

文章编号: 1007-6492(1999)01-0053-03

# 煤浆电脱水过程的物理模型

王 毅

(郑州工业大学数理力学系, 河南 郑州 450002)

**摘 要:** 对煤浆电脱水过程的特点进行分析, 并以“电渗水迁移只对一定电流密度(电场强度)条件下的可动水分起作用”的假定为基础, 分别建立了恒电流和恒电压脱水的物理模型. 结果表明: 该工艺形式结合分段加电方式用于煤浆的脱水是可行的.

**关键词:** 煤浆; 电脱水; 物理模型

**中图分类号:** O 648.25 **文献标识码:** A

## 0 引言

煤浆的电脱水过程具有明显的两阶段性: 第一阶段脱水过程特征与经典的电渗理论相一致; 第二阶段的主要特征是脱除单位体积水分的电耗指标急剧增大.

按照电渗速度计算, 第一阶段脱水结束时已完成传统意义上的电渗脱水, 第二阶段则完全靠第一阶段结束时剩余的细孔隙水和表面水(第一阶段的平衡水分)导电, 脱除的可能是部分表面水(细孔隙水与表面水之间没有明显界限, 一定电场强度下不能脱除的细孔隙水也可看成是表面水). 电场作用下固体粒子表面的电荷和偶极子是整齐排列的, 当表面水传导的电流强度达到一定值时, 使它们产生微观“旋转”运动, 有可能导致表面水的(排列或缔合)结构重排, 从而“释放”部分或全部表面水, 这些从表面释放到大孔隙中的水分子就可在机械力或较低的电场强度下被脱除.

电脱水过程遵从能量最小原则, 优先脱除的顺序依次是自由水(重力水或体积水)、孔隙水(毛细水)和表面水<sup>[1]</sup>. 与自由水和大孔隙水相比, 表面水的脱除必须首先使之从表面“释放”到大孔隙, 这个过程需要多耗一部分能量, 因而第二阶段脱水的能耗也就非常大, 与第一阶段相比已失去意义. 第一阶段脱水应当是传统电渗与表面水“释放”的叠加结果, 而第二阶段脱水则是完全靠表面水的“释放”, 但这些微观脱水机理还需要采用电镜技术进一步分析验证.

## 1 煤浆电脱水过程物理模型的简化条件

根据引言中对煤浆电脱水过程的分析描述, 可将煤浆电脱水过程进行如下简化:

(1) 煤粒为刚性, 煤浆在重力或其它机械力作用下完全浓缩后(体积水分 $\leq$ 床层孔隙率), 其可压缩性可以忽略, 重力和挤压对脱水不再起作用;

(2) 假定煤粒不随滤液流出而全部留在床层内, 床层的孔隙分布均匀且保持恒定;

(3) 忽略电极反应和温度等时孔隙水电导率和粘度的影响;

(4) 在一定的电场强度或电流密度作用下, 给定煤浆床层的电脱水有一相应的状态, 即总水分由该电场强度或电流密度下的平衡(固定)水分和自由(可动)水分两部分所组成, 而电脱水(整个过程)只对自由水分起作用<sup>[2]</sup>;

(5) 在脱水过程中, 煤浆床分为上部已脱水区和下部未脱水区两个床层.

已脱水区: 所有的电渗滤液都是从该区流出的, 水分和电导率分别为相应电场强度或电流密度下的平衡水分和平衡电导率;

未脱水区: 该区水分和电导率与电渗前的初始值相同, 电渗迁移速度服从 Henry 公式<sup>[3]</sup>, 并假定有效电渗系数在脱水过程中的变化可以忽略.

## 2 煤浆恒电流脱水模型

第二阶段脱水的能耗较大, 与第一阶段相比

收稿日期: 1998-08-29; 修订日期: 1998-11-25

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(984050100)

作者简介: 王 毅(1965-), 男, 河南省焦作市人, 郑州工业大学讲师, 博士研究生, 主要从事煤碳加工方面的研究.

已失去实用意义,模型只考虑脱水的第一阶段.

根据 Henry 公式和 Ohm 定律,电渗水的迁移速度为

$$U_E = \frac{\alpha_E V}{H} = \frac{\alpha_E I_0}{\lambda_0}, \quad (1)$$

式中: $V$ ——未脱水床层两端电压(V);

$H$ —— $t$ 时刻未脱水床层高度(m);

$I_0$ ——恒电流密度(A/m<sup>2</sup>);

$\lambda_0$ ——煤浆初始电导率(S/m);

$\alpha_E$ ——有效电渗系数(m<sup>2</sup>/V·s).

试验条件一定时, $\alpha_E$ 、 $I_0$ 和 $\lambda_0$ 就成为常数,即恒电流条件下的电渗水迁移速度为恒定值,与脱水时间无关.

未脱水层高度随时间的变化值为

$$H_t = H_0 - U_E t = H_0 - \frac{\alpha_E I_0}{\lambda_0} t, \quad (2)$$

式中: $H_0$ ——煤浆床层初始高度(m).

令 $H=0$ ,第一阶段脱水结束所需时间 $t_e$ 为

$$t_e = \frac{H_0 \lambda_0}{\alpha_E I_0}. \quad (3)$$

由于电渗只对可动水分起作用,则电渗流量(脱水速率)可表示成

$$q_E = A(\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}) U_E = A(\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}) \alpha_E \frac{I_0}{\lambda_0}. \quad (4)$$

式中: $q_E$ ——电渗流量或脱水速率(m<sup>3</sup>/s);

$\epsilon_{W0}$ ——煤浆床的初始体积水分(体积分数);

$\epsilon_{We}$ ——给定电流密度或电压条件下的平衡体积水分(体积分数).

上式说明,恒电流脱水速率与脱水时间无关.

对式(4)积分,可得 $t$ 时刻已脱除的水体积

$$Q = \int_0^t q_E dt = A(\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}) \alpha_E \frac{I_0}{\lambda_0} t, \quad (5)$$

式中: $Q$ ——已脱水体积(m<sup>3</sup>).

根据物料平衡,煤浆床中减少的水体积应等于已脱出的水体积

$$A(H_0 - H)(\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}) = A(\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}) \alpha_E \frac{I_0}{\lambda_0} t, \quad (6)$$

由此式解出的 $H$ 与式(2)相吻合,说明电脱水只对可动水分起作用的假定满足物料平衡条件.

根据 Ohm 定律,总电压可表示为

$$V_t = I_0 \left[ \frac{H_0 - H}{\lambda} + \frac{H}{\lambda_0} \right], \quad (7)$$

式中: $\lambda$ 为给定电流密度或电压条件下煤浆床的平衡电导率(S/m).

将式(7)与式(2)结合整理后可得总电压与脱水时间的关系为

$$V_t = \frac{I_0}{\lambda_0} \left[ H_0 + \frac{\alpha_E I_0}{\lambda_0} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \right], \quad (8)$$

则脱水至 $t$ 时刻的总电耗为

$$W = \int_0^t A I_0 V_t dt = \frac{A I_0^2}{\lambda_0} \left[ H_0 t + \frac{\alpha_E I_0}{2 \lambda_0} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) t^2 \right], \quad (9)$$

式中: $W$ ——脱水至 $t$ 时刻的总电耗(W·s);

$A$ ——煤浆床横截面积(电极有效面积)(m<sup>2</sup>).

据式(5)和式(9),可得恒电流条件下脱出单位体积水分的平均能耗指标为

$$N = \frac{W}{Q} = \frac{1}{\epsilon_{W0} - \epsilon_{We}} \left[ \frac{H_0 I_0}{\alpha_E} + \frac{I_0^2}{2 \lambda_0} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \right], \quad (10)$$

式中: $N$ ——至 $t$ 时刻脱出单位体积水分的平均能耗指标(W·s/m).

上式的物理意义为:恒电流脱水的能耗指标随着脱水的进行而增大;电流密度越大,脱水能耗也就越高,与电流密度成二次方关系.

### 3 煤浆恒电压脱水模型

同样只需考虑恒电压脱水的第一阶段.煤浆床的已脱水区与未脱水区在电路中为串联关系.

$$I_t = \frac{V_0 - V}{H_0 - H} \lambda = \frac{V}{H} \lambda_0, \quad (11)$$

式中: $I_t$ 为恒电压脱水时 $t$ 时刻的电流密度(A/m<sup>2</sup>).

$$V = \frac{V_0}{1 + \frac{\lambda_0}{\lambda} \left( \frac{H_0}{H} - 1 \right)}, \quad (12)$$

上式引入 Henry 公式可得

$$V_E = \alpha_E \frac{V}{H} = \frac{\alpha_E V_0}{H + \frac{\lambda_0}{\lambda} (H_0 - H)}, \quad (13)$$

由式(13)与式(2)可得

$$\frac{V_0}{H} + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \int_0^t U_E dt = \frac{\alpha_E V_0}{U_E}, \quad (14)$$

将式(14)两边同时微分并整理可得

$$-\frac{dU_E}{U_E^3} = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) \frac{dt}{\alpha_E V_0}, \quad (15)$$

将上式两边积分并利用初始条件

$$t = 0 \text{ 时 } U_E = \frac{\alpha_E V_0}{H_0},$$

整理后可得电渗速度随脱水时间变化的关系

$$U_E = \frac{\alpha_E V_0}{\sqrt{2 \alpha_E V_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) + H_0^2}}, \quad (16)$$

将式 (16) 代入到式 (2) 并令  $H=0$ , 可得恒电压脱水过程第一阶段结束时所需的时间

$$\text{脱水 } t_e = \frac{H_0^2}{2 \alpha_E V_0} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} + 1 \right). \quad (17)$$

与恒电流脱水一样, 根据物料平衡条件, 恒电压脱水也是只对可动水分起作用, 则恒电压脱水至  $t$  时刻已脱出的水体积可写成下式:

$$Q = \int_0^t A (\epsilon_{w0} - \epsilon_{we}) U_E dt = A (\epsilon_{w0} - \epsilon_{we}) \int_0^t U_E dt. \quad (18)$$

将式 (16) 代入式 (18) 可得滤液体积  $Q$  与脱水时间  $t$  的关系

$$Q = \frac{A (\epsilon_{w0} - \epsilon_{we})}{\left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \left[ \sqrt{2 \alpha_E V_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) + H_0^2} - H_0 \right], \quad (19)$$

将式 (16) 代入 Henry 公式, 可得  $t$  时刻通过煤浆床的电流密度

$$I_t = \frac{\lambda_0 U_E}{\alpha_E} = \frac{\lambda_0 V_0}{\sqrt{2 \alpha_E V_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) + H_0^2}}. \quad (20)$$

由此可得恒电压脱水至  $t$  时刻的总电耗  $W$

$$W_{\text{此}} = \frac{A V_0 \lambda_0 / \alpha_E}{\left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right)} \left[ \sqrt{2 \alpha_E V_0 \left( \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right) + H_0^2} - H_0 \right], \quad (21)$$

脱出单位体积水分的能耗指标  $N$  为

$$N = \frac{W}{Q} = \frac{U_0 \lambda_0}{\alpha_E (\epsilon_{w0} - \epsilon_{we})}. \quad (22)$$

由上式可知恒电压脱水的能耗指标在给定条件下为一常数, 与脱水时间无关.

4 结束语

对煤浆恒电流脱水和恒电压脱过程特点进行分析并以“电渗水迁移只对一定电流密度(电场强度)条件下的可动水分起作用”的假定为基础, 分别建立了两种操作条件下的煤浆电脱水的物理模型, 并得出如下结论:

(1) 煤浆的恒电流脱水过程可分为两个阶段: 第一阶段的特征是电压、电耗及电耗指标平稳上升, 脱水速率基本恒定; 第二阶段的特征是电压、电耗指标急剧升高, 脱水速率在电流密度较小的情况下表现为逐渐降低并最终停止, 而在电流密度较大的情况下维持不变或稍有升高(然后逐渐降低并停止).

(2) 煤浆的恒电压脱水过程也明显地分为两个阶段: 第一阶段的特征是电流密度下降较快, 脱水速率保持一段时间的恒定之后缓慢降低, 电耗指标逐渐减小; 第二阶段的特征是电流密度降低缓慢并最终趋于恒定, 脱水速率急剧降至很小并最终趋于零, 电耗指标直线上升.

参考文献

- [1] ROBINSON J. Use of dilatometric and drying techniques for assessing sludge dewatering characteristics [J]. Wat Environ Res, 1992, 62(1): 372-374.
- [2] WEBER M E. A model for electroosmotic dewatering under constant voltage [J]. Drying Technol, 1987, 5(3): 467-474.
- [3] YOSHIDA H. A theoretical analysis of the electroosmotic dewatering of sludge [J]. Internat Chem Eng, 1988, 28(3): 477-485.

Physical Models for Electric Dewatering of Coal Slurry

WANG Yi

(Department of Mathematics, Physics and Mechanics, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** :The physical models of electric dewatering of coal slurry were established in the paper, based on the analysis of dewatering processes under the conditions of constant voltage and constant current, and the hypothesis that only the mobile portion of water in slurries can be removed by electroosmosis under certain current density condition. The results show that this process is feasible for the dewatering of fine coal slurry.

**Key words** coal slurry; electric dewatering; physical model