

76.121
1.34

连续加热炉

H. Ю. 泰茨 等著
何水 译

冶金工业出版社

Н. Ю. Тайц, Ю. И. Розенберг
МЕТОДИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ
Металлургиздат Харьков—1956
連續加熱爐 何水 譯

冶金工业出版社出版 (北京市市口甲45號)
北京市書刊出版業營業許可證出字第093號
中央民族印刷厂印刷 新华書店发行

1959年8月 第一版
1959年8月 北京第一次印刷
印数3,510册

開本350·1168·1/32·203,000字·印量7 $\frac{28}{32}$

統一書号 15062·1161 定价 1.00 元

序

軋鋼和鍛造車間的高產量和經濟的操作，在很大程度上決定于加熱爐的狀況和它的操作。在各種加熱爐當中，最為通用的是連續加熱爐。

上世紀末和本世紀初所建造的連續加熱爐的舊式結構，在五年計劃的年代里獲得了很大的改進；此外，還建造了大量的新型爐子。連續加熱爐的結構會向着這樣的方向發展，即：強化加熱過程和縮短加熱時間，提高爐子生產率和增大它的热能力，改用低發熱值的煤氣，以及加強爐子的機械化和自動化。

在連續加熱爐舊有結構的改進和新型結構的創建中起主導作用的，是蘇聯黑色冶金部的各設計機構。在這一事業中，工廠人員也有很大的創造和發明，他們不僅局部地改進了原有的連續加熱爐，而且發揮自己的創造性並與學者們協作，進行了一些爐子的全部改建工作（如彼得羅夫斯基工廠、捷爾任斯基工廠，卡爾·里布克涅黑特工廠等）。

連續加熱爐同所有其它的加熱裝置一樣，是一種進行燃料燃燒、熱交換、金屬加熱和它種熱工過程的設備。與此同時，它作為一種熱交換裝置，還有着自己獨有的不同於它種加熱爐的特點。因此，本書詳細討論連續加熱爐內熱交換、金屬加熱以及獲得理想溫度制度與熱制度的專門問題。

在闡明理論之後，依照爐子的歷史發展敘述它的結構沿革：從最古老的爐子開始，一直到燒高爐煤氣的最新型爐子，都系統地作了說明。

由於近年來工廠里對廢氣余熱利用問題給予很大的注意，所以書中詳細分析了預熱器的結構並提出它的計算。

在技術科學副博士 А. Ф. 克拉夫佐夫 (Кравцов) 所寫第九章『連續加熱爐操作的控制與自動化』中，提出了控制與自動裝置系統。

目 录

序.....	5
第一章 連續加热爐的一般性能.....	1
第二章 燃料燃燒与燃燒裝置的結構.....	6
1. 燃料的特性.....	6
2. 固体燃料的燃燒.....	8
3. 液体燃料的燃燒.....	11
4. 气体燃料的燃燒.....	15
第三章 鋼的加热工艺.....	20
1. 被热鋼料的特性.....	20
2. 鋼的物理性質.....	21
3. 加热原理.....	23
4. 碳素鋼与合金鋼的加热制度.....	33
5. 鋼的氧化.....	37
6. 过热与过燒.....	39
第四章 連續加热爐的热交换和生产率.....	41
1. 导热輻射系数.....	41
2. 平均溫度头.....	48
3. 两段式連續加热爐的溫度制度和热制度.....	50
4. 三段式連續加热爐的溫度制度和热制度.....	61
5. 連續加热爐的生产率.....	63
第五章 热平衡与燃料消耗.....	67
1. 爐子总的热平衡.....	67
2. 区段热平衡.....	83
3. 燃料消耗的表征指标.....	85
第六章 連續加热爐的結構.....	92
1. 連續加热爐的旧式結構及其演进.....	92
2. 蓄热式連續加热爐.....	96
3. 现代連續加热爐.....	99
4. 連續加热爐的爐膛.....	110
第七章 連續加热爐的各种构件和輔助設備.....	112

1. 爐子砌体与骨架	112
2. 水冷爐底滑管	115
3. 爐子附件	119
4. 烟道与烟肉	123
5. 送风机与烟泵	124
6. 推鋼机与出鋼机	124
第八章 废气余热的利用	126
1. 概論	126
2. 空气与煤气的預热	126
3. 預热器的結構	129
4. 預热器計算	142
5. 余热鍋爐	157
第九章 連續加热爐操作的控制与自动化	158
1. 概述	158
2. 連續加热爐操作的热工控制与自动調整系統	162
第十章 連續加热爐的操作	173
第十一章 連續加热爐的計算	179
1. 两段式連續加热爐計算举例	179
2. 三段式連續加热爐內金屬加热計算	218
附录	224
参考文献	243

第一章 連續加熱爐的一般性能

在軋鋼與鍛造生產中廣泛用來加熱金屬的，有一種連續加熱爐，它是數量眾多、結構多種多樣的某一類加熱爐。

連續加熱爐的特徵是：

1. 爐膛拉成長形；
2. 爐氣沿爐長方向流動，其溫度沿流動方向逐漸降低；
3. 金屬裝入爐子較冷的部份，並遇着氣流逐漸移往較熱的部份；
4. 熱制度和溫度制度在任何時候都恒定不變。

這樣一來，連續加熱爐的裝入鋼錠和鋼坯，雖然是隔或長或短的間隔時間來進行，但它在作業原理上仍然屬於非間斷性的爐子。

連續加熱爐主要特點之一，就是爐氣同金屬的逆向流動。然而，爐子也可能是爐氣與金屬同向流動的，對於這種爐子，連續加熱爐所有其餘的特徵仍保持不變。

連續加熱爐示意圖見圖1。被熱金屬1在推鋼機2的推動下

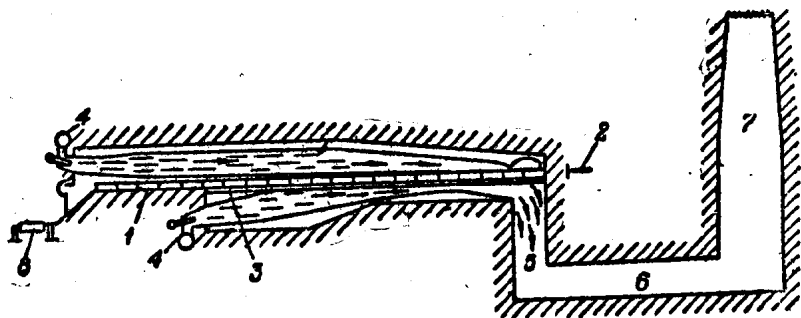


圖 1- 連續加熱爐示意圖

沿水冷滑管3移動。燃料在金屬上下兩面所設的燒咀4內燃燒。

燃烧生成物分上下两股气流在爐膛內与金屬沿相反方向流动。它經過豎烟道 5 排入烟道 6 內，由烟道經烟囱 7 排入大气內。被热金屬經出料口落到輓道 8 上，然后經輓道送往軋鋼机。

連續加热爐可按下列标志来分类：

1. 按热制度、溫度制度和爐膛形状来划分：a) 两段式；
6) 三段式。
2. 按有无下加热来划分：a) 实爐底的；6) 孔道爐底的；
B) 两面加热的。
3. 按被热金屬品种来划分：a) 加热方形或矩形截面的鋼錠和鋼坯用的；6) 加热板錠和板坯用的；B) 加热薄板坯用的；
r) 加热圓錠和圓坯用的；д) 加热特形鋼坯（例如輪坯）用的。
- 加热圓錠和圓坯用的爐底傾斜的爐子，叫做輓式爐，所有其余的都叫做推送式爐。
4. 按所烧燃料的种类来划分：a) 使用固体燃料的；6) 使用液体燃料的；B) 使用气体燃料的；r) 使用粉状燃料的；д) 复合式发热的。
5. 按空气和煤气預热裝置的型式来划分：a) 預热式的；
6) 蓄热式的；B) 空气与煤气不預热的。
6. 按爐內坯料的列数来划分：a) 单列爐料的；6) 双列爐料的。
7. 按出料方式来划分：a) 側出料的；6) 端出料的。

其实还可以按照較次要的标志来繼續进行不同的分类，例如，按燃料燃烧裝置的結構与配置、爐頂与爐底形状等来划分。

分类的基本标志應該是爐子的热制度和溫度制度，它决定着爐膛形状，燃料燃烧裝置的型式与配置以及一些其它的結構部件。

两段式連續加热爐（图 2）的爐膛分为两个区段：高溫段（或加热段）和預热段。这种爐子溫度制度的特征是，加热段长度上爐气溫度大致保持不变，預热段长度上爐气溫度逐漸下降^①。

① 爐子溫度制度与热制度以及爐子各区段的用途，在第四章中有詳細的分析。

三段式爐子(图3)除了預热段和加热段以外, 还有均热段。三段式爐与两段式爐不同, 它的加热段內具有較高的爐气温度,

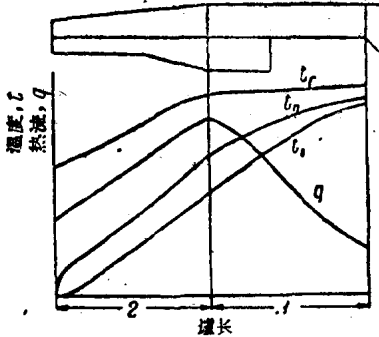


图2 两段式連續加热爐的溫度制度与热制度(t_r , t_n 和 t_g 爐气温度, 鋼錠表面与中心温度)

1—加热段; 2—預热段

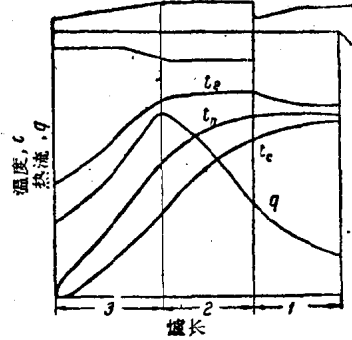


图3 三段式連續加热爐的溫度制度与热制度(代号如图2所述)

1—均热段; 2—加热段;

3—預热段

由于这一緣故, 金屬由这一区段出来时, 其截面上就有很大的溫度差。均溫(溫度差的縮小)在均热段內进行。

最古老的一种連續加热爐是实底式爐(图4, a)。这种爐內的传热表面仅仅是鋼錠的上表面, 結果, 其加热条件就最不能令人滿意。

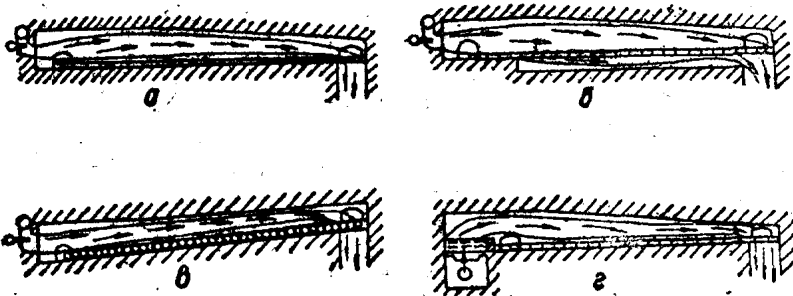


图4 不同类型連續加热爐示意图

a—实底爐; b—孔道底式爐; c—輥式爐; r—使用固体燃料的爐子

现时，实底爐主要用来加热圓坯、薄板坯，有时也用来加热厚达100—120公厘矩形截面的薄錠和薄坯。

由于想要增大加热表面和改善向金屬的传热条件，就促使建造孔道底式爐（图4,6），在这种爐内，金屬沿离爐底有一定高度的管上移动。这种爐子只在上部燃烧燃料；然而有一部份燃烧生成物进入水冷滑管与爐底間的孔道，也能从下面来加热鋼錠。

如試驗研究所指出，孔道式爐底不能保証金屬从下面受到强化的加热，而在有些情况下，冷却水所带走的热量却超过了下部的供热，由于这样，这种爐子所具有的不是下加热，却是「下冷却」。基于所述原因，孔道底式爐在现时不建造了，工厂里已建的这种结构的古老爐子也改建为双面加热的了。

双面加热爐（见图1）最为通用，其特点是爐膛的下部同上部一样，都能单独供热，这样一来，金屬的两面获得几乎等量的热。金屬在这种爐内的加热接近于对称的双面加热。

連續加热爐内所加热金屬的品种极为多种多样。其中包括鋼錠，初軋坯以及方、圓和长方截面的鋼坯。

鋼錠和鋼坯在推鋼机的推动下，沿水冷滑管或爐底移动。有时，鋼錠为了較均匀的加热，在出爐前被翻开或翻轉 $90\sim 180^\circ$ 。

有一类特殊结构的爐子，它用于加热小截面（厚60~100公厘）細长（长8~12公尺）的方鋼坯。为了避免鋼坯在推动时的拱起现象，这种爐子的爐底向出料口方向傾斜。

軋鋼板用的板錠和板坯在与方坯同样的爐内加热。板坯加热用連續加热爐的特点，是由爐端出料。

薄板坯在專門的連續加热爐内加热，这种爐子叫薄板加热爐。它与普通的連續加热爐所不同的地方，是爐膛内气体温度較低和爐底机械化（輸送带式，步进梁式，等等）。

圓坯在所謂的軋式爐内加热。这种爐子（图4,Б）的特点，是实爐底具有向出料方向的傾斜。鋼坯在爐内的位移，靠由側面爐内翻动来实现。

近一时期来，圓坯的加热，采用环形爐，这种爐内被热金屬不

动地放在繞自軸旋轉的爐底上。

連續加熱爐可以使用固体、液体、气体和粉状燃料，也能燃燒这几种燃料的混合物。

現時，应用最广的是煤气連續加熱爐。爐子在燒气体和液体燃料时，結構上几乎没有什么改变。在燒固体燃料时，其結構的特点是爐膛的一部份用作燃燒室（图4，r）。在这种爐內較难于进行金屬的两面加熱，因为这样就必須配置补充的燃燒裝置。

現代的連續加熱爐裝配有專門的空氣（有时也有煤气的）預熱裝置——預熱器。也有少数的連續加熱爐，其空氣与煤气在蓄熱室內加熱。旧式爐子在許多情形下沒有空氣与煤气預熱裝置，然而現時工厂里大力地采用預熱器。

为了更好地利用車間面积，有些連續加熱爐內的爐料分为两列。当爐子生产率很小和加熱的鋼坯长度超过3~4公尺时，爐料就只有一列。

爐子的出料方式决定于爐子同軋机相对位置的条件。端出料（见图1之3）在結構上較為簡便，因为它不需要出鋼机。然而它也具有极大的缺点，这就是大量的空氣經位置低下的出料口吸入爐內，結果使金屬在出爐前被吹冷并增加了它的氧化。

不同用途的連續加熱爐的結構在第六章內有較詳細的說明。

第二章 燃料燃烧与燃烧装置的结构

1. 燃料的特性

在連續加热爐內可燃烧固体、液体和气体燃料，在較少情形下也燃烧粉状燃料。

各种不同的固体燃料中，最通用于連續加热爐的有Г、ПЖ和П号烟煤；在較少情形下也燃烧瘠煤和无烟煤。标号一定的固体燃料，其质量决定于燃料的工业成份、粒度规格（块度）和发热值，必要时还决定于工作燃料的成份。燃料的燃烧过程在很大程度上也决定于它的結块性^①。

固体燃料有热不稳定性，也就是說在不加入空气的情形下将它加热时会发生分解过程，析出揮发份并形成固体渣——焦。因此燃料燃烧的过程不仅在爐篦上进行，而且在燃烧空間内进行，同时这两种情况的比例决定于揮发份的析出量。

連續加热爐所采用的液体燃料有重油，有时也采用焦油。重油的质量决定于它的标号、物理性質（粘度、比重、凝固点等）发热值、湿度，对某几种重油來說，它还决定于含硫量，在个别情形下它决定于工作燃料的成份。几种最通用重油的特性见表1。

表 1

标 号	比 重 公斤/标公尺 ³	Or	HR	Or + Nr	Sr	Q _н 仟卡/公斤
10、20、40和80 号重油.....	0.910~0.950	85.5~87.6	12.5~10.7	0.6~1.0	0.4~0.7	9750~9530
含硫重油.....	0.925~0.975	85.0	11.8	0.9	2.3	9520

① 結块性——乃散状煤在不加空气的情形下加热到一定温度时燒結成块，並生成气孔性固体（焦）的能力。

在各种不同的气体燃料中，連續加热爐最常用的是发热值 2000~2500 仟卡/标公尺³ 的焦爐高爐混合煤气和焦爐煤气，較少采用的有高爐煤气、发生爐煤气和天然气。现代連續加热爐的设计中通常采用低发热值 (1350~1400 仟卡/标公尺³) 的混合煤气。

表 2 載有各种不同人工气体燃料的成份与发热值。

表 2

煤 气 名 称	干燥煤气的成份 (以体积%計)								Q _H (仟卡/标公尺 ³)
	CO ₂	O ₂	CO	CH ₄	$\frac{C_m}{H_m}$	H ₂	H ₂ S	N ₂	
高爐煤气.....	10.3	0.1	29.5	0.3	—	1.6	—	53.2	957
焦爐煤气.....	2.3	0.8	6.5	22.8	2.7	57.0	0.4	7.5	4140
空气发生爐煤气.....	0.6	—	33.4	0.5	—	0.9	0.4	64.2	1100
用焦炭发生的水煤气	6.5	0.2	37.0	0.5	—	50.0	0.3	5.5	2460
混合发生爐煤气:									
a) 用无烟煤发生的	5.5	0.2	27.5	0.5	—	13.5	0.2	52.6	1230
b) 用瓦斯煤发生的	5.0	0.2	26.5	2.3	0.3	13.5	0.3	51.9	1400
b) 用褐煤发生的...	6.5	0.2	25.0	2.2	0.4	14.0	1.2	50.5	1410
r) 用泥煤发生的...	8.5	0.2	27.5	2.5	0.4	15.0	0.1	45.8	1490
x) 用木屑发生的...	6.5	0.2	29.0	3.0	0.4	14.0	—	46.9	1550

气体燃料的质量主要是决定于它的发热值，机械杂质染脏的程度和湿度。虽然天然气在现时有着較广泛的应用 (例如，斯大林格勒工厂，塔干罗格工厂等)，但可惜它在連續加热爐方面还用得很少。

发生爐煤气可以在净化状态下燃烧，或者以未净化热煤气的状态燃烧。

从燃烧各件的观点出发来评价各种不同种类的燃料时，必須注意下述情况。

固体燃料在它的成份、性質和燃烧方式上都是最复杂的。气体燃料在成份上最为簡單，同时它在燃烧方式上是一种最完美的燃料。

液体燃料需占有中間面积。最后，粉状固体燃料具有这样的性質，它易于燃烧并在质量上接近于液体或气体燃料。

2. 固体燃料的燃烧

固体燃料在燃烧室（图 5）内燃烧，这种燃烧室的主要部件是爐篦 1，爐篦的作用是保持热的燃料层和使空气得以通过。爐篦将燃烧室分为两部份：在爐篦下方的一部份叫做灰坑 5，在爐篦上方的另一部份叫做燃烧空間 2。燃烧室的其余部份如图所示。

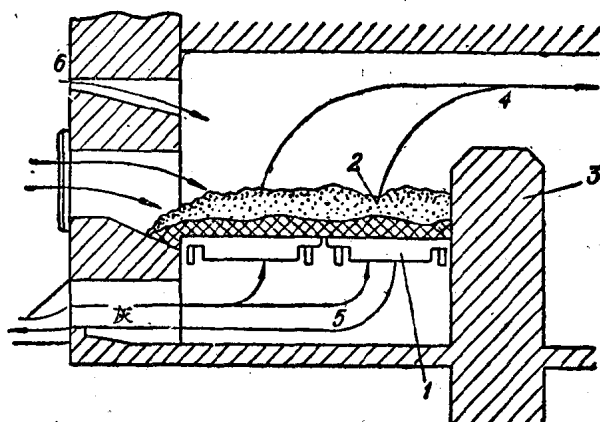


图 5 水平爐篦的燃烧室

1—爐篦；2—燃烧空間；3—火坎；4—火口；5—灰坑；6—二次空气入口

前面已指出，燃料的热不稳定性影响到燃烧过程的性质。燃料加热到 $175 \sim 400^\circ$ 时所开始析出的挥发份使得部份燃料的燃烧迁延到燃烧空間内去进行。燃料的另一部份遺留在爐篦上，呈层状燃烧。

燃烧室可按燃料燃烧方式划分为简单燃烧室与半煤气燃烧室。在简单燃烧室内进行着燃料的完全燃烧。因此，完全燃烧时燃料层的厚度应该是不大的。在半煤气燃烧室内，燃料燃烧过程中生成半发生爐煤气，这种煤气的进一步烧完是在爐膛内实现。这种燃料燃烧方式的主要目的是，在加热工艺条件所要求的那一部份爐膛内全燃半发生爐煤气以提高温度，半发生爐煤气大致有

如下的成份： CO_2 10~14%； CO 12~18%； H_2 8~10%； $Q_H = 700 \sim 900$ 仟卡/标公尺³。

为了形成燃料按半发生爐方式的燃烧过程，必須具有如下的条件：燃料层有足够的厚度，供送半煤气燃烧用的补充空气（二次空气），同时供应相当数量的一次空气。如工厂实践数据所指出，一次与二次空气量的比例约为 65 : 35%^①。

为了保证半煤气的正确与完全燃烧，二次空气应在火坎之后，均匀地沿爐膛全宽經許多孔引入，这些孔同煤气流动方向构成 25~40° 的角度，引入速度为 15~20 公尺/秒。若需在十分大的爐膛长度上提高温度，則补充空气应在爐长上的若干处引入。

燃料的半煤气燃烧法具有下列优点：

- a) 依靠半发生爐煤气的燃烧，提高了爐膛内的温度；
- b) 燃烧过程中总的空气过剩系数較低；
- b) 可能采用預热的二次空气；
- r) 过程的进行較为均匀：人工操作燃烧室所引起的波动，在半煤气燃烧时对爐子温度制度的影响較小。

在爐子技术中，篦条式燃烧室的結構只有有限的几种。

燃烧室按操作方式分为人工的和机械的。人工燃烧室的操作特征，是周期性加入燃料、透爐、清渣和其它操作所引起过程的不均衡性。加热爐采用的人工燃烧室有三种結構：a) 带有普通篦条构成的水平爐篦的；b) 带有板状篦栅构成的水平爐篦的；b) 带有梯級爐篦的。

第一种形式的燃烧室具有普通鑄鉄篦条构成的水平或稍微傾斜的爐篦。板状篦栅的空隙面积不大，它是用来燃烧含挥发份很少的燃料——貧煤和无烟煤。空隙面积小就增大了空气通过的速度，这样一来就使燃料燃烧过程远离爐篦表面，保护爐篦免于过热。为了更好地保护爐篦使它免受高温影响，燃料的燃烧是在灰渣垫层上进行；为了同一目的，也采用蒸汽鼓风。

梯級式爐篦是由傾斜放置的鑄鉄爐篦构成（图 6）。有时它也

① 这一比值决定于燃料燃烧过程中挥发份的析出量（譯者）。

叫作半自动化爐篦,这是因为抛入的燃料逐渐沿爐篦向下移动,因此在这里进行着燃料的分段燃烧过程:开始在最上部分进行燃料

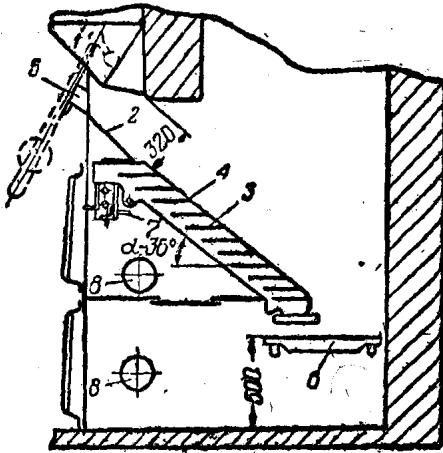


图 6 梯級爐篦燃烧室

1—漏斗; 2—不动的加煤板; 3—爐篦; 4—斜梁; 5—透爐用小門; 6—移燒出渣的水平爐篦; 7—改变爐篦傾斜度用的附件; 8—分布的空气入口

的烘烤, 然后是揮发份的析出, 此后就是燃烧, 最后是燃料的进一步烧完全并在最底层烧成残渣。梯級式爐篦具有很大的空隙面积, 然而此阶梯与水平面成一定的角度, 这样就使細粒燃料不会漏落到灰坑里。它实用于燃烧揮发份很高的烟煤、細粒煤和粘結性不强的燃料。

看管篦条式燃烧室的主要操作归結为投煤、透爐和除渣。机械化燃烧室的局部(仅是加煤或除渣)

或全部操作是机械化的。

加热爐所采用的有下加煤、螺旋送煤或活塞送煤的机械化燃烧室。

在篦条式燃烧室結構的发展和改进方面, 爐子技术要大大落后于鍋爐技术。这可能是因为爐子技术是沿采用气体燃料的道路发展的原故。因此, 在已知的程度上使爐用燃烧室机械化的問題就失掉了它的迫切性。

通用的燃烧室操作指标, 是以重量表示的爐篦工作强度, 它代表每平方公尺爐篦面积每小时所燃烧的燃料量(公斤), 这个指标或者是爐篦的热应力(千卡/公尺².时)。后者决定于所烧燃烧的种类、燃烧室結構和燃烧室的强化程度。这样, 揮发份的析出量越大和燃料所含水分越多, 則(在其它条件均相同时)可允許的爐篦工作强度就越高; 若灰分越多和灰渣熔点越低, 則爐篦工作

强度应该越小。随着风压的提高，爐篦工作强度可以增大。

表 3 載有各种不同燃料的爐篦热应力数据。

表 3

燃 烧 室 型 式	燃 料 种 类	热 应 力 10 ³ 千卡/公尺 ² .时
水平或傾斜爐篦的，无鼓风	木柴和泥煤.....	500~700
	褐煤.....	150~300
	长焰烟煤.....	300~500
	无烟煤.....	400~600
同上，但有鼓风 (60~100 公厘水柱)	未篩分的无烟煤.....	800
	篩分的无烟煤.....	1000
	烟煤.....	900
	褐煤25%.....	900
	褐煤25%.....	800
	泥煤，木柴.....	1100
竖井式		
翻动傾斜式	齐梁宾斯克煤.....	900
	莫斯科近郊煤.....	750
	AC 号无烟煤.....	1200
	烟煤.....	1300
鏈式	褐煤.....	1000
	泥煤.....	2000
	木屑.....	1100

3. 液体燃料的燃烧

液体燃料具有比固体燃料更高的发热值且几乎不含灰分，此外，它便于輸送。液体燃料燃烧装置的结构简单，并具有便于調整、开动和停止的特点。

液体燃料最常用預先霧化法呈火焰燃烧，同时燃烧过程按下述次序分段落进行：霧化、汽化、热解、同空气混合、着火和燃烧。然而这些段落既非在時間上也非在空間上可以划分开来。在霧化时，产生很大的面积，这就促使燃料同空气混合，并使它能最完全的燃烧。

液体燃料的燃烧系采用噴咀进行，噴咀的主要作用是使燃料霧化和使它同空气混合。噴咀的采用应保証：很好的霧化（霧点小且均匀），同空气混合好，火焰有一定的长度和形状，所烧燃料量易于調整并保持燃烧过程的正确性，操作的經濟性等等。此外，噴咀应该是结构简单、操作可靠和方便、不阻塞、且尽可能

易于调整。

連續加热爐采用高压或低压噴咀。高压噴咀可以用蒸汽或空气来雾化，其火焰可以是圓的或扁平的。也有内部雾化的、供送燃烧用鼓风的或不供送此鼓风的噴咀。

高压噴咀中最通用的是舒霍夫型的（图 7）。此种噴咀的重油沿內管送入，雾化剂沿外管送入。雾化是在噴咀之外进行。用作雾化剂的是水蒸汽或压缩空气。雾化用的压缩空气量占助燃用全部空气量的 8~10%。因而助燃用的大部分空气是在噴咀之外送入，这虽使燃料同空气的混合条件有所变坏，但却允許将部分空气預热到很高的温度。

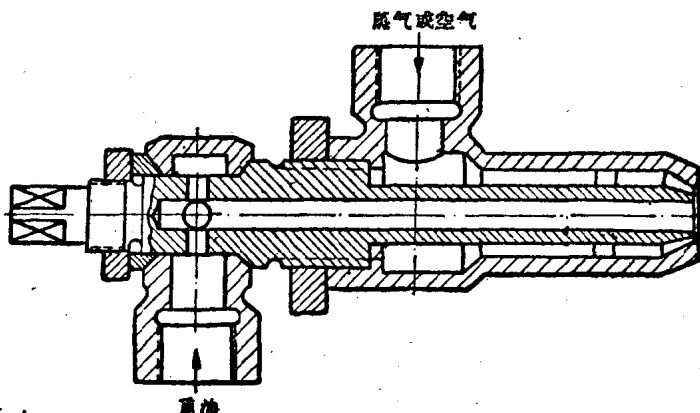


图 7 舒霍夫 (ШУХОВ) 型高压噴咀

必須指出，用压缩空气来雾化是不經濟的，这是因为压缩空气的获得要消耗大量的能。最好采用温度 250~300°、压力 8~12 大气压的过热蒸汽来雾化。雾化用的蒸汽消耗量平均为 0.3~0.4 公斤/公斤。

关于火焰长度的确定，可用下式 [6]：

$$l = 2 \left(4.2 + \frac{60}{V_p} \right) d_0, \quad (1)$$

式中： V_p ——雾化剂的单位消耗量，公尺³/公斤；