

研究论文

中国动力煤的着火温度与着火热的分布规律

樊晋元, 陈鸿伟

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 为了寻求动力煤成分分布与煤质着火及稳燃特性之间的函数关系, 根据燃烧学的热力着火理论, 对国内大型电站煤粉锅炉燃用的 166 个典型的煤质分析数据进行了数学分析。分析了固态碳 (C_{gt}) 和当量气态碳 ($C_{qt} + 3.67H_{ar}$) 比值随 V_{daf} 的分布规律及其对煤质着火的影响; 根据文献中 77 个煤质的一维沉降炉实验数据, 拟合出煤粉的着火温度与 V_{ad} 及 A_{ad} 的函数关系, 计算分析了本文大数据样本煤质的着火温度及着火热的分布规律, 提出将着火热和着火温度作为煤质着火特性的图像分辨新方法。据此分析了各类煤质的着火与稳燃特性。结果表明, 本方法能明确地定量区分不同类煤质和同类煤质的着火特性差异, 且在理论上给出符合宏观规律的合理解释。

关键词: 煤燃烧; 燃料; 热力着火; 着火温度; 着火热; 模型

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141860

中图分类号: TK 224

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 10—4170—07

Distribution of ignition temperature and ignition heat of power coal in China

FAN Jinyuan, CHEN Hongwei

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to identify the function between the distribution pattern of steam coal content and ignition and stable combustion characteristics, a mathematical analyzing data test is made to 166 coal qualities used by pulverized-coal fired boiler of large power station in China. This research analyzed the distribution pattern of V_{daf} ratio between fixed carbon (C_{gt}) and equivalent gaseous carbon ($C_{qt} + 3.67H_{ar}$), and its influence on the ignition and combustion characteristics. With the experimental data from one dimension sedimentation furnace of 77 coals collected from the literatures, the function of ignition temperature to V_{ad} and A_{ad} was simulated, and the distribution characteristics of ignition temperature and heat of different coal samples were calculated and analyzed. A new method for resolving images of ignition temperature and heat was introduced, which has been applied to analyze the characteristics of coal firing. The results showed that it can not only quantitatively distinguish the ignition characteristics among the same and different type of coals, but also give reasonable explanation of macroscopic law in theory.

Key words: coal combustion; fuel; thermal ignition; ignition temperature; ignition heat; model

引 言

评价煤质着火特性的工程常用方法是干燥无

灰基挥发分 (V_{daf})。国内、外有关煤质燃烧特性研究的文献比较多, 早期的文献大部分是基于热天平、沉降炉, 对少量煤质进行实验, 以动力学参数活化

2014-12-17 收到初稿, 2015-04-02 收到修改稿。

联系人及第一作者: 樊晋元 (1985—), 男, 博士研究生。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2015XS117)。

Received date: 2014-12-17.

Corresponding author: FAN Jinyuan, fjybjhd@126.com

Foundation item: supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015XS117).

能、反应频率因子和煤粒着火温度，或以煤质的分析成分作为主要参数进行研究^[1]；国外学者研究了煤粉的燃烧速度与加热及放热速率对煤粉燃烧的影响^[2-3]，或以燃料比作为煤质燃烧特性的判别方法^[4]，也有新型的以热重分析、升温速率和颗粒度研究煤粉燃烧特性的方法^[5-6]。近年来又开展了对煤粉在富氧燃烧条件下的燃烧特性的研究^[7-9]；大量文献研究了煤质燃烧特性对燃烧过程中 NO_x 生成量的影响；部分文献研究了不同种类煤质的灰分和焦炭的微观特征对煤质燃烧特性的影响等^[10-11]。鉴于国内外研究煤质燃烧特性的文献已有数百篇之多，限于篇幅，不便详述。然而，以大数据煤质样本的着火热和着火温度相结合的方法，研究煤质着火与稳燃特性的宏观规律的文献尚未见到。

由于近年来国内 500 多台 600~1000 MW 大型超临界机组锅炉运行中煤质变化太大带来一系列严重问题，如燃烧器烧毁、结渣、燃烧效率下降、锅炉氧化氮等污染物的生成量增加等，极大地影响了大型火电机组的安全运行和节能减排。特别是大型电厂燃用的煤质有 166 种之多，各类煤质的成分分布又极为复杂，采用针对少量煤质进行实验研究的方法不便于了解和掌握大数据煤质样本的燃烧特性的普遍规律。同时，近年来大型煤粉锅炉普遍采用的高浓度煤粉燃烧技术的最佳煤粉浓度首先取决于煤质特性^[12]，实际上也与煤质的着火温度和着火热密切相关。此外，应用煤燃烧数学模型分析问题时也需要首先确定着火温度和着火热。因此迫切需要研究反映动力煤燃烧特性的宏观规律的计算模型。

动力煤的燃烧方式多数是煤粉燃烧方式，煤粉在炉内着火燃烧主要符合燃烧学的热力着火理论，着火温度和着火热是评价煤质着火难易程度的最直接参数，已有的研究成果为研究动力煤燃烧特性宏观规律的理论模型提供了重要的基础。本文以着火温度和着火热相结合的方法建立煤质着火特性的分辨指数模型，对近 20 多年来国内 166 个动力煤典型煤质的元素分析数据，进行了大数据样本煤质的着火温度和着火热的计算和模型研究。

1 气态与固态元素发热量的分布特征

本文与此前所有文献的主要不同点在于根据煤粉燃烧的着火温度和着火热相结合的方法，来研究煤质着火特性的宏观规律，建立煤的着火特性分辨指数模型。其中着火温度的模型中引用了文献中的实验数据，并以空气干燥基成分为基准。但燃煤

的着火热必须以炉前煤的收到基成分为基准，其中全水分吸收的着火热占一大部分，因而以收到基元素成分计算着火热，才能准确分辨各类不同煤质的着火热水平。

本文研究的国内动力煤的 166 个典型煤质样本的元素分析数据量太大，不便列出。仅给出收到基成分的变化范围： $Q_{\text{ar,net}} = 8.3 \sim 27.5 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， $C_{\text{ar}} = 24.53\% \sim 72.91\%$ ， $H_{\text{ar}} = 1.53\% \sim 4.69\%$ ， $O_{\text{ar}} = 1.1\% \sim 12.2\%$ ， $N_{\text{ar}} = 0.4\% \sim 2.24\%$ ， $S_{\text{ar}} = 0.1\% \sim 4.02\%$ ， $M_{\text{ar}} = 2.46\% \sim 44\%$ ， $A_{\text{ar}} = 5.35\% \sim 37.73\%$ 。其中内部水分 $M_{\text{ad}} = 0.01\% \sim 19.07\%$ ；碳元素可分为两部分，即气态碳 (C_{qt}) 与固态碳 (C_{gt})，也即 $C_{\text{ar}} = C_{\text{qt}} + C_{\text{gt}}$ ，固态碳 (C_{gt}) 在量值上可认为是固定碳 (FC_{ar})。

由图 1 可见，在 $V_{\text{daf}} \leq 30\%$ 时，煤质中收到基氢元素的发热量 Q_{H} 普遍大于收到基碳中气态碳的发热量 Q_{Cqt} ，且随煤化程度的提高，煤中含氢量和气态碳快速减少；在 $V_{\text{daf}} > 30\%$ 时，煤中氢元素含量及其发热量 Q_{H} 普遍小于 C_{qt} ，且随 V_{daf} 增大，氢元素含量和气态碳量快速减小。但随 V_{daf} 增大，氧元素 O_{ar} 明显增加，使挥发性气态元素总量增加。

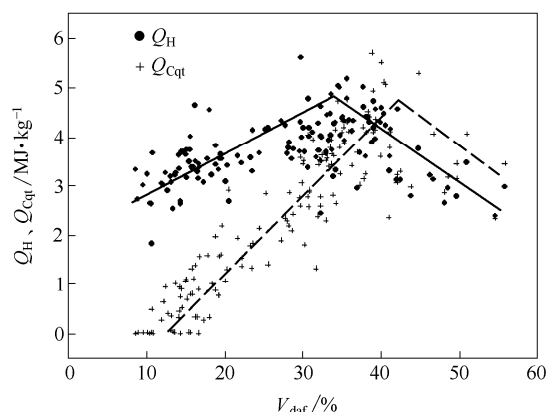


图 1 Q_{H} 、 Q_{Cqt} 随 V_{daf} 的分布

Fig.1 Distribution of Q_{H} and Q_{Cqt} to V_{daf}

图 2 给出煤元素中气态物发热总量 (Q_{v}) (Q_{v} 在数值上等于收到基挥发分的发热量) 及其占 $Q_{\text{ar,net}}$ 的份额 V_{daf} 的分布特征。数据表明 Q_{v} 值在 $2.3 \sim 10.1 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内变化，比值 $Q_{\text{v}}/Q_{\text{ar,net}}$ 在 $0.11 \sim 0.58$ 之间，且随 V_{daf} 增加近似单调线性增大。不同煤质在着火阶段气态挥发物释放的热量 (Q_{v}) 占 $Q_{\text{ar,net}}$ 的份额：无烟煤和贫煤为 $11\% \sim 20\%$ ，烟煤为 $20\% \sim 45\%$ ，褐煤为 $45\% \sim 60\%$ 。

本文认为，用固态碳发热量与可燃挥发物的发热量之比能综合地定性评价煤的着火与燃尽的难易程度。

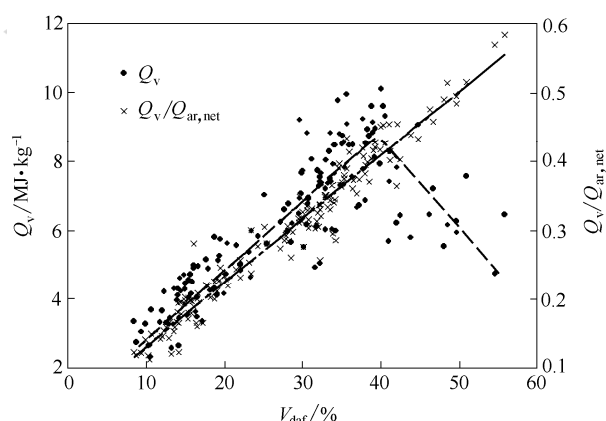
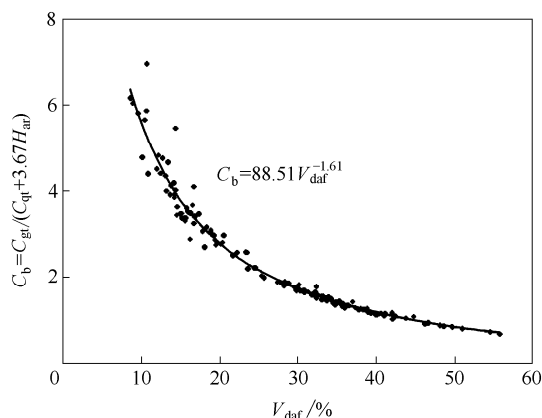
图 2 Q_v 与 $Q_v/Q_{ar,net}$ 随 V_{daf} 的分布Fig.2 Distribution of Q_v and $Q_v/Q_{ar,net}$ to V_{daf}

图 3 中纵坐标 C_b 是固态碳 (C_{gt}) 与当量气态碳 ($C_{qt} + 3.67H_{ar}$) 的比值, 其决定了不同煤质着火难易程度与气态元素的分解速度和燃烧速度。 C_b 值在宏观上有 2 层意义: ①气态可燃物元素含量大的煤质, 其热分解和燃烧速度比较高; ②气态元素发热量大的煤质, 着火初期的放热量和放热速度比较高, 可燃物升温速度越快, 越容易着火, 也容易稳燃。将氢元素与气态碳合并为“当量气态碳”, 便于分析问题。而 C_b 越大, 可认为着火阶段挥发物分解与反应速度越低, 由图 3 可见 C_b 值变化规律十分明显。对于无烟煤和贫煤 $C_b = 2.9 \sim 6.9$; 对于烟煤 $C_b = 1.1 \sim 2.8$; 对于褐煤 $C_b = 0.67 \sim 1.0$ 。

图 3 C_b 随 V_{daf} 的分布Fig.3 Distribution of C_b to V_{daf}

无论是用传统的挥发分或燃料比, 还是用本文的 C_b 值分辨煤质的着火特性, 只是在大趋势上合理, 但明显存在问题: 即对于水分和灰分含量较大的褐煤和低品位烟煤, 难以更准确和清晰地分辨其着火和稳燃的难易程度。实际燃烧过程中, 水分和灰分越大的煤质, 越难着火; 即使能着火, 也难以

稳燃^[13]。近年来随着煤粉燃烧稳燃技术的提高, 高水分和高灰分煤质在煤粉锅炉实际运行中稳燃性方面出现的问题已不再突出。但在工程应用和理论意义上煤质的着火难易程度都应该包括着火特性和稳燃特性, 既容易着火又容易稳燃的煤质才可定义为易燃煤。难于稳燃的煤质, 即使着火后也很容易灭火, 这是一种极易造成爆燃的极为危险的燃烧工况^[14]。因此, 采用着火热与着火温度相结合的方法, 可以既反映煤质的着火特性, 又反映稳燃特性。

2 煤粉着火温度的拟合函数

煤粉的着火温度与煤的着火温度不同。确定各类燃煤煤粉的着火温度需要进行特定的实验, 而用一维沉降炉实验方法测出的煤粉着火温度更接近煤粉在实际炉膛内的燃烧情况。由于本文研究的煤质样本量大, 不可能实施全部样本的实验, 故本文引用文献[15-17]中用一维沉降炉所做的 77 个煤质的实验数据, 拟合出空气干燥基挥发分 (V_{ad}) 和空气干燥基灰分 (A_{ad}) 与煤粉的着火温度 (t_{zh}) 的函数关系式 (1)。详细的实验条件参见原文献, 考虑 3 个文献的实验不是同一台实验装置, 且不同的实验者做相同的实验也会有偏差, 故本文专门对 3 组实验数据进行了分析比较, 认为 3 组实验数据的变化趋势和数值范围比较合理, 对于工程应用具有较高的可参考性和可信度。

$$t_{zh} = a_1 + a_2(\ln V_{ad}) + a_3(\ln V_{ad})^2 + a_4(\ln A_{ad}) + a_5(\ln A_{ad})^2 + a_6(\ln A_{ad})^3 \quad (1)$$

表 1 式 (1) 的拟合系数

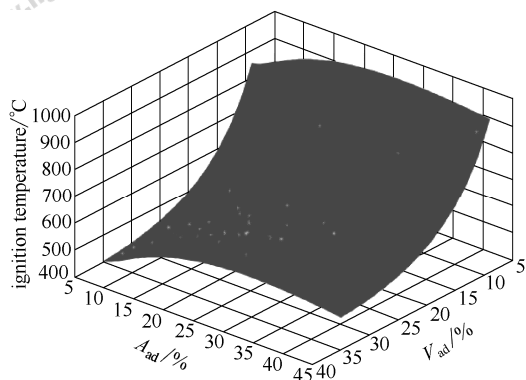
Table 1 Fitting coefficient in Eq. (1)

Coefficient	Fitted value	Coefficient	Fitted value
a_1	3691.939901	a_4	-767.652785
a_2	-1506.011833	a_5	354.750481
a_3	204.127563	a_6	-47.4471770

式 (1) 的相关系数为 97.1%。采用一维沉降炉研究煤粉燃烧特性, 对大数据煤质样本进行实验, 需大量消耗人力、经费、时间。因此式 (1) 的拟合函数对于预测和分析大批量煤质的着火温度具有比较重要的实用价值。

实验数据的拟合函数表明, 随 A_{ad} 增加, 煤粉的着火温度提高; 随 V_{ad} 增加, 煤粉的着火温度降低。但着火温度随灰分和挥发分的变化都是非线性关系, 如图 4 所示。

大量实验和工程实践证明了影响煤质着火温

图4 煤粉着火温度 (t_{zh}) 随 V_{ad} 和 A_{ad} 的变化Fig.4 Change of ignition temperature (t_{zh}) with V_{ad} and A_{ad}

度的主要因素是挥发分含量与灰分含量。选择挥发分和灰分作为着火温度的拟合因子的依据是：①挥发分含量越大的煤质，碳化程度越低，其着火温度也越低。②内部灰分含量大的煤，着火温度较高。灰分对着火温度的影响比较复杂，其中内部灰分的影响大于外部灰分，灰分中不同化学组分对煤质燃烧的影响也有差别。

煤粉的着火温度还与煤粉浓度、一次风气流中的氧浓度^[18]、煤粉细度^[19]、挥发分的热解过程^[20]、煤质内部灰分的化学组分^[21]、灰渣的熔融特性、煤中钙质组和惰质组的量、煤粉颗粒在气固多相流的传热及传质^[22]等许多极为复杂的因素有关，此类问题直到目前在世界范围内还没有建立统一的模型，但这并不妨碍对煤燃烧过程的宏观规律的研究。

3 煤粉的着火温度分布特征

图5中的数据为按照拟合函数关系式计算的分类煤质的煤粉着火温度：褐煤为475~603℃，烟煤为422~822℃，贫煤、无烟煤为754~1090℃，计算值处于合理范围。

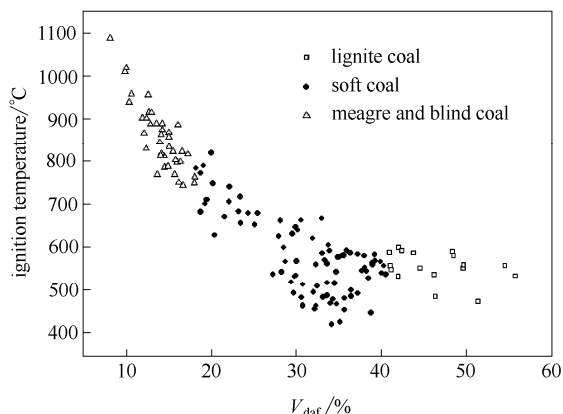
图5 着火温度随 V_{daf} 的分布Fig.5 Distribution of ignition temperature to V_{daf}

图5的数据说明，由于受煤质灰分的影响，在相近的 V_{daf} 值处，各类煤质的煤粉着火温度变化很大。例如在贫煤、无烟煤区，煤质1的 $V_{daf}=13.66\%$ ， $t_{zh}=771.4^\circ\text{C}$ ；煤质2的 $V_{daf}=16.12\%$ ， $t_{zh}=888.4^\circ\text{C}$ 。即煤质2的 V_{daf} 虽然略高于煤质1，但其着火温度却比煤质1高117℃。在烟煤区煤质3的 $V_{daf}=32.15\%$ ， $t_{zh}=457.8^\circ\text{C}$ ；煤质4的 $V_{daf}=33\%$ ， $t_{zh}=670.1^\circ\text{C}$ 。即煤质4的 V_{daf} 虽然略高于煤质3，但其着火温度却比煤质3高212.3℃。在褐煤区煤质5的 $V_{daf}=46.41\%$ ， $t_{zh}=486.7^\circ\text{C}$ ；煤质6的 $V_{daf}=48.37\%$ ， $t_{zh}=593.8^\circ\text{C}$ 。即煤质6的 V_{daf} 虽然略高于煤质5，但其着火温度却比煤质5高107.1℃。类似的情况比较多，表明简单用 V_{daf} 判断煤质的着火难易程度并不合理。

4 煤粉的着火热分布特征

本文研究煤质自身的着火特性，故仅考虑1.0 kg 燃料自身吸收的着火热。按式(2)计算

$$Q_{zh} = (c_{zh}^g t_{zh} - c_0^g t_0) \frac{100 - M_{ar}}{100} + (c_{zh}^M t_{zh} - c_0^M t_0) \frac{M_{ar}}{100} \quad (2)$$

式中， c_{zh}^M 和 c_{zh}^g 分别为达到着火温度 t_{zh} 时水分和干燃料的比热容， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ； c_0^M 和 c_0^g 分别为初温 t_0 时水分和干燃料的比热容， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

干燃料比热容按下式计算

$$\text{贫煤、无烟煤: } c^g = 0.912 + 0.00067t \quad (3)$$

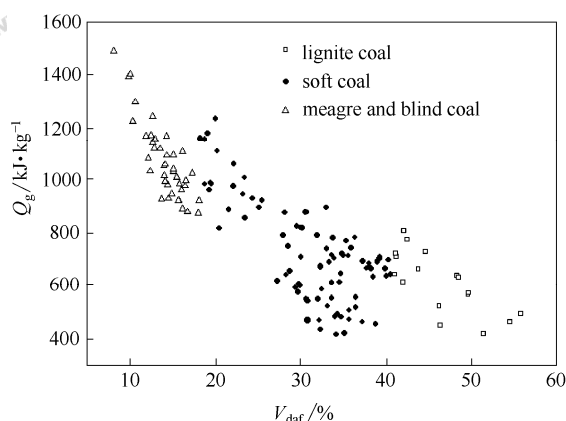
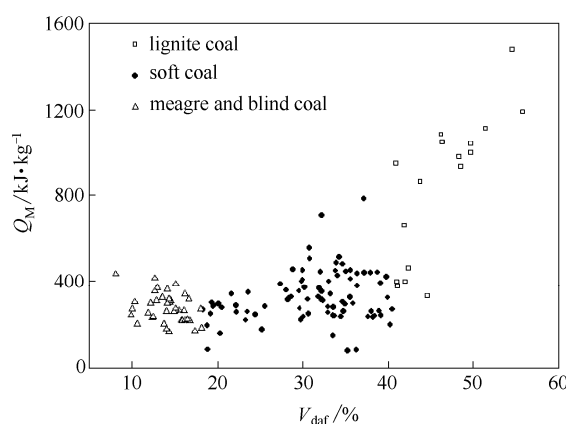
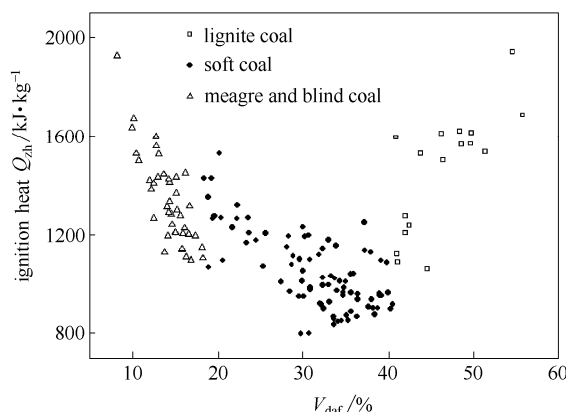
$$\text{烟煤: } c^g = 0.952 + 0.001t \quad (4)$$

$$\text{褐煤: } c^g = 1.08 + 0.001t \quad (5)$$

不同煤质的煤粉气流初温不同，按照大多数电厂中的运行实际控制值，褐煤、烟煤、贫煤及无烟煤的煤粉气流初温分别为60~70、70~80、85~90℃，烟气干燥的高水分褐煤的煤粉气流初温比较高。本文为研究煤质着火热的宏观分布规律，计算时分别取值为60、75、90℃。其中褐煤的初温取自文献[23-24]。

图6是1.0 kg 煤中干燃料吸收的着火热 (Q_g) 随 V_{daf} 的变化关系。图7是1.0 kg 煤中水分吸收的着火热 (Q_M) 随 V_{daf} 的变化关系。图8是1.0 kg 燃料的总着火热 (Q_{zh}) 随 V_{daf} 的变化关系。

图8中数据分布为“V”字形，计算条件下各类煤质的着火热变化范围是：贫煤、无烟煤为1100~1930 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，烟煤为800~1530 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，褐煤为1060~1944 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其中褐煤中水分吸收的着火热变化范围最大，为336~1484 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图 6 干燃料的着火热随 V_{daf} 的分布Fig.6 Distribution of ignition heat of dry fuel to V_{daf} 图 7 水分吸热量随 V_{daf} 的分布Fig.7 Distribution of moisture absorption of heat to V_{daf} 图 8 着火热 Q_{zh} 随 V_{daf} 的分布Fig.8 Distribution of ignition heat to V_{daf}

5 煤粉的着火特性分析

从上述数据分布可知, 166 个煤质中水分吸收的着火热占燃料总着火热的比例变化很大, 褐煤为 31%~76%, 贫煤和无烟煤为 15%~33.4%, 烟煤为 8%~63%。

显然, 水分较大的低龄褐煤虽然着火温度较低, 在 475~600℃ 范围变化, 其容易着火, 但因其着火热高达 1503.3~1944.8 kJ·kg⁻¹, 从而难于稳燃。而部分水分较小的老龄褐煤, 着火温度分布与其他褐煤相差不大, 但着火热明显降低至 1065~1279 kJ·kg⁻¹, 与部分优质烟煤处于同等水平。

贫煤和无烟煤难于着火的原因, 主要是固态碳元素含量多, 必须达到固态碳元素的着火温度, 才能持续稳定着火, 且在着火后必须充分释放热量, 使可燃碳元素继续升温反应。从本文的分辨指数看, 由于其着火温度高达 746.9~1089.8℃, 使水分吸收的着火热也相对增加, 但量值不大, 而干燃料所需要吸收的着火热达 874.8~1488.9 kJ·kg⁻¹, 其中部分煤质着火温度在 850℃ 以上, 总着火热高达 1300 kJ·kg⁻¹ 以上。所以无烟煤和部分低品位贫煤既极难着火, 也极难稳燃。

烟煤的着火热分布最为复杂, 图 8 显示 $V_{daf}=22\%\sim25\%$ 的烟煤, 其总着火热接近贫煤的着火热; $V_{daf}<22\%$ 的部分烟煤, 总着火热为 1071.7~1532.6 kJ·kg⁻¹, 与无烟煤接近, 但烟煤的着火温度绝大多数低于贫煤, 仅有个别接近贫煤。这类烟煤主要是因为含灰量大, 而挥发分较高, 所以着火温度虽然并不太高, 着火热却很高, 因而容易着火, 但难于稳燃, 属于低品位烟煤。而部分优质烟煤的着火温度最低, 在 600℃ 以下, 且着火热最小, 在 799.4~1024.7 kJ·kg⁻¹ 范围变化, 属于高品位烟煤。

上述分析表明, 不仅非同类煤质的着火特性差异很大, 即使同类煤质之间的着火特性差异也几乎相差近 1 倍。采用着火热和着火温度相结合的方法, 能很清晰和明确地分辨各类煤质的着火特性和稳燃特性, 并能十分合理地解释各类煤质着火特性之间产生巨大差别的原因, 且可定量区分。

此外, 煤质的着火稳定性还与炉膛内水冷壁的散热条件、热风温度和空气量及空气湿度、受热面结渣和积灰等许多多变的外因条件有关。本文主要研究煤质自身的着火和稳燃特性, 模型中仅考虑煤质自身的内部因素。如果加入许多多变的外部因素的变量, 会使问题的研究特别复杂。

6 动力煤的着火特性图像分辨方法

根据图 9 中的数据分布, 可将各类煤质的着火难易程度划分为 5 个等级, 即: 极易燃、易燃、较易燃、难燃、极难燃, 见表 2。

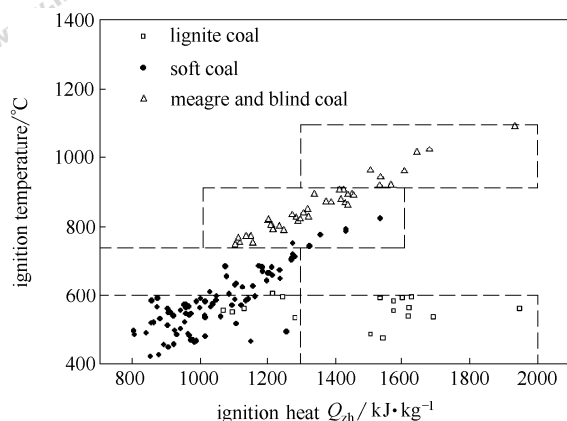


图 9 着火温度随着着火热的分布

Fig.9 Distribution of ignition temperature to ignition heat

图 9 数据分布的主要特点：①烟煤的着火温度分布在 3 个区域，其着火温度与着火热变化最大，数据分布的总体趋势是着火温度越高的煤质，着火热也越大，表明其越难着火，其中部分低品位烟煤的着火热甚至高于贫煤和无烟煤；②褐煤的着火温度较低，分布在 2 个区域，但其着火热差别最大，褐煤着火温度接近优质烟煤，但高水分褐煤的着火热接近贫煤与无烟煤；③贫煤、无烟煤着火温度分布在 2 个区域，因其着火温度很高且变化很大，着火热快速增加；④从数据分布的局部区域观察，着火温度低的煤质，其着火热不一定小。

表 2 着火特性级别

Table 2 Level of ignition characteristics

Level	Ignition temperature/°C	Ignition heat /kJ·kg ⁻¹
very easy to fire	$600 \geq t_{zh} > 400$	$1300 \geq Q_{zh} > 600$
easy to fire	$600 \geq t_{zh} > 400$	$2000 \geq Q_{zh} > 1300$
relatively easy to fire	$740 \geq t_{zh} > 600$	$1300 \geq Q_{zh} > 900$
difficult to fire	$850 \geq t_{zh} > 740$	$1600 \geq Q_{zh} > 1000$
very difficult to fire	$1100 \geq t_{zh} > 850$	$2000 \geq Q_{zh} > 1300$

图 9 中将着火温度较低的高水分褐煤划分为易着火煤，而着火温度较高的高灰分的低品位烟煤划分为较易着火煤。有 3 点依据：①本文的“着火温度”由挥发分和灰分 2 个变量确定，而着火热要通过着火温度才能确定。②高水分褐煤碳化程度低于高灰分烟煤。③煤质的着火温度不易改变，而着火热易于改变（如原煤干燥过程）。

7 结 论

（1）提出了当量气态碳（ $C_{qt} + 3.67H_{ar}$ ）的概念，固态碳与当量气态碳的比值（ C_b ）表现了不同

煤质在着火阶段可燃元素释放热量的势力对比。与挥发分或燃料比（ C/H ）的分析方法相比，该方法考虑了煤中气态碳含量与当量气态碳的发热量，因而 C_b 随 V_{daf} 的分布规律能更合理地定性分析各类煤质的着火特性不同的主要原因，但其难于分辨高水分褐煤的着火特性。

（2）采用数学分析和实验方法，对前人所做的大量实验数据进行了研究，并据此提出了国内动力煤煤粉燃烧的着火温度和着火热计算模型，给出了计算各类煤质着火温度的三维函数关系式，具有较高的实用价值。并据此提出了各类煤质自身吸收着火热的计算模型。特别说明，本文的着火热计算模型在用于锅炉设计和燃烧数学模拟时还需要加上一次风空气的吸热量。

（3）由于本文的模型研究结合了反映实际着火过程的直接参数，即以着火温度和着火热相结合的方法作为判别指标，所以能更合理、更明确地分辨各类煤质的着火与稳燃特性，也更接近煤粉在炉内实际燃烧特性。研究结果充分表明，不仅非同类煤质的着火特性差异很大，即使同类煤质之间的着火特性差异也很大。而用此前文献中的其他任何方法，都不能同时反映挥发分、灰分和着火热对各类煤质着火特性的综合影响。

References

- [1] Fu Weibiao (傅维标), Zhang Yanping (张燕屏), Han Hongqiao (韩洪樵), et al. Common pyrolysis model for coal particle (Fu-Zhang model) [J]. *Scientia Sinica, Ser. A* (中国科学, A 辑), 1988, (12): 1283-1290.
- [2] Wall T F. Combustion processes for carbon capture [J]. *Proc. Combust. Inst.*, 2007, **31** (1): 31-47.
- [3] Hjartstam S, Andersson K, Johnsson F. Combustion characteristics of lignite-fired oxy-fuel flames [J]. *Fuel*, 2009, **88** (11): 2216-2224.
- [4] Kurose R, Ikeda M, Makino H, et al. Pulverized coal combustion characteristics of high-fuel-ratio coals [J]. *Fuel*, 2004, **83** (13): 1777-1785.
- [5] Zhou Yingbiao (周英彪), Fan Duping (范杜平), Duan Quanpeng (段权鹏), et al. Experimental study of combustion characteristic index based on the Kooij law [J]. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2008, **28** (2): 39-42.
- [6] Arenillas A, Rubiera F, Pevida C, et al. A comparison of different methods for predicting coal devolatilisation kinetics [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, **58/59**: 685-701.
- [7] Chen Xiangyun (陈香云), Zhang Yongfeng (张永锋), Cui Jingdong (崔景东). Oxygen enriched combustion of lignite by thermogravimetric analysis [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2012, **31**: 232-235.
- [8] Zhang Chaoqun (张超群), Yu Lijun (于立军), Cui Zhigang (崔志刚), et al. Experimental research and computation analysis of combustion

- kinetic characteristics of micro pulverized and common-pulverized coal [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (11): 2189-2194.
- [9] Liu Guowei (刘国伟), Dong Peng (董芑), Bie Rushan (别如山). Ignition characteristics of coal powder airflow under various oxygen-enriched conditions [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2013, **64** (7): 2596-2603.
- [10] Niu Yanqing (牛艳青), Shaddix C R. Kinetic study on during char combustion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2014, **35** (5): 999-1002.
- [11] Ding Zhaoyong (丁兆勇), Li Zhenshan (李振山), Cai Ningsheng (蔡宁生). High-temperature thermal deactivation characteristics of bituminous coal char [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2014, **35** (4): 819-823.
- [12] Wang Xuebin (王学斌), Zhang Limeng (张利孟), Tan Houzhang (谭厚章), et al. Effect of coal quality on optimum fuel concentration in high-concentration pulverized coal flame [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2014, **35** (2): 392-395.
- [13] Cen Kefa (岑可法), Yao Qiang (姚强), Luo Zhongyang (骆仲泱). *Advanced Combustion Science* (高等燃烧学) [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2002: 256-275.
- [14] Xu Xuchang (徐旭常), Mao Jianxiong (毛健雄), Zen Ruiliang (曾瑞良). *The Theory of Combustion and Combustion Equipment* (燃烧理论与燃烧设备) [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 61-99.
- [15] Wang Chunlin (王春林), Yang Jianguo (杨建国), Weng Shanyong (翁善勇), et al. Analysis and experiment of igniting characteristic of main power coal in China [J]. *Boiler Technology* (锅炉技术), 2004, **35** (6): 48-51.
- [16] Xie Jidong (谢继东), Jiang Ying (姜英). Experimental study of the quality and ignition characteristics of coals for use in power plants of China [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power* (热能动力工程), 2010, **25** (5): 525-528.
- [17] Zhao Hong (赵虹), Yang Jianguo (杨建国), Chang Aiyang (常爱英), et al. Establishment of combustion stability index of pulverized-coal [J]. *Journal of Combustion Science and Technology* (燃烧科学与技术), 2003, **9** (4): 364-366.
- [18] Xu Kailong (许开龙), Yu Weiwei (俞伟伟), Wu Yuxin (吴玉新), et al. Effects of primary flow oxygen concentration on ignition of group coal particles [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2013, **34** (10): 1964-1968.
- [19] Jiang Xiumin (姜秀民), Yang Haiping (杨海平), Liu Hui (刘辉), et al. Analysis of the effect of coal powder granularity on combustion characteristics by thermogravimetry [J]. *Proceedings of the CSEE* (中国电机工程学报), 2002, **22** (12): 143-146.
- [20] Yu Junwu (虞君武), Chen Yongli (陈永利), He Rong (何榕), et al. Numerical simulation of coal pyrolysis using FD model [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65** (9): 3592-3597.
- [21] Wu Le (吴乐), Wu Jianqun (吴建群), Luo Jia (罗嘉), et al. CCSEM investigation on slagging minerals in different density ingredients of bituminous coal samples [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65** (8): 3221-3227.
- [22] Liu Chuanping (刘传平), Li Chuan (李传), Li Yongliang (李永亮), et al. Heat transfer enhancement in gas-solid flow [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2014, **65** (7): 2485-2493.
- [23] Zhang Dianjun (张殿军), Yin Xiangmei (尹向梅). Study and basic design of a 1000 MW ultra-supercritical lignite-fired boiler [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering* (动力工程学报), 2010, **30** (8): 559-566.
- [24] Zhang Qingfeng (张清峰), Cao Hongjia (曹红加), Li Junzhong (李俊忠), et al. Experimental investigation on the varying load characteristic for 600 MW boiler burning with high water content lignite [J]. *Boiler Technology* (锅炉技术), 2011, **42** (2): 32-35.