

高等学校交流讲义

炉内过程

許晋源編

只限学校内部使用



中国工业出版社

本讲义是根据 1959 年锅炉制造专业指导性教育计划中“炉内过程”一课程的要求编写的（未包括燃烧理论）。在学过燃烧理论、燃料与燃烧设备的基础上学习本课程。本讲义共分为七章。内容包括：气体和液体燃料的燃烧，固体燃料的燃烧、旋风炉，燃烧新技术，实验研究技术等。

本讲义可供高等学校锅炉专业四、五年制同学作为“炉内过程”课程的教材，也可供高等学校热能专业同学及有关工程技术人员参考。

炉 内 过 程

許 晋 源 編

★

第一机械工业部教材编审委员会編輯（北京复兴门外三里河第一机械工业部）

中国工业出版社出版（北京德胜门内大街10号）

（北京市书刊出版事业许可出字第110号）

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

★

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $57^{1/16}$ ·字数118,000

1962年8月北京第一版·1963年5月北京第二次印刷

印数544—1,186·定价(10-5)0.88元

★

统一书号：K15165·1486（一机-280）

序

本教材专供高等工业学校鍋爐制造专业四五年級学生学习“爐內过程”一課之用。“爐內过程”的目的是使学生在已經基本了解了燃烧理論和燃烧設備以后，进一步掌握国内外燃烧和爐內传热技术方面的最新成就，并且初步培养学生的科研能力。本教材約需講授28学时。

本教材既然专门講授最新科技成就，因此有一部分內容是不很成熟的。并且还有一些內容是編者和他的同事們的見解。这是在使用本教材时必须注意的。

本教材的第三章是西安交通大学徐士民同志所編写的，§ 6—5 是許德与同志編写的，§ 6—3、6、8 諸节則全文引用了哈尔滨工业大学的有关教材。

本教材在反映近年来我国鍋爐燃烧技术发展的方面还有许多不够的地方，在講授最新科学技术成就和燃用劣质煤的方面，也有許多遺漏之处，这些都是今后所应补充和改进的。

本教材的插图繪制工作是由西安交通大学牛长山同志和一部分同学所担任的。編者謹在此向他們表示謝意。

目 次

序

引言

第一章 燃用气体燃料的爐子

§ 1—1 着火稳定性	5
§ 1—2 稳定火焰的方法	6
§ 1—3 火炬长度和强化燃烧	8
§ 1—4 高爐气的燃烧	13
§ 1—5 高爐气噴燃器	14
§ 1—6 天然气的燃烧	18
§ 1—7 天然气噴燃器	21

第二章 气流的燃烧和燃烧的热工况

§ 2—1 燃烧的热工况	25
§ 2—2 煤粉气流的着火	27
§ 2—3 煤粉气流燃烧过程的正确組織	28
§ 2—4 煤粉气流的燃尽	35

第三章 鍋爐机組的爐膛热交换过程和热力計算

§ 3—1 引言	38
§ 3—2 爐膛中的溫度場分布和火焰平均溫度	41
§ 3—3 火焰黑度 α_{Φ}	48
§ 3—4 受热面的輻射性质	51
§ 3—5 爐膛的折算黑度	58
§ 3—6 爐膛热交换計算公式	62
§ 3—7 爐子的設計及布置	64
§ 3—8 爐膛出口溫度的选择	66
§ 3—9 旋风爐的热力計算	69

第四章 煤粉爐

§ 4—1 总論	75
§ 4—2 煤粉噴燃器	77
§ 4—3 爐內空气动力工况	81
§ 4—4 馬弗爐燃燒过程的組織	84
§ 4—5 爐渣的性质	86
§ 4—6 液态除渣爐	98

第五章 旋风爐

§ 5—1 臥式旋风爐	108
§ 5—2 ВТИ立式旋风爐的爐內过程	112
§ 5—3 ВТИ立式旋风爐的設計	116
§ 5—4 KSG立式旋风爐	122

第六章 燃燒技术的新問題

§ 6—1 超大型鍋爐的燃燒技术	128
§ 6—2 超大型鍋爐的制粉技术	131
§ 6—3 蒸汽燃气联合装置与压力燃燒鍋爐	132
§ 6—4 压力燃燒 (增压燃燒)	136
§ 6—5 脉动燃燒鍋爐	149
§ 6—6 沸騰层燃燒鍋爐	153
§ 6—7 煤气化和煤的动力工艺綜合利用	156
§ 6—8 成型燃燒层爐	158

第七章 实验研究技术

§ 7—1 自模化	161
§ 7—2 煤粉气流的模化	163
§ 7—3 爐內过程的模化	167
§ 7—4 爐內空气动力工况的冷模試驗	167
§ 7—5 特种的爐內过程模化試驗	169
§ 7—6 带有燃尽的烟气分析 (烟气的全分析)	169
§ 7—7 煤粒完全燃燒程度的測定	171

引 言

火力发电厂运行的安全和经济性，主要决定于鍋爐，而鍋爐运行上所发生的问题，又是大部分由燃烧问题所引起的。这首先是由于鍋爐直接受到燃料性质的影响。鍋爐所供出的蒸汽卻无论是参数或是品质，都必须严格保持在指定范围内，因此就为汽轮机的工作提供了有利条件。其次，由于鍋爐工作过程比较复杂，虽然人类在鍋爐技术上已经积累了不少经验和知识，鍋爐依然是火力发电厂的一个薄弱环节。

解放前我国鍋爐燃烧技术是十分落后的。尽管当时燃用优质烟煤，但煤耗一般均大于1公斤/度。解放后，电厂用煤根据国家燃料政策改为当地的多灰多水劣质煤或者是低挥发物煤种。这些煤从燃烧技术的角度看来是极不利的，給鍋爐的安全运行带来了很大的困难。然而在党的领导和苏联以及其他兄弟国家的帮助下，我们一方面对老厂进行技术改造，一方面建立设备完善的新厂。我们不仅在劣质煤和低挥发物煤种的燃烧上取得了很大的成就，而且电厂煤耗比解放前燃用优质烟煤时有了很大的降低。与此同时对一些新的燃烧技术如液态除渣，旋风燃烧等结合生产进行了许多研究工作，并已取得了很大的成果。所有这一切都有力地说明了我国鍋爐燃烧技术在这些年来已经取得了巨大成就。

然而我国的鍋爐燃烧技术目前还不能适应国民经济飞速发展的需要。放在我国鍋爐技术工作者面前的主要任务計有：完全解决我国各种燃料，尤其是劣质煤的燃烧问题，进一步掌握液态除渣和旋风爐等先进技术以及探索新的强化燃烧的方法。

第一章 燃用气体燃料的爐子

§ 1—1 着火稳定性

气体燃烧方面首先要研究的问题是着火稳定性，这就是保证連續送入的燃料不断着火。我們先以实验室用的煤气灯（本生灯）作为例子来说明这个问题。

煤气灯中的气流处于层流状态。

煤气灯中燃料和空气混合物連續地从圆管流出而稳定地着火现象，可以应用火焰传播的概念去研究。

如图 1—1，火焰一面以正常传播速度 u_{HOPM} 向中心传播，一面随了气流以速度 w_{HOT} 向上流动。其合成速度为 $w_{\text{HOT}} \cdot \sin \varphi$ ，结果火焰就以此速度向斜上方走，形成了圆锥形的火焰。这样从圆锥形火焰面看上去似乎是固定的，其实已包含了火焰传播自下而上的道理。

既然火焰传播是不断地沿着火焰面自下而上，那么火焰来自什么来源呢？

我們知道，层流中的流速分布是抛物綫形的，靠着管壁的流速很低。因此在靠近管壁的地方必然有 $w_{\text{HOT}} = u_{\text{HOPM}}$ 的区域存在。火焰面在这里垂直于流速，流速 w_{HOT} 和火焰传播速度 u_{HOPM} 相等，因而火焰才能稳定下来，如图 1—1。这圈垂直于流速的火焰面叫做点火环。火焰就是靠了点火环作为起源，才能連續不断地传播出来，沿着斜綫向上爬行而形成貌似固定的圆锥形火焰。

假使我們不断地提高煤气灯中的流速，那么点火环就不

断减薄，因为这时 $w_{\text{нот}} = u_{\text{норм}}$ 的点更加靠近管壁。最后点火环消灭了，这叫做火焰吹离（脱火）。

当煤气灯中的流速不断降低时，气体流速最后会小于火焰传播速度，结果火焰传入煤气灯内部，这叫做返火（回火）。

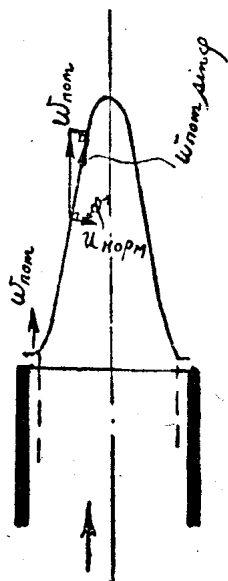


图 1—1 煤气灯火焰的分析

$w_{\text{нот}}$ —流速； $u_{\text{норм}}$ —火焰的正常传播速度；
 φ —火焰面的法线和煤气灯中心线的夹角

因此煤气灯中的流速过高时发生火焰吹离，过低时发生返火。煤气灯只有在中等流速的范围中工作时，火焰才能稳定。

虽然工业上所用的煤气喷燃器和实验室煤气灯相差很大，但是以上所述的一些原理还是适用的。我们再把上述原理整理成如下的结论：

(1) 在流速大于火焰传播速度的气流中，只能形成斜的火焰面。它不能独立存在，而必须依赖其它的火焰来源。点火环可以起火焰来源的作用。

(2) 负荷过高（流速过高）时点火环不能存在而发生火焰吹离。负荷过低时则发生返火。可工作的负荷范围介于火焰吹离和返火两个极限之间。

§ 1—2 稳定火焰的方法

工业上的煤气喷燃器中气流总是处于紊流。流速大大地超过了火焰传播速度。靠近壁面处不可能存在着象实验室煤

气灯那样自然形成的点火环。

为了使火焰稳定，必须采取一些措施。

稳定火焰的措施可以分成提高火焰传播速度和改变流速分布的两方面。

稳定火焰的措施有以下一些：

(1) 采用空气预热以提高火焰传播速度。

(2) 煤气预热（也提高火焰传播速度），这个方法只宜用于高炉气而不宜用于天然气，因为天然气受热时会产生热分解。对于高炉气炉子，高炉气预热还有利于降低排烟温度。

(3) 使高温烟气回流，加热火炬根部。我们知道这个现象叫做烟气卷吸。烟气卷吸不仅在煤气炉子中应用甚多，而在煤粉炉子中更是不可缺少的。

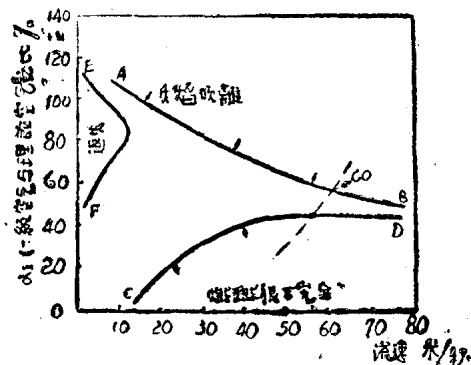


图 1—2 煤气火炬的稳定区域

α_1 ——实际空气量和理论空气量之比，也就是预混合空气的过量空气系数

(4) 使火炬根部的某些地区的局部过量空气系数接近于 1，那么那里的火焰传播就最有利。从这个观点来看，煤

气和空气预先不混合而送入炉子后再混合的燃烧方式（称为扩散燃烧）就比较好，因为在扩散燃烧的混合场中必然可以找到 $\alpha=1$ 的地点。

扩散燃烧和均匀混合物燃烧的稳定性比较可参阅图 1—2。

回火容易发生于火焰传播速度加大之时，即在 $\alpha_1 \approx 1$ 时最容易发生。另一方面当 α_1 加大时流量加大，混合物的流速增加，又容易发生火焰吹离。

因此从图 1—2 可知扩散燃烧（ $\alpha_1=0$ ）较为稳定。

在火炬根部设置一个形状丝毫不流线型化的障碍物或使火炬根部在壁面擦过，一方面可以造成烟气回流卷吸，另一方面这些障碍物和壁面加热以后也有助于提高火焰传播速度。无焰燃烧（见 § 1—5）就是这个原则充分发挥以后的一种燃烧方法。

§ 1—3 火炬长度和强化燃烧

除了着火稳定性以外，煤气燃烧的另一个重要问题便是火炬长度，这就是说燃料和空气需要多少距离才能基本上燃尽，火炬长度的问题往往又可理解成容积热强度

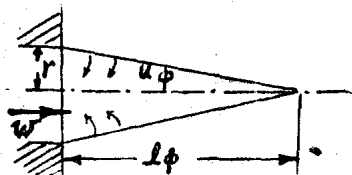


图 1—3 简单喷口所喷出的均匀混合物火炬

$\frac{Q}{V}$ 的问题。

煤气的燃烧方法可以分为均匀混合物的燃烧和扩散燃烧两大类。

在均匀混合物燃烧中，煤气和空气事先就已完全混合得很好。混合物喷入炉子后只要火焰传播到那儿，那儿就一下

子烧掉。

对于简单的喷口(如图 1—3), 可以用如下的公式计算其火炬长度:

$$l_{\Phi} = w \frac{r}{u_{\Phi}} \quad (1-1)$$

其中 w ——混合物流速;
 r ——喷口半径;
 u_{Φ} ——火焰传播速度。

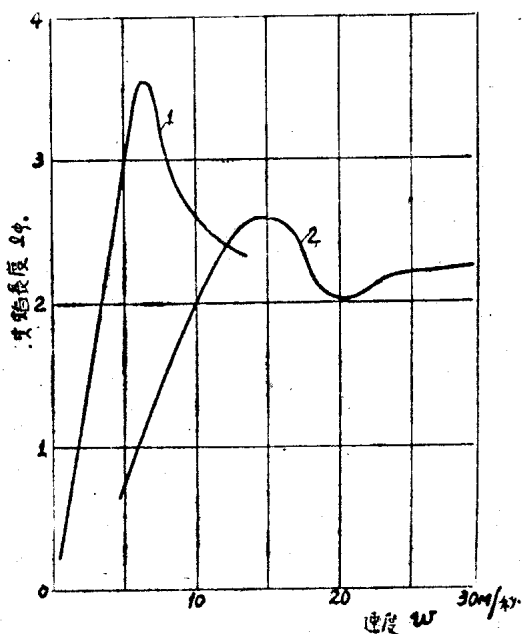


图 1—4 火炬长度与流速的关系

随着流速 w 加大, 也就是 Re 数加大, l_{Φ} 的变化如图 1—4 所示。在层流区域中, 火焰传播速度 $u_{\text{火焰}}$ 和 Re 没有关系,

所以 $l_{\phi} \sim w$ 。在大規模紊流中，火焰传播速度 $u_{\phi} \approx w'$ ，而脉动速度 w' 又和流速成正比 ($w' \sim w$)，所以 $l_{\phi} \sim \frac{w}{u_{\phi}}$ 反而变成不随 w 变化的常数。

均匀混合物燃烧时，如要縮短 l_{ϕ} ，只有縮小噴口尺寸一法。然而均匀混合物燃烧时的火炬本来就不太长，所以一般不必把注意力放到强化燃烧以縮短 l_{ϕ} 的問題上。

第二个燃烧方法是扩散燃烧。这时煤气和空气事先沒有混合，分別送入爐子，边燃烧边混合。这个时候燃烧的速度就全看混合了。只要煤气和空气一遇到，它們就能在片刻之間烧掉。因为燃烧速度决定于空气和煤气的混合扩散，所以它才叫做扩散燃烧。

在扩散燃烧中，要想强化燃烧提高允許热强度 $\frac{Q}{V}$ ，就非得在混合問題上动脑筋不可。

虽然混合过程是十分重要的，但是現在还没有关于混合过程的完整的理論。下面只能根据一些零碎的研究和运行經驗提出一些片断的推論：

(1) 气体的流速对强化混合有什么影响？

从燃烧理論关于自由气流的討論可以知道，自由气流中气体混合所造成的浓度場是不随流速 w 和 Re 数而异的（当然这是指的 Re 数很大时的自模化区），所以有許多人認為，流速的提高不能强化混合，因而也不能縮短火炬长度 l_{ϕ} 。

但是这样的理解未免太片面了。扩散燃烧的火炬长度也可以仿照 (1-1) 式写成：

$$l_{\phi} = w \frac{r}{v_{\text{混}}} \quad (1-2)$$

其中 $v_{\pi\phi}$ 是燃烧所需空气全部扩散进来和煤气混合的扩散速度，当流速 w 提高时， $v_{\pi\phi}$ 也可以增大。如果工业噴燃器中的气流已处于自模化区（这是一般常遇的情况），那么 $v_{\pi\phi}$ 和 w 成正比。两者抵消以后，(1—2) 式中的 l_{ϕ} 才和 w 没有关系。因此虽然在自模化区内火焰长度 l_{ϕ} 不再随 w 而变，但是这是流速提高一方面强化混合，另一方面 l_{ϕ} 的公式中又有 w 这么一个因数存在，两个影响互相抵消的缘故。这样流速提高对强化混合的功劳还是不能抹杀的。

在设计噴燃器时，先要根据經驗选取合理的流速，算出噴燃器出口截面积，然后再决定其各种尺寸。如果流速用得高，噴燃器的面积和尺寸可以較小。从燃烧理論中关于自由气流的討論以及 (1—2) 式都可以知道火炬长度 l_{ϕ} 是正比于噴燃器尺寸的。既然这时噴燃器尺寸小，火炬就可以縮短。

因此在設計噴燃器时提高流速可以縮短火炬。其实这就是强化混合强化燃烧的效果。

在爐子运行时，我們知道噴燃器的尺寸是不变的了。此时随着負荷增减，流速也要增减，只要气流仍处于自模化区，火炬长度 l_{ϕ} 不会改变。

(2) 空气和煤气的速度差愈大，它們的混合也愈强烈。

(3) 旋渦可以增强气流的混合，其原因現在解释为旋渦气流的脉动速度較寻常为大。

(4) 空气和煤气两股气流之間的交角愈大，則气流混合也愈强烈。

(5) 噴口的尺寸（圓型噴口的直径或縫型噴口的濶度）愈小，則火炬的长度也可以愈小。这个道理从上面一些

火炬长度的公式一看就可以知道，不必多說。因此在煤气噴燃器中常常把煤气噴口做成許多小孔，讓煤气成許多股細流噴出來，或者把煤气和空气做成許多层薄片气流，一层煤气夹一层空气。

在这样的气流中，由于煤气和空气的接触面大大地增加，所以混合得非常强烈。

(6) 有意識地控制气流射程，使煤气气流均匀分布于空气气流之中。

扩散燃烧的火炬长度目前沒有足够可靠的計算公式。下面是庫特 (A. L. Cude) 的公式 (試驗时采用城市煤气)：

$$L_{\Phi} = 20.8(1 + V_{\text{B}}) \sqrt{r_0 F} \text{ 米} \quad (1-3)$$

其中 V_{B} ——理論空气量，标米³/标米³；

r_0 ——煤气重度，公斤/米³；

F ——噴口截面积，米²。

从公式 (1-3) 式可以看出 L_{Φ} 和噴口尺寸 ($\sqrt{F}$) 成比例而和流速无关。此外， V_{B} 增大时， L_{Φ} 也要加大。这可以解释如下： V_{B} 大的煤气 (这总是发热量較高的煤气) 在燃烧时需要的空气多，因此煤气要走更多的路才能获得足够空气完全燃烧。

苏联卡尙采夫 (Е. И. Казанцев) 和謝米金 (И. Д. Семин) 对高爐气和焦爐气混合成的煤气进行研究以后得到的公式如下：

$$\frac{L_{\Phi}}{d_0} = \frac{w_0}{3.75 + 0.925w_0} (5.6 + 0.021 Q_{\text{H}}^{\text{P}}) \quad (1-4)$$

其中 d_0 ——噴口直径；

w ——流速。

(1-4) 式中 w_0 对 L_{Φ} 有些不太大的影响。

(1-3) 和 (1-4) 式都是指的煤气气流喷入静止的空气中作扩散燃烧时的火炬长度。对于空气以流速 w_n 向前流动的扩散燃烧 (图 1-4)，上面二条公式都要作适当的修改。此时因为空气也以某一流速流动，空气和煤气的混合强化，火炬缩短。

庫特的公式应修改如下。

对于城市煤气，将其 V_0 代入后得：

$$l_{\Phi} = k \sqrt{\gamma_0 F} \text{ 米 (1-5)}$$

k 和 w_n 的关系如下：

$w_n = 5$ 和 22 米/秒时，

$k = 400$ 和 90

卡尚采夫公式則修改如下：

$$\frac{L_{\Phi}}{d_0} = \frac{w_0}{2.4 + 0.925 w_0 + w_n} (5.6 + 0.021 Q_{H^0}) \quad (1-6)$$

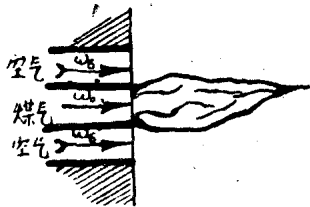


图 1-5 煤气和空气均在流动时所形成的扩散火炬

§ 1-4 高炉气的燃烧

高炉气的发热量甚低，仅 950 大卡/米³左右，因为其中含有大量惰性气体 (CO_2 , N_2)，且可燃成分也只是 CO 等 (没有烃)。高炉气燃烧以后的燃烧温度是不高的。即使理论燃烧温度，也只有 1300°C 左右 (煤的理论燃烧温度可达 1800 至 2000°C)。

因为高炉气的燃烧温度不高，它和空气混合后的火焰传播速度也就不高，所以高炉气燃烧时的着火稳定性需要注意。

火电厂往往是高炉气的缓冲用户，因此燃用高炉气的火

电厂需要同时燃用另一种燃料——煤粉。鍋爐有时燃用煤粉，有时則煤粉和高爐气一起烧，这就給鍋爐工作带来了一些困难。

同时烧高爐气和煤粉时，因为高爐气的燃烧溫度低，所以爐內溫度水平就要低于单独燃用煤粉之时，这样就使煤粉的机械不完全燃烧增加。尤其在所用的煤是低揮发物煤的时候，煤粉的机械不完全燃烧损失更要大大增加（无烟煤和高爐气同时燃用时能达15—20%）。

高爐气的火焰是不发光的（透明的），而煤粉燃烧时的火焰是发光（高揮发物燃料）或半发光（低揮发物燃料）的。因此从烧煤改为烧高爐气时，爐內传热大大减弱。传热需要轉移到对流受热面去。

高爐气中含有大量惰性气体，并且烧高爐气时的鍋爐效率低于烧煤之时（見下文），燃料消耗量增多，所以这时的烟气量要比烧煤时大出很多。

由于这两个原因，过热汽溫就要上升，省煤器出口工质的沸腾度升高。此外省煤器和空气預热器吸不了这么多热量，排烟溫度也要上升，所以鍋爐效率下降。

过热汽溫等参数的变化限制了鍋爐出力达不到銘牌。例如230吨/时鍋爐改用高爐气时出力只有150吨/时。

燃用高爐气的鍋爐的热空气溫度應該用得較高（250—350°C），这無論从改善着火稳定性降低排烟溫度的观点看来都是有利的。这时甚至还可以考虑高爐气的預热。

§ 1—5 高炉气噴燃器

§ 1—3 中已經講过了均匀混合物燃烧和扩散燃烧两种方法，均匀混合物燃烧法中为了改善着火稳定性就采用隧道

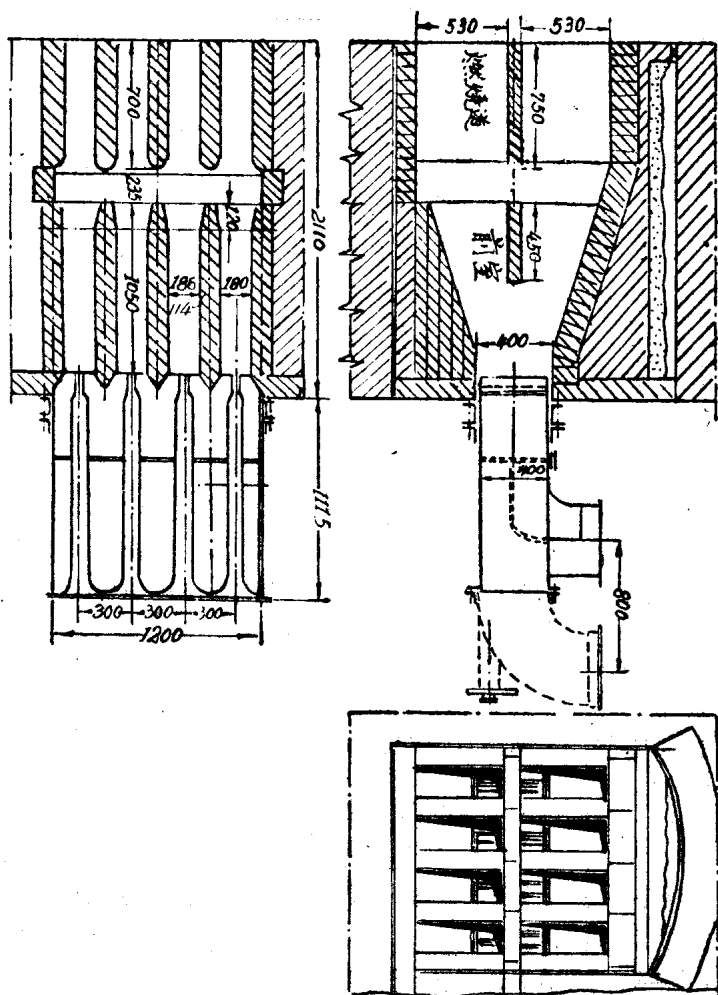


图 1—6 燃用高炉气的无焰喷燃器