

水力采煤的水力学理論

周士昌 編著



水力采煤的水力学理論 ——射流与兩相流

周士昌 編著

人民教育出版社

本書較系統地介紹了水力采煤中的主要水力学理論——射流與兩相流。在射流理論方面本書介紹了射流的性質，射流冲击力的計算，水槍對射流質量的影響及水槍的水力計算。在兩相流理論方面敘述了兩相流的基本物理性質及其阻力特性，有壓水力運輸及無壓水力運輸的阻力計算，臨界流速計算及兩相流水力計算的基本類型。同時還對這些公式用實驗資料進行了校驗和分析。

本書可作為高等學校采礦類專業的教學參考書，也可供水力開采與水力運輸方面的科學研究和設計工作人員參考。

3960/10

水力采煤的水力学理論——射流與兩相流

周士昌 編著

人民教育出版社出版 高等學校教材編輯部
北京宣武門內大街24號

(北京市書刊出版登記證出字第249)

民族印刷廠印裝 新華書店發行

統一書號 15010·511 開本 850×1168 1/16 印頁 1

字數 141,000

印數 0001—2,000 定價 (8) 0.90

1960年4月第1版

1960年4月北京第1次印刷

序

自从 1958 年大躍進以來，水力采煤事業在我國獲得了空前的發展。在這過程中，也提出了一系列超出普通水力學範圍的水力學問題。因此，過去的普通水力學對采礦類的專業來說，已經不能滿足要求了。水力采煤事業的發展要求采礦類專業的学生掌握射流及兩相流理論，這也是水力采煤中兩部分主要的水力學理論，而本書就是為了介紹這兩方面的理論而編寫的。

由於目前在這方面的理論發展還很不够和很不系統，大部分是一些經驗公式，而這些經驗公式都有局限性，只能適用於一定的範圍。因此，本書除了較系統地介紹這些理論外，還對這些理論用現有的實驗資料進行了校驗和分析，以明確它們的性質和應用範圍，對有些問題和公式也提出了編者的修正。

本書所包括的內容主要是技術基礎理論，並在編寫的過程中盡量注意了聯繫生產實際，聯繫中國實際。但由於我國目前在這方面的理論研究還很少，故書中所引的中國資料還不多。

本書主要是為了作為高等學校采礦類各專業的教學參考書而編寫的。因此敘述比較詳細，例題也較多。同時，為了使本書也能供水力開采和水力運輸方面的科學研究和現場工作人員參考，故書中也包括了一些比較新的和發展還不够的內容。

本書初稿寫完後，曾在東北工學院水力學教研室進行了討論，教研室佟慶理、賴國璋等全體同志對本書提出了很多寶貴意見。編者在此向他們致以誠懇的謝意。

由於編者學術水平所限，書中缺點和錯誤在所難免，敬希讀者批評指正。

周士昌

1959 年 6 月於東北工學院

目 录

序	1
緒論	1
第一章 射流理論	7
§ 1-1. 淹没射流的性質	7
§ 1-2. 非淹没射流的结构特征	10
1. 低压射流 2. 中压射流 3. 高压射流 4. 超高压射流	
§ 1-3. 射流的噴射軌跡	14
1. 垂直噴射 2. 傾斜噴射	
§ 1-4. 中压与高压射流的速度与断面变化	16
1. 射流速度分佈 2. 軸心流速及起始段長度的計算 3. 断面变化	
§ 1-5. 射流的冲击力及冲击压强	25
1. 射流的理論冲击力 2. 射流的实际冲击力 3. 平均冲击压强 4. 射流的有效長度 5. 影响射流質量的因素	
§ 1-6. 水枪的水力学性能及其水力計算	52
1. 水枪的水力学性能 2. 水枪的水力計算	
第二章 兩相流的基本水力学性質	81
§ 2-1. 运输材料的性質	81
1. 重率 2. 密度 3. 松散重率 4. 顆粒成分, 不均匀系数与平均粒徑	
5. 顆粒沉降速度 6. 顆粒沉降阻力系数	
§ 2-2. 混合液的物理性質	88
1. 混合液的重率 2. 混合液的濃度 3. 混合液的粘性	
§ 2-3. 紊流結構的一些理論与实验	96
§ 2-4. 固体顆粒对紊流結構的影响	101
§ 2-5. 固体顆粒的运动状态及濃度在过水断面上的分佈	103
1. 固体顆粒的运动状态 2. 濃度在过水断面上的分佈	
§ 2-6. 水对固体顆粒的作用, 使固体顆粒悬浮的条件	106
§ 2-7. 兩相流的伯諾里方程	113
§ 2-8. 兩相流的阻力特性	121
§ 2-9. 关于兩相流的两种理論——重力理論与扩散理論	127
第三章 圓管兩相流的水力計算	132
§ 3-1. 圓管兩相流阻力計算的基本公式	132

1. B. B. 卡杜里斯基公式 2. A. П. 帕尔契斯基公式 3. A. E. 伊万诺夫公式 4. 全苏煤矿科学研究院公式 5. R. 杜蘭德公式 6. B. C. 穆奇尼克經驗数据 7. 苏联庫茲涅茨煤炭科学研究院建議的数据	
§ 3-2. 圓管兩相流的临界流速	158
1. 全苏煤矿科学研究院公式 2. R. 杜蘭德公式 3. 卡杜里斯基公式 4. Г. H. 罗耶尔公式 5. A. П. 尤芬公式 6. B. C. 克諾罗茲公式 7. 关于临界流速的一些經驗数据	
§ 3-3. 圓管兩相流水力計算的基本类型	181
1. 第一类問題 2. 第二类問題 3. 第三类問題	
第四章 明槽均匀兩相流的水力計算	194
§ 4-1. 水力計算的基本公式	194
§ 4-2. 临界流速及临界坡度的計算	197
1. 全苏水利科学研究院公式 2. П. В. 叶夫多基莫夫公式 3. 罗耶尔公式 4. 苏联“水力落煤与水力运输設計指导”建議的經驗数据	
§ 4-3. 明槽兩相流水力計算的基本类型	203
1. 第一类問題 2. 第二类問題 3. 第三类問題	
附录	209
参考書目	217

緒 論

生产的發展和愈来愈多的新技术的采用必然会提出一系列科学技术問題要求解决，同时在人們解决这些問題的过程中也一定会推动科学技术的发展。由于水利及采矿工程中水力机械化的發展，尤其是采煤工業中水力采煤的出現，提出了一系列水力学問題，而这些問題已不是普通水力学所能解决的了。这样就促进了新的水力学理論——射流理論与兩相流理論（水力运输理論）的发展。虽然目前这两方面的理論还没有得到完善的发展。但在生产發展的要求与推动之下，正在逐漸形成一套独立的完整理論。因此，服务于采煤采矿事業的工程技术人員和科学工作者，有必要掌握这一新的基础理論的发展水平，以現有的理論来指导生产，同时又反过来推动这一理論的发展和进一步完整。

水力开采在十九世紀三十年代就已經得到了应用，主要是用在砂金的开采方面。1830—1839年，俄国已开始用水力来开采烏拉爾的金矿，从而水的射流开始在采矿工程中得到了应用。1880—1886年，水力开采的方法在烏拉爾和西伯利亞的一些矿山中得到了改善与較广泛的采用。在这一时期，工程师 M. A. 紹斯塔克 (Шостак) 进行了水枪射流的研究。但这一阶段中主要是利用天然压头造成的射流来进行开采，同时也只是以自然坡度来进行無压水力运输。1891年，И. А. 吉姆 (Тим) 發表了“噴嘴是砂金水力开采的主要工具”一文，对射流的一些問題进一步做了研究。但是由于当时生产水平發展的限制和社会制度的限制，不可能使射流和水力运输的理論得到很大的發展。真正的发展是在十月革命以后，由于水力机械化得到了广泛的采用，因此大大推动了射流与兩相流理論的发展。

早在1918年，在列宁的支持下与 P. Э. 克拉遜 (Классон) 的建議下，組織了泥煤的水力开采，在这里第一次用專門的离心泵——煤泥泵来进行有压水力运输。1928年苏联第一次出现了用煤水泵进行有压水力运输。1936—1937年，在工程师 В. С. 穆奇尼克 (Мучник) 的倡議下，苏联第一次在煤矿中采用了水力机械化。1938 年頓巴斯出现了世界上第一个水力开采的矿井。目前苏联在水力机械化，尤其是水力采煤技术方面是世界上最先进的国家。

衛国战争以后，苏联进行了像伏尔加-頓运河、齐姆良水庫、古比雪夫与斯大林格勒水电站等宏偉的水利工程建設，在这些工程中广泛的采用了水力取土与水力运输。同时在煤炭工業中也进一步發展了水力采煤事業，1952年苏联就有兩座水力化矿井正式投入生产。

所有这些大規模的工程建設都大大的推动了射流与兩相流理論的發展。在这方面全苏水利科学研究院 (ВНИИГ)，全苏水力采煤科学研究院 (ВНИИГидроуголь)，全苏建筑施工組織与机械化科学研究院 (ВНИОМС)，全苏煤矿科学研究院 (ВУГИ)，庫茲涅茨煤炭科学研究院 (КузНИУИ) 等研究單位对射流与兩相流的理論进行了大量的研究与实验工作。

在兩相流的基本理論方面，特別应当指出的是 В. М. 馬卡維也夫 (Макавеев) 在 1931 年提出的扩散理論及 М. А. 維里卡諾夫 (Великанов) 在 1944 年提出的重力理論。这两个理論虽然还并不完善而且都有缺点，但是它們是目前在兩相流方面的主要理論。近十年来，苏联很多研究机关和研究工作者提出了很多兩相流阻力及临界流速計算的經驗公式。在这方面苏联学者 А. П. 尤芬 (Юфин)、В. С. 克諾罗茲 (Кнороз)、Г. Н. 罗耶尔 (Рояр) 及 В. С. 穆奇尼克等人做了不少工作。

在射流理論方面苏联学者 Н. П. 加維林 (Гавырин)、Г. Н. 罗耶尔 В. М. 苏哈列夫斯基 (Сухаревский) 及 Г. А. 捷尔斯切潘諾夫 (Терстеньев) 等人也做了不少試驗与研究。

在人民民主国家中（尤其是波蘭与捷克），水力采煤事業最近也有很大的發展，在射流与兩相流理論方面也有不少研究。如在 1925—1928年波蘭学者 W. 布得雷克（Budryk）提出了管道兩相流运动的理論。

在資本主义国家中，在水力運輸方面也进行了一些实验与研究，如法国建立了一套 8.4 公里長的有压水力运煤末的管道。法国学者 R. 杜蘭德（Durand）也对兩相流进行了不少試驗，并提出了一套計算兩相流損失的經驗公式。美国設計了一条 173 公里的長距离有压水力運輸系統，并进行了相应的試驗。英国也建立了水力運輸研究所。英国学者 R. 华士脫（Worster）与 D. 丹尼（Denny）也进行了这方面的試驗工作并提出了一些經驗公式。

我国在解放前，在水力开采与水力運輸方面几乎沒有發展。只是在东北部分煤矿中采用水砂充填的頂板管理方法，并總結出了一套充填倍綫的計算方法（兩相流問題中的一种）。在射流方面沒有什么研究。

在我国解放后，党对采煤工業給予了極大的重視。当水力采煤在苏联試驗成功后，我們国家也于1956年在萍乡与开滦兩地进行水力采煤的試驗工作。唐山煤炭科学研究院也开始了水力采煤方面的研究工作。但是我国水力采煤事業的大發展是在1958年。当大躍进的形势在我国出現后，煤炭工業中也掀起了轟轟烈烈的以水力采煤为中心的羣众性技术革命运动。广大羣众在总路綫的鼓舞下，破除了迷信，發揮了敢想敢干的創造精神，在短短的几个月內，使我国水力采煤事業获得了飞躍的發展。1958年7月及8月先后在开滦与峰峰兩矿有兩個水力化矿井投入生产，到1958年末我国完全水力化的矿井已經由兩個增加到八个，水力采掘的工作面則增加为 152 个。同时在全国各地創造了很多形式的水枪，煤水泵，給煤机等。在这方面各个矿区，唐山、北京及撫順煤炭科学研究院，上海、北京及沈阳煤矿設計院以及北京矿业学

院，东北工学院等高等学校都进行了不少工作。

特别应当指出的是1958年7月我国开滦煤矿装成了扬程为300米的煤水泵，这是目前世界上扬程最高的煤水泵。峰峰矿利用了地下静压水来采煤，使害水变为利水，为井下水的综合利用起了一个良好的开端。最近时期，东北工学院，龙烟钢铁公司以及其他有关单位在龙烟矿区烟筒山矿成功地进行了无压水力运矿石（铁矿石）的试验，试验证明了水力运矿在技术上是可能的。这为金属矿的水力化运输作了个良好的开端。苏联水力开采专家穆奇尼克认为，这次试验说明象烟筒山这样条件的金属矿进行水力机械化是完全现实的，用水力来运输和提升金属矿是完全可能而且是比较经济的。

与此同时，在射流两相流的理论方面也进行了一定的研究工作，如唐山煤炭科学研究院曾进行了水枪射流冲击力的测定工作，北京矿业学院对高浓度煤浆的水力运输也进行了试验。但是，总的来说我国在射流与两相流方面的理论研究与实践目前还是做得比较少的。

我们党对发展水力采煤事业的方针是坚定不移的。1958年11月11日煤炭工业部“关于发展水力采煤的指示”中提到“水力采煤不仅在经济上和技术上有极大的优越性，而且在政治上具有广泛的群众基础，深得广大煤矿职工和家属的拥护和支持，是完全符合总路线的精神的……”。因此，推行水力采煤是煤炭工业技术革命的中心，这是坚定不移的。”为了突破水力采煤的技术关，指示中说“各大型矿井和矿务局至少应建立一个水力采煤区，作为试点，认真钻研技术”。可以预料，随着我国水力采煤技术革命的日益深入，必然会有愈来愈多的射流与两相流问题提出来要求解决。因此，在党的领导下，在我国广大煤炭工业工作人员的努力下，一定能对这一理论的发展作出更多的贡献。

水力采煤的技术及工艺过程虽然非常简单，但射流与两相流的基本理论却非常复杂，因此现阶段这一理论的发展还不很完善，还没有一个能适用于绝大部分情况的基本理论。目前大部分理论都是从实验

中總結出來的經驗公式，而任何實驗都受時間地點與條件的限制，因此從這些實驗中總結出來的東西也總有一定的局限性。因此，我們對待這些理論應當採取辯證的態度，不能迷信，應當以校驗分析的方法來評價這些理論。

還應當指出的是，我們所研究的這些問題雖然從水力采煤的角度出發的，但是這些規律和有些計算公式對其他礦物的水力開采和水力運輸，對水砂充填和泥漿的水力運輸等都是適用的。

從水力學的角度來看，水力化礦井中基本上可分成兩大系統：一個是清水系統，另一個是煤水系統（也可稱為混水系統或兩相流系

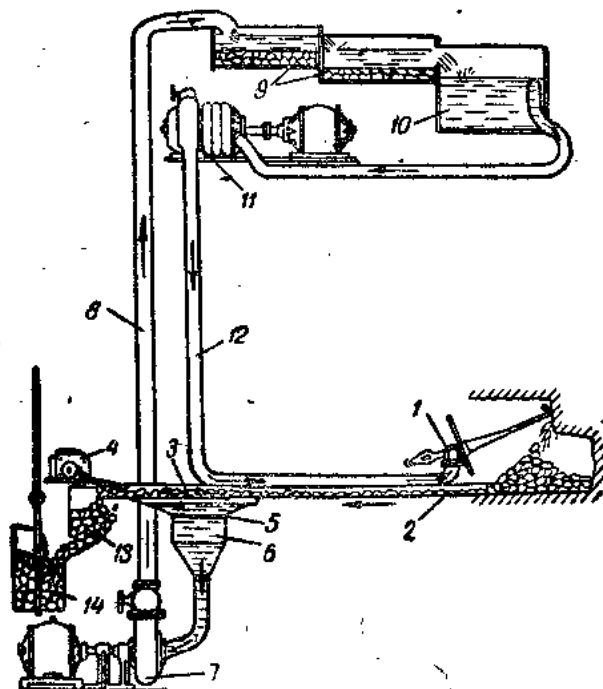


圖 0-1

- 1—水槍； 2—金屬溜槽； 3—脫水運輸機； 4—脫水運輸機的傳動裝置；
5—篩子； 6—煤水倉； 7—煤水泵； 8—煤漿管； 9—沉淀池；
10—蓄水池； 11—水泵； 12—水管； 13—儲煤倉； 14—提升箕斗。

統)。我們用圖 0-1 來具體說明這兩個系統。清水系統是從蓄水池 10 開始經過高壓水泵 11、高壓水管 12 到水槍 1 射出的射流止。在這一系統中，運動的物質只是純水。煤水系統是從采煤掌子中煤被破碎後開始，經過溜槽 2 至煤水倉 6，然後由煤水泵 7 經過煤漿管 8 送至地面。在煤水系統中運動的物質是煤與水的混合液。

清水系統的前半部分（即從蓄水池開始至水槍止）的問題，主要是管路計算的問題。關於管路計算的問題已經在普通水力學中研究過了。但是對水由水槍噴出後的高壓射流的性質及運動規律，以及水槍結構對射流的影響等問題，就不屬於普通水力學的範圍了。這是我們第一章“射流理論”所要敘述的問題。

煤水系統中溜槽的運輸是屬於無壓流動，而提升煤漿管部分是屬於有壓流動，這兩部分的運動規律屬於兩相流的範圍，將分別在本書的第三章及第四章中加以敘述。而在第二章中我們將討論兩相流本身的結構及物理性質的問題。

無論高壓射流或兩相流的理論，都是基於普通水力學的基本理論發展起來的。因此，在學習這一部分內容的時候，首先應當具備普通水力學的知識。其次，由於我們主要是研究水力采煤中的水力學理論，因此也應當對采煤工程的知識有一定的了解，而本書所敘述的內容則是“水力開采機械化”和“礦山運輸”等課程的技術基礎理論。

第一章 射流理論

流体不受固体边界的阻止而在同一种或另一种流体介质中运动，这种运动就叫射流。按照其运动情况，射流可分为两种，一种是射流射入与其本身相同的介质中，这称为淹没射流（如：水射入水中和空气射入空气中）；另一种是液体射流射入气体介质中，这称为非淹没射流（如水射入空气中）。

淹没射流射出后，射流本身与其周围介质混杂在一起，没有自由面。非淹没射流射出后能保持其独立的流束，并有自由面。

目前对淹没射流的研究比较多，其理论也比较完整。对非淹没射流（尤其是对中、高压射流）研究得还很少，理论也不完整，大部分是经验公式，而且这些经验公式都有特定的应用条件。编者除了比较系统的介绍这些公式以外，并对这些公式进行了校验。

在水力采煤中所用的射流是非淹没射流，因此，在我们这一章里主要是讨论非淹没射流。但由于两种射流的有些理论是类似的，有些非淹没射流的问题也与淹没射流有联系，所以在开始讨论非淹没射流之前，对淹没射流的一般性质也作一个简单的介绍。

§ 1-1. 淹没射流的性质

淹没射流离开出口以后，由于粘性的作用，静止流体介质阻碍运动介质的运动，因此射流流体质点与静止介质就产生了相互混杂的作用。这种混杂一方面阻碍了射流的运动；另一方面由于静止的流体介质被运动的流体带着一同运动，因而参加运动的流体质量逐渐增加，射流断面也逐渐扩大。在紊流的情况下由于射流有横向脉动速度的存在，射流质点在横向脉动速度的作用下与周围介质产生了质点交换，

这是产生混杂的主要原因。在实际問題中，絕大多數淹沒射流都是屬於紊流。因此，下述淹沒射流理論都是对紊流的情况而言。

射流断面及速度变化的情况如图 1-1 所示。射流与周圍靜止介質有質点交換的部分称为边界層；在射流中間有一部分与周圍靜止介質沒有質点交換而速度永远維持射流出口速度的部分称为等速核心。但随着射流离噴嘴出口距离的加大，参加質点交換的范围扩大了，因此边界層逐漸扩大，而等速核心則逐漸縮小，最后等速核心完全消失。等速核心开始完全消失的那个断面称为过渡断面。射流出口断面称为起始断面。在起始断面与过渡断面之間的一段射流称为起始段；而过渡断面以后的射流就称为基本段。

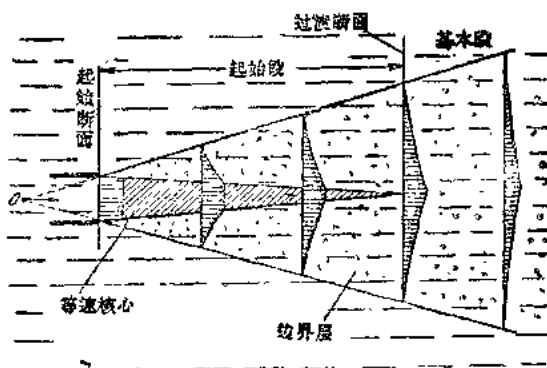


圖 1-1. 淹沒射流断面及速度变化。

现在来研究射流核心速度的变化規律。在起始段中射流流速是不变的，永远維持出口流速 u_0 ，而在基本段中，射流的軸心速度將随离噴嘴出口距离的增加而逐漸减小。

根据 А. Я. 米洛維奇 (Милович) [6] ① 对空气所做的試驗及研究得出了射流基本段軸心流速的变化規律为

① 此处及以后章节的括号中所列的号码，是本書末的參考書目中 所編排的序数，如 [6] 即系指參考書目中的第 6 号參考書。

$$u_m = \frac{\text{常数}}{l} = \varphi \frac{u_0 d_0}{l}, \quad (1-1)$$

式中: u_m ——离出口断面距离为 l 处的軸心流速;

u_0 ——出口断面流速;

d_0 ——出口断面直徑;

l ——离出口断面的距离;

φ ——系数, 米洛維奇認為 $\varphi = 6.0$ 。

Г. Н. 阿勃拉莫維奇 (Абрамович) [8] 对气流的淹沒射流所做的試驗中得出了如下的軸心流速变化規律

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{0.96}{\frac{al}{R_0} + 0.29}, \quad (1-2)$$

或

$$u_m = \frac{0.48}{a + 0.145 \frac{d_0}{l}} \frac{u_0 d_0}{l}, \quad (1-3)$$

式中: R_0 ——出口断面半徑;

a ——系数, 对空气 a 可用 $0.07 \sim 0.08$ 。

比較公式 (1-3) 与 (1-1) 可知, 实际上兩式的結構形式是一致的, 只是在公式 (1-3) 中以 $\frac{0.48}{a + 0.145 \frac{d_0}{l}}$ 代替公式 (1-1) 中的 φ 。也就是

說, 在阿勃拉莫維奇公式中把 φ 看成是一个变数。

过渡断面上 $u_m = u_0$, 故把 $u_m = u_0$ 代入公式 (1-1) 及 (1-3) 可求出起始段的長度 l_H 。

用米洛維奇公式可求得起始段的長度为:

$$l_H = 6 d_0,$$

用阿勃拉莫維奇公式可求得:

$$l_H = 4.8 d_0.$$

这两公式所得起始段長度有些差別, 其原因在于試驗的条件不同, 故所得結果也稍有差別。

对水的淹没射流，根据 В. М. 科諾瓦洛夫 (Конновалов) [6] 的試驗得出下述軸心流速的計算公式

$$u_m = \frac{\beta}{1 + \beta \frac{d_0}{l}} \frac{u_0 d_0}{l}, \quad (1-4)$$

式中， β ——實驗系数，科諾瓦洛夫認為 $\beta = 2.9$ 。

所以公式 (1-4) 也可写成，

$$u_m = \frac{0.145}{0.05 + 0.145 \frac{d_0}{l}} \frac{u_0 d_0}{l}. \quad (1-5)$$

比較公式 (1-5) 与 (1-3) 可知水的淹没射流与空气的淹没射流軸心流速計算公式在結構上完全一样，所差的只是實驗系数不同而已。

根据很多實驗資料証明，淹没射流的边界是直綫，其扩散角 α (射流边界綫的夾角) 約为 14° 。

§ 1-2. 非淹没射流的結構特征

非淹没射流的結構特征随着噴嘴工作压力的不同，而有明显的差别。可按噴咀压力的不同，把射流分成低压中压与高压三种类型。

1. 低压射流 ($P < 5 \sim 10$ 大气压)

低压射流的結構如圖 1-2 所示，在長度方面可以把它分成四段。

1) 第一段——紧密段 水流保持了紧密状态，像一个整体一样，透明清晰。断面上任一点的流速都相同。表面有波浪，其波幅随离噴嘴出口的距离而逐漸增大。波幅增大到一定程度后，射流表面就开始碎裂，同时吸入空气，由于吸入的空气量較小，射流碎裂为大塊水片，此时就进入第二段。

2) 第二段——核心段 在这一段中射流表面已开始碎裂为大塊水片，并帶有气泡，而中間則仍保持有紧密的核心。但随着离噴嘴距离的加長，核心断面愈来愈縮小，到最后完全消失，此时第二段就結束了。

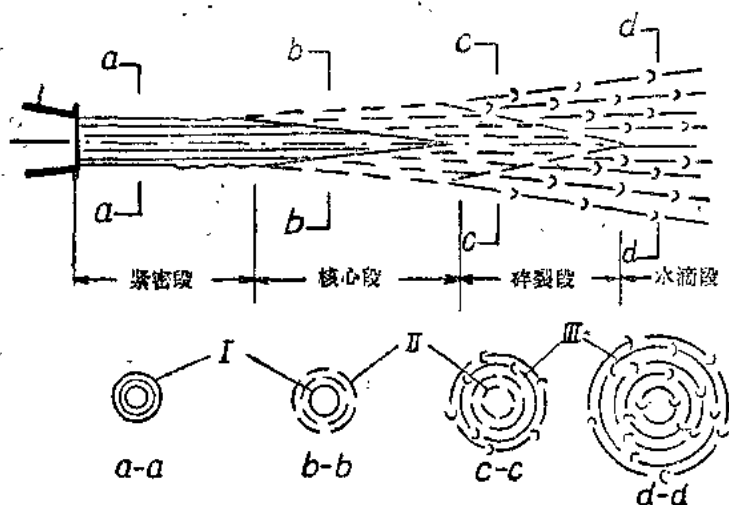


图 1-2. 低压射流结构图。

3) 第三段——碎裂段 在这一段中吸入空气逐渐增加，射流表面的大块水片进一步碎裂为水滴，而中间保持大块水片的部分也随着离喷嘴距离的加长而逐渐缩小，最后完全变为水滴。在第三段中，射流呈乳白色。

4) 第四段——水滴段 射流中吸入大量空气，全部流体都变成水滴。水滴之间被空气介质所隔离。

射流的横断面又可分成三个区域（图 1-2）。第 I 区域完全是紧密水流，第 II 区域则为大块水片，并带有气泡，第 III 区域中水全部变为水滴。

从上述分析可看出，在第一段中，射流断面全部是第 I 区域，如图 1-2 的 a-a 所示；在第二段中，射流断面中间是第 I 区域，而边上是第 II 区域，如图 1-2 的 b-b 所示；在第三段中射流断面中间为第 II 区域，边上为第 III 区域，如图 1-2 的 c-c 所示，而第四段中断面上全部属于第 III 区域，如图 1-2 的 d-d 所示。

2. 中压射流 ($5 \sim 10 < p < 30 \sim 50$ 大气压)