

# 煤化作用期间煤的地质流变学

桂林冶金地质学院隐伏矿床预测研究所 陈儒庆

## 引言

越来越多的资料表明，我国大部分地区煤变质作用主要是由岩浆引起的。从各省（区）的矿产分布来看，煤田周围几百米到50km的范围内，Cu、Pb、Zn、Mo、Be、Nb、Ta、Sn、W、Sb和Hg等呈现规律分布，这并非天然巧合，而是区域岩浆作用对整个地壳岩石（沉积物、煤）全面改造的综合结果。有的文献<sup>(1)</sup>虽认为岩浆变质作用很重要，但却把邯邢、沁水、济源、绵竹、祥云、禄丰等地区的煤看作是典型深成变质作用形成。事实上，这些地区的煤田内或其周围也发现了与岩浆作用密切相关的Cu、Pb、Zn多金属矿床，地球物理资料也显示出隐伏岩体的存在（如河南济源一带的航磁、重力异常），显然对该区煤的变质岩浆作用不可忽视。无疑，今后会发现更多煤田的煤变质与岩浆作用有关。这对寻找与岩浆作用、岩浆热液作用等有关的隐伏矿床提供了一个全新的思维方法与工作途径。这里只从地质流变学的角度探讨岩浆作用对煤变质的影响。

关于煤层流变，讨论较多的是煤化作用期后构造变动在含煤地区留下的流变痕迹，而对煤化作用期间煤的流变学问题，则尚未见报道。在预测隐伏岩体过程中，我们发现煤的流变学标志是区别深成变质和岩浆变质的一种有效方法。地下岩浆向上侵位以其热量使煤变质，并以其上挤力使煤层产生流变。流变的特点和程度在隐伏岩体顶上带煤层中呈现规律变化，主要表现在煤层内部物质成分的迁移、重组和能量转化上（煤层流

变性越大，煤的变质程度越高）。与煤化作用期后构造变动所造成的流变诸如结构破坏、夹石混入、灰分增加相比，它是一种非耗散结构。褐煤空隙度大、水分多、密度小、强度低，在岩浆热和挤压力作用下较易流变。有的文献<sup>(2)</sup>认为，煤在发生流变时，在芳香族聚合、原子平面间距缩小的同时，还出现了排列的定向规则化，在流变强烈地段已排成具有晶质结构的变形双晶，这是稳定蠕变阶段的塑性流动促使芳香族质点在滑移过程产生了定向排列而引起的。但他们却认为煤层埋深最大不过3~5km，温度60~150℃，围压100~200MPa，在这个温压条件下不可能造成煤层的固体韧性流动。而笔者下面以资料证实，在地下岩浆作用下，处于这一温压条件下的煤层是能够产生固体韧性流动的。

## 2 内生裂隙的空间变化

岩浆向上侵位和定位期间，在其顶上带围岩形成一个规则变化的温度场和应力场：越近岩体温度越高、主压应力越大，远离岩体温度逐渐降低、主压应力逐渐减小。单纯的深成变质作用不具有同样的应力场，上覆地层的静压力只能造成自上至下主压应力逐渐增大的方向相反的应力场，且远小于岩浆挤压应力，否则岩浆不会向上侵位。热量和挤压压力的共同作用，使顶上带围岩的不同部位产生不同程度的流变。在非煤系地层中，作者证实裂纹的扩展同时受制于岩石流变引起的裂隙闭合和挤压应力的大小。研究表明，煤层在煤化作用期间，岩浆作用亦使其

在空间产生规律变化，由岩体往顶上带围岩方向，煤层变化一般依次是无烟煤、贫煤、瘦煤、焦煤、肥煤、气煤、长焰煤到褐煤。深成变质作用也能造成同样变化，区别标志之一在于岩浆变质作用形成的煤具有规则变化的内生裂隙。

内生裂隙是岩浆挤压应力长期伴随煤变质作用进行的产物。它常见于光亮煤的条带中，垂直层理面。裂隙面光滑、平整，有的呈眼球状，裂隙中常充填矿物薄膜。迄今，人们还认为内生裂隙是煤中凝胶化物质在煤化过程中受温度和压力的影响，内部结构变化，体积均匀收缩产生内张力而形成的<sup>(3)</sup>。地层静压力不能使流变性较大的煤层产生裂纹并使裂纹扩展，相反只能起到“压实”作用而使煤层原来的孔隙、裂纹趋于闭合，所以只有岩浆挤压压力的作用才能使煤层产生裂纹扩展而形成内生裂隙。上覆地层的静压力是一直存在着的，垂直地层的方向是压缩方向，平行地层的方向是拉伸方向。如果煤层体积收缩，就不可能是各向同性的，因此内张力如果存在，亦是不均匀或不重要的，不可能导致内生裂隙的形成，煤层的体积亦不可能均匀收缩而形成垂直层理的内生裂隙。较为合理的解释是，岩浆的上挤力相对垂直于顶上带围岩地层层理，在煤化作用过程中该上挤力受长期活动的岩浆影响一直维持着，而在煤层中形成了垂直于层理面的内生裂隙。

内生裂隙的分布密度受制于煤层的流变性。由顶上带围岩至岩体方向，煤层的流变性和上挤压应力逐渐增大，故高变质煤内生裂隙趋于闭合；低变质程度煤内生裂隙较难扩展；中变质煤则处于最佳状态，内生裂隙既易于扩展又不易闭合，因而数量最多，如峰峰五矿“大煤”5cm 内有 30 条。裂隙面较平整、裂隙的延伸最远。低变质煤内生裂隙数量居次，如抚顺西露天煤 5cm 内有 11~13 条，裂隙面最平整，裂隙的延伸不远。高变质煤的

数量最少，如湘中的无烟煤 5cm 内只有 2~7 条，裂隙面不平整常呈眼球状且延伸不远。

### 3 煤层的增厚减薄

与动力变质作用不同，岩浆引起的煤层流变具有区域性。在岩浆热影响下，煤的流变性迅速增大。岩浆上挤力的作用最终导致煤层内的物质迁移和发生侧向固体韧性流动造成煤层增厚或减薄。煤层一般从流变性大的部位迁移到流变性小的部位，其成因近似顶薄褶皱。利用趋势面分析的原理分析煤层厚度变化，能排除局部因素干扰，提供区域性变化信息，还可突出局部性因素分析局部异常的原因。该法曾被运用于聚煤带划分、研究聚煤期间的同沉积构造。笔者认为它亦可用于分析煤层受区域岩浆作用产生流变而增厚或减薄，并反过来预测隐伏岩体的存在。

以广西晚二叠世聚煤带为例，该带含煤建造以碳酸盐沉积为主，含煤 2~12 层。燕山期岩浆活动十分强烈、频繁，在全区均有所表现。图 1 为煤层总厚度四次趋势面，在宜山、合山、迁江一线呈现一个北西 30° 方向的向斜式曲面；在隆林、平乐一带和那

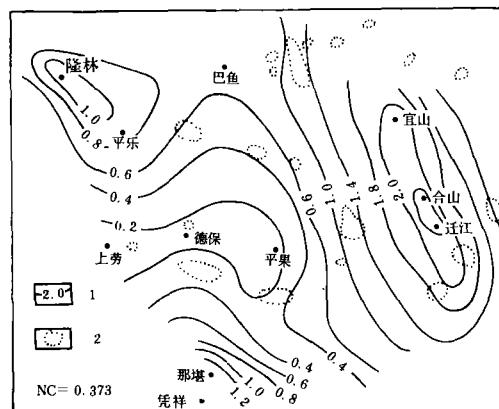


图 1 广西晚二叠世煤层总厚度四次趋势面与隐  
伏花岗岩体之间的关系

1—煤层总厚度四次趋势面； 2—隐伏花岗岩  
堪、凭祥一带为两个短轴向斜式曲面；在上

劳、德保、平果一带呈现一个东西向的背斜式曲面<sup>(4)</sup>。笔者认为，在岩浆热作用下煤层产生流变，上挤力和重力的作用使煤物质从背斜式或向斜式曲面的外侧向向斜式曲面的核部方向迁移，因而向斜式曲面反映煤层的增厚，背斜式曲面则反映煤层减薄。图1清楚地显示出这三个大的向斜式曲面之间的外部地带，广布着隐伏花岗岩体，背斜式曲面与隐伏岩体的位置则更为吻合。可见，煤层流变与隐伏岩体之间存在着相当密切的空间依存关系。

#### 4 煤的微成分的流变性

煤受热至其表面分子达到近似液体的活动程度时，便产生流变现象，构成一种塑性、各向同性、既非液体亦非固体的中间相物质（塑性～粘塑性）。在隐伏岩体顶上带围岩中，这种中间相物质在空间上表现出不同的流变性，一般越靠近岩体流变性越大，显示出各向异性特征；反之，则流变性小且仍具各向同性。在这期间最典型的地质流变学标志是新生各向异性体和次生气孔的形成。

##### 4.1 各向异性微粒体

一种反射率高、粒径不到1μm的颗粒状有机集合体。R.Thiessen等认为是次生细胞壁或分散腐植屑在泥炭化作用早期氧化而成；M.Teichmiiller根据微粒体首先出现在低煤化烟煤中，常见沥青质体过渡为微粒体等事实，认为是沥青质等富氢微成分在煤化作用过程中排出液态沥青后的裂解残体。肖贤明等<sup>(5)</sup>研究豫西晚古生代煤时，发现煤中微粒体相当丰富，粒径0.05~0.30μm，产状多种多样，反射正交偏光下多显各向异性，有些酷似焦炭光学结构中的极细镶嵌结构，旋转物台见星点状消光现象。同时，多数各向异性微粒体在光性上具有定向性，其光率体长轴方向趋于平行层理方向。微粒体在气煤中常见，在焦煤中最丰富。

微粒体并非惰性组分，在低煤级煤中它含大量氢，并不富含碳，对热极敏感，受热可放出大量挥发分，是目前远距离预测隐伏岩体较灵敏的组分之一。受热影响，约在长焰煤阶段（古地温一般低于100℃）开始形成微粒体（M.Teichmiiller, 1974），煤中活性极大的富氢组分开始裂解，排出液体烃类，而本身缩聚、萌生出具塑性的中间相物质。岩浆挤压应力作用于中间相物质，并不象作用于一个质点完全均匀的连续介质那么简单。活性极大的富氢组分在流变过程中，质点变得混乱、不连续，每个质点所受应力大小也就不同，因而各微粒之间表现出各向异性；但由于裂解温度及煤级低，故流变性及化学缩聚活性较小，生成的中间相无法长大。同时岩浆挤压应力的方向也由于煤层流变性相对小而得以反映出来，这表明多数各向异性微粒体在光性上具定向性。

##### 4.2 新生各向异性组分

主要为球状、条带和镶嵌结构，是煤在岩浆变质作用中新产生的具明显光学各向异性的次生组分<sup>(6)</sup>。球状结构可分单、复两种，后者多见，产于无结构体中，具同心纹或放射纹，突起高，多出现在焦炭以上煤级，气煤少见。条带结构，在单偏光下形态不显，正交偏光下多呈不同长度条带与半镜质体伴生，突起不显，结构均一，出现于焦煤以上煤级。镶嵌结构是一些光性不同的小碎片镶嵌在一起，堆砌成一片，交替消光，多见于高变质烟煤和无烟煤中。

在岩浆热进一步作用下温度升高，煤层中富氢镜质组和稳定组产生易挥发的气相物质。这样，在相对封闭的热环境下，由于挥发组分参与了煤层物质的重组，而使煤层的粘度进一步降低，在相同的压力和热变质时间下，煤层就表现出相对大的流变性，各向同性的中间相物质就转变成各向异性的小球体，它们聚合、固结，依次形成了条带结构

和镶嵌结构，与各向异性微粒体比，由于流变性大，故由小球体→条带结构→镶嵌结构，光性上的定向性逐渐变得不明显。

### 4.3 次生气孔

热分解使煤的有机大分子上的侧链官能团脱落，产生的易挥发物逸出，逸出后的痕迹即为次生气孔。其形态、大小和含量严格受煤层流变性控制。据唐亚兰<sup>(7)</sup>对平顶山煤田煤的高温高压实验研究，次生气孔形成温度约250~300℃(肥煤阶段)。煤层流变性不大时，挥发分只要克服表面张力就能向上逸出，形成的气孔多为圆形；随着流变性增大，挥发分除克服表面张力外，还要克服煤层发生固体韧性流动时的外力，形成的气孔多呈拉长的椭圆形；当达到高变质煤阶段时，流变性极大提高，挥发分从各向异性的中间相物质中不均匀、非连续地逸出，因而气孔多呈不规则状，有时几个气孔连在一起构成大的朵状。随变质程度增高，次生气孔的含量和直径有增大趋势<sup>(6,7)</sup>。但笔者认为，这个趋势是有一定限度的。

煤层流变性增大，可使内生裂隙、原生气孔趋于闭合、减少以致消失，次生气孔也有类似趋势。温度升高既有增加煤层流变性、也有降低流变性(由于挥发分逸出)的作用，这两个相反作用同时制约次生气孔形成过程。在中、高变质煤中后一种作用占优势(但不意味中间相物质的流变性降低)，形成的次生气孔难以闭合，因而其含量直径有增大趋势；但到超无烟煤、天然焦阶段则以前一种作用为主，形成的气孔有部分闭合，其含量和直径则有一定程度的降低。如河南禹县、新密和荥巩煤田山西组II<sub>1</sub>煤(贫煤、无烟煤)中，次生气孔平均直径分别为4.8~5.5μ, 4.7~5.8μ, 5.4~8.7μ, 其含量分别为2.2%~5.0%、5.3%~6.7%、6.6%~10.3%；永夏煤田天然焦的次生气孔直径多在5

~10μ之间，含量多小于5%<sup>(7)</sup>。显然，由贫煤和无烟煤→天然焦，次生气孔的含量是降低的。但这种不同区域构造条件下的对比，由于控制因素的差异，在某些方面如次生气孔直径，很难看出其间的变化规律。

## 5 结 论

a. 岩浆侵位引起的煤层流变，主要表现在物质成分的迁移、重组和能量转化上。煤层流变性越大，变质程度越高。

b. 内生裂隙是岩浆挤压应力长期伴随煤变质作用进行的产物。受煤层流变性的制约，由低到中到高变质煤，内生裂隙分布密度、延伸长度由小→大→小。

c. 岩浆热和挤压力的影响使煤层发生固体韧性流动，导致煤层增厚减薄。煤层总厚度四次趋势面所反映的减薄部位与隐伏岩体的位置吻合。

d. 随流变性增大，依次出现新生的各向异性微粒体、小球体、条带结构、镶嵌结构。

e. 随流变性增大，由中变质煤→高变质煤→超无烟煤→天然焦，次生气孔的含量和直径由小→大→小，其形态由圆形→椭圆形→不规则状、朵状。

## 参考文献

- (1) 杨起、任德贻：中国煤变质问题的探讨，《煤田地质与勘探》，1981, 1, 1~10。
- (2) 王桂梁、朱炎铭：论煤层流变，《中国矿业学院学报》，1988, 3, 16~25。
- (3) 陆春元编：《煤田地质》，煤炭工业出版社，1987, 36~37。
- (4) 韩金炎：广西晚二叠世聚煤带的划分及其控制因素的探讨，《煤田地质与勘探》，1983, 1, 26~32。
- (5) 肖贤明、任德贻：豫西煤田晚古生代煤中各向异性微粒体的发现及成因探讨，《中国矿业学院学报》，1988, 1, 77~80。
- (6) 王向东：淮北闸河矿区热变质煤的煤岩特征，《淮南矿业学院学报》，1987, 3, 34~39。
- (7) 唐亚兰：煤中气孔和镶嵌结构及其在煤变质研究中的意义，《煤田地质与勘探》，1986, 4, 28~29。