

# 煤灰熔融温度计算公式的研究

牛苗任<sup>1</sup>, 孙永斌<sup>1</sup>, 林碧华<sup>1</sup>, 周新文<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团公司 华北电力设计院工程有限公司 北京 100120;

2. 建设部沈阳煤气热力研究设计院 辽宁 沈阳 110026)

**摘要:** 依据 172 组商业用煤分析数据, 对 7 种经验公式的准确性和适用性进行了检测; 在此基础上, 进一步对煤灰酸碱比与 ST 和 FT 关系进行了分析, 采用分段拟合的方法, 推导出利用煤灰酸碱比计算 ST 和 FT 的一组关系式, 预测结果与实测值具有较好的一致性, 且关系式适用范围较广, 可对实际工作起到指导作用。

**关键词:** 煤灰; 灰熔融性; 酸碱比

中图分类号: TD849; TQ533.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2011)01-0069-04

煤灰熔融性决定着煤炭排渣方式的选择, 是气化用煤和动力用煤的一项重要指标。煤灰熔融温度是在加热过程中煤灰熔融所呈现的几种物理状态时的温度, 一般用 4 个状态的温度表示: DT(变形温度)、ST(软化温度)、HT(半球温度)和 FT(流动温度)。各特征温度的高低主要取决于煤灰成分。长期以来, 国内外学者对煤的灰熔点与其化学组成的关系进行了很多研究, 找出了利用灰成分计算煤的灰熔点的经验公式, 但是由于煤灰成分变化大, 各成分在高温情况下又形成不同的化合物, 使得这些经验公式在具体应用中计算精度并不理想。

笔者依据 172 组商业用煤分析数据, 煤样类别涉及褐煤、烟煤、无烟煤等, 煤样灰分相关数据见表 1。对 7 种经验公式的计算值与真值进行了比较; 最后采用分段拟合的方法, 回归出酸碱比与 ST、FT 的关系式, 预测结果与真值具有较好的一致性。

## 1 7 种灰熔点计算方法的比较

GB/T 219—2008《煤灰熔融性测试方法》中规定, 灰熔融性温度的再现值不大于 80 °C, 通常文献 [1-2] 将此规定作为经验公式预测值与实测值(真值)的偏差允许范围, 但是 80 °C 的偏差范围难以满足指导气化炉合理操作、平稳运行的要求。GB/T

23251—2009《煤化工用煤技术导则》中指出, 水煤浆气流床气化工艺一般要求 FT 小于 1300 °C; 干粉气流床气化工艺一般要求 FT 小于 1450 °C。张继臻等<sup>[3]</sup>指出, 对于水煤浆进料的气化炉, 最佳气化操作温度以高于 FT 30~50 °C 为宜。对于水冷壁式气化炉, 还要求内壁形成适当厚度的渣层以对水冷壁起到保护作用。因此工业应用对经验公式预测灰熔融性温度的准确性提出了更高的要求。

表 1 实验用煤样灰分

成分	%		
	最大值	最小值	平均值
SiO <sub>2</sub>	69.38	15.40	45.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43.01	4.53	23.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.88	1.35	10.43
CaO	36.32	0.28	10.51
MgO	7.65	0.07	1.65
酸碱比	16.32	0.63	4.13

笔者依据文献中 7 种预测 FT 的经验公式, 将预测值与真值进行比较, 除用国标规定的 FT 再现值不大于 80 °C 作为允许偏差外, 另用工业气化炉需求的预测值与真值偏差小于 50 °C 为标准, 衡量经验公式的准确性, 然后回归出酸碱比与 ST、FT 的关系

收稿日期: 2010-10-15

作者简介: 牛苗任(1979—), 男, 河北晋州人, 博士, 2008年毕业于华东理工大学洁净煤技术研究所, 从事煤气化、IGCC 研发及工程设计。

E-mail: niu miaoren@yahoo.com.cn

式。根据收集到的煤质数据进行计算,7种经验公式的计算值与真值的偏差如图1所示。

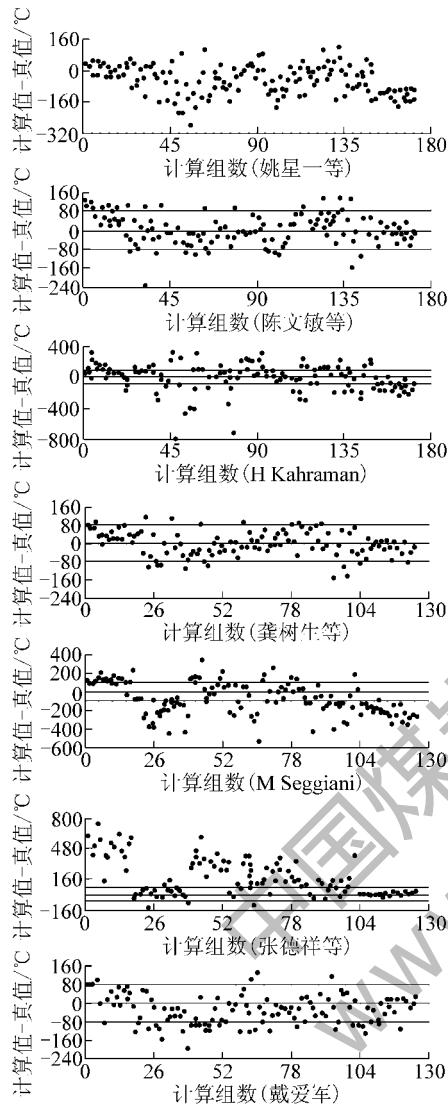


图1 7种FT经验公式计算值与真值的比较

表2总结了7种经验公式的计算结果。从表2可以看出,由于煤灰成分的复杂性和多样性以及各研究者所用煤种的局限性,这些经验公式的适用范围比较有限,在具体应用中计算精度并不理想,应用时应予以注意。

## 2 分段拟合煤灰酸碱比与ST和FT关系式

### 2.1 关系式的提出

根据煤灰化学成分中金属离子的离子势,可将氧化物分为酸性氧化物( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ )和碱性氧化物( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ),一般认为酸性氧化物含量越多,煤灰的熔融温度越高;碱性氧化物含量越多,煤灰熔融温度越低。煤灰中酸性氧化物与碱性氧化物之比,简称酸碱比。酸碱比与FT关系如图2所示。这里需要指出的是,由于煤灰中 $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ 等氧化物含量较少,实际煤灰分析数据经常缺乏这两种数据,为了使拟合公式具有普适性,因此酸碱比计算式中只包含了煤灰中的主要成分。

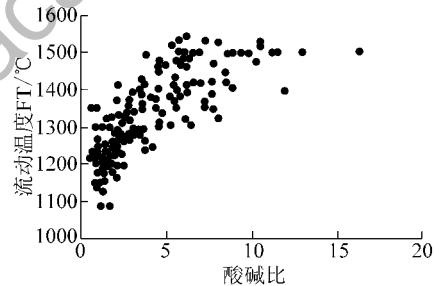


图2 酸碱比与FT关系

图2表明,随着酸碱比的增大,FT先减小后增大。酸碱比在1.7附近时,煤灰中的碱性氧化物与酸性氧化物易形成较多量的低温共熔体,流动温度达到最小值。煤灰成分具有复杂性和多样性,而且某些

表2 7种FT经验公式的计算结果统计

计算公式来源	计算煤样总数	计算值 - 真值 > 80 °C		计算值 - 真值 > 50 °C	
		个数	占煤样总数的百分数/%	个数	占煤样总数的百分数/%
姚星一等 <sup>[4]</sup>	172	67	38.95	94	54.65
陈文敏等 <sup>[5]</sup>	172	37	21.51	74	43.02
H. Kahraman <sup>[6]</sup>	172	106	61.63	124	72.09
龚树生等 <sup>[7-8]</sup>	125	23	18.40	44	35.20
Seggiani M <sup>[9]</sup>	125	70	56.00	81	64.80
张德祥等 <sup>[2]</sup>	125	97	77.60	107	85.60
戴爱军 <sup>[1]</sup>	125	37	29.60	60	48.00

组分的含量对 ST 和 FT 的影响并不是单调变化的, 各组间的作用是相互耦合的。因此: 第一, 应该采用一个包含了所有组分关系的变量——酸碱比来拟合比较合适; 第二, 应该根据酸碱比与 FT 关系, 采用分段拟合的方法, 利用一组关系式来表达, 其拟合结果才可能有较高的精度。例如, 戴爱军<sup>[1]</sup>虽然也采用酸碱比对 FT 进行拟合, 但对整个范围的酸碱比(0~11), 只进行了一次拟合, 并没有采用分段拟合的方法, 因此计算结果不够理想, 这从表 2 中可以得到证实。通过对 172 组数据的分析, 笔者得出的预测 ST 和 FT 的关系式如下:

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (1)$$

$$x = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) \quad (2)$$

当  $0.63 < x \leq 2$  时,

$$\text{ST} = 778.6640 + 473.2264x - 35.2169x^2 - 127.4729x^3 + 41.0108x^4 \quad (r=0.9911) \quad (3)$$

$$\text{FT} = 227.0042 + 2558.7753x - 2572.6361x^2 + 1159.0404x^3 - 191.3770x^4 \quad (r=0.9852) \quad (4)$$

当  $2 < x \leq 6$  时,

$$\text{ST} = 1230.5162 - 140.8910x + 108.7489x^2 - 24.6439x^3 + 1.8567x^4 \quad (r=0.9871) \quad (5)$$

$$\text{FT} = 1003.5382 + 176.6122x - 22.9635x^2 - 1.0244x^3 + 0.3182x^4 \quad (r=0.9944) \quad (6)$$

当  $6 < x \leq 8$  时,

$$\text{ST} = -82555.5744 + 45930.4295x - 9414.3938x^2 + 856.9491x^3 - 29.2150x^4 \quad (r=0.9784) \quad (7)$$

$$\text{FT} = -85415.4440 + 48492.1242x - 10145.2794x^2 + 942.8802x^3 - 32.8319x^4 \quad (r=0.9452) \quad (8)$$

当  $8 < x \leq 10$  时,

$$\text{ST} = 148005.6157 - 65772.5365x + 11031.6895x^2 - 819.6051x^3 + 22.7647x^4 \quad (r=0.8550) \quad (9)$$

当  $10 < x \leq 16.32$  时,

$$\text{ST} = -26641.7826 + 8959.1782x - 1060.6399x^2 + 55.2959x^3 - 1.0701x^4 \quad (r=0.9073) \quad (10)$$

当  $8 < x \leq 16.32$  时,

$$\text{FT} = 5438.6045 - 1384.0518x + 177.5921x^2 - 9.8580x^3 + 0.2007x^4 \quad (r=0.8297) \quad (11)$$

式中  $r$  为相关系数。通过计算分析发现, 采用分段拟合的方法确实具有较高的精度, 而且对不同区间的酸碱比, 采用式(1)一元四阶方程比较合适。通过线性回归和曲线拟合, 得出待定系数  $a, b, c, d, e$  的值。ST, FT 的计算值与真值的偏差如图 3 所示。

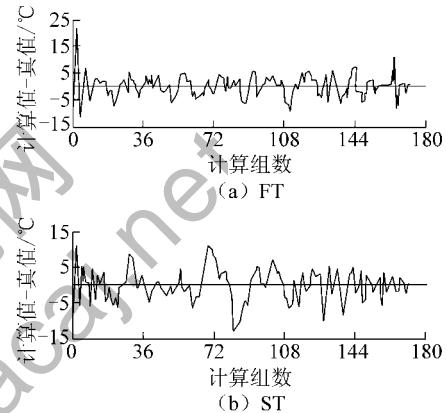


图 3 ST、FT 的计算值与真值的偏差

由图 3 可知对 ST 和 FT 的拟合效果均较好, 误差在  $\pm 25$  °C 之间, 满足工业气化炉需求的预测值与真值偏差小于 50 °C 标准。这里需要指出的是: 第一, 从计算结果看, 按照下面的酸碱比范围进行分段拟合, 其计算精度已经足够高, 当然若需更高精度的结果, 可以采用笔者提出的分段拟合的思想, 对酸碱比进行更小范围的划分, 重新拟合。第二, 由于收集到的煤种的局限性, 笔者计算 ST 和 FT 的关系式适用范围是: 酸碱比在 0.63~16.32 之间, 若酸碱比超出此范围, 关系式并不适用, 但可以按照提供的思路, 根据收集到的数据, 重新拟合出关系式。

表 3 2 组煤种的煤质分析

项目	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	FT/°C	FT 计算值/°C
煤种 A	48.42	22.44	12.96	7.00	0.92	0.43	1.20	0.60	5.41	1290	1331
煤种 B	62.34	21.01	8.09	3.12	0.84	0.33	1.98	0.78	0.94	1450	1416

## 2.2 分段拟合关系式的验证

为了检验以上关系式的准确性, 笔者应用表 3 的 2 组煤种进行验证, 这里需要指出的是, 这 2 组煤种是另外随机选用的, 并不包含在推导关系式选用的煤

种范围之内。从表 3 FT 计算值可以看出, 与真值偏差分别为 41 °C 和 34 °C, 均小于工业气化炉需求的 50 °C 标准。因此, 笔者提出的分段拟合关系式, 具有相当的准确性, 可对实际工作起到指导作用。

### 3 结 论

由于煤灰成分的复杂性和经验公式所用煤种的局限性,使得现有 7 种经验公式的使用范围受限,预测精度不够理想,应用时应予以注意。按照不同的酸碱比,采用分段拟合的方法,推导出 ST 和 FT 的一组关系式,具有较高的精度和较广的适用范围(酸碱比为 0.63 ~ 16.32),可用于助熔剂添加量的计算、单一煤种或者配煤灰熔点的计算等,具有较大的实用价值和推广价值。

参考文献:

- [1] 戴爱军. 煤灰成分对灰熔融性影响研究[J]. 洁净煤技术, 2007, 13(5): 23 - 26.  
 [2] 张德祥, 龙永华, 高晋生, 等. 煤灰中矿物的化学组成与灰熔融性的关系[J]. 华东理工大学学报(自然科学

版), 2003, 29(6): 590 - 594.

- [3] 张继臻, 王延坤. Texaco 煤气化渣中可燃物高的原因分析及应对措施[J]. 煤化工, 2007, 35(5): 17 - 24.  
 [4] 姚星一, 王文森. 灰熔点计算公式的研究[J]. 燃料学报, 1959, 4(3): 216 - 223.  
 [5] 陈文敏, 姜宁. 煤灰成分和煤灰熔融性的关系[J]. 洁净煤技术, 1996, 2(2): 34 - 37.  
 [6] H. Kahraman, F. Bos, A. Reifenstein et al. Application of a new ash fusion test to theodore coals[J]. Fuel, 1998, 77(9 - 10): 1005 - 1011.  
 [7] 龚树生, 陈丽梅. 由煤灰成分推算其熔融性的多元线性回归式研究[J]. 煤质技术, 1998(5): 23 - 26.  
 [8] 龚树生, 陈丽梅. 由煤灰成分推算其熔融性的多元线性回归式研究[J]. 煤质技术, 1998(6): 36 - 39.  
 [9] M. Seggiani. Empirical correlations of the ash fusion temperatures and temperature of critical viscosity for coal and biomass ashes[J]. Fuel, 1999, 78(9): 1121 - 1125.

## Calculation formula of coal ash melt temperature

NIU Miao-ren<sup>1</sup>, SUN Yong-bin<sup>1</sup>, LIN Bi-hua<sup>1</sup>, ZHOU Xin-wen<sup>2</sup>

- (1. North China Power Engineering Co., Ltd., China Power Engineering Consulting Group Corporation, Beijing 100120, China;  
 2. Shenyang Gas & Heat Research and Design Institute of Construction Ministry P. R. C., Shenyang 110026, China)

**Abstract:** Based on the analytical datas of 172 types of China commercial coal samples, the accuracy and applicability of seven empirical formulars for predicting the coal ash FT is analyzed. On this basis, the relationship between acid/alkali ratio and ST, FT is further analyzed. With sectional fitting method, a group of polynomial regression equations which can be used to calculate ST and FT are gained and the experimental results tally with the prediction. The results have certain reference value in practical work.

**Key words:** coal ash; coal ash fusibility; acid to alkali ratio

### 信息检索

## 乌兹别克斯坦将建成世界第 3 大天然气加工厂

乌兹别克斯坦将在卡什卡达里亚州建设中亚唯一的天然气加工厂,其规模将居世界第 3 位。该项目由乌兹别克斯坦石油天然气公司、马来西亚石油公司及韩国 Sasol Synfuels 公司共同组建的合资企业实施,总投资预计将达 25 亿美元,资金由 3 家公司自筹。合资企业注册资本将达 8.4 亿美元。这个天然气加工厂建成后,每年将加工天然气 35 亿 m<sup>3</sup>,年产柴油 67 万 t、航空煤油 28 万 t、粗汽油 36 万 t 及液化气 6.3 万 t。预计该项目将在 2011 年第二季度完成可研报告,2014 年建成投产。

——摘自《中国煤炭报》