

炉内空气动力学

译文集

王致均 编译 马毓义 校阅

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是根据英、美、苏等国的资料编译的一本译文集。它叙述了近年来炉内空气动力学的进展,介绍了与燃烧过程有密切关系的各种射流的质量交换、动量交换和热量交换的研究成果,论述了冷、热态下炉内空气动力特性的试验结果及各种模化研究。全书共分四个专题,即(一)直流紊流射流,(二)旋转射流,(三)炉内空气动力学,(四)炉膛及燃烧器的模化研究。

本书可供从事电站锅炉、工业锅炉、工业窑炉以及与各种燃烧技术有关的工程技术人员和高等学校有关专业的师生使用和参考。

炉 内 空 气 动 力 学

译 文 集

王致均 编译 马毓义 校阅

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 13.75印张 364千字

1984年9月第一版 1984年9月北京第一次印刷

印数 0001—3030册 定价 2.05元

书号 15143·5433

前 言

能源是我国“四化”建设的一个战略重点。占我国能源90%以上的化石燃料必须通过燃烧，使其化学能转变为热能后方可进一步加以利用。因此，燃烧的好坏将直接影响其合理而有效的利用。

电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉的运行实践表明，燃烧过程的经济性、稳定性和安全性与炉内空气动力学有着十分密切的关系。燃烧过程中出现的许多问题都与燃烧器和炉膛的空气动力特性不良有关。因此，要提高燃烧过程的经济性和稳定性，要改进燃烧器和炉子的设计和运行，要更好地利用劣质燃料，都必须加强炉内空气动力学的研究。

目前，我国在炉内空气动力学方面的理论和实验工作还是比较薄弱的，系统的资料也较少。为了适应国民经济发展的需要，为了促进基础理论的研究工作，系统地介绍一些国外的研究成果显然是很必要的。正是出于这些目的，编译了这本译文集。

近二十年来，由于燃烧学的发展和工业实践的需要，许多工业发达国家，如英、美、苏等国都加强了与燃烧过程有密切关系的炉内空气动力学的研究。在等温和非等温状况下，对各种射流及其组合的空气动力学特性、不同燃烧器结构和布置下的炉内空气动力学特性作了大量的试验研究，逐步形成了燃烧学的一个新的分支——炉内空气动力学。

然而，目前炉内空气动力学的专著甚少，各国研究的侧重点也不相同，论述不尽全面。为了系统而全面地介绍这方面的研究成果，本文集按四个专题选译了英、美、苏等国近年来发表的有代表性的科研论文。这四个专题是（一）直流射流，（二）旋转射流，（三）炉内空气动力特性，（四）炉膛及燃烧器的模化

研究。

由于篇幅限制，对其它一些问题，如雾化、测试、两相流动和流动过程的数学模型等未予介绍。

本书译稿承华中工学院马毓义教授在百忙中校阅，在此深表感谢。

限于编译者水平，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编译者

1983年11月

于重庆大学

目 录

前 言

炉内空气动力学的进展(代绪论)……………王致均(1)

第一部分 直 流 射 流

一、紊流自由射流的静压分布 …………… D.R.Miller
E.W.Comings (44)

二、平面空气紊流射流的速度分布、温度分布
和物质浓度分布的研究……………王致均编译(61)

三、用扩散法和热线法对平面空气射流紊流度
的测量…………… B.G.Van Der Hegge Zijnen (91)

四、轴对称紊流射流卷吸的测量……………F.P.Ricou
D.B.Spalding (110)

五、利用等温模型研究双同心射流燃烧器的混合
和回流结构…………… G.J.Wingfield (124)

六、垂直射入主气流的圆形射流的流动和混合
的研究 …………… M.A.Patrick (144)

七、钝体火焰稳定器尾迹中的流动 ……………T.W.Davies
J.M.Beér (161)

第二部分 旋 转 射 流

一、射流中旋转涡动的实验研究……………N.A.Chigier
A.Chervinsky (172)

二、旋流燃烧器的某些空气动力学
特征…………… Ф.А.Серант Б.П.Устименко (192)

三、悬浮式火焰调风器的等温空气动力特性

- 研究… J.L.Livesey P.L.Wilcox R.D.South (202)
- 四、在开式空间中两个平行旋转射流相互作用的空气
动力特性… Р.Б.Ахмедов Д.М.Ахмедов
Т.Б.Балагула Ш.А.Хакимбаев (246)

第三部分 炉内空气动力特性

- 一、炉内旋流叶片式火焰的空气动力
特性…………… S.A.Beltagui N.R.L.Maccallum (253)
- 二、ТПП-210А型锅炉燃烧室中燃烧过程的发展
和火炬结构的空气动力特性 ……С.Л.Шагалова
И.Н.Шницер Ю.И.Шаповалов
О.Т.Плаксин В.П.Мережко (280)
- 三、ТПП-312А型锅炉燃烧室中燃烧过程和空气
动力特性的研究…… И.Н.Шницер Л.В.Юрьев
Л.К.Совьев В.В.Лиговкин (290)
- 四、具有双层旋流燃烧器的БКЗ-420-140-1型锅炉
在燃烧埃基巴斯图兹克煤时火炬的空气动力
特性、着火和燃尽的研究 ……А.И.Гончаров
Ю.Л.Маршак (305)
- 五、在火炬外围着火的情况下旋流燃烧器的空气动力特
性和煤粉火炬的燃尽 ……И.Н.Шницер
Л.В.Юрьев Ю.И.Шаповалов (320)
- 六、煤粉火焰的稳定性和燃烧强度——旋转和
冲击的影响……………J.M.Beér N.A.Chigier (329)

第四部分 炉膛及燃烧器的模化研究

- 一、用于低挥发分煤粉的燃烧器模型的空气
动力特性研究……………A.C.N.Tucker (349)
- 二、等温炉膛模型中喷嘴的模化……………F.J.Davison (360)
- 三、直流缝隙形燃烧器切向布置的炉膛模型

的空气动力特性研究..... С.Л.Шагалова

И.И.Шницер Д.И.Парпаров

Л.В.Юрьев С.Л.Конашев (377)

四、ТПП-312А型锅炉燃烧室模型的空气动力

特性研究.....С.Л.Шагалова И.И.Шницер

Д.И.Парпаров Л.В.Юрьев (384)

五、炉内旋流叶片式火焰的模化

S.A.Beltagui
N.R.L.Maccallum (394)

六、在燃烧模型上研究炉膛.....А.А.Шатиль

М.А.Поляцкин В.Н.Афросимова

А.С.Иссерлин (412)

七、在工程紊流扩散火焰中燃烧模化的

研究..... F.C.Lockwood A.S.Naguib (419)

炉内空气动力学的进展（代绪论）

王致均

一、前 言

燃烧过程是一个复杂的物理-化学过程。虽然一般说来，它是一种放热的氧化反应，但是物理过程，特别是能量、质量和动量的交换过程，对燃烧系统仍起着重要的作用。在大多数工业燃烧中，对总反应速度起决定作用的是物理过程的速度。

燃烧实践中最关心的是如下的问题：

1. 燃烧过程着火的稳定性问题；
2. 燃烧强度，也即容积燃烧率问题；
3. 火焰与新鲜的燃料空气混合物以及与燃烧室环境介质间的热、质交换问题；
4. 与燃烧过程有关的结渣、腐蚀等安全性问题。

为了研究着火的稳定性，必须研究火焰传播的机理和火焰传播的速度。而火焰传播的速度与燃烧室内的流动状态和流动结构有密切的关系。在紊流流动条件下，由于质交换和热交换都显著增加，因而使火焰传播速度也增加。如果在燃烧室内有对流流动时（譬如回流区），火焰传播速度将进一步增加。因而，是否有回流区和回流区的参数与着火的稳定性有密切的关系。而这些因素都与燃烧器和炉内空气动力学有关。

为了确定火焰的外形尺寸和设计燃烧室，必须知道火焰的燃烧率。在工业条件下，火焰的燃烧率不但与燃料的着火过程有关，而且还与燃料的燃尽过程有关，也即不但与燃烧室内的一次混合过程有关，而且还与燃烧室内的二次混合过程有关。所有这

些也取决于燃烧器和炉子的空气动力学条件。

为了研究炉内火焰的对流热交换，为了防止炉内结渣和腐蚀，也必须研究炉内的流动结构，这也是与燃烧器和炉子的空气动力学有关的。

从燃烧器喷出的燃料流和空气流都是一股射流。这种射流基本上可分为两类，即直流射流和旋转射流。直流射流和旋转射流的流动结构和空气动力特性，诸如速度分布、卷吸特性、射程、回流区等，都是完全不同的，以这两种射流为基础的火焰的着火方式也是不同的。因而应当分别研究直流射流和旋转射流的空气动力学规律性。

以直流射流为基础的燃烧器和以旋转射流为基础的燃烧器与炉膛的配合方式是不同的，它们和炉膛配合后形成的炉内空气动力结构差异也较大。旋流燃烧器在炉内形成的空气动力结构基本上是独立的，它主要受燃烧器本身的结构和工况参数的影响，燃烧器彼此之间的影响较小。直流式燃烧器在炉内的空气动力结构，除了受燃烧器本身的结构和工况参数的影响外，受燃烧器布置方式的影响颇大。在切向布置燃烧器时，各燃烧器组合射流间的相互影响对炉内空气动力特性起着重要的作用。综上所述，可以看出，研究炉内空气动力学是十分重要的。

五十年代以来，英、美、苏联、西德等世界各国，加强了对炉内空气动力学方面的基础研究，在等温状态下和热态下，对各种射流及其组合的空气动力特性作了大量的试验和探索，逐步形成了一个新的分支学科——炉内空气动力学。

目前看来，炉内空气动力学主要包括如下几个方面：

1. 直流射流及其组合的空气动力学；
2. 旋转射流及其组合的空气动力学；
3. 冷、热态下的炉内空气动力学；
4. 空气动力学的模化研究。

以下将分别介绍上述几方面内容的近况和动向。

二、直流射流及其组合的空气动力学

直流射流的应用是十分广泛的。在燃烧方面，它不但是电站锅炉中广泛应用的直流燃烧器的基本组成单元，而且还经常用来作为加强质交换和热交换的重要手段。

五十年代和六十年代期间，英、美、苏联以及设在依几缪顿（Ijmuiden）的国际火焰研究中心对直流射流的空气动力学都进行了较多的研究。我国浙江大学和西安交通大学在这方面也进行过一些工作。目前，在圆形射流和平面射流方面，其时间平均参数的分布和有关空气动力特性都已比较清楚。对平面射流和圆形射流的紊流参数、相关系数、间歇系数以及高阶相关的分布，七十年代以来也有不少人进行了试验研究，以期进一步探索射流的转移机理。不少人在圆形射流和平面射流研究的基础上对其它较复杂的组合直流射流的空气动力学也作了许多试验和探索，并尽可能将过程的物理模型与分析处理结合起来，以期能导致更大程度的通用化。

1. 圆形和平面射流

现时，无论对圆形或平面紊流射流的问题都是用三种基本方法来进行理论研究的。这三种方法是：（1）勃朗特（Prandtl）的动量交换理论；（2）泰勒（Taylor）的旋度交换理论；（3）理查德（Reichardt）的分子相似理论〔文献3、4〕。

托尔明（Tollmien）利用勃朗特关于流体质点混合时动量守恒的假定，对一个从无限长的线源来的二维射流解算了其紊流运动的基本流体动力学方程。他假定，作为一层流体与另一层流体发生交换时，保持不变距离的混合长度在射流横截面上是一个常数，并随射流横截而至线源的距离线性地增加，即

$$l = cX$$

在托尔明的解中，常数 c 是仅有的未知数，而且必须由实验确定。如果假定质量交换、热量交换都具有相同的混合长度 l

时，则按照这种理论分析，这三种交换都是相同的。

与勃朗特尔不同，泰勒假定，当一层流体与另一层流体发生交换时，流体质点的旋度在一定长度范围内保持不变。

霍瓦斯 (Howarth) 将泰勒假定应用于射流横向上的速度分布，也恰好像托尔明那样引进了一个混合长度。霍瓦斯与托尔明的计算都得出了同样的结果。

理查德由于假定在紊流运动和分子运动中流体的扩散过程是相似的，从而避免了勃朗特尔和泰勒理论的某些数学上和物理上的困难。他假定，在紊流运动和分子运动中，流体的扩散过程的总动量交换受着同样定律的控制，也就是说其动量分布必须满足于高斯误差函数

$$\frac{\overline{U}^2}{\overline{U}_m^2} = e^{-\text{常数} \cdot \eta^2}$$

根据托尔明的意见，温度分布和速度分布是相似的，而根据霍华斯的意见，当热交换和质交换所用的混合长度相同时，温度分布与速度分布的平方根成正比。

理查德的分子相似理论得出温度分布与速度分布是相似的，而且都由高斯误差函数表示。

另一方面，从实验上对圆形和平面射流的压力场、速度场、温度场和浓度场作了大量的实际测定。根据实测的数据也整理出了许多速度分布、温度分布和浓度分布的无因次关系式，以及轴线上的无因次速度、无因次温度和无因次浓度衰减的表示式，并将这些关系与理论研究进行了比较[文献1、2、3、4、5]。

从燃烧角度看，圆形和平面射流的下述空气动力特性是十分重要的，这些特性都已被广泛地进行过研究。

(1) 速度分布特性

射流中的速度分布特性不但反映了射流中局部气流的运动特性，而且还由此看出射流中的动量交换特性和混合特性。因而，速度分布是射流空气动力特性中一个最重要的因素。

对圆形和平而射流来说，其速度分布的一般形式如图1所示。

根据图 1 的速度分布，可以将紊流自由射流分为若干有特征的区域，如图 2 所示。

在完全发展区中，射流各截面中的速度分布是相似的，因而能够用数学表示式来描述这种分布。各国的研究者对该区域的速度分布提出的具体数学关系是不同的。这里仅指出两种有代表性的形式。

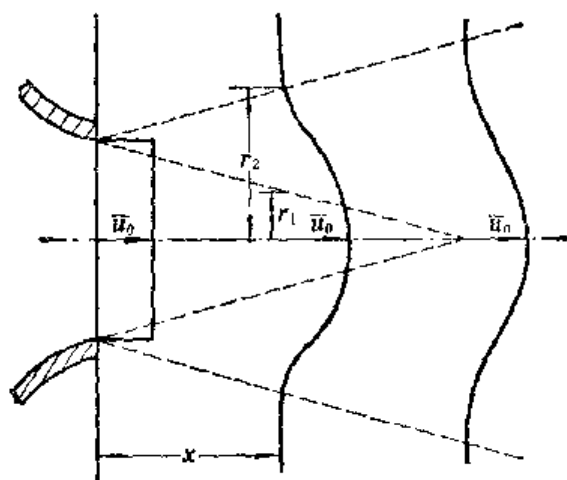


图 1 射流出口附近的速度分布

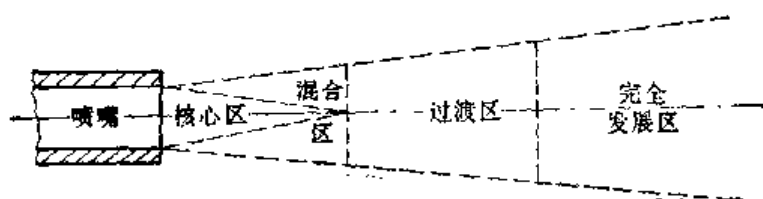


图 2 射流的各个区域

其一是利用一个高斯分布方程式，即

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_m} = \exp[-K_u \eta]$$

式中 K_u ——系数，其值为82~92；

η ——对平面射流来说为 y/x ，对圆形射流来说为 r/x 。

其二是利用一个无因次的幂函数，即

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_m} = \left(1 - \eta^{\frac{3}{2}}\right)^2$$

式中 η ——对平面射流来说为 y/b , 对圆形射流来说为 y/r 。

(2) 卷吸特性

从喷嘴流出的直流射流, 由于其中分子微团的紊流脉动而与周围介质发生动量交换, 引起周围介质随射流而流动, 从而使射流质量增加。这个过程就叫做卷吸。直流射流是从其外侧卷吸介质的。一般说来, 射流的卷吸取决于紊流交换系数、速度梯度、射流的形状和密度比等诸因素。

对于等温和非等温的圆形射流而言, 在雷诺数较大且距离 x 又大大超过喷孔直径时, 卷吸量可以由下式确定 (还有不少别的公式):

$$\frac{m_e}{m_0} = 0.32 \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{x}{d_0} - 1$$

当喷射气体在射流中燃烧时, 其卷吸率比不燃烧时低 30% 左右。

(3) 射流的射程

为了满足燃烧和混合的某些需要, 有时要求射流具有一定的射程。因而, 对射流轴线上的速度衰减规律进行了不少的研究, 提出了各种不同的数学表达式, 下面举其中之一作为例子:

对圆形射流

$$\frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_0} = \frac{0.96}{\frac{ax'}{r} + 0.29}$$

对平面射流

$$\frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_0} = \frac{1.2}{\sqrt{\frac{ax'}{b} + 0.41}}$$

从以上公式可以看出, 除了射流的初速影响射程外, 喷口的截面形状和大小也影响射程。当射流初速 $\bar{u}_0$ 及喷口的当量直径相同时, 平面射流比圆形射流有更大的射程。

(4) 紊流参数的分布特性

紊流参数的分布特性,在很大程度上决定了紊流自由射流的形状,以及动量、质量、热量的交换过程。而且,通过对紊流参数的研究,还能进一步揭示流动和转移的机理。

紊流参数的分布特性与平均参数的分布特性是不同的。从实验结果可知,在射流核心区内,不论是在横向上还是在纵向上,紊流脉动速度均不为常数,而是由核心的中间($y=0$)向内边界层逐渐升高,当然变化都不太大。在混合区内,与时间平均速度逐渐降低相反,脉动速度是逐渐升高的。其最大值大约位于与出口喷嘴直径相等的环形面上,而且对各个截面说来变化都不太大。三个方向上的脉动速度尽管也不相等,但差别不大,大致处于同一数量级[文献55]。

七十年代中期,有人为了研究平面射流的转移机理,进一步试验和比较了射流中平均速度、紊流强度、脉动速度、两点间的相关系数和间隙系数以及高阶相关的分布[文献9]。

试验表明,二维射流要离开喷嘴约40个喷嘴宽度才进入自模区。在时间平均速度、间隙性和紊流参数的分布方面,圆形射流和平面射流是相似的。试验也指出,二维射流与其它所有的剪切流动一样,都不存在任何完全的各向同性,面到处都观察到的是各向异性。

除上述特性外,圆形和平面射流的扩展角和刚度等特性也对燃烧过程有重要影响。

2. 环形和同心射流

在燃烧实践中也常常碰到环形和同心射流。这类射流与圆形射流相比,虽有许多共通性,但也存在不少特殊性[文献1、8、11、61]。

试验表明,环形和同心射流的流动图形大致可以分为两个具有不同特点的区域:完全发展区和喷嘴附近区。这两个区的流动特性和影响因素都是不同的。

完全发展区:在8~10个喷嘴直径的下游以后,环形和同心射

流的流动特性与圆形射流在完全发展区的流动特性是相似的，唯一不同的是射流原点有所移动。也就是在速度、浓度和卷吸的方程式中，轴向距离 x 要用 $(x+a)$ 来代替。其中 a 值由实验确定。对双同心射流而言，其当量直径 d_e 由下式确定：

$$d_e = \frac{2(m_1 + m_2)}{\pi \rho (G_1 + G_2)^{1/2}}$$

式中 m_1 、 m_2 ——中心射流和环形射流的质量流量；

G_1 、 G_2 ——中心射流和环形射流的动量。

喷嘴附近区：在接近喷嘴出口的地区，环形射流具有一个反向的回流区。而对同心射流而言，在中心射流和环形射流的交界面的尾迹中也存在着这样一个回流区。这个回流区的尺寸和回流速度，对着火的稳定性以及射流间的混合都有较大的影响。因而，人们对喷嘴附近区的流动结构及其影响因素更感兴趣。

喷嘴几何形状的影响。一个双同心射流的研究表明，喷嘴的几何形状 d_2/d_1 对回流结构和混合都有较明显的影响，而且存在一个最佳的 d_2/d_1 值。当 d_2/d_1 太小时，混合并不十分迅速，而回流区很小，回流量也少。当 d_2/d_1 太大时，尽管回流区较大，回流量也有增加，但射流间的间距太大，使中心射流和环形射流间的混合变慢。试验表明， d_2/d_1 似乎在 2~3 之间最好。

速度比的影响。环形射流和中心射流的速度比，对射流间的混合以及它们的势能核心和速度衰减都有较大的影响。

3. 运动气流中的射流和尾迹

在燃烧过程中，射流往往不是喷入静止的介质中的，而是喷入一个运动着的气流之中。根据射流和运动气流的方向，有两种典型的情况是很重要的。

(1) 与主气流平行流动的射流

当射流与主气流平行流动时，它们之间的混合取决于气流速度和射流出口速度之比 λ 。当 λ 往两个方向离开 1 愈远时，则混合愈强。当 $\lambda = 1$ 时，混合最弱。

射流在主气流中的流动特性也取决于 λ 。当 λ 接近于 1 时，

射流的扩展率、速度和浓度的衰减率都将减小，而势能核心区的长度却不断增加。在 $\lambda = 1$ 时，势能核心将遍及整个流场。

斯魁尔 (Squire) 等人提出了一组公式来描述射流的流动特性。

在接近射流出口的混合区内，轴向速度的分布为

$$\bar{u} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_s}{2} \left(1 - \cos \pi \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} \right)$$

式中 $\bar{u}_0$ 和 $\bar{u}_s$ ——射流出口速度和气流速度；

r_2 和 r_1 ——混合区的外半径和内半径。

势能核心的长度 x_p (对 $\lambda < 1$ 而言) 为

$$\frac{x_p}{d_0} = 4 + 12 \lambda$$

在完全发展区中，轴线上的速度 u_m 的衰减为

$$\frac{\bar{u}_m - \bar{u}_s}{\bar{u}_0 - \bar{u}_s} = \frac{x_p}{x}$$

射流的扩展率为

$$\frac{y_{0.5}}{r_0} = \left(\frac{x/d_{0.5}}{x_p/d_0} \right)^{(1-\lambda)}$$

式中 $y_{0.5}$ ——速度等于 0.5 ($u_{\text{最大}} + u_{\text{最小}}$) 处的径向位置；

r_0 ——喷嘴出口处的半径。

完全发展区中的速度分布为

$$\frac{\bar{u} - \bar{u}_s}{\bar{u}_m - \bar{u}_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi r}{2y_{0.5}} \right)$$

对于主气流和射流之间既有速度差又有密度差的情况而言，射流特性就变成了如下的一个比值的函数，这个函数为

$$\frac{\rho_s \bar{u}_s}{\rho_0 \bar{u}_0}$$

(2) 与主气流垂直的横向射流

横向射流在下列情况的计算中是有用的：燃料床上的二次风喷射；烟气由烟囱排入横向风中；垂直起飞和着陆的飞机，以及涡轮喷气发动机中为了降低温度而稀释空气等。

横向射流是紊流剪切流动的例子之一。它比自由射流更复杂。当射流垂直进入主气流中时，由于受到主气流的横向剪切作用，其流动图形就发生变化，如图3所示。

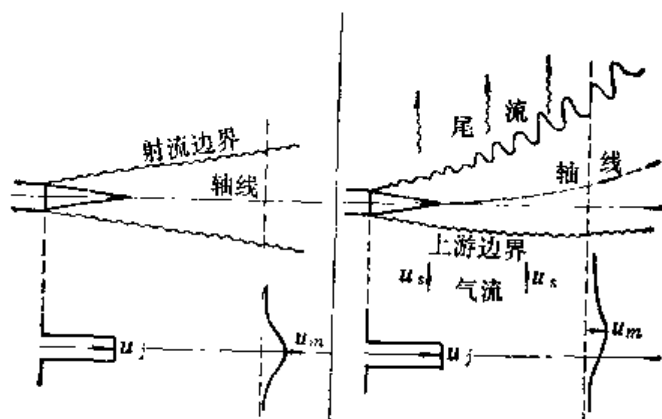


图3 自由射流和横向射流的发展

对主气流而言，射流的作用就像一个障碍物一样，主气流流到射流的正面处就减速并形成一个正压区。这个正压区的压力沿射流两侧逐步降低。在射流的背面形成一个负压区和与尾流相结合的流动状态，也就是说在射流的背面形成一对反向旋转的旋涡，与圆柱形钝体的尾迹相似。对射流而言，由于主气流的影响其轴线发生偏斜，射流断面发生变形。如果是圆形射流则断面变成椭圆形。射流与主气流之间的混合也因而加速，射流的势能核心缩短，速度和浓度的衰减加剧。

帕特利克 (Patrick)、约丁森 (Jordinson) 和豪桑 (Hawthorne) 等许多人都对横向射流进行过研究。研究的方法也是多种多样的，除了速度场、温度场和浓度场的测量外，还应用过油烟、示踪染料以及斯里伦 (Schlieren) 技术等流动显影法。对横向射流来说，人们最感兴趣的是其速度分布和透入主气流的深度等问题。

帕特利克根据实验研究提出了横向射流的速度分布图〔文献7〕。

当气流与射流的速比 λ 等于 $0 \sim 0.152$ 时，根据速度和浓度的