料越细，表面水化膜的相对厚度越大，和固相结合越牢固. 由于水化膜的流动性极差，因而占据了流道部分空间，也使滤饼孔隙率减小，滤速降低，处理量下降，水分增高.

采取分级脱水的方法均可从粒度上改善物料的过滤效果，但其成本高及工艺复杂，在生产实际中受到一定限制.

2　压滤入料浓度的影响

文献[8]提出了滤饼比阻与浓度之间的关系. 认为低浓度时，一方面过滤速率快，对颗粒的曳力大，使颗粒紧密；另一方面颗粒沉降分层明显，粗颗粒沉于底层，孔隙大，阻力小；而随着浓度的增加，比阻增大，原因是此时滤速仍较快，钻隙及析离现象明显，致使滤饼密实，易堵塞介质孔隙. 所以料浆浓度越大，成饼速度越快，滤饼的孔隙率越大，滤饼比阻越小，滤饼水分越低.

2.1　浓度对水分和固含量的影响

对浮选精煤而言，其它条件相同时，进行了不同浓度下的压滤脱水试验，结果见表 4.

表 4　入料浓度对滤饼水分的影响

Table 4　Effect of feed concentration on the moisture content of filter cake

入料浓度/(g·L^{-1})	滤饼水分/%	滤液固含量/%
150.00	22.36	6.23
200.00	21.12	4.28
250.00	19.56	3.58
300.00	18.41	2.66

由表 4 可以得出入料浓度与滤饼水分与滤液固含量之间的关系图 4，图 5 为入料浓度与压滤时间之间的关系曲线.

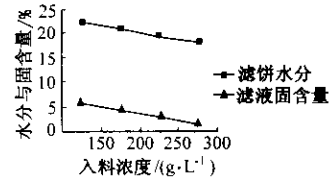


图 4　入料浓度与滤饼水分和滤液固含量的关系

Fig. 4　The relation between feed concentration and the moisture content of filter cake and solid contents in filtered water

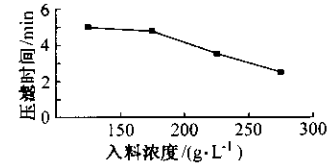


图 5　入料浓度与压滤时间的关系图

Fig. 5　The relation between feed concentration and pressure-filtering time

由实验可知，入料浓度的增加，可以显著减小细粒精煤在滤液中的损失，在相同的过滤时间内，滤饼水分也明显降低，处理能力增大. 因此浮选精煤入料浓度的提高有利于改善压滤脱水效果. 这主要是因为随着浓度的增加，滤饼形成速度加快，滤饼层结构得到改善. 由于在滤饼刚形成时滤液带走的固体量最大，降低了细小颗粒通过过滤介质的概率，从而降低了滤液的固体浓度，提高了滤液的澄清度. 因而压滤入料浓度低时滤液中的固体含量高；压滤入料浓度高时，滤液中固体含量较低.

2.2　不同浓度下细粒煤过滤滤饼结构分析

为了从微观角度观测浓度对滤饼结构的影响，在实验中我们对各浓度级物料滤饼结构的进行了扫描电镜图片分析，图 6 为 300 g/L 滤饼微观结构电镜图像.



图 6　300 g/L 滤饼微观结构电镜图像

Fig. 6　300 g/L scanning electron microscope picture of microcosmic structure of filter cake

根据各浓度级别下滤饼的图像分析结果，我们得到各浓度级别下，滤饼的孔隙率、孔隙平均面积和孔隙最大面积的柱状分布图 7.

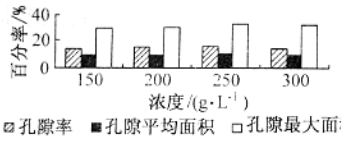


图 7 各浓度级物料滤饼孔隙尺寸分布图

Fig. 7 Distrituting picture of the vacant dimension of the filter cake in different concentration

在低浓度时，细小颗粒极易随着流线直接进入滤布的孔眼中，或穿过、或堵塞、或覆盖其上，使过滤介质孔眼很快被堵塞. 随着料浆浓度的提高，将会有更多的颗粒接近或到达过滤介质的孔眼，由于相互干扰，绝大部分颗粒不能进入孔眼而在其上成拱架桥，使滤孔可在较长时间内不被严重堵塞.

实验结果表明，随着入料浓度的增大，滤饼水分降低. 由于颗粒沉降速度的不同，在过滤介质表面形成的滤饼由下往上平均粒度逐渐减小，滤饼阻力逐渐增大，使滤饼下层的脱水受到影响，这种作用随着入料浓度的减小逐渐增大，入料浓度越低，滤饼水分越高. 可见料浆浓度对过滤效果影响十分明显，所以在工程应用中，对于同一种过滤设备、过滤介质，由于进料浓度不同，分离效果也不同. 对于低浓度料浆的过滤，首先应考虑调整进料浓度，使之有理想的过滤效果，在过滤设备和介质确定之后，应在充分了解料浆物性基础上进行试验，寻求适宜的料浆浓度与操作条件.

3 不同加压方式下的滤饼微观结构分析

单一流体静压力下滤饼结构的微观扫描电镜如图 8 示.

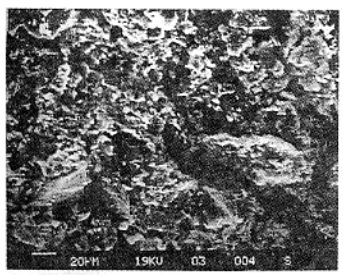


图 8 单一流体静压力下滤饼结构的微观扫描电镜图像

Fig. 8 Scanning electron microscope picture of microcosmic structure of filter cake in a single fluid pressure

比较在 3 种不同加压方式下的滤饼微观扫描电镜图表明，单一流体静压力作用于精煤滤饼时，滤饼孔隙率减小，以至于排出孔隙水，但有一限度. 此时滤饼形成了许多拱桥结构，使得流体静压力的增加对进一步降低滤饼水分不明显. 当采用二维剪切压力时表明，此时的滤饼孔隙率分布有所改变，主要是因为二维剪切压力破坏了在流体静压力下滤饼所形成的拱桥结构，使得孔隙水进一步流动，改变了内部液体的流动性，同时也使得部分液体水被排挤出. 高气压穿流脱水对滤饼结构的贡献是在二维剪切压榨后通过高气流的带动使得部分游离水和孔隙水被迫排出滤饼，3 种脱水方式对降低滤饼水分所作出的贡献是不同的，其配合不同，将影响滤饼的最终内部结构和水分.

在 0.6 MPa 流体静压力作用后，对隔膜压榨脱水和强气压穿流脱水进行了对比实验. 针对大屯选煤厂的浮选精煤进行了实验. 结果见表 5.

表 5 不同加压方式脱水效果对比

Table 5 The comparison of dewatering results in different press mode %

操作条件	1	2	3	4	5	6	平均
隔膜压榨	22.47	23.08	22.24	22.09	23.87	22.11	22.64
强气压穿流脱水	22.05	21.64	22.13	21.86	21.42	21.63	21.78
先压榨后穿流	21.23	20.56	20.18	20.64	20.06	21.14	20.63
先穿流后压榨	20.48	19.96	19.62	19.73	19.42	20.18	19.89

只采用单一隔膜压榨脱水，滤饼的平均水分为 22.64%，当只采用强气压穿流脱水时，滤饼的平均水分为 21.78%；先隔膜压榨脱水，然后进行强气压穿流脱水，滤饼的平均水分为 20.63%；先强气压穿流脱水，滤饼的平均水分为 19.89%. 通过实验我们可以得出结论：强气压穿流脱水优于隔膜压榨脱水、先强气压穿流脱水后隔膜压榨脱水，效果优于先隔膜压榨后强气压穿流脱水. 这点也从上面各微观结构的扫描电镜看得出结果. 其原因是高压流体静压力在滤腔中形成了滤饼，滤饼中形成了自然流体活动通道. 滤饼含有一定水分是因为固体颗粒表面被润湿流体液膜所覆盖. 如果此时不破坏滤饼结构形状，则此时剩余水分沿滤饼内部的流体阻力较小，在有限的时间内能及时排出，有利于脱除水分. 如果先压榨破坏滤饼的结构，使得原来的流体流动通道被堵塞，压缩空气驱逐液体时流动阻力大，不易及时排出，导致水分下降幅度小.

4 结 论

1) 当入料粒度由 0.045 mm 逐渐增加到 0.5 mm 过程中，滤饼的孔隙率由 3.87%逐渐增加到 15.46%，同时孔隙平均面积则由 2.14 μm^2 增加到 8.24 μm^2. 说明滤饼孔隙率、孔隙平均面积及最大面积与其粒度组成密切相关. 滤饼物料粒度越细，滤饼孔隙率越小，粗粒度物料比细粒度物料具有更大的孔隙面积和孔隙率.

2) 扫描电镜和自动图形处理技术用来分析微

细粒煤滤饼的内部结构组成是一种行之有效的方法.物料的物理性质和处理工艺都明显地影响了滤饼的最终水分,通过扫描电镜分析,进一步量化了过滤过程,为进一步研究过滤理论提供了基础.

参考文献:

[1] 杨俊利.几种煤炭脱水设备选用方法的探讨[J].过滤与分离,2002(2):26-29.
YANG Jun-li. The discussion to the selection of some coal dewatering equipments [J]. Filtration and Separation, 2002(2):26-29.

[2] 戚家伟,朱书全,解维伟,等.极细粒煤选择性双向絮凝脱硫降灰实验研究[J].中国矿业大学学报,2005,34(2):156-159.
QI Jia-wei, ZHU Shu-quan, XIE Wei-wei, et al. Desulphurization and deashing of ultrafine coal using selective bilateral flocculation [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005,34(2):156-159.

[3] 丁启圣.新型实用过滤技术[M].北京:冶金工业出版社,2000:1-5.

[4] 谢广元.过滤理论与精煤压滤脱水工艺研究[D].徐州:中国矿业大学化工学院,1997:32-35.

[5] STUTTGART C A. Filtration theory, its present stand and its importance for practical use [J]. Aufbereitungs Technik, 1980(4):25-29.

[6] 单忠健.精煤脱水与煤泥水净化的心途径[A].第六届全国选煤和水煤浆学术会议论文集[C].北京:煤炭工业出版社,1994:156-157.

[7] VIGNESWERAN S. Mathematical modeling of the tran-sient behavior of deep-bed filtration[J]. Water Resources, 1988,22(9):1093-1010.

[8] DARGY J L. Ripening in depth filtration: effect of particle size on removal and head loss[J]. Envir. Sci. & Technol, 1990,24(7):106-107.

(责任编辑　骆振福)