

煤的气化特性指标研究

邓绪彪

中国矿业大学（北京）煤炭地下气化研究中心，北京（100083）

摘要：本文通过对煤的气化过程全面系统的考查，找到了影响煤炭气化的主要工业分析指标 FCad% 与 Vad%，并在大量实验数据的基础，建立了煤的气化性能（气化工艺指标，由 FCad% 与 Vad% 的加权构成）与气化能量产率（气化效果指标，为煤气产率与热值的乘积）之间的关系，这对煤炭气化的理论研究与实践都有重要意义。

关键词：气化指标，气化工艺指标，气化能量产率

中图分类号：TQ546

煤的气化一直是煤化学研究的热点问题之一，近年来国内外在这一领域取得了不少重大突破，但如何评价煤的气化性能以及气化效果，却一直没有定论。我们通过对煤的气化反应性与其物理性能之间有一定的关系，如煤焦的反应性一般随原煤的煤化度的升高而降低⁽¹⁾、通常挥发分越高其气化反应性越好等；文献(5)介绍的煤气化指标包括煤气的组成和热值、煤气产率、气化强度、气化剂耗量、燃料损失量、炉渣含碳量（质量分数）、气化效率和热效率等。然而，正如文献(1)所说的，“煤的气化反应机理仍不完全清楚”，“可以用来描述不同煤种或同一煤种不同显微组分气化动力学规律的数学模型尚未建立，最基本的煤气化理论不完备”。通常，对于气化反应，我们评价煤的反应性标准除了转化率之外，还有煤气的组分与产率，不同的生产目的有不同的组分要求，而不同的煤采用不同的气化工

艺会有不同的组分配比，这样就导致了煤的气化性能的一种无标准的状态。本文根据煤气化的特点，通过对一些煤的实验数据分析，在宏观层面上建立起煤的气化效果与煤的一般工业性分析指标之间的关系。

1. 煤的气化与地下气化

煤在气化炉的反应与在地下气化炉内的反应历程基本是相似的，这从炉内反应区的划分和组分分布状况可以看出。根据炉内温度与所进行的反应的不同，将炉从空间上划分为三至四个区，依次是灰渣区（层），氧化区（层），还原区（层），干馏干燥区（层），图1与图2分别是煤炭地下气化与煤气发生炉炉内组分分布。但煤炭地下气化除了在气流方向有分区表现外，在垂直方向以及工作面推进方向也有分区特征。因此，在某种意义上，煤炭地下气化更能反映煤气化的特征。

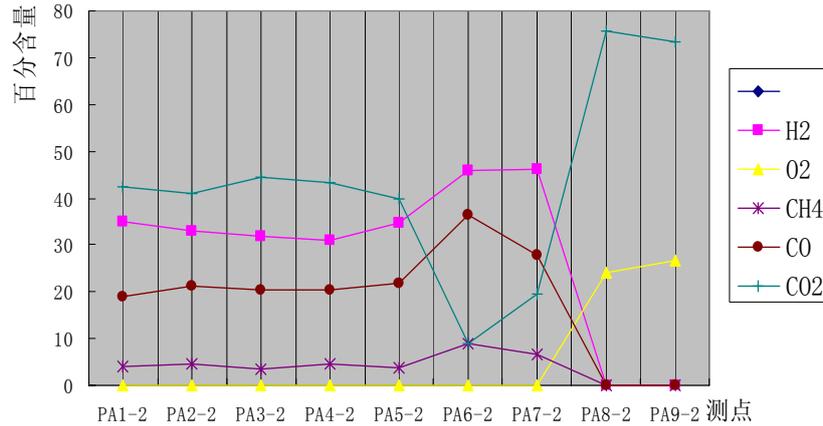


图1 煤炭地下气化炉内组分分布实测
Fig.1 Distribution of gas concentration along UCG tunnel

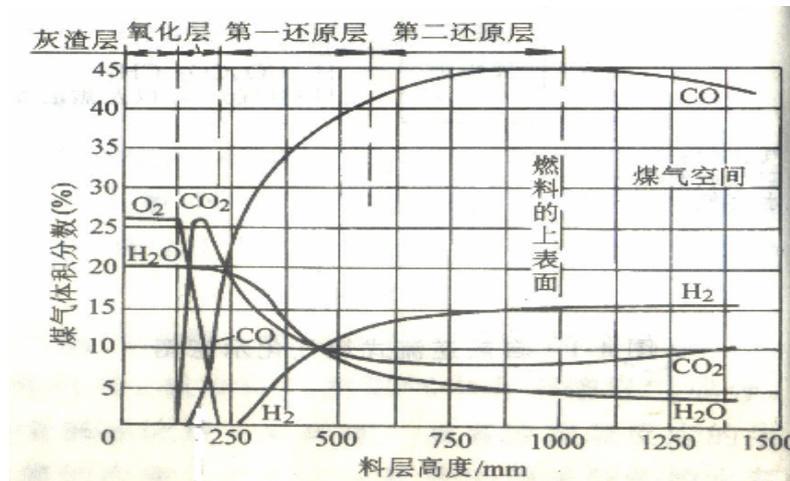


图2 煤气发生炉内组分分布实测 (5)
Fig.2 Distribution of the gas concentration in a gasification bed

在正常的地下气化阶段，O₂随风流进入氧化区使煤燃烧使炉温升高，直至O₂耗尽；燃烧产生的高温气继续向前进入还原区与煤反应生成可燃气体CO及H₂，气化炉温度下降直至不能为还原反应提供足够的能量为止，之后进入干馏干燥区，该区有甲烷和焦油组分析出，如图1所示。随着时间的推移，氧化区逐渐向还原区和干馏干燥区推移。反应区的划分，可以以温度为标志，从化学反应角度来讲，它们没有严格的界限，气化通道任何位置都有可能进行热解、还原

和氧化反应。反应区的划分只说明这三种反应在不同位置的相对强弱程度而已。这样的过程同样存在于煤气发生炉的运行中，只不过在地下气化过程中三个区不断移动，而在煤气发生炉中三个区位置相对固定。另外，它们也都采取了一些增加煤气反应的措施，如富氧——水蒸汽气化，水蒸汽的作用不仅在于在还原区进行气化反应，它还将氧化区的热量充分地带到还原区，并且进行有效的利用。

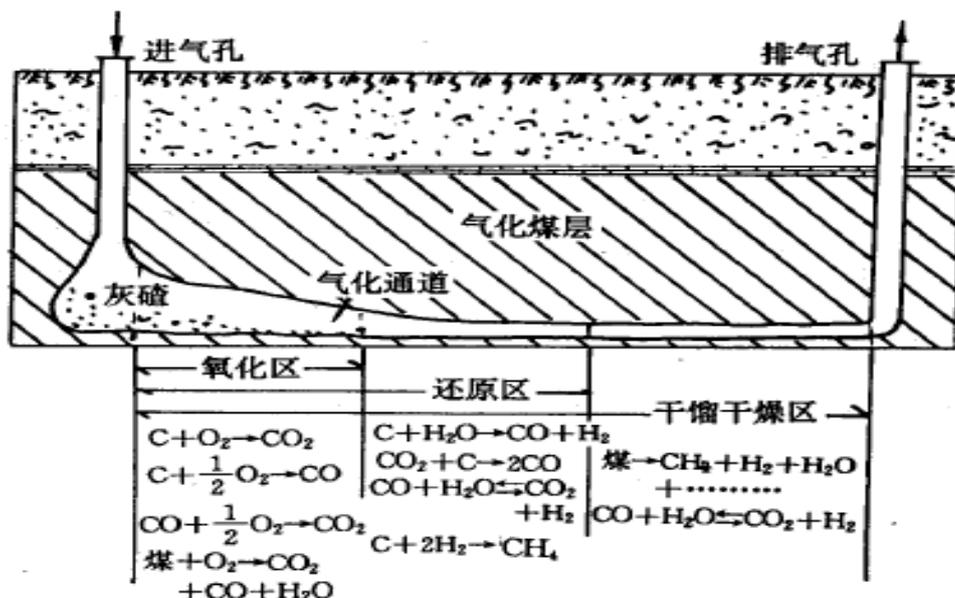


图3 煤炭地下气化原理图
Fig.3 Illustration for the underground-coal-gasification (UCG) process

文献〔4〕将气化过程煤质分子的变化表述如下〔4〕:

(1) 煤质大分子周围的官能团, 以挥发分的形式脱去, 某些交联键断裂, 氢化芳烃裂解并挥发析出, 形成烃类氢质气体。氢化芳烃还可以转化成附加的芳香部分, 芳香部分转化成小的碳微晶, 碳微晶聚积形成煤焦。

(2) 在脱挥发分的过程中, 生成活性的、不稳定的碳, 它们可以与周围气体直接作用而气化, 可以失活而形成煤焦。

(3) 析出的挥发分与气相的 O_2 、 $H_2O(g)$ 、 H_2 等作用生成 CO 、 H_2 和 CH_4 。

(4) 由碳微晶形成的煤焦, 可以气化成煤气, 也可以进一步缩聚成焦炭。

这种关于气化过程中煤质分子变化的研究代表了一般的对煤炭气化研究的方法, 即仅仅关注还原区的气化反应机理, 虽然研究成果颇丰, 形成了各种气化理论, 但“煤的气化反应机理仍不完全清楚”。笔者认为, 这些方法都是一种静止的、孤立的研究方

法, 没有充分考虑煤炭气化真实过程中三个反应区的相互影响和作用。从上述气化的历程来看, 首先是还原区的煤显然已经经历了干馏干燥的过程, 其比表面积和孔隙率以及挥发分等的组成都与原煤不同, 而煤和半焦孔结构的变化对煤焦整个气化过程中传质影响很大〔1〕; 其次, 还原区的反应温度显然受氧化区反应的影响, 煤的燃烧性质决定了还原区的反应温度, 而反应温度是气化的关键因素之一; 第三, 氧化区的煤也显然经历过一系列的还原反应, 从而与原煤在比表面积、孔隙率及孔隙分布等方面都会产生差别, 煤的燃烧性质受其干馏干燥及还原特性的影响。三个区相互影响、相互作用, 甚至于相互制约, 孤立的研究某个部分难免会造成“只见树木, 不见森林”的情况, 这大概也是煤的气化反应机理仍不完全清楚”的原因吧。

2. 煤的指标与气化指标

尽管煤的气化过程十分复杂, 我们还是

可以通过一些实验数据找到一些煤的气化特性评价指标,能够大致满足精度要求不高的工业场合的需求。根据上文的分析,煤的气化特性由煤的燃烧特性、还原特性、干馏干燥特性组成,因此我们不得不将这三个方面综合起来考察。

煤的燃烧特性最重要的指标就是发热量,目前关于煤的燃烧发热量的经验计算公式主要是在工业用煤过程中得出的,文献(2)根据某一特定矿区煤的发热量与其工业分析值之间的相关性较强这一特点,分煤种、分矿区在大量可靠数据的基础上,运用最小二乘法原理,以多元线性拟合的方法,建立了各煤种、各矿区煤的工业分析值分析基灰分、挥发分、全硫、水分(Aad、Vad、St、Ad和Mad)与其分析基弹筒发热量(Qb,ad)之间的数学关系,但其误差远大于文献(3)所使用的方法。从煤的燃烧过程看⁽¹⁾,煤的燃烧特性与Mt、Vad、FCad、Aad等有密切关系,但实际上这几个因素中只有Vad与FCad相关性较小。我们对两者的加权与煤的热值进行了线性拟合,如图4所示,其相关性在0.9以上。

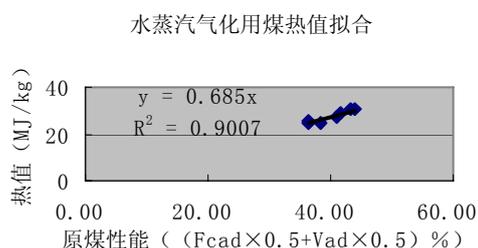


图4 原煤热值与FCad% & Vad%加权的
Fig.4 Changes of the coal heat value with the plus of
FCad% and Vad%

煤的还原反应特性在煤气化研究的焦

点,目前还没有形成一个公认的可以反映煤的气化特性的指标,因而也不存在计算的经验公式。文献(1)介绍了影响煤气化的一些主要因素,包括煤阶、煤的显微组分、灰分、制焦经历、比表面与气化反应性的关系,同时对气化反应的机理研究也进行了介绍,认为在气化过程中,均存在一个形成炭氧表面复合物的阶段,并且碳对空气、氧、水蒸汽和CO₂的反应是平行的。文献(6)用实验测得了煤的气化活性点数,能够很好地反映煤的还原反应特性。但从宏观来看,活性点数的产生受制焦历程及气化表面积与挥发分的影响,这两个因素可以反映在与温度相关的Vad与FCad上。

煤的干馏干燥特性对煤的气化反应性的有重要影响。煤的干馏干燥不但可以产生一定的可燃烃增加煤气的热值,还是造成煤的气化反应表面积增加的重要因素。根据褐煤的热重分析及比表面积研究数据,可以清楚地看到煤的孔隙率及比表面积发生了变化,见图5。褐煤的孔表面积在300-400℃之间有一个突变,大孔、过渡孔的比表面积比之前增加了一倍,而微孔的面积则增加达5倍以上,如图5所示,这表明在该突变温度下,有大量的新孔产生。从文献(1)的介绍来看,各种煤的在500℃左右基本都开始了失重。这表明,在气化的干馏干燥区各煤种都遵循相同的孔表面积变化规律。我们不难得出结论,干馏干燥区生成孔的特性也主要受Vad与FCad的影响。

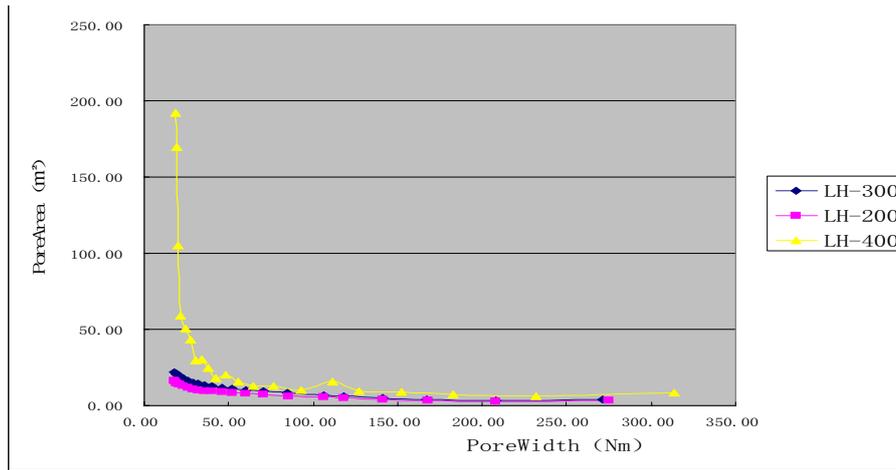


图 5 孔比表面积与孔径关系随温度的变化
Fig.5 Changes of area and diameter of the coal with the temperature

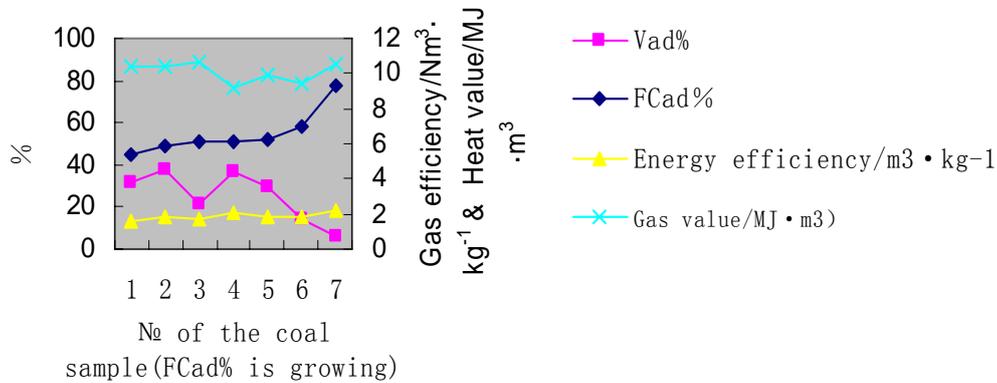


图 6 煤气热值及产率与挥发分及固定碳的变化曲线 (数据来源于文献 (7))
Fig.6 Changes of the heat value, efficiency and Vad% with the FCad%

3. 新的气化特性指标

气化特性指标必须能够反映原煤性质与气化效果之间的关系, 还要能反映各种气化工工艺的差别。根据上文分析不难发现, 挥发分 (Vad%)、固定碳 (FCad%) 能够综合反映煤气化三个阶段的作用及相互关联和影响, 可以作为原煤性质的代表; 煤气产率和热值是我们考察煤气化效果的主要指标, 其它的指标基本上都可以由这两个指标反映出来, 因此这两个指标作为煤气化效果的评价指标。

图 6 是煤气热值及产率与挥发分随固定

碳含量升高的变化曲线。图中的煤阶分别是: 1 号朝阳烟煤、2 号张庄气肥煤、3 号鄂庄 1/3 焦煤、4 号孙村气煤、5 号协庄气煤、6 号鹤壁三矿贫瘦煤、7 号前岭无烟煤。其 FCad% 依次递增, 挥发分在 FCad% 为 51.44% 时开始急剧下降, 而正是这个点煤气的热值最低。这表明在挥发分和固定碳的在气化时相互间会发生阻碍, 这种阻碍在挥发分含量下降到一定程度时就不存在了。另外, 我们通过实验得出褐煤气化的热值高达 $12\text{MJ}/\text{m}^3$ 。因此, 从整体上看, 煤气的热值随煤阶的升高, 先下降后上升, 但褐煤的煤气热值要高于无烟煤的煤气热值, 煤气的产

率却随着固定碳的增加而呈增长趋势，这和各类文献上介绍的规律是一致的。

从图 6 可以看出，煤质因素与煤气质量指标之间并没有很好的关联性。经过分析我们发现，原煤的气化性能必须综合煤的挥发分与固定碳加权来反映，而所取的权值则取决于所采用的气化工艺，因此我们将其称为气化工艺指标。同时，我们还发现原煤的气化效果可以用煤气的产率与热值的乘积关系反映出来，其单位为 MJ/kg，它反映了每公斤煤最终气化后所得的能量，它与原煤的热值具有相同的量纲，它们的比值反映了与用其它方法计算而得的气化效率相同的变化趋势且偏大，因此可以用它来代替传统的气化效率来反映煤的气化效果，我们称之为气化能量产率，它是煤的气化效果指标。

我们对三种常用气化工艺所取得的实验数据利用计算指标 x、y 作图进行曲线拟合，并在以下条件下进行试差：（1）公式对

于各种气化工艺及煤种具有通用性；（2）所得公式的相关系数要高；（3）与用其它方法计算所得的煤气产率误差最小。结果如图 7-a、b、c 所示，经过验算得出表 1 的权值对各工艺的线性相关性最好（全部在 0.85 以上），而且与用其它方法计算所得的煤气产率误差最小。可以，气化能量产率与气化工艺指标是一种线性关系：

$$Q_{\eta} = ax$$

Q_{η} ——气化能量产率， $Q_{\eta} = \text{煤气热值} \times \text{煤气产率}$ ，单位：MJ/kg；

x——气化工艺指标， $x = \text{FCad} \times k_1 + \text{Vad} \times k_2$ ，其中 $k_1 + k_2 = 1$ ；

$k_1、k_2$ ——气化工艺指数， $k_1 + k_2 = 1$ ；

a——气化能量转化系数，其值在 $0.4 \pm 0.01 \text{ MJ/kg}$ 。

表 1 三种气化工艺所取的权值
Table 1 Shares for the three different gasification process

O ₂ -H ₂ O(g) (Normal pressure)		Air (Normal pressure)		O ₂ (High pressure)	
Vad%	FCad%	Vad%	FCad%	Vad%	FCad%
0.3	0.7	0.4	0.6	0.2	0.8

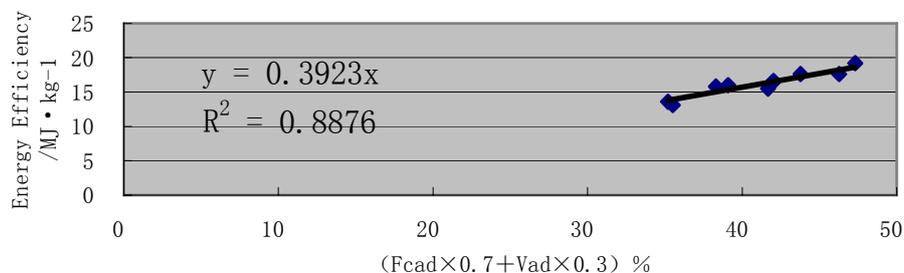


图 7-a 煤H₂O-O₂气化性能及其气化指标变化规律（数据来源于文献〔7〕）
Fig.7-a Changes of the coal index with the coal quality under the H₂O(g)-O₂ condition

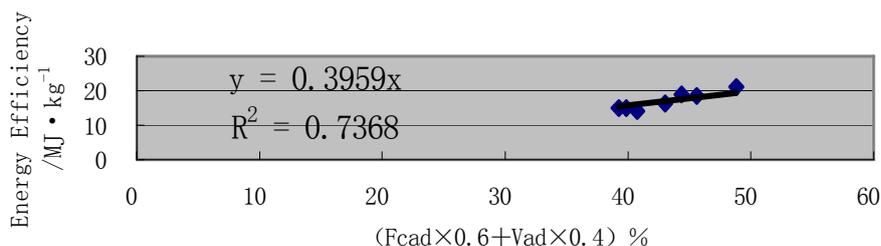


图 7-b 煤空气气化性能及其气化指标变化规律（数据来源于文献（8））
Fig.7-b Changes of the coal index with the coal quality under the air condition

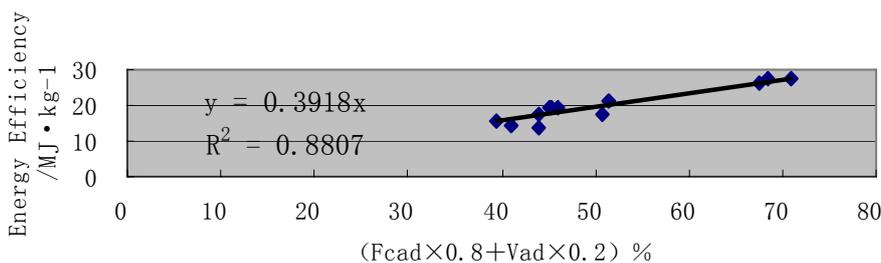


图 7-c 煤加压 O2 气化性能及其气化指标变化规律（数据来源于文献（9））
Fig.7-a Changes of the coal index with the coal quality under the O2 condition and high pressure

k_1 、 k_2 反映了不同的气化工艺之间的差别，由于大多数煤中的FCad%的含量总是高于Vad%，所以当 k_1 取大值时，同种煤的气化工艺指标总是偏高，相应的其能量产率也越高，也即是说气化工艺指数 k_1 越大，该工艺的气化效果越好。a值是一个由煤的元素构成本身决定的参数，它基本上不受工艺手段和煤种的影响，在一种程度上反映了煤气化的共性。

由此可见，气化的效果在工艺和煤质选定后就已经被确定了，工艺操作只能使其效果稳定，而不可能超越一定的界限。另外，上述分析可以用来检验微观研究结果是否正确，如果其结论不能最终简化到FCad%与Vad%的综合作用上，我们有理由怀疑该实验的正确性。上述煤的气化特性指标还有

很多用途，如在进行气化工艺设计时，可以用来选择气化工艺、气化用煤等（从工艺指数可知，对同一种煤而言，气化工艺从空气气化改为富氧水蒸汽与从富氧水蒸汽改为加压气化所取得的效果是相当的，但显然后者要花较高的成本，经济性不如前者。）；在现场生产中，气化能量效率可以用来评价现场生产中的气化效果，找到气化工艺的最佳操作条件，等等。

4. 结论

本文通过对气化过程系统的分析，结合有关理论，在大量前人实验数据的基础上找到了两个分别反映煤炭气化效果和气化性能的指标，并建立了它们间的关系，这对煤炭气化的理论研究和实践都有重要意义。

参考文献

- 1 谢克昌.煤的结构与反应性, 科学出版社, 2002.10
- 2 李徐萍等.煤的发热量经验公式及其在煤质分析中的应用, 轻金属: 2002.1: 28~29
- 3 肖乃友.浅析关于煤和焦炭中发热量计算的两种简便方法, 煤化工: 2001, 95 (2): 51~54
- 4 (前苏联)康托劳维奇 BB.固体燃料燃烧与气化导论[M], 闻望译, 中国工业出版社, 1965
- 5 王同章.煤炭气化原理与设备, 机械工业出版社, 2001.4
- 6 朱子彬, 马智华, 张成芳等.活性点数对煤焦气化反应的影响——I.气化活性的评价, 燃料化学学报, 1994, 22 (3): 321~327
- 7 戢绪国, 邓一英, 王鹏.七种煤常压纯氧固定床气化的特性, 洁净煤技术, 2004, 25 (4): 50~52
- 8 戢绪国, 步学朋, 王鹏 等. 煤常压固定床空气气化的特性研究[J]. 煤气与热力, 2004, 24 (12) : 660~664
- 9 戢绪国.煤加压固定床纯氧气化的试验研究[J]. 煤气与热力, 2005 (2) : 1~4

THE STUDY OF COAL GASIFICATION INDEX

Deng Xubiao

the UCG Research Center of China University of Mining and Technology (Beijing),
Beijing (100083)

Abstract

By a entirely and systematic analysis of the coal gasification , two industrial index——FCad% and Vad% are found to be the primary factor to influence the coal-gasification process in the article. And it gives the relationship of the coal-quality and the energy-efficiency of the coal for coal-gasification. This would be a good help for the study and practice of the coal-gasification.

Keywords: gasification index, index of gasification process, energy yield of gasification