

# 煤溶胀动力学与热力学的研究

张晓娟<sup>1</sup>, 盛清涛<sup>1</sup>, 申峻<sup>1</sup>, 凌开成<sup>2</sup>

(1. 太原理工大学 化学化工学院, 山西 太原 030024;

2. 山西广播电视大学, 山西 太原 030027)

**摘要:** 以煤溶胀机理、氢键等为基础, 从热力学和动力学方面综述了煤溶胀的本质, 讨论了溶剂性质、氧化、温度、煤粉粒度及热处理对溶胀动力学的影响。结果表明: 溶胀过程中, 表观活化能和速率常数不仅与溶剂分子的空间属性有关, 还受溶剂分子形状的影响; 混合溶剂的协同效应极大地提升了溶胀速率, 增大了表观活化能; 抽提煤的干燥条件不同及煤经过氧化后, 溶胀机理均会发生明显改变。最后详细介绍了煤溶胀技术对煤分子结构的影响及在煤液化方面的应用。

**关键词:** 煤; 溶胀; 热力学; 动力学; 影响因素

中图分类号: TQ531; TD849

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2013)05-0077-05

## Kinetics and thermodynamics of coal swelling

ZHANG Xiaojuan<sup>1</sup>, SHENG Qingtao<sup>1</sup>, SHEN Jun<sup>1</sup>, LING Kaicheng<sup>2</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Radio and TV University, Taiyuan 030027, China)

**Abstract:** Based on the mechanism of coal swelling and hydrogen bond within the coal, introduce the nature of coal swelling from the aspects of kinetics and thermodynamics. Investigate the influence of solvents properties, oxidation, temperature, particle size and heat treatment on swelling kinetics. The results show that during the swelling process, apparent activation energy and rate constant are influenced by the steric properties and shape of solvent molecular. The synergistic effect of mixed solvent increase the swelling rate and apparent activation energy. Drying condition of extracted coal and oxidation of raw coal can transform swelling mechanism greatly. Introduce the application of coal swelling technology in coal molecular structure and coal liquefaction process study.

**Key words:** coal; swelling; thermodynamics; kinetics; influencing factors

煤结构的研究是煤化学研究领域的主要内容之一, 是煤利用与煤加工方法开发的基础。长期以来煤结构的研究没有形成系统的理论体系, 但它对煤反应机理、煤液化等方面的研究有促进作用。煤

溶胀行为的研究是煤结构研究的重要方法。煤溶胀后, 结构发生变化从而改变了煤分子反应性能。本文主要从煤溶胀的热力学和动力学机理出发, 研究溶胀过程中动力学的影响因素。

收稿日期: 2013-08-22 责任编辑: 宫在芹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21076137); 山西省回国留学人员基金(2012-037); 山西省高校优秀青年学术带头人资助项目(TYAL2011)

作者简介: 张晓娟(1988—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事低阶煤分子结构的研究, E-mail: wtzhxj@163.com。通讯作者: 申峻。

引用格式: 张晓娟, 盛清涛, 申峻, 等. 煤溶胀动力学与热力学的研究[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(5): 77-81, 91.

## 1 溶胀机理

溶胀是高分子物理中的概念,它描述了交联聚合物在溶剂中不溶解而溶胀的现象。近几年,煤结构的研究对这一概念及其相应的研究方法多有借鉴。这对煤分子间作用力及溶剂间作用力的研究起到推动作用。

煤溶胀是基于煤的两相结构模型而建立的一种用于研究煤分子结构的方法。其作用机理是在亲电、亲核试剂的作用下,打破煤分子中网络结构与小分子相间的氢键,脱除分子内氢键的束缚,使煤中较弱的非共价键断裂,降低了煤结构的交联密度,使交联网络结构充分伸展,从而使煤的体积增大。与此同时,溶剂脱除过程中煤内部大分子结构发生重排,溶胀煤的自由能降低<sup>[1-2]</sup>。

## 2 煤中非共键作用力——氢键

一般认为,煤具有复杂的网状结构,它由氢化芳香核和缩聚芳香核这2个大分子结构单元组成,该大分子的交联键包括共价键和非共价键。其中共价键主要是乙基、甲基及其他醚键;非共价键主要是离子力、电荷转移力、范德华力、氢键、 $\pi-\pi$ 相互作用力。明确地将共价键与 $\pi-\pi$ 相互作用力分离比较困难,但氢键与其他相互作用力的分离已经实现。氢键在煤结构及溶胀过程中发挥了重要作用。

氢键是构成煤大分子的主要非共价键,而羟基是形成氢键的主要官能团,它与不同的氢键受体形成不同类型的氢键。Larsen<sup>[3]</sup>研究发现,以氢键为代表的非共价键作用力是共价键交联力的4倍,且烟煤的脆性及类似岩石的性质均与煤中的氢键息息相关。通常认为,煤中存在6种类型的氢键<sup>[4-5]</sup>,如:  $\text{OH}\cdots\pi$ ,  $\text{OH}\cdots\text{N}$ ,  $\text{OH}\cdots\text{OH}$ ,  $\text{OH}\cdots$ 醚氧,  $\text{COOH}\cdots\text{COOH}$ 及环状氢键,它们均属弱氢键作用。对于高阶煤,随着煤化程度的增加,煤中芳香片层的芳香度增大,芳香环平面上的电子云与羟基通过电荷转移的方式发生相互作用,形成了 $\text{OH}\cdots\pi$ 类型的氢键。有学者采用真空红外光谱对兖州4种煤进行研究<sup>[6]</sup>,但未能观察到 $\text{OH}\cdots$ 醚氧类型的氢键缔合,这可能是由于空间位阻阻碍了羟基与醚氧间形成氢键。陈莞等<sup>[7]</sup>采用真空红外光谱技术分别对4个不同煤样及其溶剂抽提产物中形成氢键的羟基的不同缔合类型进行研究,并利用原位热解红外技术对这些氢键的热稳定性进行测定。发现:在这些煤

样中存在5种不同缔合类型的羟基,且它们的热稳定性顺序为:  $\text{OH}\cdots$ 醚氧  $>$   $\text{OH}$  自缔合  $\approx$  环状四聚体  $\text{OH} > \text{OH}\cdots\text{N} > \text{OH}\cdots\pi$ 。

## 3 溶胀热力学

聚合物的溶胀理论早有报道,煤与聚合物具有相似之处<sup>[8]</sup>。在煤溶胀体系中,吉布斯自由能的变化受两方面因素的影响<sup>[9]</sup>:一方面是煤分子网状结构黏弹性变化的影响;另一方面是煤与溶剂混合后自由能变化的影响。因此,该体系中,吉布斯自由能的变化( $\Delta G \leq 0$ )可表示为

$$\Delta G = \Delta G_{\text{mix}} + \Delta G_{\text{el}} \quad (1)$$

当煤溶胀达到平衡时,体系的吉布斯自由能存在最小值。在温度和压强一定时,平衡溶胀体系中有如下关系式:

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial n_s}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta G_{\text{mix}}}{\partial n_s}\right)_{T,P} + \left(\frac{\partial \Delta G_{\text{el}}}{\partial n_s}\right)_{T,P} \quad (2)$$

公式(2)直观地从热力学角度将影响煤溶胀平衡的2个过程区分开来。通常可以利用混合吉布斯自由能的变化间接描述溶胀后煤大分子弹性性质的变化。

由于煤是具有网状结构的大分子,因此在溶胀过程中煤与溶剂作用后混合焓的变化值是指煤分子内部结构分解的焓变、溶剂分子间的作用焓变及煤与溶剂分子形成新键的焓变这三者的和。通常溶胀过程是吸热的<sup>[9]</sup>,固混合焓变值是正值。由于分子的排列总是趋于混乱,因此 $\Delta S_{\text{mix}}$ 是增加的,即 $\Delta S_{\text{mix}} > 0$ 。根据化学热力学公式:  $\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}}$ <sup>[9]</sup>,可知混合吉布斯自由能为负值。在非特殊溶剂的溶胀反应理论中,达到动力学平衡时,欲使弹性自由能的改变为正效应,则混合自由能的改变必定发生负偏移。事实上,混合焓的变化是推进煤溶胀进程的关键因素。

## 4 溶胀动力学

### 4.1 溶胀动力学研究方法

与高聚物相似,煤的溶胀过程可分为3个阶段<sup>[8]</sup>,从溶胀开始到溶胀平衡的过程称为溶胀动力学过程。在一定程度上,它反映了煤交联聚合物分子链段运动的能力。

对于溶胀动力学的研究,通常采用 Suuberg 等<sup>[10]</sup>的方法

$$\frac{M}{M_{\infty}} = \frac{q-1}{q_{\infty}-1} = Kt^n \quad (3)$$

式中  $K$  为与溶胀速率有关的常数;  $M$  为溶剂的吸收量;  $M_{\infty}$  为溶胀平衡时溶剂的吸收量;  $n$  为溶胀过程性质的数, 单位与  $n$  有关,  $K^{1/n}$ ;  $q$  为溶胀度;  $q_{\infty}$  为平衡溶胀度;  $t$  为试验温度, K。

对式(3)两边取自然对数值得到式(4)

$$\ln [(q-1)/(q_{\infty}-1)] = \ln k + n \ln t \quad (4)$$

由  $\ln [(q-1)/(q_{\infty}-1)]$  对  $\ln t$  作图,  $n$  值可由直线斜率得到。

#### 4.2 溶胀动力学研究机理

溶胀动力学研究决定煤网状结构对溶剂的吸收机理, 同时有助于研究煤大分子与溶剂的相互作用。扩散指数  $n$  反映了煤在溶剂中的扩散机理及溶胀过程的本质<sup>[11-12]</sup>。通常溶剂吸收可通过 Fickian 扩散、异常扩散、Case - II 扩散和超 Case - II 扩散实现。Fickian 扩散是由煤颗粒内外的浓度梯度引起的, 该扩散受黏弹性压力等因素影响; 而 Case 扩散是由溶剂分子疏松程度控制的。

已有文献利用溶胀技术研究了溶剂向煤中扩散的动力学<sup>[11, 13-19]</sup>。这些研究表明, 溶胀过程的本质是松弛控制与 Fickian 扩散控制间的相互转化。Milligan 等<sup>[20]</sup>分别研究了原煤、原煤显微组分、残余煤及残余煤显微组分在吡啶中的动力学过程。发现原煤及其显微组分的溶胀是异常扩散或 Fickian 扩散, 而残余煤及其显微组分机理倾向于松弛控制。Daniel 等<sup>[21]</sup>利用正交显微图像分析法评估了单煤粒子的溶胀行为, 发现尽管该过程主要遵循 Case - II 扩散与超 Case - II 扩散, 但仍有少量 Fickian 和异常扩散存在于这 2 种煤中。

#### 4.3 溶胀动力学的影响因素

##### 4.3.1 溶剂性质的影响

1) 溶剂空间效应的影响。溶剂分子大小对于溶胀度的改变、溶胀动力学的研究及煤结构的变化有重要影响, 但是它并不改变溶剂的扩散机理。

Brenner<sup>[22]</sup>发现胺分子与煤网状结构溶胀作用后, 煤分子经历了由玻璃态向橡胶态的转变过程。这主要是由于胺破坏了煤结构间的氢键。Ndaji 等<sup>[14]</sup>研究表明: 在 20 ~ 70 °C 的温度范围内, 高挥发性烟煤和直链胺类的溶胀体系中, 溶胀度随着溶剂分子体积的增大而增加, 但当溶剂分子的体积达到一定临界值后溶胀度反而下降, 且溶胀速率常数随溶剂分子体积的增大而减小。这是由于溶剂与煤相互作用时, 氢键断裂, 交联密度降低, 使溶剂分子更易进入煤的微孔结构, 煤内部分子链重新定向排列, 在这个过程中表观活化能和活化能垒均随溶

剂分子体积的增大而减小。

溶胀过程中, 表观活化能的大小不仅与溶剂分子的空间属性有关, 还受溶剂分子形状的影响。Otake 等<sup>[17]</sup>观测到 NMP 分子的形状为三角形, 而 EDA 分子的形状接近于圆柱形, 且 EDA 分子的尺寸小于 NMP 分子。这 2 种因素决定了 EDA 分子更易渗入煤分子结构发生溶胀作用。

##### 2) 溶剂碱性的影响

溶剂的碱性反映了溶剂的供氢能力。Hall 等<sup>[23]</sup>研究发现煤的溶胀度与溶剂  $pK_b$  间有一定相关性。当不考虑溶剂的空间效应时, 随着溶剂碱性的增大, 煤溶胀度增大, 氢键与溶剂的反应性增强。

Ndaji 等<sup>[13]</sup>研究了煤阶为 502 的原煤和吡啶抽余煤的溶胀动力学过程。研究表明: 原煤、抽余煤分别与具有相同空间效应却有不同碱性的吡啶、2-氯吡啶和 2-氟吡啶作用, 2 种煤最初 10% 的溶胀均遵循一级动力学规律。随着溶剂碱性的增加, 原煤的溶胀速率常数和表观活化能均增大。但吡啶抽余煤溶胀度和动力学参数并无明显变化。这可能是由原煤和吡啶抽余煤网状大分子间的结构差异引起的。因此, 溶剂的碱性对煤溶胀度和扩散机理有重要影响。

##### 3) 溶剂抽提的影响

Larsen 等<sup>[3]</sup>运用溶胀技术研究了煤的网状结构, 发现用吡啶抽提处理后的煤的溶胀度远远大于未经处理的原煤, 且吡啶抽提处理后的煤的表观活化能呈下降趋势。这主要是由于吡啶在抽提过程中破坏了煤中氢键。但是 Otake 等<sup>[17]</sup>也同样研究了褐煤和吡啶抽提处理后的褐煤的溶胀及其动力学过程。结果显示抽提后的煤在吡啶中的溶胀速率明显增大, 但表观活化能并未发生变化, 且抽提过程影响了  $n$  值, 进而改变了溶胀机理。这 2 种结果严重不符, 可能是由于对吡啶抽提处理后的煤样干燥处理方法不同造成的。因为活化能垒主要指破坏煤中电子受体-供体间作用力所需要的能量。仅仅通过抽提并不能改变活化能垒, 也不能使煤达到最小能量的网状稳定结构。对抽提后的煤干燥条件越严格, 煤结构越松弛, 越接近抽提前原煤的结构, 该结构中才会仍然存在受体-供体间作用力。2 种结果表明抽提煤的干燥过程对动力学研究起着至关重要的作用。

##### 4) 混合溶剂的影响

Daniel 等<sup>[24]</sup>研究了具有相同煤阶但不同煤质组分的 2 种煤在溶剂 NMP 及混合溶剂  $CS_2$ /NMP 中

的溶胀过程,发现2种煤在混合溶剂中的溶胀率大于在单一溶剂中。Lei Chen等<sup>[25]</sup>也发现了相同的结果。这是因为在混合体系中 $\text{CS}_2$ 起催化作用,降低了活化能垒,从而加快了溶胀速率。Pande等<sup>[12]</sup>研究了同一煤种分别在单一溶剂NMP、EDN及体积比为1:1的NMP/EDN混合溶剂中的溶胀。发现煤在混合溶剂中的溶胀率远大于在单一溶剂中,即煤内部分子结构在混合溶剂中更易发生改变。在这3种溶胀体系中,扩散指数 $n$ 值都较小,从某种程度上反映了溶胀动力学遵循Fickian扩散。从 $n$ 值的大小可以看出,煤结构由玻璃态向橡胶态快速转换,在煤粒子中形成浓度梯度,这种松散的结构有利于溶剂向煤中渗透。在煤与混合溶剂NMP/EDN的溶胀体系中,溶剂NMP使体系形成一定的浓度梯度,减小了EDN的活化能垒,利于溶胀的进行。煤在该混合溶剂中的表观活化能高于在任何一种单一溶剂NMP或EDN中的表观活化能,这是因为混合溶剂具有更强的能力来破坏更强的非共价键作用力,从而使溶胀体系具有更高的溶胀度和表观活化能。

#### 4.3.2 煤阶的影响

煤中共价交联键及官能团的变化在很大程度上影响了溶胀度大小,而煤中这些参数均与煤阶有密切联系。煤阶不同所含的煤分子间作用力强度和类型就不同,在溶剂中的吸附性能和溶胀行为也不同<sup>[26]</sup>。有研究表明对于低阶煤,遵循松弛控制机理<sup>[18]</sup>。Ndaji等<sup>[15]</sup>研究了5种不同煤阶(501~902)的煤与吡啶作用的溶胀过程。结果显示这些煤的溶胀度几乎没有改变,但表观活化能随煤阶的增加而增大,主要是由于在溶胀过程中,吡啶破坏了氢键,导致扩散系数的改变。

#### 4.3.3 温度的影响

室温下,煤溶胀遵循Case-II速率定律,这是松弛控制机理的一种。随着温度的升高,向Fickian扩散控制转变<sup>[27]</sup>。温度对煤溶胀速率的影响较大,所以提高温度有利于溶胀的进行。

常鸿雁等<sup>[28]</sup>研究了不同温度下新庄煤、神华煤在溶剂中的溶胀。研究发现:升高温度有利于煤样达到溶胀平衡。章结兵等<sup>[8]</sup>研究表明神府煤在20~60℃时溶胀度变化不是很大,但是当温度进一步升高时,溶胀度相应提高,温度变为80℃时,神府煤的溶胀度达到最大值,当温度进一步升高,溶胀度又呈下降趋势。这主要是因为温度的升高加快了溶剂与煤中非共价键的作用,使溶胀度增大,而

温度过高会破坏煤分子结构。

#### 4.3.4 煤的热处理的影响

王知彩等<sup>[29]</sup>对比了水热处理前后神华煤的溶胀过程,发现水热处理煤的溶胀度降低,这可能是由于较高温度下水热处理煤会向煤结构中引入一定量的羟基,使煤中产生新的非共价键作用。当温度上升至300℃或更高时,煤将发生热分解且溶胀过程急剧减缓,溶胀度急剧下降。这主要是因为高温热处理时热解自由基复合作用使分子间产生了新的共价交联键。

#### 4.3.5 煤粉粒度的影响

尽管已经发现煤粒径越小,扩散机理越接近Fickian扩散<sup>[21]</sup>,但研究表明粒径为150~600 $\mu\text{m}$ 的煤颗粒对动力学并无影响。这可能是因为溶胀动力学受煤粒分散的影响,且大孔径更易于溶剂向煤粒子内转移<sup>[18]</sup>。

熊楚安等<sup>[30]</sup>研究了在温度为60℃,煤浆质量分数为20%的不同粒度依兰煤在3种不同溶剂中的溶胀度。研究发现,溶胀度随着煤粉粒度的增加而略微减小。Otake等<sup>[17]</sup>研究了吡啶与粒径为150~600 $\mu\text{m}$ 褐煤的作用,结果表明该尺寸范围的煤粒对动力学和最终溶胀度均无影响。这主要是因为煤粒尺寸对溶胀的影响取决于煤粒分散的特性长度而不是实际粒子的大小。该特性长度指煤中小粒子进入大粒子的孔隙结构中时,这些孔隙间的距离。

#### 4.3.6 氧化的影响

有学者在温度为200℃的条件下,对煤阶为204~902的4种英国煤进行氧化,结果表明:氧化后的煤具有很高的溶胀率,说明煤中共价交联密度下降。氧化后的煤不同于原煤,原煤的溶胀动力学遵循Fickian扩散或松弛控制,但通过光学显微镜看到,氧化后的煤中同时存在这2种动力学机理。另外,红外光谱显示氧化能降低脂肪族与芳香环的比例,增加羟基芳香环含量、煤中羰基官能度,破坏煤中的交联键。

## 5 溶胀煤性质的变化

### 5.1 溶胀技术对煤结构的影响

利用扫描电镜对溶胀前后的胜利煤进行表征<sup>[31]</sup>,发现经过REC和STA溶胀预处理后的煤样的平均孔径较原煤有不同程度的增大,圆柱形孔径增多,球形孔径减少,且溶胀煤平均孔径增加的幅度随温度的升高而增大,比表面积较原煤有所减小,利于

传质过程的进行。

## 5.2 溶胀对液化的影响

溶胀是煤的一种重要的预处理手段。煤在溶胀的预处理过程中受到溶剂极性、供氢能力等因素的影响,物理结构甚至一些化学性质发生了明显变化,如煤内部流动相发生溶解和再分布。流动相是煤中的富氢部分,流动相有利于煤分子自身供氢能力的提高。

溶胀煤的液化实验能够直接反映溶胀处理后的煤在加氢液化方面的性能<sup>[32]</sup>。有学者研究了原煤、甲苯溶胀煤以及吡啶溶胀煤的直接加氢液化性能。发现溶胀处理改变了煤内部大分子结构,降低了骨架网络结构的缔合度,扩张了骨架结构空间,更易与供氢溶剂接触,减少了液化过程中逆反应的发生,使煤加氢液化反应的条件得以改善。

## 6 结 语

煤中相当多的部分是以非共价键结合的。溶胀利用高分子物理学研究法与煤炭化学研究法相结合,加强了对煤的结构和性质的进一步了解。将热力学平衡理论与动力学理论结合用于研究煤大分子交联结构的溶胀过程,加深了对煤溶胀本质的认识,为煤科学与煤工业应用提供了一定的理论基础。

### 参考文献:

- [1] Given P H ,Marzec Anna. The concept of a mobile or molecular phase within the macromolecular network of coals [J]. Fuel ,1986 ,65( 2) : 155 - 163.
- [2] 刘劲松 ,冯杰 ,李凡 ,等. 溶胀作用在煤结构与热解研究中的应用[J]. 煤炭转化 ,1998 ,21( 2) : 1 - 6.
- [3] Larsen J W ,Green T K ,Kovac J. The nature of the macromolecular network structure of bituminous coals [J]. J. Org. Chem. ,1985 ,50( 24) : 4729 - 4735.
- [4] Tian Y J ,Zhang Y L ,Wang B J ,et al. Coal-derived Carbon Nanotubes by Thermal Plasma Jet[J]. Carbon 2004 ,42( 12/13) : 2597 - 2601.
- [5] 赵清艳 ,章日光 ,凌丽霞 ,等. 量子化学计算 CH<sub>4</sub>和 CO<sub>2</sub>在高挥发性烟煤上的吸附[C]//第九届化学工艺年论文集. 北京:中国石化出版社 ,2005.
- [6] 梁美生 ,李春虎 ,谢克昌 ,等. 铁酸锌高温煤气脱硫剂的还原行为的气氛效应及助剂的影响[C]//第九届化学工艺年会论文集. 北京:中国石化出版社 ,2005: 785 - 791.
- [7] 陈苑 ,许学敏 ,高晋生. 煤中氢键类型的研究[J]. 燃料化学学报 ,1998 ,26( 2) : 140 - 144.

- [8] 章结兵 ,葛岭梅 ,周安宁. 神府煤溶胀特性研究[J]. 煤炭转化 ,2006 ,29( 2) : 1 - 3.
- [9] Suuberg E M ,Otake Y ,Langner M J. Coal macromolecular network structure analysis solvent swelling thermodynamics and its implications [J]. Energy and Fuels ,1994 ,8: 1247 - 1262.
- [10] Otake Y ,Suuberg E M. Temperature dependence of solvent swelling and diffusion processes in coals [J]. Energy and Fuels ,1997 ,11( 6) : 1155 - 1164.
- [11] Hall P J ,Thomas K M ,Marsh H. The relation between coal macromolecular structure and solvent diffusion mechanisms [J]. Fuel ,1992 ,71( 11) : 1271 - 1275.
- [12] Pande S ,Sharma D K. Studies of kinetics of diffusion of NMP ,EDA and NMP + EDA mixed solvent system in chinakuri coal by solvent swelling techniques [J]. Energy Fuels 2001 ,15( 5) : 1063 - 1068.
- [13] Ndaji F E ,Thomas K M. Effect of solvent basicity on the kinetics of solvent swelling of coal [J]. Fuel ,1993 ,72( 11) : 1531 - 1535.
- [14] Ndaji F E ,Thomas K M. Effect of solvent steric properties on the equilibrium swelling and kinetics of solvent swelling of coal [J]. Fuel ,1995 ,74( 6) : 842 - 845.
- [15] Ndaji F E ,Thomas K M. The kinetics of coal solvent swelling using pyridine as solvent [J]. Fuel ,1993 ,72( 11) : 1525 - 1530.
- [16] Otake Y ,Suuberg E M. Determination of the kinetics of diffusion in coals by solvent swelling techniques [J]. Fuel ,1989 ,68( 12) : 1609 - 1612.
- [17] Otake Y ,Suuberg E M. Temperature dependence of solvent swelling and diffusion process in coals [J]. Energy Fuels ,1997 ,11( 6) : 1155 - 1164.
- [18] Otake Y ,Suuberg E M. Solvent swelling rates of low rank coals and implications regarding their structure [J]. Fuel ,1998 ,77( 8) : 901 - 904.
- [19] Ritger P L ,Peppas N A. Transport of penetrants in the macromolecular structure of coals [J]. Fuel ,1987 ,66( 6) : 1379 - 1388.
- [20] Milligan J B ,Thomas K M ,Crelling J C. Solvent swelling of maceral concentrates [J]. Energy Fuels ,1997 ,11( 2) : 364 - 371.
- [21] Gao H ,Artok L ,Kidena K. A novel orthogonal microscope image analysis method for evaluating solvent-swelling behavior of single coal particles [J]. Energy Fuels ,1998 ,12( 5) : 881 - 890.
- [22] Brenner D. Microscopic in-situ studies of the solvent-induced swelling of thin sections of coal [J]. Fuel ,1984 ,63: 1324 - 1328.
- [23] Hall P J ,Marsh H ,Thomas K M. Solvent induced swelling of coals to study macromolecular structure [J]. Fuel ,1988 ,67( 6) : 863 - 866.

(下转第 91 页)

材料及其厚度确定时,应考虑保温、隔热要求。当采用轻型结构时,按照保温、隔热的要求确定保温材料的厚度;建筑设计中凡涉及节能、合理利用能源、保温、隔热有关的技术问题,均进行综合考虑,协调处理<sup>[13]</sup>。

## 6 给排水系统节能措施

给水管管材采用内壁光滑的内外涂塑埋地钢管,选用合理的经济流速,减少管道的水头损失;选用低阻力阀门,在循环水系统中采取防结垢措施,以减少管道局部水头损失,相应可减少水泵供水压力,降低供水能耗;选用高效率低能耗的水泵产品,同时工况点应在水泵性能曲线的高效区;浴室对热水管道系统进行保温,采用高效能保温材料,减少热量损失;使用节水型卫生器具,除节水效果好外,节能效果也比较显著。目前使用节水型器具主要有:减少马桶冲洗水量,全部使用冲水量 $\leq 6$  L的马桶且采用两挡冲洗阀门,办公楼可节水27%。厨房、沐浴、洗涤盆、沐浴水嘴和盥洗室的面盆龙头若采用充气水嘴,可节水且不减小水柱的直径,充气率一般在15%左右,即节水率在15%左右<sup>[14]</sup>。

## 7 结 语

选煤厂在自身能源生产过程中主要消耗电力、水等各种形式的能源,单位产煤量的能源消耗量直接影响煤炭生产的成本和经济效益,通过实施节能管理措施或技术改造方式,降低煤炭生产过程的能耗,提高企业能源利用率是选煤厂节能的最终目的<sup>[15]</sup>。选煤厂在总图、工艺设计、设备选型、供电系统、地面建筑、给排水系统等方面的节能措施合理、可行,有效节约了能源。

.....

(上接第81页)

[24] Daniel V N, Phillip M H. Solvent swelling behavior of Permian-aged South African vitrinite-rich and inertinite-rich coals [J]. Fuel, 2010, 89(1): 19-25.

[25] Lei Chen, Jianli Yang, Muxin Liu. Kinetic modeling of coal swelling in solvent [J]. Ind Eng Chem Res, 2011, 50(5): 2561-2568.

[26] Astashov A V, Belyi A A, Bunin A V. Quasi-equilibrium swelling and structural parameters of coals [J]. Fuel, 2008, 87(15-16): 3455-3461.

[27] Painter P C, Park Y, Coleman M. Thermodynamics of coal solutions [J]. Energy Fuels, 1988, 2(5): 693-702.

## 参考文献:

[1] 张军, 赵梦生. 谢桥煤矿新建选煤厂的设计特色 [J]. 洁净煤技术, 2013, 19(2): 19-21.

[2] 任玉东. 园子沟矿井及选煤厂场址选择及总平面设计浅析 [J]. 科技创新与应用, 2013(25): 141.

[3] 黄健华. 斜沟煤矿选煤厂设计特色及新技术应用 [J]. 山西焦煤科技, 2013(S1): 3-4.

[4] 李以峰. 富城矿业选煤厂工艺设计分析 [J]. 选煤技术, 2013(3): 62-65.

[5] 苑忠明. 特大型选煤厂工艺设计探讨 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(2): 16-21.

[6] 李昌普, 李建业, 樊海龙. 节能降耗措施在马脊梁选煤厂的运用 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18(4): 101-102.

[7] 吴胜. 响水矿选煤厂开展节能减排的措施 [J]. 煤质技术, 2009(4): 58-59.

[8] 任建国. 西铭矿选煤厂的工艺特点及设备选型的优化设计 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2008(6): 27-30.

[9] 关丽敏, 李秀文. 选煤厂供配电节能降耗措施综述 [J]. 河南科技, 2011(16): 61.

[10] 李常武. 谈选煤厂供配电系统的节能降耗 [J]. 价值工程, 2011(12): 30.

[11] 余志福, 周波. 金鸡岩选煤厂胶带输送机走廊照明系统节能改造 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2010(5): 21-22.

[12] 王运锋, 乔红斌, 王秋生. 选煤厂产品仓采暖设计改进与节能效果技术分析 [J]. 煤炭工程, 2009(9): 19-21.

[13] 王秋生. 输煤栈桥节能技术 [J]. 山西煤炭, 2010(8): 82-83.

[14] 郑高超, 王举龙, 张卿. 察哈素选煤厂节能减排措施 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18(6): 103-105.

[15] 孙银辉, 肖志敏. 选煤厂节能减排措施 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2012(4): 65-68.

[28] 常鸿雁, 张德祥, 韩文煜, 等. 不同温度下煤在溶剂中的溶胀行为 [J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(4): 406-409.

[29] 王知彩, 水恒福, 张德祥. 水热处理对神华煤质的影响 [J]. 燃料化学学报, 2006, 34(5): 524-529.

[30] 熊楚安, 李双志. 依兰煤溶胀特性的初步研究 [J]. 洁净煤技术, 2008, 14(1): 78-80.

[31] 熊楚安, 王永刚, 陈伟. 胜利煤的溶胀行为及溶胀煤的特性分析 [J]. 化工进展, 2009, 28(8): 1343-1354.

[32] 马嫚, 曹敏, 谷小虎. 煤直接液化用溶剂的研究现状 [J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 36-38.