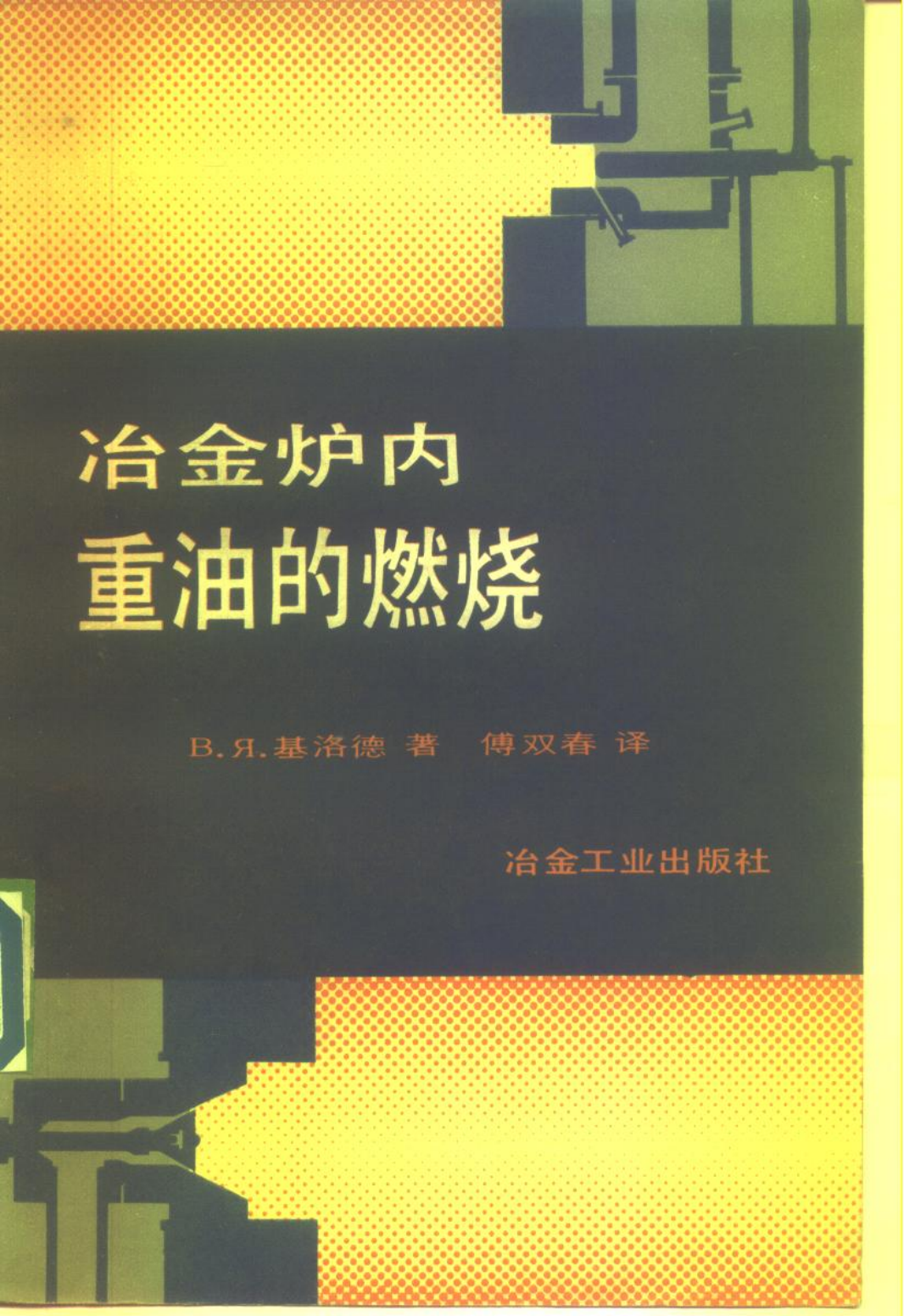




冶金炉内 重油的燃烧

В.Я.基洛德 著 傅双春 译

冶金工业出版社

冶金炉内重油的燃烧

В.Я.基洛德 著
傅 双 春 译

冶金工业出版社

冶金炉内重油的燃烧

В.И.基洛德 著

傅双春 译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 8 字数 207 千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷

印数 00,001~2,100 册

统一书号: 15062·3811 定价1.00元

译者的话

苏联基洛德 (В.Я.Гилод) 所著《冶金炉内重油的燃烧》(Сжигание мазута в металлургических печах) 一书是一九七三年出版的。该书系统地论述了液体燃料雾化、燃烧的新方法, 新的燃烧设备, 并介绍了现代冶金生产中的各种热工设备应用液体燃料的特点。

书中综合叙述了近年来苏联及其它国家燃油技术方面的新成就, 如重油的脉动燃烧、悬浮燃烧, 并对液体燃料的雾化、燃烧原理、燃烧设备的结构、计算方法及操作等做了系统的阐述。

该书可供从事工业炉研究、设计、操作人员及高等院校师生参考。

该书由东北工学院陈世海(五、六章)和张洪芝(一、二、三、四章)同志审校。

由于我们水平有限, 译文中的错误和不妥之处, 恳请读者批评指正。

目 录

第一章 液体燃料总论——燃料雾化的新方法	1
一、燃料重油的基本性质	1
二、蒸汽和空气雾化喷嘴的计算原则	4
三、工业炉喷嘴燃料雾化的质量要求	6
四、在声振动场中雾化燃料	7
1. 燃料的雾化机理	7
2. 声振动的气体动力学发生器	7
3. 声喷嘴火焰的分散特性	11
4. 声雾化燃料喷嘴的工业结构	13
五、利用机电转换器雾化燃料	17
六、在电场中雾化燃料	22
第二章 燃烧液体燃料的新方法	24
一、脉动燃烧	24
1. 定义	24
2. 脉动喷嘴的分类	25
3. 脉动喷嘴的工业结构	26
二、重油的乳化和悬浮燃烧	32
1. 水—重油乳化液	32
2. 煤—水—重油悬浮液	36
3. 蒸汽和空气—重油的乳化液	38
三、重油在泡沫层中的燃烧	41
四、液体燃料的脉冲燃烧	44
第三章 高强度燃烧重质液体燃料的燃烧设备	48
一、概述	48
二、炉用重油的燃烧特征	49
三、重质液体燃料油滴燃烧条件的分析	49
1. 着火前的过程	49
2. 燃料滴的燃烧	50

3. 气相中(蒸汽)自由碳的析出	51
4. 火焰中炭粒子的燃烧	55
四、强化重质液体燃料燃烧的技术措施	57
1. 全面强化燃烧过程的途径	57
2. 提高燃料的雾化质量	57
3. 燃料的多段燃烧	59
4. 高温气体的再循环	60
5. 混合的强化	63
6. 燃料的反向流股燃烧	65
7. 声和电场的作用	66
8. 强化燃烧过程的界限	67
五、液体燃料喷嘴的工业结构	68
1. 预先气化燃料的喷嘴	68
2. 具有相遇流股的燃烧室	73
3. 综合利用分开的和相对的空气流	75
4. 有机械稳焰器的喷嘴	79
5. 燃烧产物限制再循环的燃烧设备	83
6. 旋流式燃烧设备	89
7. 关于高强度燃烧的燃烧设备的选择	93
六、燃烧设备的构件计算	94
1. 燃烧产物限制再循环的燃烧设备用燃烧坑道(喷嘴砖)	94
2. 空气旋流器	104
第四章 煤气—重油烧嘴	113
一、实现燃料联合燃烧的困难	113
二、转为联合供热时烧嘴的改造	114
三、设计煤气—重油烧嘴的一般原则	118
1. 煤气入口部分	118
2. 重油供入部分	120
3. 空气的供给部分	121
4. 稳定火焰的方法	124
四、煤气—重油烧嘴的工业结构	126
五、贫煤气燃烧特征	133
第五章 现代冶金过程应用液体燃料的特征	135

一、冶炼用铁矿石的制备	135
1. 矿石的磁化焙烧	135
2. 球团	138
3. 矿石烧结	138
4. 球团烧结	140
5. 球团的预还原	142
二、炼焦	142
三、炼铁	143
1. 炼铁生产中焦炭的代用品	143
2. 使用液体燃料的热工和工艺原理	144
3. 喷吹液体燃料高炉的操作	147
4. 液体燃料的预先气化	151
5. 煤—重油混合物	155
6. 铸造化铁炉	158
7. 外燃式热风炉	160
四、铁矿石直接还原	162
五、炼钢	165
1. 平炉	165
2. 平炉中液体燃料的燃烧方法	166
3. 转炉	180
4. 电炉	182
5 其他炼铁设备	186
六、金属加热	188
1. 均热炉	188
2. 连续加热炉	191
3. 步进底式加热炉	193
4. 无氧化和少氧化加热炉	195
5. 快速加热炉	197
6. 室式锻造炉	199
七、热处理	200
1. 直接加热的热处理炉	200
2. 保护气体发生器	203
3. 辐射管式炉	204

八、某些辅助过程	208
1. 石灰石的焙烧	208
2. 钢水包的干燥和烘烤	212
3. 修理工作	212
第六章 燃烧设备的一些操作问题	214
一、重油喷嘴的点火和监视	214
1. 点火装置	214
2. 火焰的监视	216
二、化学不完全燃烧的检查	217
三、机械不完全燃烧的检查	220
四、预热空气喷嘴的工作特性	225
五、液体燃料质量的检查	228
附录一 某些国家动力设备和工业炉用液体燃料标准	232
附录二 各种粘度单位对照表	234
参考文献	236

第一章 液体燃料总论——燃料 雾化的新方法

一、燃料重油的基本性质

燃料重油是苏联工业炉应用最广泛的一种液体燃料。普通使用的重油性质，应符合1970年1月修改后的标准ГОСТ10585—63（表1），而平炉用的重油质量，应符合ГОСТ14298—69的要求（见第五章）。国外某些工业发达国家的液体燃料的标准性质列于附录1中。

苏联工业炉用的液体燃料，几乎都是使用石油多次加工后的产品。应该指出，重馏分约为加工石油数量的30%，其中相当大的部分为高粘度的热裂化残渣油。因此，燃料重油除去液态的碳氢组分外，还含有塑性和固态的物质，它们以细小分散的胶体状态，分布于燃料总体中。这些物质是含碳85~87%的高分子化合物（沥青、焦油、亚碳化物、炭青质），在加热过程中能够分解，生成残炭。

燃烧时，液体燃料生成残炭的趋势，用间接方法，即用结焦性来说明。结焦性为在无空气条件下，用标准方法（ГОСТ5987—51）将燃料试样灼烧后的残留碳化物值。国外结焦性也是用类似的方法确定的。此法称康拉德逊（Конрадсон）法。而试验结果所得出的残焦量（以重量百分数表示）称为康拉德逊系数。

燃料的残炭值对火焰亮度有一定的影响（见第五章）。由于平炉中辐射传热占主要地位，因此平炉适宜用重油。ГОСТ14298—69限制残炭值下限为8%。工业炉上使用最广泛的100号重油的实际残炭值，虽然不属于标准范围，但也达到了很高的数值，为12~19%〔4〕。同时在一系列冶金过程中的重油火焰内，存在有来源于液体燃料的不均匀质点，它们起着不良的作用，大大地延

长了燃烧过程（见第三章）。

应注意，如附录 1 所示，外国工业中一般使用较轻的液体燃料，其残焦较小。在比较苏联和其他国家的喷嘴工况时，必须考虑到这种情况。

苏联燃料重油的规定指标^①

表 1

指 标	重 油 标 号		
	40	100	200
动粘度，厘沲（°E），温度为80℃时	59 (8.0)	116(15.5)	—
100℃时	—	—	48~70
灰分，%，不高于	0.15	0.15	0.3
机械杂质含量，%，不高于	1.0	0.25	2.5
含水量，%，不高于	2.0	2.0	1.0
含硫量，%，不高于	0.5~3.5	0.5~3.5	0.5~3.5
闪点（在敞口坩锅中测定），℃，不高于	90	110	140
低发热值（换算为干燥燃料）， 百万焦耳/公斤	40.0~40.6	39.7~40.4	39.5~40.1
千卡/公斤	9550~9700	9500~9650	9450~9600
密度（20℃时），克/厘米 ³ ，不高于	—	1.015	—

① 无水解性酸和碱。

液体燃料的粘度是它的重要使用参数之一。在工程上动粘度 ν 的单位用米²/秒表示，也常用沲（1 沲=10⁻⁴米²/秒）或厘沲（1 厘沲=10⁻²沲=10⁻⁶米²/秒）计量 ν 值。但直到目前为止，另一个相对粘度单位得到了广泛使用，其数值完全是以测量的方法确定的。例如上面提到的苏联液体燃料的标号，是以相对粘度（°E）表示。与以前所用过的恩氏粘度值不同^②，以°E 表示的相对粘度值的确定方法为：在20℃下，试验用的200厘米³的石油产品由校正的标准粘度计孔中流出的时间与同样数量的蒸馏水流出的时间的比值。对于低粘度燃料，国外用万能的赛波尔特（Се-йболт）粘度计和雷德伍德（Редвуд）№1粘度计测得的秒数作为规定的粘度单位。对于高粘度燃料，国外用赛波尔特、富劳尔

② 按ГОСТ1085—63规定，重油的标号，等于50℃时燃料的粘度（°E）。

(Фурол)粘度计和雷德伍德No.2粘度计测得的秒数表示。相对和绝对粘度单位表列于附录2中。

实际上,液体燃料的粘度是它唯一重要的性质。在操作中利用粘度与燃料预热温度之间的关系来改变燃料的性质,有很重要的作用^[2]。在实践中找到了向热工设备输送液体燃料及在各种形式喷嘴中将其雾化所允许的最大粘度值。最低的和推荐的燃料预热温度列于表3中。当喷嘴前重油的表压力低于 100×10^3 牛/米² (1个大气压)时,对于蒸气雾化喷嘴和高、低压空气雾化喷嘴,一般不要把燃料加热到高于105~110°C,因为燃料中不可避免地存在着水蒸气,所以它有沸腾的危险。

液体燃料的水分,不单是它本身包含的水分,主要的还是运往工厂油库及贮存中增加的水分。ГОСТ10585—63对石油燃料中的水分限制为1~2%,只是对于40号和100号重油,在用水路运输或用蒸气直接加热卸油的情况下,允许含水量增加到5%。实际上,由于加热规程和贮存条件的破坏,可能远远超过上述数值。在重油的贮存中,水的自然沉淀达不到所需的程度,因为高粘度重油与水的密度差,甚至当燃料加热到60~80°C时,也是相当小的(不高于0.01~0.02克/厘米³)。很湿的燃料只有在预先制备为成分均匀的乳化液时,才能有效地使用(见第二章)。

含硫量是冶金用重油的重要特性。在一般应用的燃料中(ГОСТ10585—63),含硫量限制为0.5;2.0和3.5%(分别为低硫、

苏联燃料重油的粘度—温度特性

表 2

重油号	在下列温度下, °C, 最大动粘度, 厘沱 (°E)							
	40	50	60	70	80	90	100	110
40	563 (75)	299 (40)	150 (20)	89 (12)	59 (8.0)	34 (5.1)	27 (3.8)	19 (2.9)
100		750 (100)	343 (46)	187 (25)	120 (16)	68 (9.1)	44 (6.1)	30 (4.2)
200			675 (90)	321 (43)	180 (24)	112 (15)	70 (9.5)	44 (6.1)
МП, МПС		788 105	381 51	217 29	120 16	74 10	51 6.9	32 4.7

燃料重油预热温度

表 3

用 途	最 低 预 热 温 度, °C			
	重 油 号 数			
	40	100	200	МП, МПС
用于输送:				
螺旋泵和齿轮泵	30 (50)	40 (60)	50 (70)	45 (65)
活塞泵	40 (50)	50 (60)	60 (70)	55 (65)
用于喷嘴雾化:				
旋转蒸汽雾化	65 (85)	80 (100)	90 (105)	85 (105)
高压或低压空气雾化	75 (90)	90 (105)	100 (105)	90 (105)
机械雾化	85 (105)	100 (120)	110 (130)	105 (120)

注: 表中括号内值为推荐值。

含硫和高硫的40号和100号重油), 而平炉用重油 (ГОСТ14298—69) 限制为0.5 (МП牌号重油) 和1.5% (МПС牌号重油)。

各种牌号重油的元素组成区别不大。可燃成分的平均含量 (计算中为燃料的工作质): 83~86% C; 10~11% H; 0.5~3.0% S。此外在燃料中还含有0.3~0.7% (O+N); (0.1~0.3)% 的不燃矿物质——灰分 (A) 和水分 (W)。低含水量重油的低发热值波动于 $(38\sim40) \times 10^6$ 焦/公斤 (9100~9600 千卡/公斤) 之间。当空气过剩系数 $\alpha = 1.0\sim1.6$ 时, 对于具有一般元素成分的重油, 燃烧计算用的热工特性列于表4中。

二、蒸汽和空气雾化喷嘴的计算原则

在以重油为燃料的冶金炉上, 装有用蒸汽或高、低压空气雾化燃料的喷嘴。

当设计液体燃料的雾化部件时, 要计算重油、雾化介质和燃烧用空气的出口截面尺寸。所用的各种计算公式列于表5中。

列于表5中的重油喷出口截面积计算公式, 是在下列条件下推导的; 重油的密度等于9600公斤/米³, 而燃料由孔中流出的流量系数 $\mu = 0.3$ 。在蒸汽和空气的计算公式中 μ 值取0.8。按公式

重油的热工特性

表 4

指 标	空 气 过 剩 系 数						
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
低 硫 重 油 ^①							
标准状态下1公斤重油的单位空气消耗量, 米 ³	10.3	11.3	12.3	13.4	14.4	15.4	16.5
标准状态下1公斤重油的单位燃烧产物数量, 米 ³	11.1	12.1	13.2	14.2	15.2	16.3	17.3
燃烧产物成分, %: CO ₂	14.5	13.2	12.2	11.3	10.5	9.8	9.2
H ₂ O	12.1	11.2	10.4	9.8	9.3	8.7	8.3
O ₂	0	1.8	3.3	4.6	5.6	6.6	7.5
高 硫 重 油 ^②							
标准状态下1公斤重油的单位空气消耗量, 米 ³	10.2	11.2	12.2	13.2	14.2	15.2	16.2
标准状态下1公斤重油的单位燃烧产物数量, 米 ³	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.1	17.1
燃烧产物成分, %: CO ₂	14.5	13.2	12.2	11.3	10.5	9.8	9.2
H ₂ O	12.1	11.2	10.4	9.8	9.2	8.7	8.3
O ₂	0	1.8	3.3	4.6	5.7	6.6	7.5

① $Q_{\text{低}} = 38.9 \times 10^6$ 焦 (9300 千卡/公斤)。成分, %: C=85.3; H=10.2; S=0.5; O+N=0.7; W=3.0; A=0.3。

② $Q_{\text{低}} = 38.4 \times 10^6$ 焦 (9170 千卡/公斤)。成分, %: C=83.4; H=10.0; S=2.9; O+N=0.4; W=3.0; A=0.3。

将计算出最小(临界)截面尺寸, 因此, 不能用它计算端头带有拉瓦尔管的喷嘴出口截面。

当燃烧室或炉膛中存在着很大的反压力 p_T 时, 在公式中必须用压差 $p - p_T$ 代替开始压力 p 。

为避免堵塞和结焦, 重油喷头的出口截面直径不应小于 3 毫米(即使按计算所得数值小于此值时)。

根据燃料消耗量的不同, 推荐采用如下的重油导管直径^[6]:

重油消耗量, 公斤/时	低于30	30~200
推荐直径, 毫米	8~10	10~15

计算蒸汽和空气导管时, 推荐采用下列介质流速: 饱和蒸汽 20~30 米/秒, 过热蒸汽 30~60 米/秒, 压缩空气 15~20 米/秒, 鼓风空气 10~15 米/秒。计算喷嘴外壳尺寸时, 允许将上列数值增

重油喷嘴出口截面积计算公式

表 5

介 质	喷嘴前各种介质压力为下列各单位时的出口截面积, 毫米 ²		
	牛/米 ²	大气压	毫米水柱
重 油	$21.5 \frac{M}{\sqrt{p_n}}$	$0.07 \frac{M}{\sqrt{p_n}}$	—
水蒸气:			
饱 和	$555 \frac{M}{\sqrt{\frac{p_a}{v}}}$	$1.75 \frac{M}{\sqrt{\frac{p_a}{v}}}$	—
过 热	$510 \frac{M}{\sqrt{p_a \rho}}$	$1.63 \frac{M}{\sqrt{p_a \rho}}$	—
压缩空气	$510 \frac{M}{\sqrt{p_a \rho}}$	$1.63 \frac{M}{\sqrt{p_a \rho}}$	—
鼓风空气	$246 \frac{Q}{\sqrt{\frac{p_n}{\rho}}}$	—	$78 \frac{Q}{\sqrt{\frac{p_n}{\rho}}}$

注: 式中采用的代号: M —介质的重量耗量, 公斤/时; Q —实际的空气体积消耗量, 米³/时; p_a 和 p_n —喷嘴前介质的绝对压力和相对压力; ρ 和 v —喷嘴前特定条件下(温度和压力)介质的密度(公斤/米³)和单位体积(米³/公斤)。

加20~30%。

三、工业炉喷嘴燃料雾化的质量要求

与理论推测(表6)相反, 实践资料证明, 用压缩空气(蒸汽)喷嘴雾化液体燃料, 雾滴很粗。

燃料雾化质量

表 6

喷 嘴 形 式	雾滴平均直径, 微米	
	计算值 ^[5]	实际值 ^[7]
空气雾化		
高压	4~5 ^①	达200
低压	80 ^②	500或更高

① 空气计算压力: 0.3×10^6 牛/米² (3个大气压)。

② 5×10^3 牛/米² (500毫米水柱)。

在机械喷嘴中,当燃料压力为 $(1\sim 2)\times 10^6$ 牛/米² (10~20 大气压) 时,雾滴的平均直径在较好的情况下是 270~370 微米^[8],一般要大一些。用现有结构的喷嘴所获得的雾化燃料火焰的分散特性,远远不能适应新型工业炉对燃烧质量所提出的不断增长的要求。为了改善雾化过程,不得不提出新的雾化方法。新雾化方法的简要特性在本章中将进一步说明。

四、在声振动场中雾化燃料

1. 燃料的雾化机理

关于燃料在高频声(有时称超声)振动的作用下的雾化机理问题,目前是有争论的。一些研究人员^[9]这样解释这个效应,即在振动的液体表面上产生了超声波,由振动振幅所构成的波峰从表面以液滴形式分离出来。分散特性与振动频率间的关系可证明这种假设:随着频率的增加(其它条件相同),燃料雾滴的尺寸减小^[10]。超声波频率的振动,可以获得直径为几微米级的燃料雾滴。另一些研究人员^[11]指出了在声雾化过程中,空化起着决定性作用。在燃料薄层中,周期(在抽空的半周期)产生并由液体的蒸汽填充的小空腔形成空化。在压缩的半周期内,这些气泡的破坏,是形成破坏燃料表面稳定性的强烈冲击波的原因。当没有空化作用时,即使是在足够大的声能下,燃料的雾化也是进行不了的。可见,在声振动场的作用下,有两个燃料雾化的因素是有意义的:即毛细波的产生和空化作用。

大家知道,在普通结构的喷嘴中,当燃料薄层分解时,在射流中产生各种长度的不稳定波^[12],由它引起生成的雾滴有很广泛的尺寸范围。声喷嘴工作原则的特征是,所发生的振动具有完全一定的频率和振幅。因此,分散的雾滴组成是很均匀的。

2. 声振动的气体动力学发生器

以射流为声能源的空气动力装置,是简单和经济的声振动发生器(发射器)。在各种气体动力设备中,喷嘴系统是最有前途的。比如它不同于旋笛、它没有制造和使用特别是在高温下复

杂的旋转零件。

在广泛使用的格尔特曼 (Гартман) 系统的气流发生器中, 体积不大的共振腔 2 的振动, 是声场的能源 (图 1)。这一振动是由经共振腔对面的喷嘴 1 压入的气流所产生的。如果喷嘴 1 出口的气流速度是超声速的 (即超过了声在这个气体中的传播速

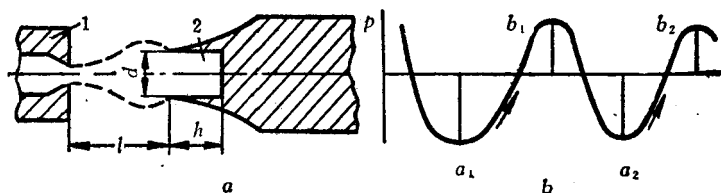


图 1 格尔特曼气体射流发生器结构 (a) 及压力变化曲线 (b)

度), 则在喷嘴后的气流中就会出现不稳定的压力区域。用测压管测量气流各截面上的压力变化, 其结果表示于图 16 的曲线中。按普朗特 (Прант) 理论, 周期性压力分布的条件是, 气流的运动速度超过声在形成该气流的气体中的传播速度。压力增加的区段 ($a_1 b_1$ 、 $a_2 b_2$) 是不稳定的。当在其中一个区段内 (一般在开始处) 放置一个共振用的空腔时, 空腔内产生了振动, 其频率等于共振器本身的振动频率。这些振动是各种张弛振动, 在振动过程中, 在剩余压力作用下空气周期地进入共振器, 然后排出。气体射流发生器的振动频率由共振器尺寸确定, 见式 1:

$$f = C / [4(h + 0.3d)] \quad (1)$$

式中 f —— 频率, 千赫兹;

C —— 通过喷嘴的气体中的声速, 米/秒;

h, d —— 共振腔的几何尺寸, 毫米 (见图 1)。

空气流出时, 能够产生频率达 120 千赫兹的振动。在高频率下共振器的尺寸是很小的。例如, 一般取 $h = d$, 得: 当 $h = 2$ 毫米, $f = 31.5 \times 10^3$ 赫兹; 而当 $h = 1$ 毫米, $f = 63 \times 10^3$ 赫兹。为了获得超声速的空气流, 气体在喷嘴前的相对压力应高于临界值, 即

0.09×10^6 牛/米² (0.9 大气压)。而实际上是以 $(0.2 \sim 0.4) \times 10^6$ 牛/米² ($2 \sim 4$ 大气压) 工作。

格尔特曼气体射流发生器可以得到相当大的发射振动功率，其功率 (瓦特) 可接近似公式 2 计算：

$$N = 3d^2 \sqrt{10.2p - 0.9} \quad (2)$$

或者

$$N = 3d^2 \sqrt{p - 0.9} \quad (2a)$$

式中 p ——气体在喷嘴前的相对压力 (在式 2 中单位为 10^6 牛/米²，式 2a 中单位为大气压)。

当频率为 20×10^3 赫兹时，发射功率可达 50 瓦，但气体射流发生器平均效率总共只有 5%。

格尔特曼发生器除效率低外，其原始结构在使用上还很不方便，气体压力有微小变化，或喷嘴与共振器间的距离 (L) 有微小变化，对发生器的工作参数都有影响。此缺点由于改进了发生器 (棒形哨) 而克服了。与原始结构不同的是：沿射流轴线方向有一个圆柱形棒 (此棒一般用来固定共振器)。使用棒就有可能在很广的 L 数值范围内达到稳定的发生振动。棒形哨在低的气体压力下是有效的。这因为在气体接近声速下流出时，棒形哨可以发射高频率的振动。按格尔特曼资料，棒形哨的功率正比于 $\sqrt{P - 0.3}$ ，而不是像原始的发生器那样，正比于 $\sqrt{P - 0.9}$ 。

棒式发生器的优点，使它在最近一些年中，在气体射流振动发生器中占据了主要位置，其中也包括用于雾化液体燃料的。但是棒形哨的计算方法直到目前还没有。棒式气体射流发生器的几何尺寸和操作参数的合理化，还需要进行许多认真的实验工作。

苏联科学研究院及热工设计院曾对棒式发生器 (图 2) 进行过研究，此种发生器的特点是在共振腔入口前使空气旋转 180° 。发生器包括：由棒 2 和喷头 4 组成的环形喷嘴 1，共振腔 5 (它是在棒的根部制成的沟槽)。声振动的能源——压缩空气在棒 2 内部通过，经斜孔 3 进入喷嘴 1，然后改变方向——入共振腔 5。此种构造由于高速空气流的强烈冷却作用，可以改善喷头的工作