

国家自然科学基金资助项目(59974020)

国家杰出青年基金资助项目(50125414)

鲍庆国 文 虎 王秀林 徐精彩 著

煤自燃理论及防治技术

MEIZIRANLILUNJI
FANGZHIJISHU

煤炭工业出版社

国家自然科学基金资助项目 (59974020)

国家杰出青年基金资助项目 (50125414)

煤自燃理论及防治技术

鲍庆国 文 虎 王秀林 徐精彩 著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

煤自燃理论及防治技术/鲍庆国等著. —北京: 煤炭工业出版社, 2002

ISBN 7-5020-2227-9

I. 煤… II. 鲍… III. ①煤田—内因火灾—研究
②内因火灾—矿山防火 IV. TD75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 074285 号

煤自燃理论及防治技术

鲍庆国 文 虎 王秀林 徐精彩 著

责任编辑: 李 振 祥

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 9

字数 232 千字 印数 1—1,200

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月第 1 次印刷

社内编号 4998 定价 35.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换



内 容 简 介

全书共十二章。第一章煤炭自燃综述，介绍煤的自燃学说、煤的自燃性、煤低温自燃过程；第二章煤自燃环境分析，分别论述了巷道煤层自燃环境分析、采空区遗煤自燃环境和现场煤炭自燃的规律；第三章煤炭自燃的预测预报，介绍了煤的自燃倾向性测试、巷道自燃危险区域预测、采空区遗煤自然发火预测、煤层自燃预报及气体监测等技术；第四章煤样自然发火实验，介绍煤自燃特性参数实验，煤体粒度与自燃性关系实验测试；第五章至第九章主要介绍了专项防灭火技术；第五章注浆与注砂防灭火技术；第六章调节风压防灭火技术；第七章堵漏技术；第八章凝胶防灭火技术；第九章氮气防灭火技术；第十章防灭火技术的组织与管理；第十一章四处火点的治理方案；第十二章工作面防火处理实施方案。

目 录

第一章 煤炭自燃综述	1
第一节 煤自燃学说	2
第二节 煤的自燃性	5
第三节 煤低温自燃过程	7
第二章 煤自燃环境分析	34
第一节 巷道煤层自燃环境分析	34
第二节 采空区遗煤自燃环境	44
第三节 现场煤炭自燃的规律	51
第三章 煤炭自燃的预测预报	56
第一节 煤的自燃倾向性测试	56
第二节 巷道自燃危险区域预测	58
第三节 采空区遗煤自然发火预测	60
第四节 煤层自燃预报及气体监测	67
第四章 煤样自然发火实验	72
第一节 煤自燃特性参数实验	72
第二节 煤体粒度与自燃性关系测试	88
第五章 注浆与注砂防灭火技术	94
第一节 注浆防灭火系统	94
第二节 注浆方式	99
第三节 注砂防灭火	104

第六章 调节风压防灭火技术	107
第一节 调压技术的基本原理及方式	107
第二节 采空区全风压调压技术的应用	113
第三节 联合调压法防灭火技术的应用	126
第七章 堵漏技术	133
第一节 灰膏组合材料封堵漏风	133
第二节 聚胺脂泡沫塑料喷堵漏风	135
第八章 凝胶防灭火技术	138
第一节 胶体防灭火材料	138
第二节 胶体防灭火工艺及应用	145
第九章 氮气防灭火技术	154
第一节 氮气防灭火机理及特点	154
第二节 注氮防灭火系统	155
第三节 注氮防灭火技术的应用	161
第十章 防灭火技术的组织与管理	168
第一节 组织保障措施	168
第二节 生产管理措施	171
第三节 专业管理措施	175
第四节 监督检查措施	179
第十一章 四处火点的治理方案	181
第一节 348 工作面材料道火点处理	181
第二节 2336 ^② 工作面溜子道西段火点处理	194
第三节 2339 通道火点处理	209
第四节 2342 综放面停采线火点处理	218

第十二章 工作面防火处理实施方案..... 232

第一节	2347 区段防火.....	232
第二节	2334 区段防火.....	244
第三节	2349 综放面防火.....	253
第四节	363-3 高档放顶煤工作面防火	257
第五节	340-1 区段防火	264
第六节	347-3 高档放顶煤工作面防火	270

第一章 煤炭自燃综述

煤自燃是自然界存在的一种客观现象，已经存在了数百万年。譬如大同侏罗纪煤层最早在第四纪早更新世，即距今约二百万年前就开始自燃，仅在雁崖3号和11号煤层古火区就已烧毁大约2000万t煤，燃烧特征十分明显。据统计，仅我国北方7省露头着火面积达720km²，累计烧毁煤量42亿t以上，现仍以每年3000多万吨燃烧速度发展。

在煤层开采过程中，我国大约有50%的矿井存在自然发火危险，每年由于自燃造成的直接和间接经济损失近百亿元。尤其是到20世纪80年代末、90年代初，自燃火灾已成为制约煤矿高产高效技术发展的主要障碍之一。煤层自燃火灾经常引发矿井瓦斯爆炸，而且灭火时常有水煤气爆炸的危险；自燃火灾产生的有毒有害气体在井下巷道流动，给井下工人生命安全造成极大威胁，严重影响了矿井的安全生产。因此，煤层自燃机理和防治技术的研究与实践显得十分重要。

关于煤炭自燃起因和过程，学者们在17世纪即开始探索和研究，迄今未能得到圆满解决。各国学者发表了各种学说以解释煤炭自燃的起因，主要有黄铁矿导因、细菌导因、酚羟基导因、煤氧复合导因等，其中煤氧复合学说得到了大多数学者的一致认同。煤自燃的最终参与物主要是煤和氧，煤对氧的吸附和氧化反应经实验考察得到证实。

引起煤自燃的最初导因是煤岩体与某些物质的作用，激发煤表面分子中的某些结构，这些受激的表面结构进而与氧发生复合作用，放出的热量使煤体温度升高，从而使氧化反应加快，最终导致自燃。煤岩并非一个均质体，它含有多种成分的有机和无机物质，其化学结构、物理性质、煤岩组分因产地不同存在很大差

别，不同煤岩的氧化性和放热性亦不同。

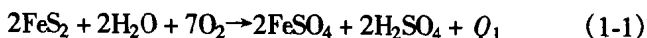
煤体暴露于空气中能否引起自燃取决于煤体的自发放热和环境散热，当热量产生速率大于散发速率时，煤温上升就会引起自燃。也就是说，任何一种煤暴露于空气中因存在多种作用，具有自发产生热量的属性，即都存在自然发火的属性，但能否发生自燃则取决于煤体的放热强度和环境散热强度。因此，煤氧复合及热效应是导致煤自燃过程发展最主要素。

第一节 煤自燃学说

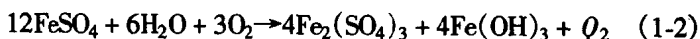
煤自燃问题自 17 世纪即开始研究探索，到目前为止提出了多种煤炭自燃学说，主要有黄铁矿导因学说、细菌导因学说、酚基导因学说以及煤氧复合学说等。

一、黄铁矿导因学说

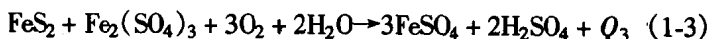
该学说最早由英国人 (Plott 和 Berzelius) 于 17 世纪提出，是第一个试图解答煤自燃原因的学说。它认为煤的自然是由于煤层中的黄铁矿 (FeS_2) 与空气中的水分和氧相互作用放出热量而引起，其化学反应过程推断如下：



硫酸亚铁 (FeSO_4) 在潮湿的井下环境中，可被氧化生成硫酸铁，即 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ，其化学反应如下式：



硫酸铁 [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] 在潮湿的环境中作为氧化剂又可和黄铁矿发生反应：



以上化学反应均为放热反应 (Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别代表各反应释放的热量)。另外，黄铁矿在井下潮湿的环境里被氧化产生 SO_2 、 CO_2 、 CO 、 H_2S 等气体的反应，也都是放热反应。因此在蓄

热条件较好时，这些热量将使煤体升温达到煤氧化反应所需温度，导致煤自热与自燃。

黄铁矿另一促使煤体氧化的物理作用是：当其自身氧化时，体积增大，对煤体产生胀裂作用，使得煤体裂隙扩大、增多，与空气的接触面积增加，导致氧气更多地渗入。此外，硫的着火点温度低，在 200℃ 左右易于自燃； FeS_2 产生的 H_2SO_4 使煤体处于酸性环境中，亦能促进煤的氧化自燃。

黄铁矿学说曾在 19 世纪下半叶被人们所接受，但随后大量的煤炭自燃实践证明，大多数的煤层自燃是在完全不含或极少含有黄铁矿的情况下发生的。该学说无法对此现象作出解释，因此具有一定的局限性。

二、细菌导因学说

该学说是由英国人帕特尔（Potter M·C）于 1927 年提出。他认为在细菌的作用下，煤体发酵，放出一定热量，这些热量对煤的自燃起了决定性的作用。

后来（1934 年）有的学者认为煤的自燃是细菌与黄铁矿共同作用的结果。

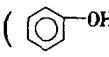
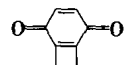
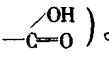
1951 年波兰学者杜博依斯（Dubois·R）等人在考查泥煤的自热与自燃时指出：当微生物极度增长时，通常伴有放热的生化反应过程。30℃ 以下是亲氧的真菌和放线菌起主导作用（使泥煤的自热提高到 60 ~ 70℃ 是由于放线菌作用的结果）；60 ~ 65℃ 时，亲氧真菌死亡，嗜热细菌开始发展；72 ~ 75℃ 时，所有的生化过程均遭到破坏。

为考察细菌作用学说的可靠性，英国学者温米尔与格瑞哈姆（Graham·J·J）曾将具有强自燃性的煤置于 100℃ 真空器里长达 20h，在此条件下，所有细菌都已死亡，然而煤的自燃性并未减弱。细菌作用学说仅这一点就无法作出解释，未能得到广泛承认。

三、酚羟基作用学说

1940年前苏联学者特龙诺夫(Б.В.Троинов)提出:煤的自热是由于煤体内不饱和的酚基化合物强烈地吸附空气中的氧,同时放出一定的热量所致。此学说的实质实际上是煤与氧的作用问题,因此可作为煤氧复合作用学说的补充。

该学说的依据是:在对各种煤体中的有机化合物进行实验后,发现煤体中的酚基类最易被氧化,不仅在纯氧中可被氧化,而且亦可与其他氧化剂发生作用。故特龙诺夫(Б.В.Троинов)认为:正是煤体中的酚基类化合物与空气中的氧作用而导致了煤的自燃。

根据该学说,煤分子中的芳香结构首先被氧化生成酚基() ,再经过醌基()后,发生芳香环破裂,生成羧基()。但理论上芳香结构氧化成酚基需要较激烈的反应条件,如程序升温、化学氧化剂等,这就使得反应的中间产物和最终产物在成分和数量上都可能与实际有较大的偏移。因此,酚羟基导因作用是引起煤自燃的主要原因的观点尚有待进一步探讨。

四、煤氧复合作用学说

1870年瑞克特(Rachtan·H)经实验得出:一昼夜里每克煤的吸氧量为0.1~0.5mL,而褐煤为0.12mL。

1945年姜内斯(Jones E·R)提出:常温下烟煤在空气中的吸氧量可达0.4mL·g⁻¹。该结果与1941年美国学者约荷(Yohe G·R)对美国伊利诺斯煤田的煤样试验结果相近。

20世纪60年代抚顺煤研所通过大量煤样分析,确定了100g煤样在30℃的条件下经96h吸氧量小于200mL时属于不自燃的煤;超过300mL时属于易自燃的煤。这也说明,煤在低温时吸氧量愈大,愈易自燃。

1951年前苏联学者维索沃夫斯基（Висоловский·В·С）等提出：煤的自燃正是氧化过程自身加速的最后阶段，但并非任何一种煤的氧化都能导致自燃，只有在稳定、低温、绝热条件下，氧化过程的自身加速才能导致自燃。这种氧化反应的特点是分子的基链反应：即每一个参加反应的团粒或者说在链上的原子团首先产生一个或多个新的活化团粒（活化链），然后又引起相邻团粒活化并参加反应。这个过程在低温条件下，从开始要持续地进行一段时间，即通常所称的“煤的自燃潜伏期”。他们通过实验还发现，烟煤低温氧化后，着火点降低，活化度提高，易于点燃。低温氧化过程的持续发展使得反应过程的自身加速作用增大，若最终生成的热量不能及时散发，就会引起自热阶段的开始。

煤氧复合作用学说得到大多数学者的赞同，因为煤自燃的主要参与物一个是煤，一个是氧，煤对氧的吸附是经实验考察得到完全证实的。表面的吸附（即物理吸附）虽然产生的热量微不足道，然而化学吸附以及与其相伴随的煤氧化反应则可以放出相当多的热量。

细究上述各种煤的自燃学说，不论其是否完善或是否能得到广泛承认，都涉及到煤的氧化作用和自发产热的问题。煤具有的氧化性质正是由煤的有机质及无机矿物质的易氧化性所体现，煤具有的放热性质也正是由煤有机质及无机矿物质的氧化反应所放出的热量所体现。另外，水对煤的润湿热、煤分子的水解热、煤中含硫矿物质的水解热、煤中细菌作用放出热等，对煤体自发产生热量也起着一定的积极作用。

第二节 煤的自燃性

煤体自燃过程是一个非常复杂的动态过程，这个过程由煤体内在自燃性和外界条件共同决定。一百多年来，国内外有关学者一直想把煤体的内在自燃属性较准确地测定出来，为此进行了许多研究，以便指导矿井煤层自燃的防治。根据煤氧复合是煤自燃

导因的学说，学者们以煤的氧化性为基础，来鉴定煤的内在自燃属性——煤自燃倾向性。

目前世界各国自燃倾向性鉴定方法大体可分为两类：

(1) 化学试剂法。该方法主要以双氧水、亚硝酸钠、联苯胺等化学试剂取代氧，把缓慢的难以测定的煤氧复合过程加速，考察煤在试剂作用下的氧化速度和快速反应的临界点——着火点，以此衡量煤自燃倾向性的强弱。该类方法主要有：奥尔宾斯基法（波）、奥尔连斯卡娅-维谢洛夫斯基着火点温度降低值法（前苏联）、马切雅什法（即双氧水法）等。

(2) 吸氧法。该类方法主要分静态吸氧法和动态吸氧法。静态吸氧法是把一定量的煤样置于一个恒温的密闭容器中，在该容器内充满氧气，然后考察在一定时间内该煤样对氧的吸收量。动态吸氧法是让氧以一定的流量在一定的时间内通过恒温的煤样（通常为几克煤样），然后考察该煤样在某一设定温度下单位质量煤样吸附氧的数量。

20 世纪 80 年代，美国研究利用绝热炉测定煤的最小自热温度，加拿大采用绝热和动态法测定煤的吸氧特性，土耳其采用非恒温动态法测试煤的自燃临界温度和 CO 产生率，南非采用绝热量热法测试煤的氧化性，通过这些参数考察煤的自燃倾向性。

以往对煤自燃性的分析或侧重于煤的氧化性，用煤的氧化性衡量煤的内在自燃性；或侧重于煤的放热性，用热的变化量衡量煤的内在自燃性。实际上，由于实验条件所限和煤体自身的复杂性，很难用煤的氧化性或放热性单个指标准确衡量煤的内在自燃性。煤的氧化性与煤的放热性有关，但又无法用氧化性衡量出煤的放热性，同样也无法用煤的放热性衡量出煤的氧化性。我们虽能大体掌握能与氧产生复合作用的煤表面分子活性结构种类，但针对具体的煤很难搞清表面分子中哪种活性结构占多大比例。我们虽能推断每一类结构与氧复合过程的热效应，但针对具体的煤很难搞清每一类结构与氧复合的具体过程，同时哪一类结构的反应过程占多大比例。同一类活性结构与氧复合过程中产生几步反

应，最终可能产生 CO，也可能产生 CO₂，然而产生 CO 和 CO₂ 的热效应差异甚大。因此，我们认为，煤的内在自燃性需以煤的氧化性和煤的放热性共同衡量。

煤暴露于空气初期，煤表面分子与空气产生水的蒸发与凝结，煤表面分子某些结构的水解、润湿、煤岩中无机矿物的氧化放热、微孔隙内瓦斯的脱附及吸附作用，激活了煤表面分子的某些结构，增强其化学活性，促进煤与氧的化学吸附和化学反应，影响煤的放热性能，从而引发煤自燃过程的发展。

煤自燃过程除了与煤自身的氧化性和放热性相关外，还与所处环境条件有关。从环境条件看，煤体的几何形状和数量、环境温度、风流温度、速度和湿度、氧浓度、煤（岩）体导热性等都影响煤自燃发展的过程，这些外界因素的差异，造成煤自燃具有区域性，并且发火期也有差异。也就是说，并非有煤的地方都会发生自燃，也并非同种煤的发火期都一样。

第三节 煤低温自燃过程

煤自燃过程大体可以划分为潜伏期、自热期和燃烧期 3 个阶段（如图 1-1）。目前，人们对临界温度以上的自燃过程基本上达成了共识，而对煤低温阶段自燃最初的导因和过程仍众说纷纭。煤自燃过程的关键在于低温阶段，这个阶段煤自燃处于潜伏期，在整个自燃发展过程中所占时间最长。由于煤是一种非常复杂的非均匀、具有有机和无机双重特性的特殊岩体，低温下暴露于空气中，煤体中各种活性结构与空气和周围环境产生许多痕量和微量的复杂作用，这些作用激活煤表面分子的这些结构，促进

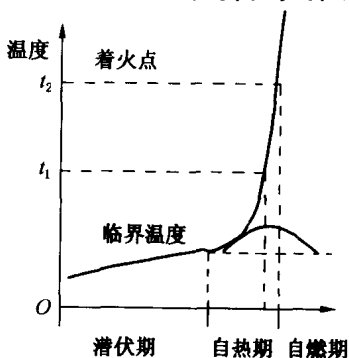


图 1-1 煤炭自燃过程

其进一步氧化放热。但这些痕量与微量的作用由于种类繁多、作用缓慢、条件严格，实验模拟、定量研究非常困难。如果煤自燃潜伏期所激发的活性结构数量不多，进一步的氧化放热作用就很困难，则煤自燃的进程就会进入风化状态，风化煤不会自燃。

一、煤自燃的最初导因——煤自燃综合作用学说

煤自燃的最初导因是由各种能在常温下自发产生热量的因素综合作用，激发煤表面分子的某些结构，促使这些结构在常温下与氧作用，引发自燃过程——即煤体自发放热和环境散热这对矛盾持续动态地发展。因此，煤自燃的最初导因就是常温下能自发产生热量的各种因素综合作用的结果，而热量自发产生是问题的关键。

煤在常温下能自发产生热量的因素很多，如水对煤的润湿热、煤分子的水解热、煤中矿物质的水解和氧化热、煤中微量元素的反应热、煤氧复合的物理吸附和化学吸附热、煤氧复合的化学反应热等等。上述因素对煤自发产生热量都起着一定的积极作用，在某些条件下某些因素起关键性的作用。如黄铁矿与空气中的水和氧作用放出热量，在黄铁矿含量高的煤层里成为导致煤自发放热的主要因素。但在大多数情况下，水对煤的润湿热、水解热、矿物质的水解和氧化热、煤中微量元素的反应热等都不是煤体产生热量的主体，它们主要起到激活煤表面分子的某些结构，使之能易于产生煤氧复合作用。煤体产生热量的主体是煤氧复合作用放出的热量。

常温下，煤总的放热强度较小，测定困难，各种作用独自的放热能力测试尤其困难。煤放热性既与煤的氧化性有关，又与煤表面活性结构的种类、煤氧复合过程及煤体含水量、吸附气体等有关。因此，考察煤的放热性，通常考察其总的放热强度。放热强度是各种热效应的总和，既包含了煤与氧作用的热效应，也包含了其他热效应，如附着瓦斯脱附热、水的汽化潜热、凝结热及水解热等。因此，煤的放热强度大体上看可由两部分组成。即：

$$q(T, V_{O_2}) = q_{\text{氧化}} + q_{\text{其他}} \quad (1-4)$$

式中 $q_{\text{氧化}}$ ——煤氧复合放出的热量, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$;

$q_{\text{其他}}$ ——煤氧复合放出热量之外的其他热效应, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$ 。

煤的氧化放热——煤对氧的物理吸附热、化学吸附热和化学反应热, 其放热强度可表示为:

$$q_{\text{氧化}} = q_{\text{物}} + q_{\text{化}} + q_1 + q_2 + q_3 = V_{\text{O}_2}(T, C_{\text{O}_2}) \cdot H(T) \quad (1-5)$$

式中 $q_{\text{物}}$ ——煤对氧的物理吸附放热强度, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$;

$q_{\text{化}}$ ——煤对氧的化学吸附放热强度, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$;

q_1 ——煤氧结合生成过氧化基的第一步反应放热强度, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$;

q_2 ——过氧化基分解成带羧基、酚基、羟基、羰基侧链, 即第二步化学反应热放热强度, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$;

q_3 ——带过氧化基的煤表面大分子结构降解, 放出 CO 、 CO_2 , 即第三步化学反应放热强度, $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$ 。

上述 5 类热效应均与耗氧速率直接或间接相关, 假定各步氧化反应均为简单一级反应, 又因 q_2 、 q_3 与前面反应有关, 故 q_1 、 q_2 、 q_3 之间有以下关系:

$$q_1 = H_1 \cdot V_{\text{O}_2}$$

$$q_2 = H_2 \cdot q_1 = H_1 \cdot H_2 \cdot V_{\text{O}_2}$$

$$q_3 = H_3 \cdot q_2 = H_1 \cdot H_2 \cdot H_3 \cdot V_{\text{O}_2}$$

则总的放热强度可表示为:

$$q(T, V_{\text{O}_2}) = (H_{\text{物}} + H_{\text{化}} + H_1 + H_1 \cdot H_2 + H_1 \cdot H_2 \cdot H_3) \cdot V_{\text{O}_2} + q_{\text{其他}} \quad (1-6)$$

式中 H_1 ——仅与温度有关的煤表面放热量, J/mol ;

V_{O_2} ——煤的耗氧速率, $\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{s})$ 。

从式 (1-6) 可以看出, 不同煤的总热效应 q 在氧浓度相同时, 因 $H_{\text{物}}$ 、 $H_{\text{化}}$ 、 H_1 、 H_2 、 H_3 和 $q_{\text{其他}}$ 不同, 其值也不同。

令 $H_{\text{氧化}} = H_{\text{物}} + H_{\text{化}} + H_1 + H_1 \cdot H_2 + H_1 \cdot H_2 \cdot H_3$

则 $q_{\text{氧化}} = H_{\text{氧化}} \cdot V_{\text{O}_2} \quad (1-7)$

式中 $H_{\text{氧化}}$ ——仅与温度有关的煤表面氧化放热量, J/mol。

$q_{\text{其他}}$ 包含了除煤氧复合之外所有的自发放热强度, 它主要含煤中矿物质的氧化和水解放热、煤与水分子作用产生的润湿热、水解热、溶解溶胀热、煤内瓦斯脱附或吸附热, 其放热强度可表达为:

$$q_{\text{其他}} = q_{\text{无机}} + q_{\text{水}} + q_{\text{吸}} \quad (1-8)$$

式中 $q_{\text{无机}}$ ——煤中无机矿物质 (主要是含硫矿物质) 氧化和水解的放热强度, J/(g·s);

$q_{\text{水}}$ ——煤与水作用产生的放热强度, J/(g·s);

$q_{\text{吸}}$ ——煤内原生瓦斯吸附和解吸产生的放热强度, J/(g·s)。

综上所述, 煤的放热性主要取决于煤的氧化放热, 其次是煤无机物的氧化放热、煤与水的作用热、煤的吸附与脱附瓦斯热及其水分的汽化和凝结潜热等构成。即

$$q = H_{\text{氧化}} \cdot V_{\text{O}_2} + H_{\text{无机}} \cdot V_{\text{O}_2} + H_{\text{水解}} \cdot V_{\text{O}_2} + H_{\text{吸}} \cdot V_{\text{CH}_4} + H_{\text{溶}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{润}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} \quad (1-9)$$

从放热强度 q 测定角度考虑, 式 (1-8) 可表示为:

$$q_{\text{其他}} \approx H_{\text{其他}} \cdot V_{\text{O}_2} \\ q = (H_{\text{氧化}} + H_{\text{其他}}) \cdot V_{\text{O}_2} = H \cdot V_{\text{O}_2} \quad (1-10)$$

式中 H ——主要与温度参数有关的煤表面氧化放热量, J/mol。

从式 (1-9) 和式 (1-10) 可以看出放热强度不仅与耗氧速率有关, 还与耗水速率、瓦斯放散速率、汽化速率有关。煤表面放热量 H 综合考虑了除耗氧速率之外的其他参数对放热强度的影响, 因此 H 不完全是一个常数。很显然, H 与内在分子结构、无机物的成分与含量和温度等因素有关。

二、影响煤放热性的主要因素

1. 煤种对氧化放热性的影响

利用 XK 系列煤低温自然发火实验台, 对自燃性不同的煤进