

陶瓷材料专业系列教材

T AOCI GANZAO YU
SHAOCHENG JISHU
**陶瓷干燥与
烧成技术**

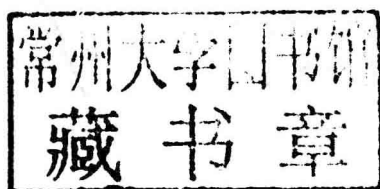


主 编 闵国强

AOCI GANZAO YU
SHAOCHENG JISHU

T 陶瓷干燥与 烧成技术

主 编 闵国强



图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷干燥与烧成技术 / 闵国强主编. —南昌: 江西高校出版社, 2017.8

陶瓷材料专业系列教材

ISBN 978-7-5493-4733-9

I. ①陶… II. ①闵… III. ①陶瓷—干燥—高等学校—教材 ②陶瓷—烧成(陶瓷制造)—高等学校—教材 IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 209271 号

出版发行	江西高校出版社
社 址	江西省南昌市洪都北大道 96 号
总编室电话	(0791)88504319
销 售 电 话	(0791)88592590
网 址	www.juacp.com
印 刷	南昌市光华印刷有限责任公司
经 销	全国新华书店
开 本	787mm × 1092mm 1/16
印 张	16.25
字 数	234 千字
版 次	2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5493-4733-9
定 价	37.00 元

赣版权登字-07-2017-986

版权所有 侵权必究

图书若有印装问题,请随时向本社印制部(0791-88513257)退换

前 言

为适应当前我国职业教育形势的发展,我们通过生产企业调研和人才需求分析,针对专业课程在生产工艺流程中设置的岗位和这些岗位应完成的任务以及完成岗位任务应具备的知识能力、技术能力、社会能力的要求,组织教师和企业生产一线的工程技术人员一起编写了这本《陶瓷干燥与烧成技术》。

根据职业教育的特点,本书参照行业职业标准,重新组织教学内容,做到理论与实践并重,且更倾向于实践。具体内容有:阐述了陶瓷热工基础;叙述了干燥机理,重点介绍了对流干燥设备及其干燥技术,简单介绍了红外干燥与微波干燥;叙述了陶瓷烧成的基本知识;在间歇窑烧成技术中着重介绍了倒焰燃气窑的结构、操作调控方法,设备的维护和保养方法,以及部分陶瓷产品常见烧成缺陷分析与解决办法,简单介绍了梭式窑和钟罩窑等;在连续窑炉中重点介绍了辊道窑和窑车隧道窑的结构、工作系统,烧成时的操作调控方法,窑炉设备的启动运行和烘烤,常见故障及排除方法,设备的维护和保养,以及陶瓷砖产品常见烧成缺陷分析与解决办法等,简单介绍了推板窑。此外,还介绍了电热窑炉的结构和操作使用方法。最后介绍了热工测量仪表及使用方法等。力求使课程内容贴近生产岗位。

本书由江西陶瓷工艺美术职业技术学院闵国强任主编。具体分工为:项目1由广东轻工职业技术学院周纯编写,项目2部分内容由江西陶瓷工艺美术职业技术学院胡澄清编写,项目5中辊道窑及项目2中辊道式干燥器部分由广东佛山佳窑陶瓷技术有限公司程昭华编写,项目6由江西陶瓷工艺美术职业技术学院邱辉辉编写,其余内容由闵国强编写。本书插图由邱辉辉绘制和整理。本书由程昭华和胡澄清任副主编。全书由江西陶瓷工艺美术职业技术学院涂申年教授任主审。

此外,本书还得到广东特地(景德镇)陶瓷有限公司、景德镇市鹏飞建陶有限公司等的大力支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,本书缺点、错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

二〇一七年六月

目 录

项目 1 陶瓷热工基础	001
任务 1.1 燃料、燃烧及燃烧设备	001
任务 1.2 窑炉中的气体流动	026
任务 1.3 窑炉中的传热	039
项目 2 陶瓷干燥技术	053
任务 2.1 干燥机理	053
任务 2.2 对流干燥	059
任务 2.3 红外干燥及微波干燥简介	088
项目 3 陶瓷烧成的基本知识	092
项目 4 间歇窑烧成技术	099
任务 4.1 倒焰燃气窑	099
任务 4.2 梭式窑	118
任务 4.3 钟罩窑、升降窑简介	126
项目 5 连续窑炉烧成技术	129
任务 5.1 辊道窑	129
任务 5.2 窑车隧道窑	182
任务 5.3 推板窑简介	214
项目 6 电热窑炉烧成技术	216
项目 7 热工测量仪表及使用方法	232
附录	250
参考文献	254

项目1 陶瓷热工基础

任务1.1 燃料、燃烧及燃烧设备

各种陶瓷工业窑炉,除电窑炉外,大多要依靠燃料的燃烧来提供热量。燃料的种类和性质是陶瓷热工设备实现生产机械化、自动化的重要条件,是影响陶瓷产品质量的重要因素。因此我们应了解各种燃料的热工特性,掌握基本的燃烧计算,正确选择和使用燃烧设备,合理组织燃烧过程,以达到优质、高产、低消耗的目的。

一、燃料种类及特性

(一) 燃料种类

根据燃料的状态不同,可分为固体、液体和气体燃料三类。具体分类见表1-1-1。

表1-1-1 工业燃料的分类

来 源	物 态		
	固 体	液 体	气 体
天然燃料	木柴 褐煤 无烟煤 烟煤 可燃页岩	石油	天然气
加工燃料	木炭 焦炭 煤球 煤粉等	石油加工产品 (重油、柴油、燃料油等) 水煤浆(暂定)	液化石油气 发生炉煤气 焦炉煤气 高炉煤气等

(二) 燃料的特性

1. 固体燃料特性

(1) 热值

热值也称发热量,指每千克固体、液体燃料或每立方米标态(标准状态,即0℃,

101 325Pa) 气体燃料完全燃烧, 燃烧产物冷却到燃烧前的温度所放出的热量。按燃烧产物中水的存在状态, 热值有高位热值 Q_{gr} 与低位热值 Q_{net} 之分。高位热值是指燃烧产物中的水蒸气全部冷凝成水时所放出的热量; 低位热值是指燃烧产物中的水蒸气仍以气态存在时所放出的热量。热值的单位是 kJ/kg 或 kJ/m^3 。

由上述定义可知, 高位热值与低位热值的差为单位燃料完全燃烧生成的水气化所吸收的热量。常温下水的气化热约为 2500kJ/kg 。热值是保证窑内烧成温度和正常升温的主要指标, 如: 松柴的热值范围是 $10\ 470\text{kJ/kg} \sim 18\ 300\text{kJ/kg}$, 煤的热值范围是 $8300\text{kJ/kg} \sim 34\ 300\text{kJ/kg}$ 。

(2) 挥发分

挥发分是指燃料中可燃气体的组分。挥发分含量直接影响到燃烧时火焰的长度和着火温度。挥发分含量高, 火焰长, 着火温度低。木柴的挥发分含量可达 80% 以上, 火焰长, 着火温度只有 $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$, 烟煤的挥发分含量为 10% ~ 45%, 火焰较长, 着火温度为 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$, 无烟煤的挥发分含量小于 10%, 火焰较短, 着火温度为 $700^\circ\text{C} \sim 750^\circ\text{C}$ 。

(3) 粘结性

煤的粘结性是指煤逸出挥发分后的焦渣特征。可分为八类:

①粉状: 不粘结。

②粘结: 手指轻压即成粉块。

③弱粘结: 手指轻压即成小块。

④不熔融粘结: 手指用力压才裂成小块, 焦渣上表面无光泽, 下表面银白色光泽并不明显。

⑤不膨胀熔融粘结: 焦渣形成扁平的饼状, 煤粒的界限不易分清, 表面有银白色金属光泽, 焦渣下表面光泽更明显。

⑥微膨胀熔融粘结: 用手指压不碎, 在焦渣上下表面上有银白色金属光泽, 但焦渣表面有小气泡。

⑦膨胀熔融粘结: 焦渣上下表面有银白色金属光泽, 膨胀高度不超过 15mm。

⑧强膨胀熔融粘结: 焦渣上下表面有银白色金属光泽, 膨胀高度大于 15mm。

(4) 灰分

灰分是燃料中的不可燃组分。灰分含量多, 会降低燃料的发热量, 热损失增大。

(5) 结渣性

结渣性即灰渣的熔融性。灰分的化学组成为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等, 灰分中 SiO_2 、 Al_2O_3 含量多, 熔点高, 烧后不易结渣; Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等含量多, 熔点低, 烧后易结渣。灰分的熔点还与燃烧时的气氛有关。

(6) 水分

燃料中的水分包括外在水(自由水)和内在水(吸附水)两部分。水分含量增加, 会使

燃料的热值降低,也不利于着火。

(7) 硫分

指燃料中可燃硫含量。可燃硫燃烧生成的 SO_2 和 SO_3 与烟气中的水蒸气结合生成硫酸或亚硫酸蒸气,腐蚀金属设备,污染大气。生成硫酸或亚硫酸蒸气还易与坯体中的钙盐反应生成硫酸钙,硫酸钙分解温度较高,使瓷器釉面蒙上一层“白霜”,降低了釉层的表面光泽度,影响产品质量。一般要求其含量小于1%。

2. 液体燃料的特性

我国陶瓷热工设备中使用的液体燃料主要有重油、柴油等,另外,水煤浆作为一种新型煤基固、液两相流体燃料,与液体燃料有许多相似之处。

(1) 水煤浆

水煤浆的生产与应用技术已日益成熟,水煤浆应用可以做到达标排放,与燃油价格相比更经济,水煤浆热值为 $16\,000\text{kJ/kg} \sim 20\,000\text{kJ/kg}$ 。水煤浆的制造过程如下:

① 制水煤浆的煤质要求

不粘结性或弱粘结性烟煤(末煤即可),发热量 $> 20\,000\text{kJ/kg}$,挥发分 $> 28\%$,灰分 $< 10\%$,灰熔点 $> 1250^\circ\text{C}$,硫分 $< 1\%$,内水分 $< 5\%$ 。

② 水煤浆工艺参数

细度为 200 目筛余 $10\% \sim 20\%$,粘度 < 80 秒(涂料粘度计),水分为 $45\% \sim 51\%$,沉淀性为 72 小时无硬沉淀。

③ 水煤浆制备过程

干煤粉($53\% \sim 57\%$) + 水($46\% \sim 42\%$) + 添加剂 1% ,混合后入球磨机 $5 \sim 7$ 小时检测其参数,达到要求即可。

水煤浆添加剂主要有分散剂、稳定剂和其他辅助添加剂。分散剂主要是为提高煤表面的亲水性、增强煤粒间的静电斥力以及空间隔离位阻效应。常用分散剂有萘磺酸盐、木磺酸盐、磺化腐植酸盐等;稳定剂是用于保持煤浆储存时性态均匀,常用的稳定剂有聚丙烯酰胺絮凝剂、羧甲基纤维素等。其他辅助添加剂有消泡剂、调整剂、表面处理剂及促进剂等。

水煤浆目前主要用于喷雾干燥塔的热风炉,少量用于烧成温度较低的陶瓷墙地砖辊道窑。有些陶瓷厂建有煤气站,在处理煤气过程中会产生一定的有害物质(如:酚水),难以处理,所以,有的厂将部分酚水加入,和煤一起球磨制得水煤浆,经燃烧,产物作为热介质使用。

(2) 燃料油

陶瓷工业用的燃料油主要是重油、柴油,它们都是石油加工产物,重油一般指在蒸馏原油的过程中,分馏出航空油、汽油、煤油、柴油以及其他石油产品后,残留在蒸馏塔中的一种呈黑褐色的较重的油品。重油的元素组成范围为:C 为 $85\% \sim 88\%$,H 为 $10\% \sim 13\%$,

N + O₂为0.5% ~ 1% ,S 为0.2% ~ 1% ,发热量很高,为38 000kJ/kg ~ 42 000kJ/kg;柴油一般含:C 为85.5% ~ 86.5% ,H 为13.5% ~ 14.5%。柴油分为轻柴油和重柴油。轻柴油主要来自催化裂化的柴油馏分,也有部分直馏柴油馏分,具有良好的低温流动性和储存安定性以及低灰分等特点,发热量42 700kJ/kg ~ 43 000kJ/kg。重柴油则馏分较重,甚至可混入一定量的重油,因此不易燃烧完全,发热量为40 600kJ/kg ~ 44 000kJ/kg。

①密度

燃油的密度随着温度的升高而略有减小,20℃时重油密度为0.9t/m³ ~ 1.0t/m³,柴油的密度为0.810t/m³ ~ 0.855t/m³。

②水分

燃油中含有水分,不仅降低其发热量,而且当水分过高时容易产生“气塞”现象,使燃烧火焰不稳定,影响窑炉的正常运行,故贮油罐应定期排水。由于燃油的密度略小于水,因此贮油罐的排水管安装在下部。

③粘度

我国重油常用的粘度标准是以恩氏粘度(°E)来表示的。即在测定温度下重油从恩格拉粘度计中流出200ml所需时间(s)与20℃的蒸馏水流出200ml所需时间(约52s)的比值。我国重油的牌号,就是以50℃时油的恩氏粘度来分类的。例如,60[#]重油在50℃时的恩氏粘度值为60°E。重油的牌号愈高,油的粘度愈大。我国各种重油的特性见表1-1-2。

表 1-1-2 重油的特性

指 标	20 [#]	60 [#]	80 [#]	100 [#]	200 [#]
恩氏粘度(°E), 80℃时不大于 100℃时不大于	5.0	11.0 4.8	11 ~ 13	15.5	5.5 ~ 9.5
闪点(开口)(℃), 不低于	80	100	120	120	130
凝固点(℃), 不高于	15	20	20	25	36
灰分(%), 不大于	0.3	0.3	—	0.3	0.3
硫分(%), 不大于	1.0	1.5	3.5	2.0	3.0
水分(%), 不大于	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0
机械杂质(%), 不大于	1.5	2.0	—	2.5	2.5

实际上,工业炉所使用的重油往往是混合渣油,即以原油加工过程中的常压油,减压渣油、裂化渣油、裂化柴油和催化柴油等为原料调和而成的燃料油。

重油的粘度随着温度升高,粘度减小。各种重油在低温下粘度相差很大,温度越高,它们的粘度相差越小。为了保证重油良好的雾化,要求重油的粘度最好为5°E ~ 10°E。

④闪点、燃点、着火点

油类加热到一定温度时,油表面有油蒸气产生。油温越高,油蒸气越多。当有火焰接

近时,若出现短暂的蓝色闪光,则此时的油温称为油的“闪点”。若油温超过闪点,则油的蒸发速度加快,以致用火源接近油表面时,在蓝光闪现后能持续燃烧(不少于 5s),此时的油温称油的“燃点”。若再继续提高油温,则油表面的蒸气即使无火源接近也会自发燃烧起来,相应的油温称油的“着火点”。

燃油的闪点与其组成相关。油密度越小,闪点越低。测定闪点的方法有开口杯法(油表面暴露在大气中)和闭口杯法(油表面封闭在容器内)两种。前者用于测定闪点较高的油类,如重油,后者一般用于测定闪点较低油类,如原油、汽油等。开口闪点比闭口闪点一般高 15℃~25℃,重油的闪点见表 1-1-2。

燃点与闪点相差不大,重油的燃点一般比其闪点高 10℃左右,柴油的燃点约为 220℃。重油的着火点为 500℃~600℃。

⑤凝固点
当油类失去流动性时的最高温度称凝固点。重油的凝固点一般为 30℃~45℃。我国柴油的牌号就是根据凝固点来分类的,柴油牌号及特性见表 1-1-3 和表 1-1-4。

表 1-1-3 轻柴油的特性

项 目	质 量 指 标				
	10 [#]	0 [#]	-10 [#]	-20 [#]	-35 [#]
运动粘度×10 ⁶ (20℃), (m ² /s)	3.0~8.0	3.0~8.0	3.0~8.0	2.5~8.0	2.5~7.0
灰分(%), 不大于	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
硫含量(%), 不大于	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
机械杂质	无	无	无	无	无
水分含量	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹	痕迹
闪点(闭口)(℃), 不低于	60	60	60	60	50
凝固点(℃), 不高于	10	0	-10	-20	-35

表 1-1-4 重柴油的特性

项 目	质 量 指 标		
	RC3—10	RC3—20	RC3—30
运动粘度×10 ⁶ (20℃), (m ² /s) 不大于	13.5	20.5	36.5
硫含量(%), 不大于	0.4	0.6	0.8
机械杂质(%), 不大于	0.5	0.5	1.5
水分(%), 不大于	0.5	1.0	1.5
闪点(闭口)(℃), 不低于	65	65	65
凝固点(℃), 不高于	10	20	30

⑥比热容和导热系数

重油的比热容一般为 $1.88\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \sim 2.1\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 。重油的导热系数与重油的品种及温度有关,一般为 $0.128\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \sim 0.163\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

⑦机械杂质

燃油中的机械杂质,大部分是在贮运过程中带入的,它容易磨损油泵,堵塞输油管路和油喷嘴,因此,应在输油系统中安装过滤器,以除去油中的机械杂质。

3. 气体燃料的特性

(1)组成

发生炉煤气是用固体燃料在高温下通入气化剂得到的人造煤气,根据气化剂的不同,又有空气煤气、水煤气、混合煤气之分。焦炉煤气是炼焦(即将煤隔绝空气加热)过程得到的气态挥发物,高炉煤气则是高炉炼钢得到的副产品。这三类煤气的组成和热值范围列于表 1-1-5。

天然气根据矿藏特点可分为伴生气和非伴生气,伴生气随原油共生,与原油同时被采出,还有一种伴生气是煤矿伴生气。非伴生气包括纯气田天然气和凝析气田天然气,两者在地层中均为均一的气相。凝析气田天然气由井口导出后,经减压降温,分离为气、液两相。气相经净化后,成为商品天然气。天然气主要成分是甲烷,发热量约为 $33\,500\text{kJ/m}^3 \sim 37\,700\text{kJ/m}^3$ 。表 1-1-6 为我国部分天然气组成。

表 1-1-5 发生炉煤气、焦炉煤气、高炉煤气的组成及热值范围

煤气名称	平 均 组 成 ($\varphi \times 100$)							热 值 (kJ/m^3)
	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$	O_2	CO	H_2	CH_4	C_mH_n	N_2	
空气煤气	0.5 ~ 1.5		32 ~ 33	0.5 ~ 0.9			64 ~ 66	4000 ~ 4500
水煤气	5 ~ 7	0.1 ~ 0.2	35 ~ 40	47 ~ 52	0.3 ~ 0.6	0.2 ~ 0.4	2 ~ 6	10 000 ~ 11 000
混合煤气	5 ~ 7	0.1 ~ 0.3	24 ~ 30	12 ~ 15	0.5 ~ 3		46 ~ 55	5000 ~ 6500
焦炉煤气	2 ~ 3	0.7 ~ 1.2	4 ~ 8	53 ~ 60	19 ~ 25	1.6 ~ 2.3	7 ~ 13	15 000 ~ 17 000
高炉煤气	8 ~ 14		23 ~ 31	10 ~ 15	0.1 ~ 2.6		48 ~ 60	4000 ~ 5000

表 1-1-6 我国部分天然气组成

产 地	种 类	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	H_2S	其他
大庆油田	伴生气	79.75	1.9	7.6	5.62			3.31
胜利油田	伴生气	86.6	4.2	3.5	2.6	1.1		2.0
大港油田	伴生气	76.29	11.0	6.0	4.0			2.07
四川自流井气田	非伴生气	97.12	0.56	0.07			0.02	2.23
四川威远气田	非伴生气	86.8	0.11				0.88	12.88
四川卧龙河气田	非伴生气	95.97	0.55	0.10	0.03	0.04	1.52	1.80

天然气开采出来后,经脱水、脱硫、分离(凝析油、氦气等)等工序后,逐步降压送至用户使用。也有将天然气液化,然后贮运使用的。

液化石油气是石油炼制的副产品,其主要组成为丙烷和丁烷,液态密度为 500 ~ 600kg/m³。表 1-1-7 列出几种液化石油气的组成与热值。

表 1-1-7 几种液化石油气的组成(φ×100)与热值

序号	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂	其他	Q _{net,ar} , (MJ/m ³)
1	0.57		15.37	34.06	40.23	9.5	0.45	0.37	105.86
2	16.0	0.8	63.4	14.4	2.6	0.2	0.3	2.3	84.24
3			76.8	10.9	6.6	1.9	2.3	1.5	95.05
4			61.2	12.7	14.5			11.6	86.25
5			90.7	3.5	3.8	0.1	0.5	1.4	92.11

由表 1-1-7 可知,液化石油气组成变化较大,虽然都是以 C₃ 和 C₄ 为主,这与石油产地和炼制工艺有关。低位热值高达 85 000kJ/m³ ~ 108 000kJ/m³,如以质量计则为45 000kJ/kg ~ 50 000kJ/kg。

气体燃料还可通过裂解重油制得。

(2) 相对分子质量和密度

煤气的相对分子质量按下式计算:

$$M_r = \sum \varphi_i M_{ri}$$

(1—1)

式中: M_r——煤气的平均相对分子质量;

φ_i——各气体成分在煤气中的体积分数;

M_{ri}——各气体成分的相对分子质量。

煤气在标准状态和工作状态下的密度均可用理想气体状态方程计算。

(3) 平均比热容

煤气的平均比热容按下式计算:

$$C = \sum \varphi_i C_i$$

(1—2)

式中: C_i——煤气中各气体成分的平均比热容。

各种气体的平均比热容见附录。

4. 标准燃料

不同种类的燃料热值相关较大,为了便于统计和评比燃料的消耗量,就需要有一个统一的标准。目前规定,标准煤的收到基低位热值为 29 310kJ/kg,标准油或标准气则为 41 870kJ/kg 或 41 870kJ/m³。

二、燃料组成的表示方法与燃烧计算

(一) 燃料组成的表示

1. 固体、液体燃料

固体、液体燃料的组成,可以由化学分析得到,通常包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)五种元素以及水分(M)和部分矿物杂质——灰分(A)。上述元素并不是单独自由存在的,而是以结合成有机化合物的形式存在。这种用元素来表示燃料组成的分析方法,称为元素分析法。还有一种分析固体燃料组成的简易方法叫工业分析法,其组成由挥发分(V)、固定碳(FC)、灰分(A)及水分(M)来表示。

由于煤的开采、运输、贮存的条件往往不同,因而同类煤的组成也会有较大的变动,特别是其中的水分和灰分的含量。所以在表示煤的组成时,必须说明所选用煤的基准。表示煤组成的常用基准有四个:(1)收到基,指使用单位收到的煤的组成,在各组成的右下角以“ar”表示;(2)空气干燥基,指风干(20℃、相对湿度70%)煤样的组成,各组成右下角以“ad”表示;(3)干燥基,指绝对干燥的煤的组成,各组成右下角以“d”表示;(4)干燥无灰基,指假想的无水无灰的煤的组成,各组成右下角以“daf”表示。其中,用于燃烧计算的为收到基组成,常用下式表示:

$$C_{ar}\% + H_{ar}\% + O_{ar}\% + N_{ar}\% + S_{ar}\% + A_{ar}\% + M_{ar}\% = 100\% \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad V_{ar}\% + FC_{ar}\% + A_{ar}\% + M_{ar}\% = 100\% \quad (1-4)$$

2. 气体燃料

气体燃料是由可燃成分(如:CO、H₂、H₂S、CH₄、C_mH_n等)及不可燃成分(CO₂、H₂O、N₂、SO₂、O₂等)组成的混合气体。一般用体积分数表示,并有干成分和湿成分两种表示方法。

$$\text{干成分: } \varphi_{CO,g} + \varphi_{H_2,g} + \varphi_{CH_4,g} + \cdots = 1 \quad (1-5)$$

$$\text{湿成分: } \varphi_{CO,s} + \varphi_{H_2,s} + \varphi_{CH_4,s} + \cdots + \varphi_{H_2O,s} = 1 \quad (1-6)$$

通常给出的煤气分析数据是干煤气的成分,而燃烧计算时应采用湿成分,故两者要进行换算,其换算关系如下:

$$\varphi_{X,s} = \varphi_{X,g} (1 - \varphi_{H_2O,s}) \quad (1-7)$$

3. 根据燃料组成估算燃料热值

(1) 固体、液体燃料

若已知固体、液体燃料的收到基组成,可按下列下式估算其收到基低位热值:

$$Q_{net,ar} = 339C_{ar} + 1030H_{ar} + 109(S_{ar} - O_{ar}) - 25M_{ar} \quad (1-8)$$

(2) 若已知气体燃料的体积分数,可按下列下式估算气体燃料的低热值:

$$\begin{aligned} Q_{net} = & 12\,600\varphi_{CO} + 10\,800\varphi_{H_2} + 35\,800\varphi_{CH_4} + 59\,000\varphi_{C_2H_4} + 63\,700\varphi_{C_2H_6} + \\ & 80\,600\varphi_{C_3H_6} + 91\,200\varphi_{C_3H_8} + 113\,300\varphi_{C_4H_8} + 118\,700\varphi_{C_4H_{10}} + \\ & 146\,000\varphi_{C_5H_{12}} + 23\,200\varphi_{H_2S} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式(1—9)中,若各气体成分为干成分时,计算出的热值为气体燃料干成分低位热值;若为湿成分,则为湿成分低位热值。

(二) 燃烧计算

1. 基本知识

(1) 完全燃烧与不完全燃烧

所谓燃烧,即为燃料中的可燃成分与氧气进行的激烈氧化反应,完全燃烧,是指燃料中所有的可燃成分达到完全氧化,燃烧产物中不存在游离碳和 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃气体的。

不完全燃烧,是指燃料中的可燃成分没有全部氧化,燃烧产物中有游离碳和 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃气体的。不完全燃烧又分为化学不完全燃烧和机械不完全燃烧。化学不完全燃烧指燃烧产物中含有游离碳、 CO 、 H_2 ;机械不完全燃烧指部分可燃成分未参加燃烧反应被损失掉,如因管道、阀门不严而泄漏的液体或气体燃料等。

(2) 空气系数

陶瓷窑炉燃料燃烧一般用空气助燃,特殊情况采用纯氧助燃。按燃烧化学反应方程式计算得到的燃料完全燃烧所需的空气量(m^3/kg 或 m^3/m^3)叫理论空气量(V_a^0)。燃烧时,实际通入的空气量叫实际空气量(V_a),实际空气量与理论空气量的比值,叫作空气系数(或空气过剩系数) α ,即

$$\alpha = \frac{V_a}{V_a^0} \quad (1-10)$$

空气系数的选择,取决于燃料的种类、燃烧设备、燃烧方式等。

(3) 烟气的成分

燃烧时通入的空气量不同,燃烧产生的烟气的化学性质也不同,根据烟气的化学性质,可分为氧化气氛、中性气氛和还原气氛。

① 氧化气氛

烟气中含有 O_2 ,不含 CO 、 H_2 等时,称为氧化气氛。燃烧时空气系数 $\alpha > 1$ 。

② 还原气氛

烟气中含有 CO 、 H_2 等,不含 O_2 时,称为还原气氛,燃烧时空气系数 $\alpha < 1$ 。

③ 中性气氛

烟气中既不含 O_2 ,也不含 CO 、 H_2 时,称为中性气氛,燃烧时空气系数 $\alpha = 1$ 。

2. 燃烧计算方法

燃烧计算的项目通常有燃料燃烧所需空气量、烟气生成量及烟气组成、燃烧温度等。计算时,空气近似认为只有 N_2 和 O_2 两种气体构成,其中 N_2 的体积占 79%, O_2 的体积占 21%,所涉及的气体均按标准状态来计算,标态下 1Kmol 的气体体积为 22.4m^3 。

(1) 空气量的计算

①理论空气量 V_a^0 的计算

对于固体、液体燃料,各可燃成分燃烧时按下列反应进行:



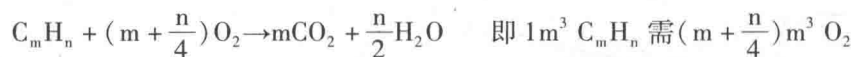
燃料中的 O_{ar} 可认为相当于 O_2 提供助燃,燃料燃烧所需理论氧气量:

$$V_{O_2}^0 = \left(\frac{C_{ar}}{12} + \frac{1}{2} \times \frac{H_{ar}}{2} + \frac{S_{ar}}{32} - \frac{O_{ar}}{32} \right) \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg \quad (1-11)$$

则

$$V_a^0 = V_{O_2}^0 \times \frac{100}{21} = \left(\frac{C_{ar}}{12} + \frac{1}{2} \times \frac{H_{ar}}{2} + \frac{S_{ar}}{32} - \frac{O_{ar}}{32} \right) \times \frac{22.4}{21} \quad m^3/kg \quad (1-12)$$

对于气体燃料,由于组分不同,其可燃成分也不同,这里列举主要的可燃气体如 CO 、 H_2 、 H_2S 、 CH_4 及 C_mH_n 等,其燃烧按下列反应进行。对于具体的气体燃料,应按各自可燃成分在计算时进行增减。



那么 $1m^3$ 含这些可燃气体的气体燃料燃烧所需理论氧气量为:

$$V_{O_2}^0 = \left[\frac{1}{2}\varphi_{CO} + \frac{1}{2}\varphi_{H_2} + \frac{3}{2}\varphi_{H_2S} + 2\varphi_{CH_4} + \left(m + \frac{n}{4}\right)\varphi_{C_mH_n} - \varphi_{O_2} \right] \quad m^3/m^3 \quad (1-13)$$

需理论空气量为:

$$V_a^0 = V_{O_2}^0 \times \frac{100}{21} \quad m^3/m^3 \quad (1-14)$$

②实际空气量的计算

$$V_a = \alpha V_a^0 \quad m^3/kg \text{ 或 } m^3/m^3 \quad (1-15)$$

(2)烟气量及烟气组成的计算

①理论烟气量 V^0 及烟气组成的计算

理论烟气量是指燃料与理论空气进行完全燃烧时所产生的烟气量。它由以下部分组

成:燃料燃烧产生的气体成分、燃烧时燃料中产生的不可燃气体组分以及助燃空气中的不可燃成分等。

对于固体、液体燃料,理论烟气中各组成的生成量为:

$$\text{CO}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{CO}_2}^0 = \frac{C_{\text{ar}}}{12} \times \frac{22.4}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\text{H}_2\text{O 生成量: } V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = \left(\frac{H_{\text{ar}}}{2} + \frac{M_{\text{ar}}}{18} \right) \times \frac{22.4}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\text{SO}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{SO}_2}^0 = \frac{S_{\text{ar}}}{32} \times \frac{22.4}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

$$\text{N}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{N}_2}^0 = \frac{N_{\text{ar}}}{28} \times \frac{22.4}{100} + V_{\text{a}}^0 \times \frac{79}{100} \quad \text{m}^3/\text{kg}$$

所以,理论烟气的量为各组成生成量之和为:

$$V^0 = V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{SO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-16)$$

理论烟气组成:

$$\varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}} + \varphi_{\text{SO}_2} + \varphi_{\text{N}_2} = 1 \quad (1-17)$$

式中: φ_{CO_2} 、 $\varphi_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 φ_{SO_2} 、 φ_{N_2} ——为烟气中各组成的体积分数,例如:

$$\varphi_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}^0}{V^0} \times 100\%, \text{ 其余类推。}$$

对于气体燃料,烟气中各气体组成生成量为:

$$\text{CO}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{CO}_2}^0 = (\varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{CH}_4} + m\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n}) \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{H}_2\text{O 生成量: } V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = (\varphi_{\text{H}_2\text{O}} + \varphi_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{H}_2\text{S}} + 2\varphi_{\text{CH}_4} + \frac{n}{2}\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n}) \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{SO}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{SO}_2}^0 = \varphi_{\text{H}_2\text{S}} \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{N}_2 \text{ 生成量: } V_{\text{N}_2}^0 = \varphi_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}^0 \times \frac{79}{21} = \varphi_{\text{N}_2} + V_{\text{a}}^0 \times \frac{79}{100} \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

理论烟气的量为:

$$\begin{aligned} V^0 &= V_{\text{CO}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{SO}_2}^0 + V_{\text{N}_2}^0 \\ &= \left[\varphi_{\text{CO}_2} + \varphi_{\text{H}_2\text{O}} + \varphi_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2} + 3\varphi_{\text{CH}_4} + \left(m + \frac{n}{4} \right) \varphi_{\text{C}_m\text{H}_n} + 2\varphi_{\text{H}_2\text{S}} + \varphi_{\text{N}_2} \right] + \\ &\quad V_{\text{a}}^0 \times \frac{79}{100} \quad \text{m}^3/\text{m}^3 \end{aligned} \quad (1-18)$$

其理论烟气组成计算方法同固、液燃料。

②实际烟气的量

对于固体、液体燃料:

$$\text{当 } \alpha > 1 \text{ 时, 实际烟气的量为 } V = V^0 + (\alpha - 1)V_{\text{a}}^0 \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-19)$$

过剩的空气使烟气中含有 O_2 , 烟气各组成的生成量为:

$$O_2 \text{ 生成量: } V_{O_2} = (V_a - V_a^0) \times \frac{21}{100} = (\alpha - 1) \times V_a^0 \times \frac{21}{100} \quad m^3/kg$$

$$CO_2 \text{ 生成量: } V_{CO_2} = \frac{C_{ar}}{12} \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg$$

$$H_2O \text{ 生成量: } V_{H_2O} = \left(\frac{H_{ar}}{2} + \frac{M_{ar}}{18} \right) \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg$$

$$SO_2 \text{ 生成量: } V_{SO_2} = \frac{S_{ar}}{32} \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg$$

$$N_2 \text{ 生成量: } V_{N_2} = \frac{N_{ar}}{28} \times \frac{22.4}{100} + \alpha V_a^0 \times \frac{79}{100} \quad m^3/kg$$

实际烟气组成的计算与理论烟气组成的计算相同。

当 $\alpha < 1$ 时, 由于空气供应不足, 燃料中将有部分可燃物质不能完全燃烧, 产物中可能含有可燃气。为简化计算, 产物中的可燃气均按 CO 进行计算。

导致烟气中 CO 生成的不足氧量为: $(1 - \alpha) V_{O_2}^0 \quad m^3/kg$

按燃烧反应式 $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$ 可知, 每少一个氧分子可生成两个 CO 分子, 故 CO 量为: $V_{CO} = 2(1 - \alpha) V_{O_2}^0 = 2(1 - \alpha) V_a^0 \times \frac{21}{100} \quad m^3/kg$

$$\text{则 } CO_2 \text{ 生成量: } V_{CO_2} = \frac{C_{ar}}{12} \times \frac{22.4}{100} - 2(1 - \alpha) V_a^0 \times \frac{21}{100} \quad m^3/kg$$

$$H_2O \text{ 生成量: } V_{H_2O} = \left(\frac{H_{ar}}{2} + \frac{M_{ar}}{18} \right) \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg$$

$$SO_2 \text{ 生成量: } V_{SO_2} = \frac{S_{ar}}{32} \times \frac{22.4}{100} \quad m^3/kg$$

$$N_2 \text{ 生成量: } V_{N_2} = \frac{N_{ar}}{28} \times \frac{22.4}{100} + \alpha V_a^0 \times \frac{79}{100} \quad m^3/kg$$

$$V = V_{CO} + V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} \quad m^3/kg \quad (1-20)$$

比较 V 和 V^0 可知, 实际烟气体积为: $V = V^0 - (1 - \alpha) V_a^0 \times \frac{79}{100}$

对于气体燃料:

$$\text{当 } \alpha > 1 \text{ 时, 实际烟气体积为: } V = V^0 + (\alpha - 1) V_a^0 \quad m^3/m^3 \quad (1-21)$$

过剩空气中 O_2 的生成量为: $V_{O_2} = (\alpha - 1) V_a^0 \times \frac{21}{100} \quad m^3/m^3$

当 $\alpha < 1$ 时, 若煤气按比例燃烧, 则:

$$V = (1 - \alpha) + \alpha V^0 \quad m^3/m^3 \quad (1-22)$$

式中: $1 - \alpha$ ——未燃燃料量, m^3/m^3 ;