

# 固液两相流泵的 边界层理论及其应用

梁 冰 朱玉才 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 固液两相流泵的边界层 理论及其应用

梁 冰 朱五才 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书主要介绍离心式固液两相流泵的边界层理论及其应用。全书共分六章,分别介绍固液两相流泵的边界层方程、动量积分方程及其求解,离心泵的叶片型线方程,离心式清水泵性能对比试验及边界层理论在叶轮设计中的应用。

本书可供从事力学、机械、电力等研究的科技人员及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

固液两相流泵的边界层理论及其应用/梁冰等著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011677-1

I. 固… II. ①梁… III. 两相流动-离心泵-边界层理论-理论研究 IV. TH311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 058866 号

---

责任编辑:童安齐 / 责任校对:包志虹

责任印制:刘士平 / 封面设计:张放

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年8月第一版 开本:850×1168 1/32

2003年8月第一次印刷 印张:4 5/8

印数:1—3 000 字数:118 000

定 价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

# 前 言

固体物料的管道水力输送技术,已有 120 多年的发展历史<sup>[1,2]</sup>。近年来,这一技术已得到了迅速的发展。美国、巴西、加拿大等国相继建设了浆体管道输送线。离心式固液两相流泵是固体物料管道水力输送的关键设备,它随着管道水力输送技术的发展而发展。

研究固液两相流体在离心泵内的运动规律,完善其设计理论和设计方法,一直是国内外大专院校、科研机构的教授和企业研究人员十分重视的课题。

目前,固液两相流离心泵在使用中所暴露的主要问题是效率低、寿命短。其主要失效形式是磨粒磨损失效。而设计中的问题主要表现在“对所设计的方案或对所选择的参数等设计行为的预测”方面。设计师除非凭着其经验或所掌握的对比资料,否则很难对所设计的产品在通过验证之前有一个比较满意的预测。当然,固液两相流离心泵的技术问题与很多因素相关,如设计的可靠性,制造、安装、使用、选型的合理性,以及基础工业的水平,但这毕竟反映出一个问题——离心泵,尤其是固液两相流离心泵设计所需的理论基础仅依赖具有局限性的欧拉(Euler)理论。

“欧拉理论局限于仅从物理上考虑流入流出状态,而忽略了水的动力量沿叶片的变化(沿程变化)”。而在此理论的基础之上,将固液两相流理论应用在其设计上,所得到的结论也只能是反映流入流出状态即叶轮的出入口参数(如几何比、固液速度比等)。

边界层流动属于两相流体的动力学问题,不过这种动力学问题是在给定叶轮的出口或入口参数之后,以流体相对于过流表面的沿程变化规律为对象来探索流体在过流表面的边界层流动

规律。

固液两相流泵的边界层理论主要研究离心泵过流表面的流动规律,即边界层流动规律。而这种规律是以过流表面为其主要边界条件,是在沿程的变化过程中反映出来的。它所揭示的规律以及参数之间的关系正是这种变化过程的反映。固液两相流泵的边界层理论,其应用分为两个方面:其一是用该理论对离心式固液两相流泵进行过流表面的水力损失的分析,即先分析叶道流区的速度场,计算边界层动量损失厚度,再求出过流表面的切应力,并由其对过流表面的切应力的积分可获得水力效率在理想状态下的理论计算值,它是各过流表面流动损失理论分析的基础;其二是用该理论确定二维叶片式水轮机的型线方程,该型线方程主要由两个因素——边界层分离和泵的理论扬程决定。边界层的分离可由边界层理论来分析确定,而泵的理论扬程正是以欧拉方程所确定的离心泵的基本方程为其表现形式。离心泵叶片的型线方程是边界层理论与欧拉理论的结合,它不仅表达了流动的出入口这两种状态,同时也反映了流体的沿程变化,它说明了流体在叶片表面流动的全部过程。

从流体在离心泵内流动的整个过程而言,固液两相流泵的边界层理论与欧拉理论的有机结合将给离心泵的设计带来质的飞跃。

本书共分六章,主要介绍固液两相流泵的边界层方程、动量积分方程及其求解方法、离心泵的叶片型线方程、边界层理论在叶轮设计中的应用以及对比试验。

由于我们的水平所限,不足和缺点在所难免,请予以指正。

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 离心式固液两相流泵的研究现状 .....	1
1.2 离心式固液两相流泵边界层理论概述 .....	7
<b>第二章 固液两相流泵的边界层方程</b> .....	9
2.1 概述 .....	9
2.2 层流边界层和湍流边界层 .....	9
2.3 固液两相流体的一般方程.....	14
2.4 固液两相流泵叶片边界层微分方程.....	17
2.5 固相动量方程和连续方程.....	28
<b>第三章 固液两相流泵的动量积分方程及其求解</b> .....	38
3.1 固液两相流边界层动量积分方程.....	38
3.2 固液两相流动边界层动量积分方程的近似解.....	43
3.3 边界层厚度的有限次逼近.....	65
3.4 过流表面边界层动量积分方程的一般式.....	69
<b>第四章 离心泵的叶片型线方程</b> .....	72
4.1 概述.....	72
4.2 离心泵的边界层分离.....	73
4.3 叶片型线方程.....	76
4.4 欧拉方程的应用.....	80
4.5 速度系数的分析.....	83
4.6 小结.....	86
<b>第五章 边界层理论在叶轮设计中的应用</b> .....	88
5.1 概述.....	88
5.2 叶轮参数.....	89

5.3	叶片型线的确定	94
5.4	实例分析	101
5.5	小结	120
<b>第六章</b>	<b>离心式清水泵性能对比试验</b>	<b>122</b>
6.1	概述	122
6.2	试验用叶轮设计参数	122
6.3	对比试验	124
6.4	试验结果分析	131
6.5	结论	132
<b>参考文献</b>		<b>134</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 离心式固液两相流泵的研究现状

离心式固液两相流泵的研究,就其方法上而言,可分理论分析和试验两个方面;从其内容上来看,包括外特性的研究和内部流动规律的研究。

### 1.1.1 国内研究概况

#### 1. 内部流动规律的研究

对固体颗粒在泵内运动规律的研究,石家庄杂质泵研究所的赵振海在清华大学读研究生时,在国内首次采用高速摄影技术,研究了固体颗粒在叶轮内的运动规律<sup>[6]</sup>。其后,清华大学的戴江,采用高速摄影技术研究了固液两相紊流在离心泵内的流动规律,完成了博士学位论文<sup>[7]</sup>。

如上所述,采用高速摄影技术对半开式离心泵叶轮内固液两相流动进行了摄影研究,得到了固体在叶轮内的运动规律。

西安交通大学的姜培正等<sup>[8]</sup>,对闭式泵叶轮内的固液两相流进行了高速摄影试验研究,得到了泵叶轮内固体颗粒群的速度分布和浓度分布,以及单颗粒在叶道内的运动轨迹及速度变化。

1992~1998年,清华大学的吴玉林等研究了杂质泵内固体颗粒的运动规律<sup>[9,10]</sup>。

#### 2. 外特性的研究

固液混合物——浆体,对离心泵性能影响方面的研究,最早起始于石家庄水泵厂。在1976年,该厂首次提出“砂泵砂浆性能试验研究报告”<sup>[11]</sup>。在试验过程中,该厂采用6PH型灰渣泵,粒径 $d_s =$



1mm, 比重  $\rho_s = 2.58 \text{g/cm}^3$ , 研究了浆体的浓度  $C$ 、对泵的扬程、效率及轴功率的影响。

1983~1985年, 石家庄杂质泵研究所利用 4PN 型泥浆泵, 进行输送颗粒粒径为  $d_s = 0.075 \text{mm}$ 、 $0.16 \text{mm}$ 、 $0.70 \text{mm}$ 、 $\dots$ 、 $7 \text{mm}$  固体物料的浆体性能试验, 系统地研究了浆体的浓度、比重、粒径对泵性能的影响<sup>[12]</sup>。

清华大学分别于 1986 年和 1989 年提出了试验报告<sup>[13,14]</sup>, 并进行了固液混合物对泵性能影响的研究。

1986~1987 年, 石家庄杂质泵研究所对 6BA-8 型, 6/4E-AH 型, 6/4LXL-H-36 型离心泵输送泥沙  $d_s = 0.071 \text{mm}$ 、河沙  $d_s = 0.154 \text{mm}$ , 在不同浆体浓度下进行了系统的试验, 研究了不同泵型的性能变化规律。其试验结论为: “各种泵型在不同浓度下, 其性能变化是不同的, 用清水理论设计的 6BA-8 型泵不适合输送浆体; 在一定的浓度下, 各种杂质泵(包括 4PN 型泵)输送细颗粒浆体时, 泵的效率有时高于清水时的效率; 输送粗颗粒浆体时, 一般低于清水泵的效率; 各种泵型, 在输送浆体时都存在一个最佳输送浓度”<sup>[15]</sup>。

何希杰根据上述试验结果, 从理论上分析了浆体的浓度、黏度对渣浆泵性能的影响<sup>[16]</sup>。

1990 年, 江苏理工大学的陈次昌等研究了离心泵叶轮内固液两相流动和泵的性能<sup>[17]</sup>。

### 1.1.2 国外研究概况

国外离心式固液两相流泵的研究, 大体上可分为三个发展阶段<sup>[18]</sup>。

第一阶段:

20 世纪 30 年代到 60 年代: 这一阶段的研究人员, 从分析固体颗粒在泵内的运动入手, 提出计算公式。主要有三个代表性成果。

(1) 1937 年, M. P. 奥布雷恩(O'Brien) 等人在“管道输

砂”<sup>[19]</sup>一文中,对固体颗粒在离心泵叶轮内的运动进行了分析,并通过试验研究了颗粒粒径固液混合物的体积浓度对泵性能的影响。由于在固液混合物中水对固体物传递能量,作为混合物的整体,流动方向要改变,在叶轮出口处,绝对速度的圆周分量在减少,泵的理论扬程降低,而其速度的圆周分量的减少随混合物的浓度和粒径的大小而变。他们用  $4\text{in}^1$  的离心泵在转速为  $1750\text{r}/\text{min}$  的条件下,输送颗粒粒径  $d_s=0.13\text{mm}$  和  $d_s=0.305\text{mm}$ ,比重  $\rho_s=2.6\text{g}/\text{cm}^3$  的砂水混合物进行试验。其试验结果为:“扬程随浓度的增加而下降,功率随浓度的增加而增加”。这一结论被后来的大量试验所证实。

(2) 1942年,L. C. 费尔班克(Fairbank)在发表的“对离心泵性能的影响”<sup>[20]</sup>一文中,分析了固体颗粒和水质点在离心泵叶轮内的运动规律及固体在叶轮内的受力情况。

他根据受力分析,得出固体颗粒的运动方程式。这是在固液两相流离心泵叶轮内,固体颗粒运动最早的研究成果,为以后固体颗粒的分析奠定了基础。

费尔班克还提出了输送固液混合物时,泵的理论扬程表达式。该式除了固相和液体质点在叶轮出口处的轴面速度外,还包含了混合物的体积浓度、固体的比重及混合物的容重等参数。这个公式就是后来的固液两相流离心泵的基本公式。

他利用  $3\text{in}$  离心泵对输送固体颗粒分别为  $d_s=0.8\text{mm}$ 、 $0.034\text{mm}$ 、 $\dots$ 、 $0.001\text{mm}$ ,比重分别为  $\rho_s=2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 、 $2.76\text{g}/\text{cm}^3$  三种物料进行对比试验。其试验结论为:“在相同的流量条件下,泵的扬程曲线和效率曲线随着混合物的浓度的增加而下降”。

(3) 1962年,太田启吉良发表了一篇题为“砂泵理论的考察”的文章<sup>[21]</sup>。在文章中,他将离心式砂泵的叶轮和泵体内的流动作为弯曲流道及其在流管外面外加压力的问题进行了研究,利用图

---

1)  $1\text{in}=2.54\text{cm}$ ,下同。

解法表示出了固体颗粒在叶轮内不同时刻的运动状态和轨迹。

在这个阶段,还有 1927 年的 W. B 格理高利(Gregory)<sup>[22]</sup>、1933 年的三云<sup>[23]</sup>、1939 年的掘田正雄<sup>[24]</sup>、1958 年的佐佐木<sup>[25]</sup>、1959 年的真野一德<sup>[26]</sup>、1961 年的赫比奇(Herbich)<sup>[27]</sup>等,他们利用离心泵输送各种不同混合物来研究浆体浓度等参数对泵性能影响。其主要结论为:

泵的扬程随着浓度的增加而下降;

泵的功率随着浓度的增大而增加;

泵的效率随着浓度的增加而下降;

泵的最高效率点向小流量区偏移。

第二阶段:

20 世纪 60 年代到 80 年代:开始采用了先进的测试手段(如高速摄影)观察颗粒在泵内的运动,用以验证所提出的颗粒的运动方程,以确定数学模型。

该阶段主要有 6 个代表性的研究成果:

(1) 1963 年,板谷树、西川孝雄在“关于砂泵的研究”<sup>[28]</sup>一文中,分析了固体颗粒在砂泵中的运动规律和受力情况,同时用高速摄影机对固体颗粒在泵内的运动轨迹进行了拍照,并对之进行了分析。固体颗粒在叶轮内的受力有离心力、惯性力、压力梯度产生的力、黏性力。并由力的平衡条件,得到了固体在运动方向和法线方向上的运动方程式,以及固体颗粒在小区段内的相对速度公式。同时按如下条件进行了试验:

叶片出口安装角分别取为 15°、25°、35°、45°;取三种玻璃球,其平均粒径分别为 12.57mm ( $S=2.52$ )、8.82mm ( $S=2.90$ )、5.19mm ( $S=2.87$ );对固体颗粒的运动轨迹进行了高速摄影。其试验结果为:当叶片安装角为 25°~35°范围内,流出角和叶片安放角相近;颗粒出口的计算值与实测值也大体一致。

(2) 1967 年,Л. П. 别洛鲁斯切夫(Белорусцев)在“关于固液混合物中固体颗粒在矿浆过流部件中的运动”<sup>[29]</sup>一文中,分析了固体颗粒在离心式矿浆泵叶轮中的运动规律和受力状况。根据颗

粒在叶轮中力的平衡关系,求得了颗粒相对运动方程式,并得到了叶片工作面和非工作面的磨损判别式。

(3) 1972年,В. К. 苏波隆(Супрун)出版了《泥浆泵的磨料磨损及其防护》<sup>[30]</sup>一书。书中论述了磨料颗粒在叶轮和泵壳内的运动规律,并附带高速摄影拍摄的颗粒在泵内的流动状态图。

该书论述的研究成果为:

1) 叶道内固体颗粒运动轨迹的特点是:小颗粒(1~2mm)大致沿着叶片的工作面运动,而大颗粒(8~10mm)由于离心力的作用,其运动背离工作面。

2) 叶轮直径等于310mm,大颗粒出口角为30°~35°,而小颗粒出口角则为10°左右。

3) 小颗粒分布较均匀,大颗粒集中在泵壳内壁。

(4) 1975年,А. 扎里亚(Заря)发表了“固液混合物中固相在离心泵产生扬程中的作用”和“固液混合物中固相对离心泵扬程的影响”<sup>[31,32]</sup>等文章。他在文章中分析了颗粒受力和混合浆体对扬程的影响,得出了泵送混合物时,扬程与转速、混合物的流量、固体颗粒的密度、粒径以及叶轮出口宽度等参数之间的经验公式;得出了泵效率与混合物容重、粒径和叶轮直径之间的关系式。列举了高速摄影机对钢球( $d=7.4\text{mm}$ )和铝球( $d=7.5\text{mm}$ )在泵内运动的各种速度的实测值。他的研究结果表明:“在清水最高效率点的左侧——小流量区,输送浆体时泵的效率高于清水时泵的效率,而在右侧——大流量区,则低于清水时泵的效率。”

(5) 1978年,Л. С. 任沃托夫斯基(Животовский)等在《抽送磨蚀性固液混合物的叶片泵》<sup>[33]</sup>一书中,叙述了泵的结构、设计和应用。它是一本渣浆泵的专著。

(6) 1980年,官江伸一在“关于砂泵的扬程特性”<sup>[34]</sup>一文中,分析了固体颗粒在泵叶轮内的运动和受力状态,并用高速摄影机拍照了颗粒的运动轨迹。又根据颗粒在相对运动方向和法线方向上力的平衡条件,得出了颗粒的运动方程式。通过试验,确定出特定渣浆泵的理论扬程修正系数,摩擦损失、扩大损失系数公式。这是首次研究渣浆泵流动损失的重要成果。

### 第三阶段:

从 20 世纪 80 年代开始采用有限元等方法,借助于计算机对固液混合物在泵内的运动进行数值分析和计算。此阶段的主要研究成果有:

(1) 1980 年, M. 罗克(M. Roco)和 F. 雷哈特(F. Reinhart)在“利用有限元法计算离心泵叶轮内的固体颗粒的浓度”<sup>[35]</sup>一文中,分析了颗粒的受力情况和浓度分布状态;再由固体颗粒所受力的平衡条件,得出了颗粒的相对运动速度。通过对渣浆泵运行的观察发现,叶轮有效运转寿命由最大局部磨损来确定;根据数值计算,可以按着粒径的范围预测最佳叶片形式;叶轮的最终设计方案是最佳水力型式和最佳磨损型式相兼顾。

(2) 1982 年, G. 格拉鲍(G. Grabow)发表“离心泵内二相流动”<sup>[36]</sup>的文章。该文从离心泵叶轮流道中二相流(液—固)滑动模型出发,通过对固体颗粒所受力的分析,得到了固体颗粒和水流的运动速度公式以及泵效率的计算式,计算结论为泵的效率低于清水时的效率。

(3) 1983 年, В. Я. 卡列林(В. Я. Карелин)在《叶片泵磨损》<sup>[37]</sup>一书中,专门讲述了离心式固液两相流泵的磨损机理、类型、实例及预防措施。书中指出,叶片的磨损强度随着泥沙的颗粒尺寸的增大而增强。

在颗粒尺寸增大到 0.35mm 以前比大颗粒砂粒的磨损强度增加的速度要快。颗粒增加会引起叶片进口区的显著磨损,颗粒尺寸小于 0.25mm,叶片出口处的磨损将特别显著。

(4) 1985 年,峰村吉泰、村上光清和泽茂田在“离心泵内固体颗粒的运动”<sup>[38]</sup>一文中,分析了固体颗粒和液体质点受力情况,在主流区内的运动及其相关力的变化规律,同时研究了固体颗粒与壁面之间撞击速度的变化,得出了旋转坐标系中水流运动方程式和固体颗粒运动方程式。

(5) 1985 年, M. C. 罗克等在“离心式泥浆泵压出室内的水力损失”<sup>[39]</sup>一文中,分析了压出室内的水力损失,利用有限元法计算了环形压出室的速度分布,指出水头损失与压出室的形状、流量、

浓度和从叶轮流入的边界条件等因素密切相关。

在这个阶段还有许多成果,其中有 1986 年 Л. С. 任沃托夫斯基和 Л. А. 斯莫依洛夫斯卡娅(Л. А. Смойловская)合著的《固体混合物工程力学和泥浆泵》<sup>[40]</sup>,比较详细地研究了固体颗粒运动规律和速度变化规律以及对泵性能的影响,同时讲述了渣浆泵设计理论和设计方法;2000 年,宇野美津夫、王新明、吴玉林等人在“固液二相流泵叶轮内流动的研究”一文中指出,固液二相流动时泵的性能低于水单相时的性能,颗粒的状态对泵叶轮内的压力分布、压力变化有很大的影响等。

以上简要介绍了国外离心式渣浆泵研究成果,特别是着重介绍了固体颗粒和液体在泵内运动规律,以及它们对泵性能的影响。从上面介绍中可以看出以下几个方面:

(1) 国外离心式渣浆泵研究工作开展较早,如果从 M. P. 奥布雷恩等研究固液二相在泵内的运动规律算起,距今已有 60 多年的历史。

(2) 固体物的存在,对泵的性能有很大的影响。扬程随着混合物浓度的增加而降低;泵的效率随着浓度的增加而下降。但在一定的条件下,输送混合物时泵的效率有可能高于清水时的效率。

(3) 小颗粒沿着工作面运动,对叶片工作面 and 出口边产生磨损,大颗粒离开工作面运动,对入口边产生磨损。

(4) 国外渣浆泵研究工作的手段和设备也经历了几个发展阶段,先后采用了多层涂层技术、高层摄影技术、图像显示技术、计算机设计计算和有限元分析等技术。

## 1.2 离心式固液两相流泵边界层理论概述

离心式固液两相流泵的边界层理论是以工程应用的需求为背景,根据黏性流体的一般边界层理论而提出的一种以反映流体沿程变化为其主要规律的适合于离心式固液两相流泵的流动损失分析及其叶片型线设计的工程理论。

它将离心泵内流道的流动分成两个部分:边界层和边界层外

的主流区(图 1.2.1),并将其流场简化为二维不可压缩定常流动。在二维离心场内,主流区的流动因其流速梯度接近零,可以不考虑内摩擦切应力的作用,故按理想流动处理,符合势流的流动规律。而在过流件表面的薄层内因其流速由零急速增加至  $W_0$ ,流速梯度很大,黏滞作用显著,流动规律复杂,这一薄层叫作过流件的边界层。在边界层内,简化所给定的固液两相流体的一般方程式,得到近似的但却能反映过流表面流动的主要规律的理论。

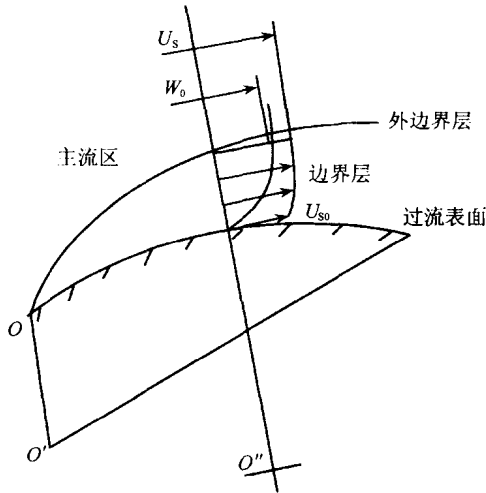


图 1.2.1 主流区和边界层

固液两相流泵的边界层理论主要研究离心泵过流表面的流动规律,即边界层流动规律。而这种规律是以过流表面为其主要边界条件,是在沿程的变化过程中反映出来的。它所揭示的规律以及参数之间的关系正是这种变化过程的反映。固液两相流泵边界层理论的应用主要分两个方面:其一是用该理论对离心式固液两相流泵进行过流表面水力损失的分析;其二是利用该理论确定二维叶片式水轮机的型线方程。离心式叶片的型线方程是边界层理论与欧拉理论的结合,它不仅表达了流动的出入口的两种状态,同时也反映了流体的沿程变化,它说明了流体在叶片表面流动的全部过程。

## 第二章 固液两相流泵的边界层方程

### 2.1 概 述

在实际工程问题中,如在黏性流体绕过物体的流动中,常常需要计算物体表面的摩擦阻力;黏性流体在管道进口段中流动,也常常需要计算流动阻力,用  $N-S$  方程式求解是很困难的。为此,普兰特首先提出边界层概念,对于计算表面阻力问题提供了有效的计算方法。边界层理论的建立,在流体力学中可以说是划时代的贡献。它不仅开辟了将黏性流体力学应用于解决工程实际问题的广阔前景,同时也进一步阐明了研究理想(无黏性)流体力学的实际意义以及理想流体所不能解释的一些现象,如流体在绕过物体后发生分离现象等。由于应用广泛,边界层理论得到了迅速发展,现已成为流体力学中的一个重要分支。

### 2.2 层流边界层和湍流边界层

#### 2.2.1 层流边界层

边界层理论是在黏性很小的或者是在大雷诺数流动情况下,研究它的近似求解方法。边界层流动是黏性流中另一种特殊的流动情形。在大雷诺数情况下, $N-S$  方程可以简化,因此可以得到在黏性很小情形下的近似解。

对于大雷诺数流动,虽然惯性力远远大于黏性力影响,但实验发现,无论雷诺数多大,在壁面附近的流动黏性力的影响是不能忽略的,因为与理想流有本质的区别。

普兰特提出,像水和空气具有普通黏性的流体,绕过物体的运



动黏性影响仅限于靠近物体表面的一薄层内,在这一薄层外边,黏性影响是可以忽略的。我们把靠近物面附近受到黏性影响的这一薄层,称为边界层,通过来流速度  $U$  绕过平板的流动,在平板上形成边界层,如图 2.2.1 所示。

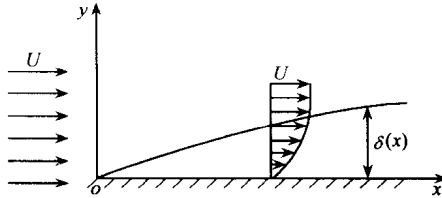


图 2.2.1 边界层示意图

在平板上,游离平板的来流速度  $U$  是均匀的,在靠近平板附近受到黏性影响,产生沿  $y$  方向几乎是均匀分布的速度,并且和上游来流速度  $U$  相同。从图上可以看出,边界层厚度  $\delta(x)$  自前边缘开始沿流动方向是逐渐增加的。这是由于平板阻滞作用的缘故。

在大雷诺数流动的情况下整个流场可以明显分成两个区域:

(1) 在靠近物面附近的薄层内流动的区域,称为边界层。边界层内流动的主要力学特征是,在固体边界上满足黏附条件,且边界层内速度有物面上的零值,在离开物面很短的一段距离内达到边界层外部流动的数值,变化异常急剧,因而速度梯度  $\tau = \mu \partial u / \partial y$  可以达到很大的数值,所以必须考虑黏性力的作用,而且与惯性力有相同数量级大小。次流域内为有旋流动。

(2) 在边界层外侧的流动区域,称为外部流动。在这个区域内速度梯度很小,因此黏性不起作用可以忽略,可视为理想流体,而且可以认为是有势流动(无旋流动)。

这两个区域在边界层的边界线上相互匹配,这个边界层边界线就是一般称为的边界层厚度。但由于边界层流动趋于外部流动是渐进的而不是突然变化的,所以边界层厚度是不确定的,具有一定的任意性。为了确定边界层厚度,人们人为地做了规定。

边界层厚度定义:当边界层内速度,从物体上速度为零值增加