# 第一章 绪论

## 1.1中国炼焦煤资源利用现状

能源是人类赖以生存和持续发展的重要物质基础[1]，煤炭是化石燃料范畴[2]内最重要的一块拼图。煤炭是我国现阶段最主要的能量来源[3]，近五年来我国的能源消费和生产增速都远低于近期历史平均水平[4]，但我国仍主导着世界煤炭市场，并在本国能源结构[5]中的煤炭的使用比重高达67%，是世界上最大的煤炭生产国和消费国[6]。以2013年为例，中国的煤炭消费增长4%，不足其过去十年平均水平的一半。表1和表2分别为2013年以来中国的煤炭资源使用统计情况和中国煤炭资源储量统计。

表1-1 2013-2017年中国的煤炭资源使用统计

Table1-1 Statistics of Coal Resources Use in China from 2013 to 2017

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | 无烟煤和烟煤储量 | 次烟煤和褐煤储量 | 总计 | 储产比(R/P) | 煤炭使用比重/% | 煤炭消费增长/% | 煤炭生产增长/% |
| 2013 | 49800 | 45200 | 95000 | 29 | 67.0 | 4.0 | 1.2 |
| 2014 | 53100 | 47600 | 100700 | 30 | 66.0 | 4.1 | -2.6 |
| 2015 | 62200 | 52300 | 114500 | 31 | 64.0 | -1.5 | -2.0 |
| 2016 | 230004 | 14006 | 244010 | 72 | 62.0 | -1.6 | -7.9 |
| 2017 | 130851 | 7968 | 138819 | 39 | 60.4 | 0.5 | 3.6 |

注：(1)储量/产量（R/P）比率——前一年年底剩余储量与该年度的产量之比；

(2) 无烟煤和烟煤储量、次烟煤和褐煤储量及总计单位：百万吨；

(3) 数据来源：BP世界能源统计年鉴(2014-2018)。

表1-2 2013-2017年中国炼焦煤资源储量统计

Table1-2 Statistics of Coal Resources Reserves in China from 2013 to 2017

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 年份 | 查明资源/亿吨 | 增减变化/% | 新增查明资源储量/亿吨 | 增减变化/% | 预测资源量/亿吨 | 查明资源率/% |
| 2013 | 14842.90 | 4.5 | 673.0 | 29.2 | 36500 | 29.0 |
| 2014 | 15317.00 | 3.2 | 561.0 | -16.7 | 38000 | 29.6 |
| 2015 | 15663.10 | 2.3 | 390.3 | -30.4 | 38796 | 30.0 |
| 2016 | 15980.01 | 2.0 | 606.8 | 55.5 | 38796 | 30.3 |
| 2017 | 16666.73 | 4.3 | 815.6 | 34.4 | 39000 | 31.0 |

注： 数据来源：中国矿产资源报告(2014-2018)

由2013-2017年BP世界能源统计表1-1可以看出在全国范围内从2013年至2016年无烟煤和烟煤的探明储量逐渐增加，而2017年的探明储量有所降低但仍比2015年以前要翻一番；而2013年至2015年次烟煤和褐煤的探明储量每年有很少量的增加，而2016和2017年的探明储量急剧减小；同时从2013年至2016年我国的煤炭使用比重始终逐年下降并稳定在60%至67%之间；对于我国的煤炭消费，2013年与2014年基本持平，2015年与2016年都在上一年的基础上都有1.5%左右的减少，而2017的煤炭消费[7]又有0.5%的增长；对于我国的煤炭生产，2013年相对于2012年有所增加，而2014、2015与2016年连续三年煤炭产量都为下降趋势，2017年有了的反弹。

由2013-2017年中国矿产资源报告表1-2可以看出，在2013年至2017年全国的查明炼焦煤资源连续小幅度增加，2013年的增幅最大高达4.5%，其次是2017年的4.3%；2013-2017年的新增查明资源储量呈现先减小后增加的趋势，2016年的增幅最大达到55.5%，2014年与2015年的新增查明资源储量有所减少；2013年至2017年的预测资源量逐年小幅度增加，查明资源率在这5年来趋于稳定，基本稳定在30%左右。

从BP世界能源与中国矿产资源的统计报告可以看出，中国的煤炭炼焦煤资源从储量、使用、消费、生产、查明资源、新增查明资源储量和预测资源量在2013年至2017年的变化来看，我国的能源使用结构比较稳定[7]，并且依赖煤炭这种一次能源的情况有所改善。

山西省具有丰富的煤炭资源[8]，也是全国开发强度最大的炼焦煤资源基地[9]。参考山西省国土资源厅资料（表1-3），截止2017年12月山西省的炼焦煤月度产量为4203.20万吨，同比2014、2015与2016增加为-9.92%、-9.41%与5.14%，相比于煤炭行业的寒冬，2017年12月有一定回暖的趋势，其中贫瘦煤、瘦煤、焦煤、肥煤、1/3焦煤、气肥煤、气煤的产量同比都有所增加；2015年12月的贫瘦煤、瘦煤、肥煤、1/3焦煤、气肥煤、气煤的产量同比都有所减小，而焦煤的产量同比有所下降，下降幅度为4.89%；2016年12月的贫瘦煤、焦煤、肥煤、1/3焦煤的产量同比都有所增加，而瘦煤、气肥煤、气煤的产量同比都有所下降，下降的幅度为7.16%、8.25%、22.78%。

表1-3 山西省炼焦煤分煤种原煤月度产量（万吨）

Table1-3 Monthly output of raw coal of coking coal in Shanxi Province (10,000 t)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 煤种 | 2014.12 | 2015.12 | 2016.12 | 2017.12 |
| 贫瘦煤 | 457.40 | 485.60 | 408.90 | 419.90 |
| 瘦煤 | 279.40 | 299.40 | 282.70 | 293.80 |
| 焦煤 | 1159.80 | 1071.60 | 1124.00 | 1201.10 |
| 肥煤 | 342.60 | 364.50 | 327.50 | 355.60 |
| 1/3焦煤 | 252.80 | 308.70 | 275.20 | 299.80 |
| 气肥煤 | 167.20 | 153.40 | 150.90 | 161.30 |
| 气煤 | 2239.70 | 1729.70 | 1428.70 | 1471.80 |
| 合计 | 4898.90 | 4412.90 | 3997.90 | 4203.20 |

## 1.2 煤大分子结构及分子模拟

**1.2.1 煤大分子结构模型的研究进展**

上世纪50年代，有关煤的基本理论如煤岩学和煤的出现并且迅速发展，煤结构模型、成焦机理、显微组分[10]等方面的工作也有了理论基础，这些理论可以合理的解释关于煤在开采、利用过程中的理化现象。伴随着计算机科学技术的发展，世界各地的学者不断尝试从微观尺度对煤的物理化学性质进行探索，研究煤的微观分子结构为煤及煤层气[11]的开发提供理论支持。

关于煤的化学结构模型的构建早有研究，1942年美国学者Fuchs[12]构建了第一个具有代表性，并含有较多数量的缩合态芳香结构的环状物及其周围的含氧官能团的煤大分子结构模型后，为各学者研究煤结构奠定了坚实的基础。

20世纪60年代以来，在美苏冷战的影响下，高速发展的现代测试技术如傅里叶变换红外光谱[]及核磁共振波谱[]在煤化工中得以应用，使各学者可以通过测试得到更为详尽的表征煤结构的信息。1975年英国学者Peter H. Given[15-16]根据一个煤化程度较低样品的结构信息表征，提出了著名的Given三维大分子结构模型，该模型由几个长链芳香萘环组成，并且芳环间的载体为氢化芳环。这在煤大分子结构发展历程中具有跨时代的历史意义，但此模型的缺点是没有给出有关S在模型上的结构信息。

1985年美国学者W. H. Wiser[17]在前人的基础上，第一次提出了具有现代概念的低煤化烟煤的大分子结构Wiser模型（图1-1），该模型内的芳环结构包含了1-5个苯环，芳环之间以脂肪桥建与醚键等作用较弱的键连接， O、N、S杂原子也被比较正式地结合在了煤结构分子上，如吩噻[18]等杂原子结构。除此之外，与Wiser模型齐名的是美国学者J. H. Shinn[19-21]在1984年提出的Shinn模型，Shinn模型的相对分子质量高达10023，分子式为C661H561N4O74S6，通过这两个大分子结构模型可以从微观角度研究得到煤的部分化学性质。



图1-1 Wiser模型

Fig. 1-1 Wiser Model

在煤的物理结构模型方面，1954年P. B. Hirsch[22]根据X射线衍射图谱[23-25]的研究结果进行整理分类分析，提出了将不同煤化程度的煤划分为敞开式、液体以及无烟煤三种物理结构模型，此模型比较直观的解释了煤中的交联结构、无定型结构与孔隙结构，对煤结构的研究具有一定的促进意义。

1986年Peter H. Given[26-27]根据H-NMR谱图研究结果提出了煤中质子的弛豫时间有差别的现象，提出了著名的Host-Guest两相模型（图1-2），此模型第一次指出了煤中固定相大分子既有共价键交联结合，也有流动相小分子作用力的物理缔合。从另一方面来看，煤中的主体为多聚集态芳香环，煤阶相近的煤种主体是一致的，而作为客体的流动相小分子柔和在了主体之中。



图1-2 两相模型

Fig. 1-2 Two-phase Model

1992年日本学者Nishioka M[28-30]在溶剂萃取试验的基础上，提出了基于单相模型的缔合模型（图1-3）。此模型构建在连续分子量分布的煤分子上，煤中不存在共价键，芳香族官能团之间以静电型或其他联合力连接，由于这些力的积累作用从而形成体积更大的联合体，最后再形成多孔的煤。

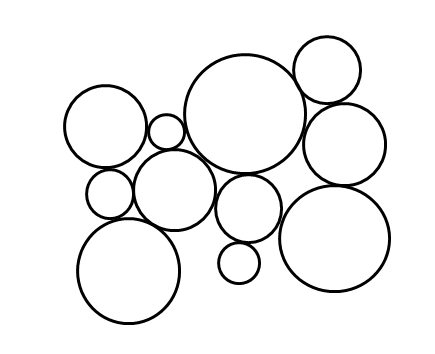


图1-3 缔合模型

Fig. 1-3 Associated Model

1985年美国学者[Andrew Oberlin](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014579304006490" \l "!)[31-32]利用高分辨透射电镜为主要工具对煤结构进行研究之后第一次提出了稠环个数居多的Oberlin模型[33]，此模型近似为Fuchs模型与Hirsch模型的结合，其中最大含有8个苯环。

1990年波兰学者Grigoriew[34-35]利用基于X射线衍射[36]径向分布函数，研究了煤的内部结构后提出了Sphere模型，此模型一共有两个特点，第一次构建出具有20个苯环的稠环芳香大分子结构模型；从另一方面解释了煤的电子谱是颜色的形成因素。

进入到20世纪，集成电路的发展及电子计算机（集群）计算能力的大幅度提高，一大批优秀的数据处理软件相继出现，包括Origin、[ACD/ChemSketch](http://www.baidu.com/link?url=50J-tIXXN-auStkFWcvMLxHnRF9OqEOU-tqUOTGkkWqkz6fVeEM-ejy1Wv7PSvHJl7AJIQW20pN5oubzyZMBP_)，煤的大分子结构模型的研究也进入了一个新的阶段。

贾建波[37] 使用固体13C-CP/MAS NMR 测试对神东2-2煤镜质组进行C原子结构分布特征的表征，得到运用ACD/CNMR predictor 软件对样品的大分子结构模型的13C化学位移进行计算，经过模型修正最终得到最优的大分子结构模型。此结构模型中芳香碳原子主要包括萘、苯环和含杂原子的芳香环。

相建华[38-39]分别对成庄无烟煤（图1-4）和兖州煤进行大分子结构模型构建。对样品进行13C CP/MAS NMR测试并进行分析，利用13C CP/MAS NMR分峰谱图拟合分析，计算得到芳香桥碳与周碳之比，再根据芳香结构单元的比例构建大分子结构模型。其中成庄无烟煤大分子结构模型中芳香碳以最多不超过5个苯的环状结构为主，脂肪碳以甲基、乙基以及环烷烃为主要形态，杂原子方面其中O原子以羰基、羟基以及醚氧基的形式存在，N原子以吡咯的形式存在；兖州煤大分子结构模型中芳香结构以苯为主，脂肪结构以脂肪侧链、环烷烃和氢化芳环组成，且甲基、亚甲基和次甲基的含量相当，杂原子方面其中O原子以羧基、羰基与羟基的形式存在，N原子以吡啶与吡咯的形式存在，S原子以噻吩型硫的形式存在

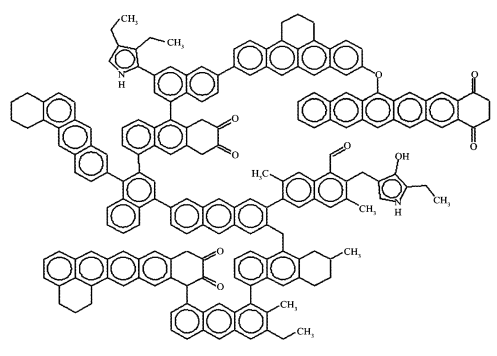


图1-4 成庄煤样大分子结构模型

Fig. 1-4 Model of Macro-molecular Structure in Chengzhuang Coal Sample

马延平[40]对样品进行13C CP/MAS NMR和XPS测试并进行分析，结合元素分析和工业分析，构建大分子模型。运用13C-NMR预测软件ACD／CNMR predictor计算了大分子结构模型的13C化学位移。与实验13CNMR谱图相比较，对大分子结构模型进行修正，获得了13C NMR计算与实验谱图吻合较好的大分子结构模型。此结构模型中芳香结构以蒽为主要组成部分，脂肪结构以脂肪侧链为主要存在形式，杂原子部分O原子以醚键、羟基和羰基的形式存在，N原子以吡啶吡咯的形式存在。

张莉[41]对伊敏五牧场11号原煤进行大分子结构模型构建（图1-5）。构建过程中运用工业分析、元素分析、13C-NMR、FTIR、XPS等数据进行分析，在此基础上获取煤大分子结构模型中碳骨架、脂肪以及含氧官能团类型及比例、N原子的赋存形态及比例等结构信息[42]，通过这些信息来构建与核磁共振谱图吻合较好的大分子结构模型。此结构模型中芳香结构以苯、萘、蒽、菲为芳香结构为主，结构中还有醚键、氢化芳环以及邻位亚甲基等桥键，甲基和脂肪短链分布在芳香单元的边缘[43-44]，杂原子部分O原子以酚羟基、羰基、羧基的形式存在，N原子分别以吡啶和吡咯的形式存在。

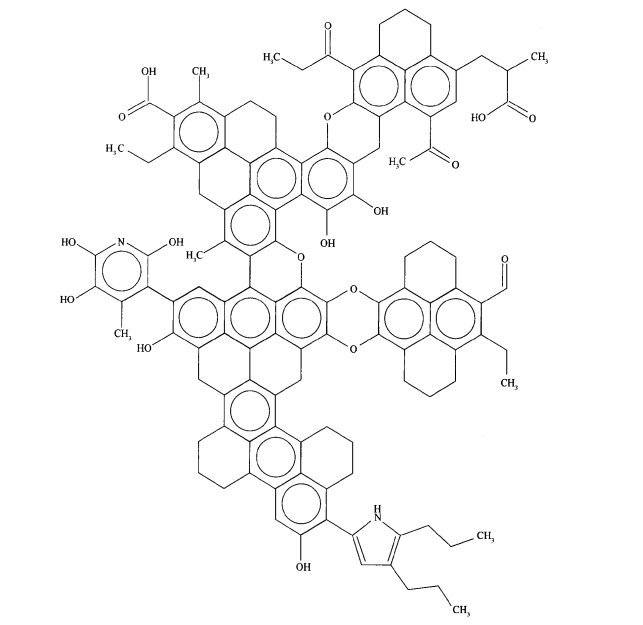


图1-5 伊敏五牧场11号原煤大分子结构模型

Fig. 1-5 Model of Macro-molecular Structure in WMC No.11 Raw Coal

至此，对煤的化学结构模型的研究，已经到了一个趋于稳定成熟的时期。以上介绍的煤结构模型构成了现代煤大分子结构模型的基本框架，在此基础上为我们进行全面的大分子结构模型研究奠定了坚实的基础。

**1.2.2 煤大分子结构的分子模拟**

随着计算机科学和模拟技术的进步，学者们开始尝试从微观尺度对煤的物化性质进行研究，并以此来探讨煤结构中所表现的内在机理，为煤化工的发展提供理论支持。

1947年，AT&T公司的William Shockley发明了电子晶体管[45-46]并应用到电子计算机上，这是电子计算机发展历史中最重要的里程碑事件。1988年，科技日新月异地发展使3500万个晶体管集成在了一块1cm2的硅片上，标志着电子计算机进入了ULSI[47]大规模集成的时代。近年来涌现出的新兴科技公司（如NVIDIA，ARM公司等）开发出了具有优秀计算能力的GPU[48]，使得计算机科学与基础科学相结合的分子模拟技术迅速发展并应用到了许多领域，譬如药学、生物科学、化学化工、能源和材料等前沿领域。

现代分子模拟技术主要是基于分子[蒙特卡洛法](https://baike.baidu.com/item/%E8%92%99%E7%89%B9%E5%8D%A1%E6%B4%9B%E6%B3%95/2056487)[48-51]和[分子动力学](https://baike.baidu.com/item/%E5%88%86%E5%AD%90%E5%8A%A8%E5%8A%9B%E5%AD%A6)法[52-54]两种方法。模拟技术利用提前在电脑主文件中构建的分子模型与反应环境，结合一套精心设计的模拟算法，为了避免量子力学、爱因斯坦相对论对模拟不确定性原理的影响，体系内的原子运动严格遵循牛顿三大定律，与之对应的是质点体系遵循哈密顿变分运动原理，用来模拟分子在反应环境中的特定行为，以此来模拟大分子系统中的物理化学性质。

在煤化工煤科学的发展过程中，分子模拟技术具有不可忽视的关键作用。1992年G. A. Carlson[55]开创性地使用3D建模技术构建了烟煤的第一个立体3D结构模型，并通过对煤大分子结构内部的相互作用力进行模拟，得到了范德华相互作用和氢键在煤大分子结构形成起到了关键性的作用。

1994年，[William D. Provine](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28William%20D.%20Provine%29%20UNIV%20DELAWARE%2CCTR%20CATALYT%20SCI%20%26%20TECHNOL%2CDEPT%20CHEM%20ENGN%2CNEWARK%2CDE%2019716&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson)[56]采用蒙特卡罗模拟技术，直接构建了煤分子的结构并且将其液化，通过模拟得到分子的主要反应路径及反应机理，从而用来评估模型的合理性，最终得到分子结构中醚键和硫醚键在结构中所起到的关键作用。

1996年Chen Honggang[57]介绍了煤炭结构计算机辅助模拟技术的最新进展，对煤大分子结构的构象、能量最小化、密度、表面积和分形维数的构造进行了详细的描述。

1998年[Toshimasa Takanohashi](https://www.researchgate.net/scientific-contributions/85414211_Toshimasa_Takanohashi) [58]利用萃取试验中的萃取物丙酮可溶物（AS）、丙酮不可溶-吡啶可溶物（PS）和吡啶不可溶物（PI）三个分馏部分建立基于结构参数的结构模型，并使用ATD-OT计算机软件中的分子力学和分子动力学方法,对构建的煤大分子结构模型进行分子模拟，详细地介绍了煤大分子结构分子的详细特征以及性质，计算得到了分子结构的能量最小构型，并且得到了在煤大分子结构中芳香-芳香相互作用、氢键和静电的相互作用规律。

Xiaomin Ma[59]采用蒙特卡罗模拟技术，利用经典分子动力学（MD）模拟理论，通过结合煤中芳香层片层间距，结合碎块密度泛函理论，构建了最佳的煤微晶结构模型，此外还研究了煤中碳含量与电子性质之间的关系。

由前人研究可知，在漫长的煤变演化过程中聚集态结构的形成受分子间弱相互作用力的影响，煤结构中含有大量的芳香层片并且芳香层片中含有大量存在分子间弱相互作用的小分子化合物，因此通过对煤分子之间的相互作用力的研究是对表现为聚集态煤研究的一种重要手段。在煤的大分子结构模拟中，可以通过模拟动力学、分子动力学、密度、量子力学方面的模拟工作，得到最低能量构型、周期性边界条件、密度、键级、键能、电荷布居数等表征煤大分子结构在介观尺度下性质及力学参数，由此来研究煤中的成断键的影响因素、特定官能团的性质、芳香层片层间距的测量、后续模拟过程中的反应过程等。

## 1.3煤的热解模拟

**1.3.1 TG/MS热解模拟**

在绝对的密闭空间内，煤受强热分解为气、液、固相分子，或游离的官能团的过程被称为煤的热解。煤的热解是煤清洁、气化、液化等热转化加工中的重要步骤，研究煤的热解对煤化工生产的意义重大。研究中一般使用热重-质谱联用技术[60-61]（TG/MS）对煤样进行热解模拟[]， 获得各种产物的生成速率曲线，由此来研究煤样在热解过程中的性质。

从1999年开始，Arenillas A[62]采用通过草酸钙测定过系统标准基线的热重-质谱联用技术（TG/MS）对三种不同含量挥发分的无烟煤和烟煤进行了热解试验，热解试验通过程序升温测定了挥发性混合物的瞬时变化及所生成的曲线，由此得出了热解试验煤中不同官能团含量的变化及煤阶变化对不同官能团含量具有依赖性的结论。

宋绍勇[63]采用等温热重法对7种变质程度不同的煤进行热解动力学分析，研究发现煤热解过程中的升温速率及煤中各元素的含量对煤的热解有影响，并且由热重曲线特征分析煤的热解不能简单的描述，煤的热解可以使用化学反应模型和二维扩散模型进行描述。文章还结合煤热解原位XRD分析，煤热解FTIR分析，得到煤热解的反应特征。

孙庆雷[64]采用TG/MS技术对神木煤显微组进行了加氢热解，并通过对热解气体产物的分析，得到相比于煤的惰质组，镜质组的具有较大的失重速率，较小的初始热解温度。

降文萍[65]采用TG/DTA、TG/MS技术以及FTIR对九种经过脱灰、抽提处理，变质程度不同的煤进行测试及热解试验，得到了变质程度不同的煤的结构特征及热解规律：煤化程度越高热解过程中的失重率相对越小，热解时的特征温度点越高，在同一升温速率下煤中的活化能分布[66]与频率因子具有正线性相关性。

白宗庆[67]采用TG/MS技术对在甲烷气氛中的焦炭进行热解试验，研究在此化学环境下焦炭的热解行为以及气体逸出情况，并考察了温度、热持续时间及甲烷产量等关键性因素对焦炭的影响，得到了在试验中焦炭会发生增重，且增重会随着温度升高、热持续时间增长、甲烷体产量提高而增加的结论。

曾凡桂[68]采用TG/MS技术对低阶煤种霍林河褐煤进行热解试验，从而获得了甲烷[69-70]的生成速率曲线，使用量子化学理论计算得到甲烷的4种生成反应类型，此为在量子化学角度分析煤热解的主要研究方法；

李美芬[71]采用TG/MS技术对7种低变质程度煤进行热解模拟试验，研究了其热解特征与第一次煤化作用跃变的关系，其中氢气生成的特征温度参数以及动力学参数可以在甲烷生成的参数分析中提供借鉴意义；

王民[72]采用TG/MS技术对煤岩进行热解试验，来解决烃源岩热解试验中因为温度较低而无法揭示高演化阶段无法生气的特征，通过试验并分析得到了在热解过程中甲烷的逸出特征，甲烷在300℃生成，480℃生成速率为最大，在850℃时生成基本结束，同时在反应过程中烃气分子量的降低造成了成气活化能依次增大的结论。

范冬梅[73]采用TG/MS技术对三种烟煤进行热解试验，分析了热解过程中温度、升温速率对气相产物的影响及逸出特征，得到升温速率越大，温度越高热解产物越容易析出、反应时间越短的结论。

Feng Han[74]研究了中国西南地区云南省五种褐煤的热分解和析出气体特性，其中官能团对褐煤失重和气相产物演化有显著影响，其关于低温热解的理论不仅对CO2、CO、H2O适用，也可以推广到煤的其他热解产物中；

**1.3.2 ReaxFF反应力场简介**

煤的热解为煤转化的初始阶段并且为以后的转化过程其中相当重要的关键性作用，因此研究煤的热解在煤化工中极有意义。但是煤的大分子聚集态结构决定了煤中的活性因子、自由基含量很多的特性，所以在热解试验中煤的热解反应太快导致难以检测到自由基、活性因子的变化，不能深入的了解热解反应的反应机理。

2001年，德裔美国学者[Adri C.T. van Duin](https://www.researchgate.net/profile/Adri_Van_Duin)[75]第一次提出了基于键级反应的ReaxFF反应力场，这个理论开创性地使用分子体系内的原子间距来确定键级，再根据原子间的键级[76]来确定分子体系内化学反应时化学键断键成键时的相互作用，同时也可以在能量的角度定量[77]来描述体系内的化学反应。反应分子动力学[78](Reactive Force Fields Molecular Dvnamics，ReaxFF MD)是了ReaxFF反应力场与分子动力学方法的一种分子模拟手段，因此可以用来描述模拟复杂体系时的化学反应。

在反应力场的环境中，经典力场中所描述的原子类型及原子运动的概念已经不适应于这种环境，在此体系下系统中的各个原子之间的连接性也已经消失，取之代替的是任意两个原子之间存在的键级，因为键级的作用在化学键的断裂与生成过程中保持了各原子之间的连接性。在分子动力学的的模拟过程中，化学键发生断裂时键级影响的力和能量将被归置为零并重新参与下一轮反应进行循环。相比于经典分子动力学方法和量子化学模拟方法[79]，ReaxFF MD可以不用预先定义模拟过程中的化学反应路径，与之代替的是在力场中的随机反应，反应的随机性加大了模拟的可信度，因此ReaxFF MD在热解模拟方面极具潜力。

在ReaxFF反应力场中使用BO来表示键级，将原子之间的相互作用定义为键级函数，通过键级函数来表示原子之间的相对位置关系称为势，再由势的函数计算出原子之间的各种能量（公式1-1）。

 （1-1）

式中： *Ebond*表示键能； *Elp*表示孤对电子项；*Eover*、*Eunder*表示过配位的能量矫正项； *Eval*、 *Epen*、*Ecoa*表示价角能量项；*EC2*表示修正项；*Etors*、*Econj*表示四体作用项；*EH-bond*表示氢键作用项；*Etriple*表示三键修正项；*EvdWaals*表示范德华能、*ECoulomb*表示库伦能。

以描述复杂体系的化学反应为目标而提出的ReaxFF是基于键级的化学反应力场，为系统研究凝聚态性质及处理其中可能存在的化学反应过程提供了可能。在ReaxFF力场中，键级是原子间距离的约数，在分子动力学的每一个时间巧循环时重新计算，当化学键断裂时，与键级相关的能量和力将变为零。相比于量子化学和经典分子动力学方法，ReaxFF MD能够在不预先定义化学反应路径的前提下模拟具有反应性的分子体系中的化学反应，且具有处理较大体系及凝聚相中的化学反应过程的能力，基于键级的化学反应力场ReaxFF为研究大规模凝聚态物质的化学反应过程及反应性质提供理论依据。因此这种方法在热解模拟方面极具潜力。

ReaxFF反应力场经过十几年的快速发展，目前ReaxFF MD的适用范围已覆盖元素周期表中的30多种元素，模拟的范围包括高能物质的爆炸反应，晶体及晶体表而的相关作用，热解与燃烧以及其它新材料的开发等多个方面。

**1.3.3 基于ReaxFF反应力场的煤热解模拟**

Salmon[80]在世界范围内首次将ReaxFF MD运用于两个煤大分子结构的热裂解模拟研究中。在煤大分子结构的热解模拟过程中，ReaxFF MD完美地展现了在各种试验研究中观察到的残余结构的失能、解聚和重排的热分解过程，研究表明了甲氧基官能团在系统中形成酚类结构的过程，以及木质素侧链C–C键断裂后产生气态碳氢化合物的过程，这些反应与试验中的推测基本吻合，论文中解释了煤热解过程中主要产物的生成机理。

Mingjie Gao[81]采用ReaxFF MD进行了超级煤大分子热解模拟，模拟表明热解早期阶段， CO2、H2O、CH4和H2的主要生成反应途径与羧基、甲氧基密切相关，但热解模拟对气体和焦油产量的过度预测，但对非挥发性产量的预测不足，由此表明ReaxFF-MD模拟有助于揭示煤热解的总体情况和详细反应；

Dikun Hong[82-83]采用反应分子动力学模拟ReaxFF-MD对准东煤的热解过程进行研究。首先在试验和经典煤模型相结合构建了煤大分子结构模型，随后在程序升温模拟条件下温度从1400-3000 K进行了模拟，研究了温度对准东煤热解的影响，研究还表明热解模拟过程中焦油的反应有两条途径，一是焦油碎片与另一个反应生成碳；二条是焦油分解产生的自由基对碳进行攻击，导致炭碎片的变长，遇刺同时伴随着H2和CO的释放；作者还采用ReaxFF分子动力学模拟研究了冷却速度在低变质程度煤在热解过程中对挥发分的影响。模拟热解时首先在不同温度下对煤进行一系列的热解模拟，然后从热解产物中提取新形成的含自由基挥发性化合物碎片，最后建立了初始的挥发物模型。通过对热解过程中的反应分析，揭示了挥发分在系统冷却过程中的反应机理；

Bhoi S[84]在IntelXeonE5-1607处理器上运行基于ReaxFF反应力场的热解模拟，模拟将16个褐煤分子分别放置于密度分别为0.08 g/cm3、0.1 g/cm3和0.2 g/cm3，尺寸为60nm\*60nm\*60nm、56nm\*56nm\*56nm和44nm\*44nm\*44nm的盒子中，最后使用C/H/O/N/S/B力场进行模拟反应，模拟表明在高温下密度对势能减小现象的影响远远小于温度；

[Bo Chen](http://xueshu.baidu.com/s?wd=author%3A%28Bo%20Chen%29%20&tn=SE_baiduxueshu_c1gjeupa&ie=utf-8&sc_f_para=sc_hilight%3Dperson)[85]采用ReaxFF-MD方法模拟了几种常见煤系模型化合物的加氢反应。在模拟过程中，起始加氢反应的活性部位与超不定域性和空间位阻效应有关，由于其实过程中所需的活化能较低，加氢反应主要发生在取代基的芳香族邻位；

Zheng M[86-87]采用基于GPU的Reaxff MD对计算机硬件施加的计算能力和内存需求特性进行管理，使用该MD对原子范围为1378到27283的煤进行热解模拟计算。作者还使用采用GPU的GMD ReaxFF-MD和VarxMD的反应分析工具，对500-2500 K和1000-2800 K下的热解过程进行了ReaxFF分子动力学模拟，模拟得到了和氮氢化合物有关的详细结构与转化反应；

Castro-Marcano F[79, 88]采用ReaxFF反应力场，再结合Fringe3D和Perl脚本对伊利诺伊州6号煤大分子进行燃烧模拟。Fringe3D可以生成基于HRTEM分布的芳香结构，Perl脚本可以合并杂原子和脂肪结构。论文中作者选择3000–4000 K的温度条件下进行再模拟，研究表明碳的氧化过程主要是由碳的热解或氧分子与氧自由基和氧自由基的吸氢反应来反应的；作者还采用ReaxFF反应力场对伊利诺伊州6号煤的大分子模型进行热解模拟，研究与煤热解有关的结构变化和反应。模拟之前构建了由728种不同原子组成的伊利诺伊6号煤的大分子结构模型，然后使用2000K进行时间持续长度为250 ps的热解模拟。热解模拟结果表明，煤热解主要是由羟基的脱落、芳香结构脱氢和含杂原子的交联断裂引起的；在硫元素存在的情况下，无机气相物质和焦油的生成速率较高，由此得知硫原子增强了煤的热解反应动力学。ReaxFF与煤大分子结构模型一起使用可以作为研究煤热解过程中复杂化学过程和转化的有用工具；

Hanhui Jin[89]采用ReaxFF分子动力学方法对更优秀的煤大分子模型进行超临界水煤气化过程进行热解模拟，模拟过程中发现了水煤气气化过程中发生的化学反应和成氢路径，即H+是成氢的主要途径，同时随着温度的升高，成氢量增加，煤分子在与水分子发生反应前会破碎成小碎片；

Wang H[90]基于WISER煤模型[17]，采用ReaxFF反应力场分子动力学方法模拟研究了煤的加氢热解过程，分析了天然气生产过程和有机硫脱除过程，并讨论相关的反应机理和影响因素。分析表明，在热解过程中加氢[91]可以提高气体产率，随着温度或压力的升高，大分子的脱硫率先升后降。同时加氢可使噻吩、硫酚中的S-C键减弱，键离解能下降，容易发生断裂现象，因此加氢热解可有效提高脱硫率，脱硫率的模拟温度依赖性与实验趋势一致。

ReaxFF MD在碳氢化合物体系上的成功应用，使人们对其在探索复杂体系的化学反应[92]的应用方面产半浓厚的兴趣，并尝试将ReaxFF MD应用到更为复杂体系中煤的热解机理进行探索。煤的热解为自由基驱动的链式反应过程，ReaxFF MD能够对该体系中涉及白由基的化学反应进行描述，为煤的热解和燃烧的机理探索提供新的思路。

根据前人的研究，煤的热解一般遵循有机化合物热解的规律[]，但是为了从其他角度验证这些规律，因此各研究者不约而同地利用ReaxFF MD对相应煤样的大分子结构模型进行热解模拟研究，并且得到了与试验相似的结果。譬如煤的热解过程由煤中桥键断裂开始，其中含有化学性质活泼杂原子更表现为有限断裂，同时在热解试验中发生的脱氢、氢转移、异构化和歧化反应[93]都可以在热解模拟中发生。煤的热解试验和热解模拟中均含有CH4、CO和H2等小分子气体和大量的自由基、官能团。这些在不同煤样的热解试验和模拟中相似的结果，表示ReaxFF MD在研究复杂体系中的煤热解具有极大的潜力，并且可以放心大规模应用。

## 1.4 主要研究内容及思路

**1.4.1 研究内容**

本论文参考前人的研究，结合新的模拟方法，主要内容包括：

（1）首先采用新鲜的东曲2号镜煤样品，分别进行工业分析、元素分析、反射率测定、FTIR测试、XRD测试、13C核磁共振测试、XPS测试以及TG/MS测试。

（2）通过测试所获得的数据，对东曲2号镜煤的结构信息进行表征，通过这些信息并结合ACD、gNMR、origin软件和Python脚本对东曲2号镜煤进行平面结构模型进行调整，最终得到与试验谱图基本吻合的最终平面结构模型。

（3）采用Marerial Studio6.0软件对大分子结构模型依次进行能量最低化模拟、退火模拟、周期性边界条件密度模拟、分子力学和分子动力学模拟，最终得到结构模型的稳定构型、能量组成以及模型的最佳模拟密度值。对大分子结构模型进行量子力学模拟，最终得到表征大分子结构模型微观结构的键长、键角以及电荷布居数，并以此分析整个大分子结构模型的化学环境组成。

（4）采用基于ReaxFF反应力场的ADF-GUI软件对大分子结构模型进行等温条件下的热解模拟，得到此条件下的系统特征、能量变化以及主要产物的产生规律，最后再结合温度为3000K时的产物产生规律，对此温度下的热解规律进行分析。对大分子结构模型进行不同升温速率条件下的热解模拟，得到500K/ps、50K/ps以及5K/ps时的热解规律，并三种不同条件下的热解规律进行对比分析。

（5）对TG/MS测试的测试数据进行处理，得到样品失重及失重速率曲线，由此对热解主要产物CH4及H2的逸出规律进行分析，同时总结东曲2号镜煤的热解反应机理。

（6）得出结论。

**1.4.2 研究思路**

东曲2号镜煤

工业分析、

元素分析

元素分析

XPS

FTIR

XRD

13CNMR

大分子结构模型

分子力学、动力学模拟

模拟

量子化学模拟

基于ReaxFF反应力场的热解模拟

热解产物分析

模拟

结论

Romax

TG/MS

密度

等温条件

下的热解模拟

模拟

不同升温速率条件下的热解模拟

模拟

系统能量变化规律

模拟

失重特征

模拟

图1-5 技术路线图

Figure1-5 Technological route

# 第二章 样品的制备及测试

## 2.1 样品的采集及制备

煤样采自山西太原西山煤田古交矿区东曲2号煤层，选取矿井新鲜煤样，样品采集后，立即装入样品袋内，防止样品污染和氧化作用。样品测试前，在样品制备室手工剥离镜煤部分，手工磨至200目，密封干燥保存，以备测试使用。

## 2.2 样品的测试方法

**2.2.1 工业分析和元素分析**

分别称取2g0.2g残煤和沥青质样品，工业分析依据国家标准《煤的工业分析方法》（GB/T212-2008）进行测定，元素分析依据国家标准规定（GB/T476-2008）进行测定。工业和元素分析在德国EA公司Vario EL型元素分析仪上进行，C、H、N、S的含量为两次平行样的平均值，O含量使用差减法获得。测试结果如下，

表2-1 东曲2号镜煤工业分析和元素分析

Table 2-1 Proximate and ultimate analysis of Dongqu No.2 coal

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Proximate analysis w /% | | |  | Ultimate analysis wdaf /% | | | | |
| Mad | Aad | Vdaf |  | C | H | O | N | S |
| 0.71 | 2 | 17.72 |  | 90.31 | 4.66 | 2.91 | 1.56 | 0.57 |

**2.2.2 反射率测定**

反射率测试在德国Carl Zeiss AG公司生产的Zeiss Axioskop 40A型显微镜上完成，测试依据国家标准（GD/T6948-2008），在24℃的室温的条件下对东曲2号原煤镜质体反射率进行测定，测试结果为Romax=1.81%。

**2.2.3 FTIR测试**

FTIR测试在德国BEUKER公司生产的VERTEX70红外光谱仪上完成，测试采用KBr压片制样法制样。将样品与KBr以1:100的质量比混合，在玛瑙研钵中研磨，置入磨具中，在粉末压片机9Mpa压力下保持1min。试验测试波数范围为400-4000 cm-1，分辨率为2 cm-1，累计扫描次数16次，同时对比空白KBr片18次扫描背景，以此获取高质量光谱。

**2.2.4 XPS测试**

XPS测试在英国VG 公司型号为ES2CALAB250型X射线光电子能谱仪上完成，以C1s（284.6ev）为基准进行能量校正。使用Al Kα阳极，功率为200 W。全扫描透过能为150 eV，步长0.5 eV；窄扫描透过能为60 eV，步长0.05 eV，基础真空为10-7 Pa。

**2.2.5 XRD测试**

XRD测试在日本理学D/Max-RINT2500型X射线多晶衍射仪上完成，测试使用铝框架制样法，将样品置于特定的盲孔载玻片中压片后放入仪器进行测试。试验条件为：Cu靶辐射，电压为40kV，发散和防发散狭缝1.0mm，接收狭缝0.2mm。电流为100mA，扫描范围为5~80°，连续式扫描方式，扫描速度2°/min。强度单位CPS（计数/秒），步长0.01。

**2.2.6 13C核磁共振测试**

C核磁共振测试在美国Varian INOVA300型超导核磁共振仪上完成。测试条件为：固体双共振探头，外径6mm ZrO2转子，魔角转速为6 kHz，13C检测核的共振频率为76.425 MHz，采样时间0. 05 s，脉宽4 μs，循环延迟时间4 s，扫描6000次。使用交叉极化（CP）技术，TOSS 抑制边带。接触时间5 ms，谱宽3000 Hz。

**2.2.7 TG/MS测试**

TG/MS测试在德国NETZSCH公司型号为STA449 F3-QMS403 D的热分析-四级杆质谱仪上完成，热重试验在干燥环境下进行，称重东曲2号原煤样品10mg，仪器在真空的条件从40℃升温至1000℃，升温速率为10℃/min，试验气氛为氮气，吹扫气流速为80 mL/min，保护气流速为20mL/min，仪器可测气体产物质量范围为1u-300u。

# 第三章 东曲2号镜煤结构参数表征及大分子模型的构建

## 3.1 东曲2号镜煤结构参数表征

本论文通过对东曲2号镜煤FTIR、XPS、13C-NMR、XRD测试数据进行分析，以此表征此样品的化学结构并构建其大分子化学结构模型。

**3.1.1 FTIR测试结果分析**



图3-1 东曲2号镜煤的红外光谱图

Fig.3-1 the FTIR spectrum of Dongqu No.2 coal

傅里叶转换红外线光谱(Fourier Transform infrared, FTIR)可以用来侦测不同物质的化学结构，并且是分析化合物结构特征的重要手段。自从上世纪90年代以来，煤的FTIR被广泛应用于煤结构研究中，经过多年的发展可以通过FTIR数据拟合判断煤结构中特定位置的官能团类型。

对于煤的FTIR大致可以分为四个波段吸收带，分别是位于700-900cm-1波段的芳香烃吸收带，位于1000-1800cm-1波段的各种含氧官能团和部分脂肪烃吸收带，位于2800-3000cm-1波段的脂肪烃吸收带，位于3000-3600cm-1波段的羟基吸收带。由上图3-1为东曲2号镜煤的红外光谱原始图，表3-1为煤红外光谱中各个吸收峰的归属。

表3-1煤红外光谱中各吸收峰的归属

Table3-1 Attribution of Absorption Peaks of Coal FTIR

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 波数/cm-1 | 波长/um | 各吸收峰的归属 |
| >5000 | <2.0 | 振动峰的倍频或组频 |
| 3300 | 3.0 | 氢键缔合的-OH(或-NH), 酚类 |
| 3030 | 3.30 | 芳烃CH |
| 2950 | 3.38 | -CH3 |
| 2860-2920 | 3.42-3.50 | 环烷烃或脂肪烃CH3 |
| 2350-2780 | 3.6-4.52 | 羟基 |
| 1780-1900 | 5.25-5.6 | 芳香烃(1, 2-取代; 1, 2, 4-取代) |
| 1700 | 5.9 | 羰基 |
| 1610 | 6.2 | 与氢键缔合的羰基; 具有-O-取代的芳烃C=C |
| 1470-1590 | 6.3-6.8 | 大部分的芳烃 |
| 1460 | 6.85 | -CH2和-CH3, 或无机碳酸盐 |
| 1375 | 7.27 | -CH3 |
| 1110-1330 | 7.5-9.0 | 酚、醇、醚、脂的C-O |
| 910-1040 | 9.6-11.0 | 灰分 |
| 860 | 11.6 | 1, 2, 4-; 1, 2, 4, 5-(1, 2, 3, 4, 5)取代芳烃CH |
| 833 | 12.0 | 1, 4取代芳烃CH |
| 815 | 12.3 | 1, 2, 4-(1, 2, 3, 4-)取代芳烃CH |
| 750 | 13.3 | 1, 2-取代芳烃 |
| 700 | 14.3 | 单取代或1, 3-取代芳烃CH, 灰分 |

**3.1.1.1 芳香烃吸收带**

700-900cm-1波段红外光谱反映煤结构中芳香核中近邻氢原子的变形振动区域，代表芳香结构中苯环的取代方式。

利用数据分析软件Oringin 7.5对红外光谱上波段为700-900cm-1的谱图进行截取后，利用插件PFM重新校订此段基线后，并参考煤的红外光谱归属对此波段的谱图进行分峰拟合处理。分峰拟合结果如图3-2所示，分峰拟合后各峰峰位归属参数详见表3-2。

图3-2 700~900cm-1波段分峰拟合图

Fig.3-2 Curve fitted of 700~900cm-1 wave number

表3-2 700~900cm-1波段分峰参数表

Table3-2 Parameters of 700~900cm-1 FTIR absorbance by curve-fitting

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 峰位/cm-1 | 半峰宽 | 面积百分比/% | 峰位归属 |
| 1 | 721.75 | 12.18 | 0.80 | 灰分 |
| 2 | 750.69 | 29.49 | 23.45 | 1取代芳烃 |
| 3 | 788.22 | 36.72 | 12.70 | 2取代芳烃 |
| 4 | 810.68 | 30.05 | 18.75 | 3取代芳烃 |
| 5 | 836.55 | 34.32 | 13.74 | 3取代芳烃 |
| 6 | 868.47 | 29.86 | 22.07 | 4取代芳烃 |
| 7 | 887.47 | 27.39 | 8.09 | 5取代芳烃 |
| 8 | 915.90 | 10.61 | 0.41 | 6取代芳烃 |

从图3-2中可以看出将900-700cm-1波段的红外谱图分峰拟合为8个高斯肩峰，结合本波段的分峰拟合参数表3-2可知，东曲2号镜煤芳香结构中的苯环上氢原子共有5种取代方式，其中以3取代为主，占比约32％，1、4取代次之，分别占比为23.45%、22.07%。

**3.1.1.2 含氧官能团吸收带**

1000-1800cm-1波段红外光谱反映煤结构中各种含氧官能团的振动，同时还包括少量脂肪烃以及芳香烃中C=C双键的伸缩振动。煤中的含氧官能团主要有羧基、酚羟基、羰基、甲氧基和醚氧键，其中甲氧基和羧基在煤变过程的早中期就已消失，东曲2号镜煤变质程度达到了烟煤阶段（R0max=1.81），因此此煤中不包含羧基和甲氧基。

利用数据分析软件Oringin 7.5对东曲2号镜煤红外谱图上1000-1800cm-1波段的含氧官能团吸收带进行分峰拟合处理，分峰拟合结果如图3-3所示，分峰拟合后各峰峰位归属参数详见表3-3。



图3-3 1000-1800cm-1波段分峰拟合

Fig.3-3 Curve-fitted of FTIR during1000-1800cm-1

表3-3 1000-1800cm-1段红外吸收峰分峰参数表

Table 3-2 Peaks parameters of 1000~1800cm-1 FTIR absorbance by curve-fitting

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 峰位/cm-1 | 半峰宽 | 百分比/% | 峰位归属 |
| 1 | 1008.16 | 22.58 | 0.81 | 灰分 |
| 2 | 1033.83 | 29.54 | 1.81 | 灰分 |
| 3 | 1073.60 | 99.86 | 5.69 | 酚、醇、醚、苯氧基、酯中C-O伸缩振动 |
| 4 | 1177.46 | 102.34 | 9.44 | 酚、醇、醚、苯氧基、酯中C-O伸缩振动 |
| 5 | 1270.01 | 98.46 | 12.72 | 酚、醇、醚、苯氧基、酯中C-O伸缩振动 |
| 6 | 1343.33 | 69.78 | 9.97 | 酚、醇、醚、苯氧基、酯中C-O伸缩振动 |
| 7 | 1380.15 | 31.78 | 3.78 | 酚、醇、醚、苯氧基、酯中C-O伸缩振动 |
| 8 | 1403.33 | 23.43 | 2.38 | CH2-C=O |
| 9 | 1425.16 | 33.87 | 4.97 | CH3对称弯曲振动 |
| 10 | 1450.14 | 36.96 | 7.08 | CH3对称弯曲振动 |
| 11 | 1480.34 | 56.86 | 4.87 | -CH3和-CH2不对称变形振动 |
| 12 | 1524.25 | 78.26 | 4.98 | -CH3和-CH2不对称变形振动- |
| 13 | 1583.51 | 56.84 | 8.91 | 芳香烃的C＝C骨架振动 |
| 14 | 1615.60 | 50.35 | 14.77 | 芳香烃的C＝C骨架振动 |
| 15 | 1658.26 | 42.84 | 6.46 | 羧酸的C=O的伸缩振动 |
| 16 | 1718.28 | 61.10 | 1.34 | 羧酸的C=O的伸缩振动 |

从图3-3中可以看出将1000-1800cm-1波段的红外谱图分峰拟合为16个高斯肩峰，结合表3-3可知，1000-1800cm-1波段拟合后1380-1000cm-1段吸收峰源于煤中含氧官能团的振动，如1270-1073cm-1为醚氧峰，1380-1343cm-1为酚羟基；1524-1425cm-1段吸收峰指示脂肪烃CH；1615-1583cm-1段吸收峰的出现归因于煤中芳香结构化合物C=C的伸缩振动；1658cm-1峰属共轭C=O键；1718cm-1为羧基振动峰。

**3.1.1.3 芳香烃吸收带**

2800-3000cm-1波段红外光谱反映煤结构中脂肪烃-CHx对称和不对称的伸缩振动。利用数据分析软件Oringin 7.5对东曲2号镜煤红外谱图上2800-3000cm-1波段脂肪烃吸收带进行分峰拟合处理，分峰拟合如图3-4所示，分峰拟合各峰峰位归属参数详见表3-4。



图3-4 2800-3000cm-1波段分峰拟合图

Fig. 3-4 Curve fitted of 2800-3000cm-1 wave number

表3-4 2800-3000cm-1段红外吸收峰分峰参数表

Table 3-3 Peaks parameters of 2800-3000cm-1 FTIR absorbance by curve-fitting

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 峰位/cm-1 | 半峰宽 | 面积百分比/% | 峰位归属 |
| 1 | 2837.53 | 34.72 | 7.39 | 对称的CH2 |
| 2 | 2854.62 | 26.21 | 11.08 | 对称的CH2 |
| 3 | 2873.34 | 34.85 | 12.48 | 对称的CH3 |
| 4 | 2899.85 | 33.56 | 18.17 | CH |
| 5 | 2923.88 | 29.14 | 32.46 | 不对称的CH2 |
| 6 | 2954.18 | 28.92 | 18.42 | 不对称的CH3 |

从图3-4中可以看出将2800-3000cm-1波段的红外谱图分峰拟合为6个高斯肩峰，结合表3-4可知，2800-3000cm-1段红外光谱包含三个显著的吸收峰，峰位分别为2854.62cm-1、2923.88 cm-1和2954.18 cm-1。2854.62cm-1吸收峰反映的是脂肪烃中对称的CH2的伸缩振动，2923.88 cm-1吸收峰反映的是脂肪烃中不对称的CH2的伸缩振动，2954.18cm-1吸收峰反映了CH3的非对称伸缩振动。

样品FTIR数据分析中对称的CH2含量为18.47%，不对称的CH2含量为32.46%，对称的CH3含量为12.48%，不对称的CH3的含量为18.42%，而CH的含量为18.17%，由此可得知在东曲2号镜煤中-CH3、=CH2与≡CH之比近似为3 : 5 : 2。

**3.1.1.4 羟基吸收带**

煤是具有聚集态的复杂结构，但氢键是煤变演化过程中促使煤大分子之间相互结合地重要化学作用，因此在煤大分子聚集态研究中不能忽视氢键对整体结构的作用。在煤中氢键的作用促使形成了羟基，羟基的化学性质活泼，对煤的理化性质具有重要影响，因此研究煤中的羟基具有重要意义。

煤中的羟基类型包括五种：自由羟基、环状羟基、与醚连接的羟基、与苯环连接的羟基、羟基间的氢键形成的羟基[]。煤中存在的自由羟基不能排除水的影响，在煤变演化的早期，可能由于煤中的含氧官能团较多，造成氢键对整体的作用较为明显，随着时间的推移煤阶变得越来越高，这种影响越来越弱，因此形成羟基的氢键作用变弱。

利用数据分析软件Oringin 7.5对东曲2号镜煤红外谱图上3000-3600cm-1波段的含氧官能团吸收带进行分峰拟合处理，分峰拟合如图3-5所示，分峰拟合后各峰峰位归属参数详见表3-5。



图3-5 3000-3600cm-1波段分峰拟合图

Fig.3-5 Curve fitted of 3000~3600cm-1 wave number

表3-5 3000-3600cm-1段红外吸收峰分峰参数表

Table 3-5 Peaks parameters of 3000~3600cm-1 FTIR absorbance by curve-fitting

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 峰位/cm-1 | 半峰宽 | 面积百分比/% | 峰位归属 |
| 1 | 3040.18 | 55.64 | 2.33 | 苯环C-H |
| 2 | 3243.77 | 149.10 | 13.48 | 环状氢键 |
| 3 | 3401.19 | 169.02 | 48.25 | 羟基-醚氢键 |
| 4 | 3481.90 | 129.96 | 21.31 | 羟基-羟基氢键 |
| 5 | 3559.99 | 97.55 | 11.84 | 羟基-π氢键 |
| 6 | 3622.35 | 57.86 | 2.78 | 自由氢键 |

从图3-5中可以看出将3000-3600cm-1波段的红外谱图分峰拟合为6个高斯肩峰，结合表3-5可知，东曲2号煤镜煤中含量最多的氢键类型为羟基-醚氢键，其含量高达48.25%；其次是羟基-羟基氢键，其含量为21.31%，结合样品的性质推测出现这种情况的主要原因为样品中含有的醚氧基和酚羟基较多，在煤的演化过程中不同煤分子之间的酚羟基相互作用可连接形成此类氢键，与之相对应的是在样品中的羟基-π氢键含量则比较少，含量为11.84%。

**3.1.2 XPS测试结果分析**

X射线光电子能谱(XPS)在测试中对受测样品的结构不具有破坏性，根据这一点其是研究煤中微量元素赋存形态的有效手段。根据测试过程中光电子吸收峰的峰位，根据各个峰的归属，即判断出可出样品中的存在元素及同种元素不同的赋存形态。

本文通过对东曲2号镜煤进行XPS测试，并利用测试数据对XPS谱图进行分峰拟合，来表征O和N两种杂原子元素在样品中的赋存形态。

**3.1.2.1 氧元素**

张卫[]认为无机氧、有机氧和吸附氧为煤中O元素的三种赋存形态，其中-COOH、C=O、-OH和C-O-C为有机氧的四种赋存形态。

利用数据分析软件Oringin 7.5对东曲2号镜煤O1s XPS谱图进行分峰拟合处理，分峰拟合结果如图3-6所示，分峰拟合后氧原子存在形式及含量详见表3-5。



图3-6 氧原子的XPS分峰拟合图

Fig.3-6 Curve-fitted of oxygen atom

表3-6氧原子的存在形式及含量

Table 3-5 Oxygen atom form and content

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| E/eV | Oxygen form | Content wmol% |
| 531.48 | 无机氧 | 13.58 |
| 533.19 | C=O | 48.26 |
| 534.43 | 吸附氧 | 38.16 |

从图3-6中可以看出将O1s XPS谱图分峰拟合为3个高斯肩峰，结合表3-6可以看出，东曲2号煤镜煤中在531.48eV的无机氧的含量为13.58%，534.43eV吸附氧的含量为38.16%，533.19eV有机氧的含量为48.26%，三种氧元素存在形式的比例为1 : 3 : 4。由于东曲2号镜煤的变质程度较高，因此样品中已不含有羧基，氧元素主要存在于羰基中。

**3.1.2.2 氮元素**

成煤植物、微生物含有的蛋白质、氨基酸、叶绿素及生物碱等[]是煤中的氮元素主要来源，且氮元素几乎全部以吡咯型氮(N-5)、吡啶型氮(N-6)、氮氧化物(N-X)和质子化氮(N-Q)[]等有机物的形式存在，此外还有一定量的吡啶酮和不饱和芳香氨基。其中，吡啶与吡咯由于化学性质不活泼可在煤变质过程中保持稳定，因此煤中氮元素最主要的存在形式是吡咯型氮和吡啶型氮，氮氧化物和质子化氮的含量较少。

利用数据分析软件Oringin 7.5对东曲2号镜煤N1s XPS谱图进行分峰拟合处理，分峰拟合结果如图3-7所示，分峰拟合后氧原子存在形式及含量详见表3-7。



图3-7氮原子的XPS分峰拟合

Fig.3-7 Curve-fitted of residue of nitrogen atom

表3-6 氮原子的存在形式及含量

Table 3-6 Nitrogen atom form and content

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| E/eV | Sulfur from | Content Wmol / % |
| 398.54 | 吡啶型氮(N-6) | 41.90 |
| 399.96 | 吡咯型氮(N-5) | 35.57 |
| 401.05 | 季氮(N-X) | 14.96 |
| 402.49 | 氮氧化物(N-Q) | 7.581 |

从图3-7中可以看出将N1s XPS谱图分峰拟合为4个高斯肩峰，结合表3-7可以看出，东曲2号镜煤的N1s XPS谱图中398.54ev和499.96ev存在两个吸收峰，由表3-7可知这两个吸收峰分别归属于吡啶型氮(N-6)和吡咯型氮(N-5)，且二者的总含量超过了煤中氮元素总量的77%，吡咯型氮与吡啶型氮的含量之比为1:1。由元素分析可知N元素的质量分数为1.56%，所以考虑在模型中加入一个吡啶和一个吡咯。

**3.1.3 X射线衍射结果分析**

X射线衍射法(X-Ray diffraction, XRD)是目前测定晶体结构[]的重要手段，使用XRD研究煤结构的历史很长，早在上世纪30年代年美国学者Mahadevan首次使用XRD对煤的性质进行研究[]。X射线衍射分析能观测和揭示煤的基本结构单元信息以及碳原子排列的序性[]，是研究煤中的芳香层片堆砌高度及延展度的有效手段[]。

当 X 射线通过煤的芳环层叠片时产生衍射角。根据 X 射线衍射图的波形、波峰和衍射角的大小，可计算出芳环层叠片结构参数d002( 芳香层单层之间的距离，nm) 、Lc ( 芳香层片平均堆砌厚度，nm) 、La ( 芳香层片的直径，nm) 、N( 碳原子网堆砌层数) ，并可以通过衍射峰的形状判断煤的有机分子排列的规则程序

。



图3-8 东曲2号镜煤XRD原始谱图

Fig.3-8 XRD original spectrum of Dongqu No.2 Vitrinite coal

由图3-8可知，图谱中均包含两个明显的衍射峰，2θ=25°的002峰衍射强度很大，2θ=43°左右的100峰衍射强度则比较弱，峰型比较低缓。002峰实际是由002带和γ带叠加形成的，002带与芳香层片的堆垛有关，γ带则是由煤中脂肪烃引起的，受煤脂肪侧链、环烷烃含量的影响。

利用数据分析软件Oringin 7.5对XRD谱图进行分峰拟合处理，处理时主要选取5°-35°的002峰部分和35°-50°的100峰两部分， 002峰和100峰分峰拟合如图3-9所示，分峰参数见表3-7。



(a)



(b)

图3-9 XRD图谱分峰拟合，a : 5°-35°的002峰，b : 35°-50°的100峰

Fig.3-9 Curve-fitted of asphaltene XRD spectrum, a : 5°-35° diffraction peak，b : 35°-50° diffraction peak

表3-7 XRD分峰参数表

Table 3-7 parameters by curve-fitting of XRD

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Number | 2θ/° | FWHM | Peak Type |
| γ Band | 19.58 | 12.57 | Gaussian |
| 002 Peak | 24.96 | 4.27 | Gaussian |
| 100 Peak | 43.42 | 9.00 | Gaussian |

所要计算的XRD参数有芳香层间距（d002）、芳香层片的延展度（La）、堆砌高度（Lc）、堆砌层数（N）和层间距d002可通过式（3-1）-（3-4）得出[]。

d002= （3-1）

Lc= （3-2）

La= （3-3）

Nave=+1 （3-4）

式中:

λ—X射线的波长，（nm）

θ002、θ100—002峰和100峰所对应的衍射角度，（°）

β002、β100—002峰和100峰所对应的半峰宽值，（rad）

K1、K2—微晶形状因子，K1=0.94，K2=1.84

将原煤、残煤和沥青质的XRD分峰参数代入到式（3-1）-（3-4），计算得出煤的结构参数，计算结果见表3-8。

表3-8 XRD结构参数表

Table 3-10 structure parameters of XRD

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 层间距d002/（Å） | 延展度La/（Å） | 堆砌高度Lc/（Å） | 堆砌层数/N |
| 3.55 | 19.62 | 21.32 | 6.01 |

由表3-15可知，此样品的层间距d002大小为3.55 Å略大于石墨的3.35 Å，由于堆砌层数为6.01层，故有堆砌高度为21.32 Å符合基本客观规律。由于此样品的变质程度较高，故与芳香环相连的脂肪侧链相对含量较高，所以造成延展度La较大。

**3.1.4 13C核磁共振结果分析**

13C核磁共振是一种表征有机材料结构组成的重要手段，是研究有机化合物结构和构象等的重要工具。早在1955年核磁共振就开始用于煤的研究，主要用来研究煤中碳、氢原子分布，煤的芳香度及煤中缩合芳香结构等[1,2]。近年来，随着实验技术的不断改进，如交叉极化(CP)、魔角旋转(MAS)、偶极相移(DD)、旋转边带全抑制(TOSS)等技术的应用，才使得煤的13C核磁共振技术广泛应用。13C核磁共振光谱可以直接提供煤大分子结构的骨架信息，反映煤芳香结构单元的连接方式，为煤大分子结构模型的构建提供重要依据。

[1] Yoshida T , Maekawa Y . Characterization of coal structure by CP/MAS carbon-13 NMR spectrometry[J]. Fuel Processing Technology, 1987, 15(none):385-395.

[2] 叶朝辉, 李新安. 煤的固体高分辨~(13)C-NMR谱[J]. 科学通报, 1985, 30(20):1545-1545.



图3-10 13CNMR核磁谱图

Fig.3-10 13CNMR spectrum

由图3-10可以看出13C核磁谱图的化学位移范围是0-250ppm，核磁图谱主要包括四个吸收峰，分别为位于0-25ppm的甲基、亚甲基峰；位于25-60ppm的季碳和次甲基峰；位于90-165ppm的芳香碳峰；位于175-220ppm的羰基碳峰[]。90-165ppm的芳香碳峰的吸收强度明显大于脂肪碳吸收峰，表明煤结构中芳香碳原子占主导地位，脂肪碳起到连接芳香环的作用。

由于煤结构的复杂性，在13CNMR核磁谱图中，不同化学结构的特征峰出现重叠现象，参考13C核磁的碳化学位移归属，使用Origin7.5软件对东曲2号镜煤的13C核磁谱图进行分峰处理如图3-11所示，碳化学位移归属见表3-9。



图3-11 13CNMR分峰谱图

Fig.3-11 Curve-fitted 13CNMR spectrum

表3-9 13CNMR分峰模拟参数

Table 3-9 Parameters of 13CNMR by curve-fitting

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 峰位/ppm | 半峰宽 | 面积百分比/% | 峰位归属 |
| 1 | 15.16 | 8.35 | 1.84 | 脂甲基 |
| 2 | 21.01 | 7.11 | 4.01 | 芳甲基 |
| 3 | 29.88 | 10.85 | 4.06 | 与脂甲基相连的亚甲基 |
| 4 | 35.69 | 9.60 | 5.68 | 亚甲基 |
| 5 | 41.92 | 9.41 | 4.35 | 次甲基 |
| 6 | 51.18 | 16.62 | 5.06 | 氧接亚甲基碳 |
| 7 | 112.92 | 15.37 | 3.93 | 质子化芳碳 |
| 8 | 120.43 | 9.92 | 12.10 | 质子化芳碳 |
| 9 | 127.31 | 9.91 | 28.06 | 质子化芳碳 |
| 10 | 137.97 | 11.81 | 16.63 | 桥接芳碳 |
| 11 | 149.40 | 14.82 | 2.79 | 侧支芳碳 |
| 12 | 158.97 | 16.98 | 1.06 | 氧取代芳碳 |
| 13 | 207.59 | 13.16 | 3.44 | 羰基碳 |
| 14 | 214.11 | 10.10 | 4.08 | 羰基碳 |
| 15 | 223.92 | 14.33 | 2.93 | 羰基碳 |

对13CNMR核磁谱图分峰处理之后，根据各个官能团的峰位归属和面积百分比计算出表征煤化学结构信息的12个结构参数，见表3-10。

表3-10 东曲2号镜煤结构参数表

Table 3-10 Parameters of Dongqu No.2 Vitrinite coal

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 芳香碳部分 | 芳香碳类型 |  | 脂肪碳部分 | 脂肪碳类型 |  |
| *fa* (100-220) | 总碳 | 0.75 | *fal* (-90) | 总碳 | 0.25 |
| *fa’*(100-165) | 芳环碳 | 0.65 | *falH* (-36) | 亚甲基或次甲基碳 | 0.10 |
| *faC*(165-) | 羧基碳 | 0.10 | *fal\**(36-50) | 甲基碳或季碳 | 0.10 |
| *faH*(100-129) | 质子化芳碳 | 0.44 | *falO*(50-90) | 氧连碳 | 0.05 |
| *faN*(129-165) | 非质子化芳碳 | 0.21 |  |  |  |
| *faP*(150-165) | 酚羟基或醚氧连碳 | 0.01 |  |  |  |
| *faS*(135-150) | 烷基取代碳 | 0.03 |  |  |  |
| *faB*(129-137) | 芳香桥碳 | 0.17 |  |  |  |

由表3-13可知，东曲2号镜煤的*fa’*为0.65即此样品的核磁芳碳率为0.65，此结果与FTIR所计算得到的红外芳碳率0.67基本一致，验证了13CNMR核磁谱图数据拟合的正确性。

## 3.2东曲2号镜煤大分子模型的构建

**3.2.1 芳香结构单元**

构建大分子模型过程中，主要通过计算芳香桥碳与周碳之比来确定分子模型的芳香结构，且桥碳与周碳之比用XBP表示

*XBP*=*faB*/（*faH*+*faP*+*faS*）

前人研究表明，对于烟煤中的缩合芳香环：碳含量为80%时，其苯环平均个数为2个；碳含量为85%时，其苯环平均个数为3个；当碳含量大于90%时，其苯环的个数为3-5个。萘环缩合程度为2，X*BP*为0.25；蒽环缩合程度为3，X*BP*为0.4。由表3-8中的12个煤结构参数计算得出东曲2号镜煤中芳香桥碳与周碳之比为0.35，因此东曲2号镜煤构模型芳香骨架以蒽环为主，萘环和苯环为辅。通过调整结构模型中苯环、萘环和蒽环的数学组合，使模型*XBP*接近0.336，并最终确定了结构模型中芳香骨架组合，结果见表4-1，

表3-11 东曲2号煤芳香结构类型和数量

Table 3-11 Types and quantities of aromatic unit structure of Dongqu No.2 coal

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 芳香结构类型 | | 数量 | 芳香结构类型 | | 数量 |
| 说明: 33 | 4 Ring | 3 |  | 1 Ring | 1 |
|  | 3 Ring | 2 |  | < 3.0 Å | 1 |
|  | 2 Ring | 2 |  | 1 |

**3.2.2 脂肪结构**

煤中脂肪烃的存在形式主要是烷基侧链、环烷烃和氢化芳环等。烷基侧链随煤化度的增加而减少，如：碳含量为80.4%时，烷基侧链中含有的碳原子平均数目为2.2，碳含量为84.3%时，烷基侧链中含有的碳原子平均数目为1.8。

脂肪结构的存在形式主要通过红外测试结果得到。900-700cm-1段分峰结果表明，东曲2号镜煤中苯环上的氢原子共5种取代方式，其中以3取代为主，其次是1取代、4取代，表明芳香结构中连接有更多的甲基和亚甲基。

对3000-2800cm-1波段分析得到残煤中脂肪烃结构以CH2为主，其次为甲基，次甲基含量最少；沥青质中脂肪结构也以亚甲基为主，且亚甲基的含量高于沥青质。

脂肪烃结构在煤结构中的占比是通过核磁共振测试结果分析得到的。由表3-8可知，结构中的*fal*值为25%。

综合可得，两组分脂肪烃结构的主要存在形式为脂肪侧链和环烷烃，其中以CH2形式存在的脂肪烃结构最多，其次为甲基和次甲基。

**3.2.3 杂原子结构**

由芳香结构单元的类型和数量，得样品中芳香族碳原子的个数为117，再根据芳碳率计算得出模型中碳原子总数为174。而元素分析可以确定各元素原子个数比，从而计算出O、N原子个数分别为5个、2个。

（1）氧原子

煤中氧原子的存在形式主要是羧基、羰基、羟基、甲氧基和醚氧键这五种含氧官能团。随煤化度增加，不稳定的含氧官能团逐渐脱除，焦煤中已不含有甲氧基和羧基，因此结构模型中不再添加甲氧基和羧基。羰基和羟基比较稳定，存在于整个煤化过程中。

残煤和沥青质氧原子主要存在形式为C-O和C=O，并且含有少量的无机氧和吸附氧。对于531eV和533eV的官能团归属有不同的观点，有文献[66]认为531ev和533ev属于C-O和C=O,也有文献[67]认为531ev和533ev归属于C=O和C-O，本文持与前者一样的观点，在13CNMR核磁图谱中60~90ppm的氧接脂肪烃部分并没有明显的吸收峰，说明样品中醚氧键的含量很少，而在190~220ppm的羰基碳峰强度很大，说明羰基的含量比较高。由XPS分峰归属得出两种组分中C=O和C-O的含量之比为5:1和5:2，因此在残煤模型中添加1个酚羟基和5个羰基，在沥青质模型中添加1个醚氧键、1个酚羟基和4个羰基。

（2）氮原子

残煤和沥青质中N元素主要存在形式为吡啶型氮和吡咯型氮。其中吡咯型氮和吡啶型氮含量比值约为1:1，经计算残煤和沥青质模型中氮原子个数均为2，因此模型中均添加了1个吡咯环和1个吡啶环。

（3）硫原子

由样品的元素分析知在样品中的含量较低为0.57%，煤中硫元素的赋存形式有无机硫和有机硫，有机硫主要以硫醚和杂环醚的形式存在，在褐煤中的有机硫的存在形式为硫醇和脂肪硫醚，在烟煤中的存在形式是噻吩环。由碳原子总数计算出硫原子的个数小于1，又考虑到构建过程中ACD/CNMR Predictor软件的计算能力的限制，碳原子总数不能超过255个，因此残煤和沥青质模型中不再添加硫原子。

**3.2.4 模型修正**

模型构建主要使用使用ACD/Chem Sket软件。Wiser模型较完整的反映了烟煤的结构特征，故本次平面模型建立以Wiser化学模型为参考。同时利用ACD/CNMR Predictor软件对结构模型进行13CNMR化学位移计算，将化学位移计算结果导入到gNMR软件计算模型的13CNMR图谱，并与试验13CNMR图谱进行比对。有机物具有同分异构体，故在构建分子模型过程中需要不断调整各结构单元的连接方式，使得13CNMR模拟图谱与实测图谱很好地吻合。

图4-2为东曲2号镜煤的初始平面结构模型，并将得到的13CNMR模拟图谱导入origin8.0软件中与实测图谱对比，如图4-3所示，

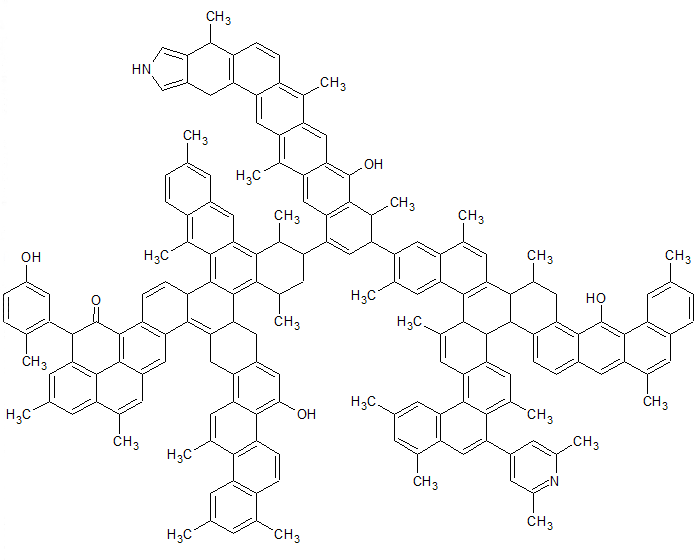


图3-14初始平面结构模型

Fig.3-14 Initial plain model



图3-15初始平面模型13CNMR计算图谱与试验图谱对比图

Fig.3-15 Comparison of calculated 13CNMR specturm with experimented of initial plain model

由图4-3可知，

沥青质模拟图谱与试验图谱并没有很好的吻合，25~55ppm的计算图谱低于试验图谱，表明沥青质模型中亚甲基、次甲基的含量低于真实含量；另外计算图谱100~129 ppm的芳香碳峰出现了右偏现象，说明芳香环之间的连接方式与真实煤结构有较大的差异，需要重新绘制平面模型。

由图4-7可知沥青质13CNMR计算图谱与试验图谱整体吻合程度较高，只是在190~220ppm区域相差较大，该区域碳化学位移归属于煤中的羰基碳原子，受试验过程中边带效应的影响[68]，试验图谱羰基碳峰吸收强度相较计算图谱偏大。

分子结构模型构建完成后，计算了模型的结构参数，结果见表4-2，

表3-12 模型结构参数

Table3-12 parameters of structure model

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品 | 分子式 | 元素含量/（*w*t/%） | | | | 相对分子量 | 芳香度/% |
| C | H | O | N |
| 东曲2号镜煤 | C174H148O5N2 | 89.04 | 6.36 | 3.41 | 1.19 | 2347 | 66.5 |