

1963

化学工程学校际学术讨论会论文集

(内部资料 注意保存)

1964 年 印

前 言

一九六三年十二月十日至十七日高教部委托华东化工学院在上海举行了“化学工程”校际学术讨论会。这次会议受到了有关领导和各方面很大的重视与支持,除高等院校外,科学院和企业部门有关单位也参加了会议。

这是一次检阅成果、交流经验的会议。会上检阅了近年来在党的领导下,高等院校、中国科学院和企业部门等各条战线在化学工程科学研究工作上的成果。会上宣读了五十九篇论文,分发交流资料五篇。在这些论文中,“化学工程”学科规划中的重点项目得到了较集中的反映,同时显示出各单位在化学工程科学研究上已积极开展工作,并取得了初步成绩。会上还交流了研究动态、经验与今后的打算。因而,会议不仅加强了各单位之间的学术交流,还使大家对今后如何完成学科规划、努力赶上世界先进水平,有了更为明确的看法,增强了信心与决心。让我们高举毛泽东思想的伟大红旗,积极投身到阶级斗争、生产斗争和科学实验三大革命运动中去,为国民经济和国防尖端科学的发展,为科学技术赶上世界先进水平,为社会主义祖国的繁荣富强而共同努力,不断前进!

为了更好地交流和推广这次会议的成果,决定将会上提出的论文汇编成论文集,作为内部资料出版。论文集中共刊登六十一篇论文及摘要。并参照化学工程十年规划各研究项目,将论文分为:1. 传递过程原理;2. 化学反应工程;3. 蒸馏及吸收;4. 萃取及浸取;5. 离子交换、吸附及特殊分离过程;6. 传热原理及过程;7. 固体流态化;8. 其他等八大类。

由于缺乏经验并限于水平,在编辑工作中,必有很多缺点和错误,希望同志们多予批评和指正。

化学工程学校际学术讨论会论文集编委会

1964年12月

化学工程学校际学术讨论会论文集编委会名单

苏元复、汪家鼎、朱葆琳、郭慕孙、陈家麟、

沈济川、林纪方、丁緒淮、張震旦

目 录

前言

一、傳遞过程原理

自由射流中动量、热量和质量的傳遞·····	袁权、程德鑫、徐金耀、朱葆琳·····	1
气(汽)-液双相流傳质动力学的研究·····	陈丙珍、段道順、沈复·····	13
水平管內的气液并流·····	周肇义·····	21
单孔篩板塔中液滴流体力学現象的研究·····	丁緒淮、盛强、陈大亨·····	31
滴外傳质系数的研究·····	苏元复、卢鴻业、毛之侯、陈同芸·····	47
单滴內的傳质(I)·····	張震旦、瞿谷仁、吳志泉、郑景濤、朱至英、林依明·····	63
流动情况下液液界面傳质阻力的研究·····	·····	·····
·····	張冬富、謝声礼、毛履珠、李盘生·····	77
CO ₂ -H ₂ O 系統吸收和解吸时界面阻力产生的机理·····	·····	·····
·····	赵恒琅、严子綱、馬因明、李盘生·····	89
湿壁塔液相傳质理論分析(摘要)·····	蔣国樑、朱葆琳·····	95

二、化学反应工程

Pachuca 型气体攪拌反应器的研究 I. 流动型态, 压降和停留時間分布·····	·····	·····
·····	苏立民、陈家鏞·····	99
气相湍流扩散火焰·····	袁权、程德鑫、徐楚雄、徐金耀、朱葆琳·····	105
固定层宝塔型煤气发生炉模型流体力学实验研究·····	謝丰毅、孙貽芳、楊嘉名·····	113
液液連續攪拌反应器內分散相的混和效应 I. 混和效应的理論分析·····	·····	·····
·····	陈敏恒、陈良恒、袁渭康·····	119
管式反应器的研究 I. 噴流攪拌及流体停留時間分布性质·····	·····	·····
·····	楊守志、安震濤、陈家鏞·····	129
液液互溶相快速反应动力学研究 I. 絕热反应动力学的近似处理(摘要)·····	·····	·····
·····	顾其威、翁元垣、張宁国·····	141
液液互溶相快速反应动力学研究 II. 扩散过程反应动力学(摘要)·····	·····	·····
·····	洪如瑾、吳叔筠、顾其威等·····	145

三、蒸餾及吸收

穿流塔液儲及其影响因素·····	馬克承·····	151
多管塔流体动力学性能的初步研究·····	洪大章·····	157
乳化填料精餾塔的分离能力·····	王紹亭、孙中汉等·····	163

泡罩齿缝张开程度与空气流量的关系	路秀林、丁伯民、琚定一	181
某些操作、结构因素对泡罩塔板雾沫夹带的影响	丁伯民、史美庚、路秀林、琚定一	193
喷射泵式吸收器中双相流的流体力学及传质研究	段道顺、陈丙珍、沈复	209
球柱吸收塔的特征	施亚钧、邓修、涂晋林	223
乳化式填料塔用水吸收二氧化碳过程的性能	謝端綬、蔣年喜、程懋鈺、潘志榮等	231
三相三元系统蒸馏过程的理论塔板数计算方法的研究	余益年	241
不同压力下进行氨-水蒸馏的塔板效率	尤彩真、楊舒元、陈家鏞	263
醋酸-苯、醋酸-四氯化碳二元系统汽液平衡数据的测定(摘要)	江成璋、方书贵、陈淑霞、章元琦	269
并流逆流塔研究	丁健椿、何焜、范国中、周咸通、俞翊棠、屠之龙、顾翠翠	271

四、萃取及浸取

填料萃取塔与脉冲填料萃取塔中的液泛速度	沈自求、馮朴蓀	275
填料萃取塔中引入空气对液储影响的研究	陈文靖	283
液-液萃取脉冲筛板塔中的两相流动特性的初步研究	汪家鼎、沈忠耀、汪承藩等	291
油脂浸取器的分类、评价和弓型浸取器研究的初步报告	刘复光、姚景凤、郑澤賢等	295

五、离子交换、吸附及特殊分离过程

几种国产离子交换树脂的性能	湯惠芳、黃國昌、王承明	303
三元系统气体热扩散柱分离理论	邓頌九、陈煥欽	315
液体有机碳氢化合物在无对流热扩散池中的扩散 I. 光学折射法测定液体有机碳氢化合物在无对流热扩散池中的折射率梯度及扩散系数	叶振华	323
4A 型分子筛对含乙烯气体的选择性吸附性能	張远謀、程钱楚等	331
用活性炭从溶液中吸附鉍	曾宪富、肖凤石、林敏坚	341
纵向流速变化对色谱溜出曲线的影响	朱葆琳、陈大卫、丁景群	347

六、传热原理及过程

圆管进口区的层流传热	袁权、朱葆琳	353
沸腾传热的机理	林紀方、丁惠华、楊友麒、徐敦頤	361
固体溶质溶液的沸腾传热	林紀方、楊友麒	377
过渡流时气固系统的传热(I)	顾毓珍	401
在过渡范围内($2300 < Re < 10^4$) 硅素有机载热质在水平管内的对流放热研究	石秉三	407
气流旋涡式强化器应用于强化对流放热过程的研究	賴盛剛、陈丙珍、沈复	423

声振动对流体边界层的影响及其对放热过程强化机理的探討	.....	陈丙珍、賴盛剛、張伯嗣、沈复	433
噴动床干燥谷物的研究 III. 几何参数对噴动性质与水份迁移量和顆粒温度等关系	.....	沈惠子、謝声礼、呂惠玲、張希賢、顾毓珍	449
谷物流态化干燥的初步試驗	.....	譚天恩、譚式人	455
維尼綸絲束干燥动力学实验与計算	.....	王榮年、章名耀	465
蒸汽和水之間噴射換热的初步研究(摘要)	.....	刘明杰	481
在平面傳热和在沸騰床层中水分汽化对放热系数的影响(摘要)	.....	王榮年	483
稻谷悬浮状态干燥初步試驗研究与分析(摘要)	.....	章名耀	485

七、固体流态化

聚式錐形流化床的流体力学特性的研究	.....	秦霽光、邱信森、陈洪生、刘連书、崔秀云	487
流化床气体分布篩板最适宜孔率的研究	.....	秦霽光、丛启明、陈洪生、邱信森、刘連书、何連春	491
錐形流化床的流体力学特性 I. 临界流速和最大压降	.....	石炎福	503
逐級流态化浸取中顆粒与流体的运动(摘要)	.....	喻名祥、張和宗、李希光、吳鴻恩	509
单孔板流态化床內的气泡現象(摘要)	.....	王中礼、周秀琴、傅宗賀	511

八、其 他

F691 凝絮剂的应用(I)	.....	龙世明、蕭錦、陈煥禧、邓頌九	513
論由因次分析法所得的无因次群的数目	.....	石炎福	519
H ₂ S-H ₂ O 双温度化学交換法生产重水的級联設計研究	.....	費維揚、戴为智	527
液滴傳质(萃取)过程界面騷动的“光紋技术”研究法	.....	張兆奎	551
化学工程学符号命名方案(草案)	.....		.....555

自由射流中动量、热量和质量的传递

袁 权 程德鑫 徐金耀 朱葆琳

(中国科学院化学物理研究所)

引 言

近代由于化学工业的飞跃发展,射流中动量、热量和质量的传递问题,引起了人们的注意。射流技术在生产实践中的应用相当广泛。例如,流体的混和,喷雾干燥,液体的雾化或分散等等化工单元操作以及在射流中伴随化学反应的燃烧过程。此外,由于射流中没有固体壁的存在,研究射流对研究流体流动机制亦颇有意义。

自由射流中的动量传递现象,已被研究得相当深入,Forstall等^[1]有过这方面早期文献的归纳。实验结果表明,一般射流都是湍流。由于射流中没有固体壁的存在,湍动促使处于周围相对静止的第二种流体与射流本体混和,射流的速度逐渐下降而质量流增长,但总的动量不变。实验也表明了,自由射流具有边界层的属性,即所需寻找的解答的空间在径向(或横向)伸展不远;压力梯度给予运动的影响甚小;速度分布在和射流体相垂直的各截面上,用无因次速度和无因次距离标绘都获得了同一类型的函数曲线,即表明了通用函数 $u/u_0=f(y/x)$ 的存在。各国学者在综合实验事实的基础上,相继涌现出大量理论分析的研究工作。Tollmien^[2], Howarth^[3], Tomotika^[4], Kuethe^[5], Абрамович^[6]等人基于Prandtl, Taylor的动量或涡量传递论,假定混合长度 $l(y)$ 为一常数,得到了以级数表达的解答,结果和实验吻合。Hinze^[7]等在假定湍流粘度 ϵ 为常数的基础上亦获得了符合于实验结果的解。Reichardt^[8]在分析实验数据后,提出了轴向动量在径向(或横向)传递的强度正比于轴向动量的径向(横向)梯度的假设,于是把动量方程简化成一个变系数的线性偏微分方程。解的形式是正态分布。总结前人的工作,大致就射流中的速度分布的分析一般理论解都能和实验结果相吻合。但是,理论解常采用级数表达,实用不便,且理论解通常都假定从点源射出,而实际上喷嘴有一定尺寸,在喷嘴附近某一距离内,轴心处的速度是不变的,即有势心区存在,因而,解答只适用于距喷嘴较远的地方,且需引入第二个实验常数。此外,当射流体与其周围第二流体有一定的温度差时,譬如,射流体的温度高于环境时,两者混和的结果使射流体的温度下降而密度上升。因而,射流体的流速比相对于在两者没有温差时,衰减和蔓延得要更快些。同时考虑到重力场中由于密度差的存在而产生的浮力对速度分布的影响,尚没有定量的描述。

由于湍流中的传递过程只决定于流动因素,和流体的本性无关,所以能量和质量的传递应该具有同样的速率。在Forstall^[1]归纳的文献中,大多数作者的结论认为能量和质量较动量传递快得多。Baron^[9,10]把Reichardt的射流理论推广到能量,质量传递方面,并应用于湍流火焰。但是,从各种射流理论推断的结果不尽相同,因而,进行更多的实验考察是必要的。

我们就无温差和有温差场合下的自由射流作了实验考察。测定了:

1. 流速在 30~84 米/秒 ($Re \approx 14,000 \sim 40,000$) 間等温射流軸向和徑向速度分布;
2. 流速为 30, 60 米/秒的不等温射流的軸向和徑向速度分布;
3. 流速是 30~80 米/秒, 温度差 (相对于环境) 分別为 300°C , 200°C , 100°C , 和 35°C 的軸向和徑向温差分布;
4. 30, 60 米/秒时 CO_2 由噴嘴射入大气中的軸向濃度分布; 此外, 还使用电模拟計算法作了动量傳遞的計算, 并在另文中把上述結果用于湍流扩散火焰的分析。

实 驗 方 法

自由射流实验装置流程图見图 1。空气由压缩机輸出, 流經加热炉加热到一定温度, 經噴嘴而复排入大气中。做等温射流实验时, 不需要加热; 当做濃度分布实验时, CO_2 从鋼瓶由湿式流量計計量后送入实验系統, 此时, 加热炉用作混合器, 使 CO_2 和空气充分混

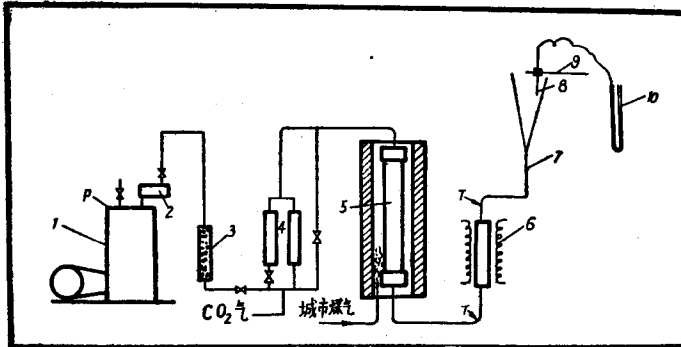


图 1 射流实验设备流程

- 1—空气压缩机; 2—分油器; 3—活性炭除油器; 4—轉子流量計; 5—煤气加热炉;
6—电加热炉; 7—噴嘴; 8—串接管; 9—定位机构; 10—压差計

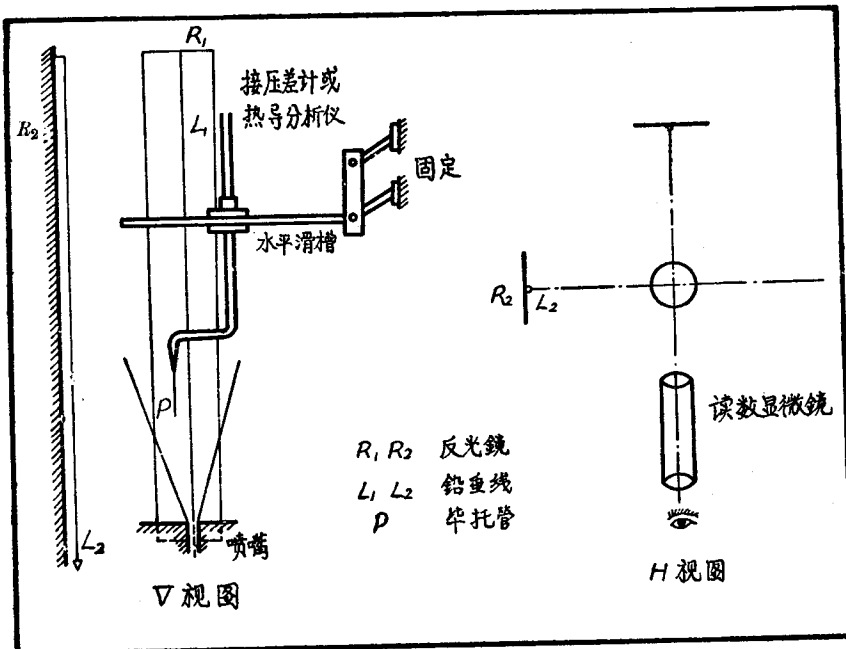


图 2 定位设备示意图

和后,再經噴嘴而排入大气。測定徑向和軸向動量、溫度和濃度分布的定位機構見圖 2。噴嘴形狀見圖 3。噴向是垂直向上。噴口是否水平,用水平度為千分之五的普通水平尺測量,在離噴口中心 20 個直徑處,偏差小於 0.3 直徑。沿噴嘴出口測量的結果,表明出口處的速度是均一的。

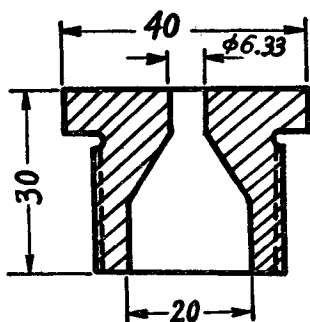


圖 3

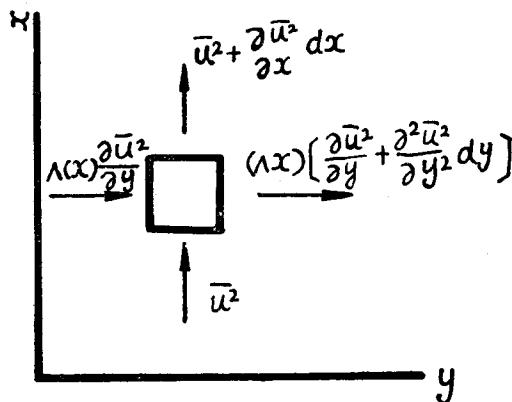


圖 4

噴口直徑是 6.33 ± 0.01 毫米。定位機構軸向讀數誤差小於 2%, 徑向讀數誤差在 6 毫米以內, 小於 0.1 毫米; 6~12 毫米, 12~18 毫米之間分別是 0.2 和 0.3 毫米。速度測量是用無縫注射針的針頭制成的只測量動壓頭的皮托管。測量頭的外徑是 0.50 ± 0.03 毫米。動壓頭測量的相對誤差為 0.2~1.5%。溫度測量用銅-康銅熱電偶, 接頭大小是 0.72 ± 0.02 毫米。用精密毫伏計或精密電位差計測量電動勢, 讀數誤差分別相應為 0.5°C 及 0.05°C 。濃度測量也用上述形式的皮托管取樣; 當噴嘴出口速度是 30 米/秒和 60 米/秒時, 抽樣速度小於 4 毫升/分。此時, 取樣管內樣品流速分別是它們的 1/100 或 1/200。空氣- CO_2 混合物用氣相色譜法分析, 測定誤差約 0.5%。

電 模 擬 計 算

射流問題具有邊界層屬性。考察二維邊界層運動方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

在穩定流動時, 有 $\frac{\partial u}{\partial t} \rightarrow 0$, $\frac{\partial \rho}{\partial t} \rightarrow 0$ 。由實驗得知 $\frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow 0$ 。當忽略粘性摩擦, 合併

(1)(2)式, 得

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

取時間平均, (3)式變為

$$\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{uv}}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

式(4)給出了它的物理概念: 軸向動量的變化率等於軸向動量向徑向的傳遞。在沒有確立 u, v 間函數關係時, 想從式(4)直接求解是困難的。運用 Reichardt 的假定

$$\overline{uv} = -\Lambda(x) \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial y}, \quad (5)$$

式(5)亦可写成

$$\overline{uv} = -(\Delta \bar{u}^2)_x \bigg/ \frac{(\Delta y)_x}{\Lambda(x)}. \quad (6)$$

这个假定,不仅就动量传递过程给出了清晰的物理概念,并由此给出了对自由射流的速度分布用直接电模拟法求解的可能。鉴于物理现象间的类似规律,把(6)式与熟知的欧姆定律 $I = \frac{E}{R}$ 相比,可见轴向动量在径向(或横向)的传递过程和电的传导过程是极为类似的。它们的传递速率,皆取决于推动力 $\Delta \bar{u}^2$ 或 E 和阻力 $\frac{(\Delta y)_x}{\Lambda(x)}$ 或 R 。当我们以电位类比作轴向动量,以电流比拟为动量的径向传递量,电阻代表动量传递时所遇的阻力,于是就可以用电模拟法求解了。合并(4)(5)两式,得

$$\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} = \Lambda(x) \frac{\partial^2 \bar{u}^2}{\partial y^2}. \quad (7)$$

(7)式的电模拟计算线路是熟知的。图(4)是(4)(5)二式的物理含义。

結果和討論

一、等温射流

图5和图6是喷嘴直径为 6.33 ± 0.01 毫米,流速是 $30 \sim 84$ 米/秒条件下的实验结果。图5是不同初速度时动量流速度的轴向分布。图6是不同轴向距离处动量流速度的径向分布。点源时,轴向动量流速度分布方程是^[8],

$$\sqrt{\bar{u}_c^2} / \sqrt{\bar{u}_0^2} = \frac{1}{2c_m \left(\frac{x}{d} \right)}, \quad (8)$$

对有限尺寸的射流,式(8)的一般形式是

$$\sqrt{\bar{u}_c^2} / \sqrt{\bar{u}_0^2} = \frac{d}{2c_m (x+a)}. \quad (9)$$

用 $\sqrt{\bar{u}_c^2} / \sqrt{\bar{u}_0^2}$ 对 $\frac{x}{d}$ 标绘图,斜率就是 $2c_m$, 其中 a 是实验常数, c_m 是动量传递系数。

由表1,不同速度时, c_m 是接近的,说明了速度对动量的传递没有明显的影响。表2中列出了有关文献的结果。

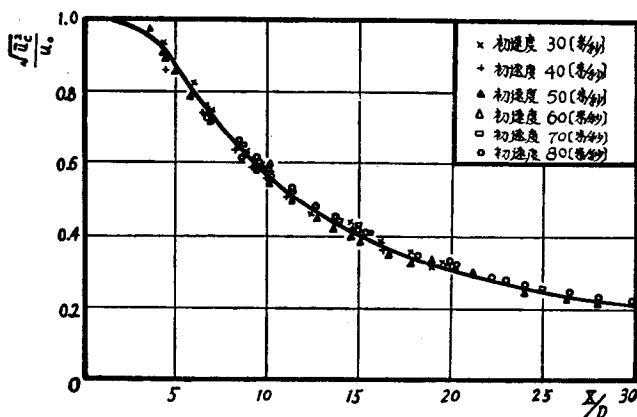


图5 动量流速度的轴向分布

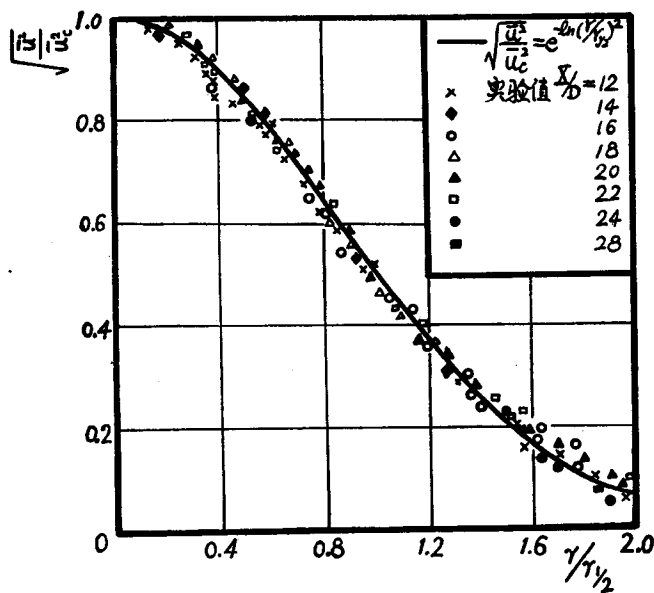


图6 动量流速度径向分布

表1 c_{m_1} 的值

$\bar{u}_0$ 米/秒	30	40	50	60	70	80
c_{m_1}	0.081 ₉	0.081 ₂	0.083 ₃	0.083 ₃	0.083 ₁	0.0840

表2 各研究者的实验结果

研 究 者	c_{m_1}	c_{m_2}
Reichardt ^[8]	0.072	
Corrsin 等 ^[11]	0.0751	0.0691
Albertson ^[11]	0.0806	
Keagy 等 ^[11]	0.0862	0.0754
	0.0747	0.0702
Hinze 等 ^[7]	0.075	
Taylor 等 ^[11]	0.075*	0.0725

* 是平均值, 见[9]

从这些数据看来, 相互间的差别还是较大, 较多的数据在 0.075 左右。而我们求得的 c_{m_1} 较大, 这是因为我们的数据是以 $\sqrt{\bar{u}_c^2}/\sqrt{\bar{u}_0^2} \sim x/d$ 标绘求得的, 而文献上的数据则是以 $\sqrt{\bar{u}_c^2}/\bar{u}_0 \sim x/d$ 标绘求得的。两者差别是由于脉动速度存在, 使得 $\bar{u}_0^2 \neq \bar{u}_0^2$, 而是 $\bar{u}_0^2 = \bar{u}_0^2 + \bar{u}_0'^2$ 。因为皮托管量得的是 $\bar{u}^2$, 显然以 $\sqrt{\bar{u}_c^2}/\sqrt{\bar{u}_0^2} \sim \frac{x}{d}$ 标绘更严谨些。引用 Corrsin^[7] 以热线风速仪测得的 $\bar{u}^2/\bar{u}^2$ 值进行粗略的校正, 那末, 文献的数据和我们的结果是接近的。如取文献值 $c_{m_1} = 0.075$ 并以 c'_{m_1} 表示, 校正后的文献值以 c''_{m_1} 表示, 于是有

$$c_{m1}'' = \frac{1}{2x} \sqrt{\bar{u}_0^2 / \bar{u}_c^2} = \frac{1}{2x} \frac{\sqrt{\bar{u}_0^2 + \bar{u}_0'^2}}{\sqrt{\bar{u}_c^2}} = c_m' \sqrt{1 + \bar{u}'^2 / \bar{u}_0^2} \approx 0.075 \times (1 + 0.45^2)^{\frac{1}{2}} \approx 0.083。$$

图 6 表明了实验结果和描述径向动量流速度分布方程^[11]

$$\sqrt{\bar{u}'^2 / \bar{u}_c^2} = e^{-\ln 2 (r/r_{1/2})^2}。 \quad (10)$$

几乎完全重合。式中 $r_{1/2}$ 是速度等于轴心速度 $\bar{u}_c$ 一半处的径向坐标。显然

$$r_{1/2} = x c_{m1} \sqrt{\ln 4}。 \quad (11)$$

从图 7, 求得的 $c_{m1} = 0.081$, 比由轴向分布求得的 c_{m1} 略小一些。考虑到求取 c_{m1} , c_{m2} 的误差, 可以把从轴向速度分布和从径向速度分布求得的传递系数 c_{m1} 和 c_{m2} 认为是相同的, 以 c_m 表示。在实验范围内, $c_m \approx 0.083$ 。

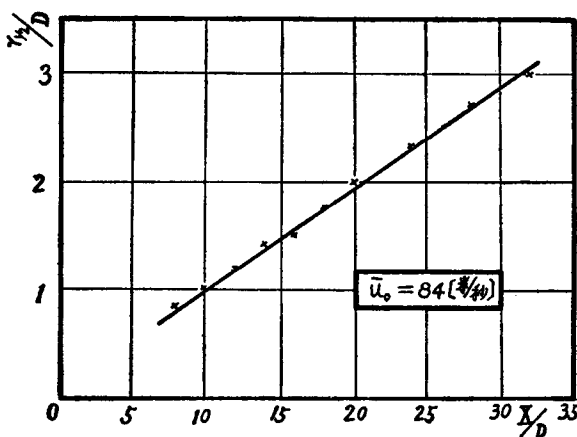


图 7₁ 轴向 $\frac{r_{1/2}}{D} - \frac{x}{D}$ 关系

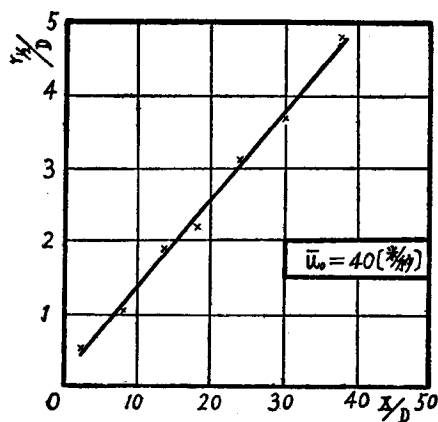


图 7₂ 轴向 $\frac{r_{1/2}}{D} - \frac{x}{D}$ 关系

我们把电模拟解和文献上的实验结果^[11]一起绘于图 8 和图 9。(当然 c_m 取该文献的值)。由图可以看到符合得相当好。图 10 是邻近喷嘴附近势心区中动量流速度分布的实验结果和模拟求解的比较。分析图 8 和图 10 左上角部分, 模拟解的结果即使处于这些区域也能和实验结果吻合, 表明了传递系数可用于射流的起始段。在起始段, 分析求解是困难的。Kuethe^[6] 曾不厌其烦的将运动方程试差求解, 事实上他的求解方法是任意的, 不

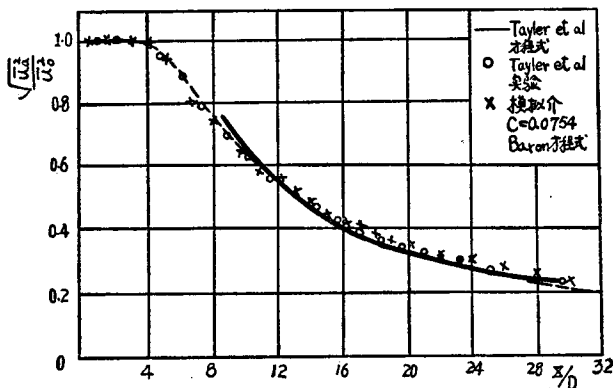


图 8

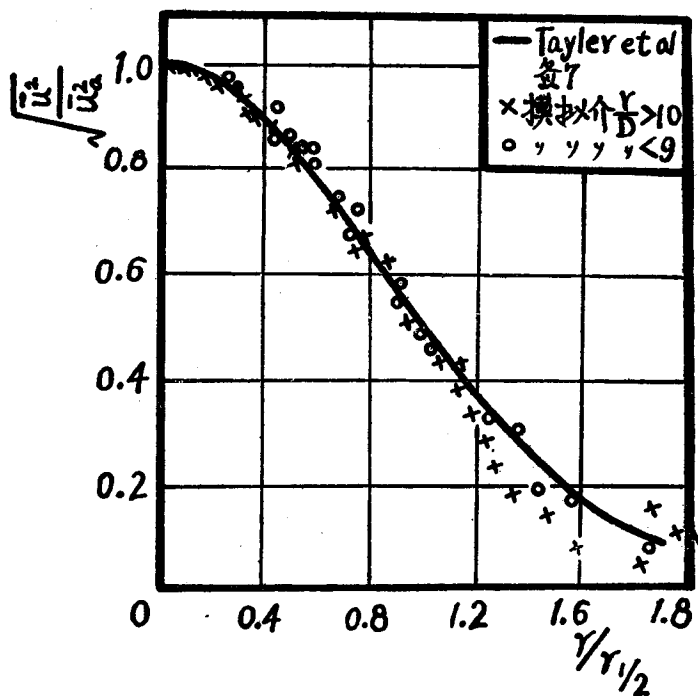


图 9

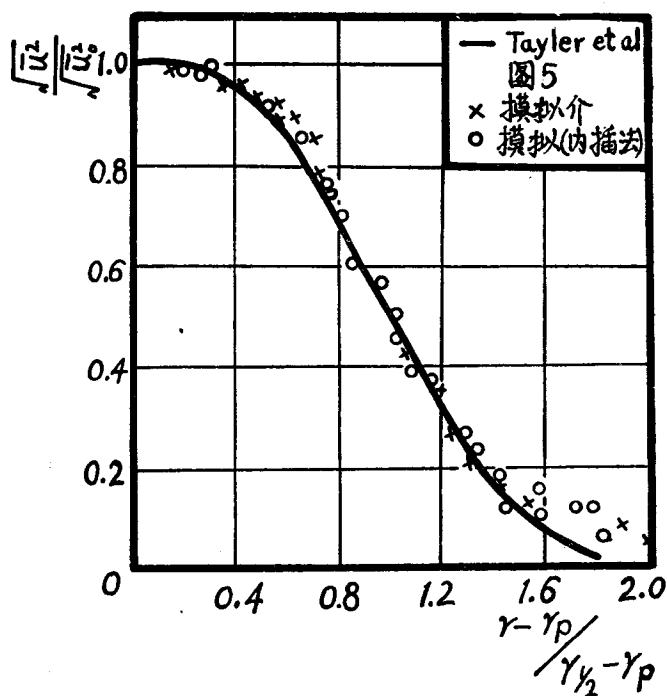


图 10 喷口附近的径向动量流速度比较。

事先知道結果是无法进行求解的。模拟法在起始段和实验数据相符是由于在进行模拟計算时,仅仅只要假定动量傳遞的机制,既不必事先知道解答的函数形式,也不需要簡化的边值条件。只要所提供的傳遞机制是明晰、正确的,那末,模拟計算的結果就会是正确可信的。所以,图 8、9、10 所提供的事实,間接說明了 Reichardt 的假定是正确的,并且可以設想,电模拟計算法能成为处理这类問題的有效工具。

二、不等温射流

当射流体与周圍第二流体亦即环境温度不同时,考虑到重力場的影响,在描述射流运动的方程中必須附加估計浮力作用的一項,动量守恒方程才能成立。这时 Reichardt 的軸对称运动方程为

$$\partial \frac{\overline{\rho u^2}}{\partial x} = \frac{c_m x}{2r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{\rho u^2}}{\partial r} \right) \pm (\rho_s - \rho) g. \quad (12)$$

当浮力和噴射的方向一致时为+。由于式(12)中的 ρ 随温度而变,給方程(12)的解析求解带来了困难。考虑了有关文献的結果和 Taylor 渦量傳遞論的結論,把关系式。

$$\frac{T - T_s}{T_c - T_s} = \left(\frac{\bar{u}}{u_c} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

及 $\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{T_0}{T}$ 一并代入(12)式,經处理,求得了适用于 $(r/c_m x) < 1$ 場合之近似解:

$$\overline{\rho u^2} = \left(\frac{\rho_0 u_0^2 d^2}{4 c_m^2 x^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{c_m^2 x^2} \right) + \frac{g \rho_0 T_0 k}{T_s} \ln \frac{T_s x + k}{T_s}. \quad (14)$$

在我們的实验范圍內 ($x/d < 30$, $T_0 < 600^\circ \text{K}$), 用上式計算表明(表 3), 浮力的作用很小, 可以略去不計。

表 3 浮力的影响

x/d	忽略浮力項所引入的誤差		
	$\bar{u}_0 = 30 \text{ 米/秒}$ $T_0 = 600^\circ \text{K}$ $T_s = 300^\circ \text{K}$	$\bar{u}_0 = 30 \text{ 米/秒}$ $T_0 = 1,000^\circ \text{K}$ $T_s = 300^\circ \text{K}$	$\bar{u}_0 = 60 \text{ 米/秒}$ $T_0 = 1,000^\circ \text{K}$ $T_s = 300^\circ \text{K}$
10	0.51	2.27	0.31
20	2.41	10.2	1.43
30	6.05	24.7	3.46
40	11.5	46.9	6.58
50	18.9	75.8	11.7

图 11 和图 12 是等温和不等温下軸向和徑向的动量分布的比較, 証明上述推断是和实验結果吻合的。

浮力給予动量分布的影响, 基于式(14)可以归結为:

1. 随軸向距离的增加而急剧增加;
2. 和初速度的平方成反比;
3. 随温度差的加大而增加。故而, 当处于高温差, 低流速或在 x/d 較大的場合下, 浮力給予动量分布的影响是要考虑的。表 3 所列的計算結果很好說明了这些因素的影响。

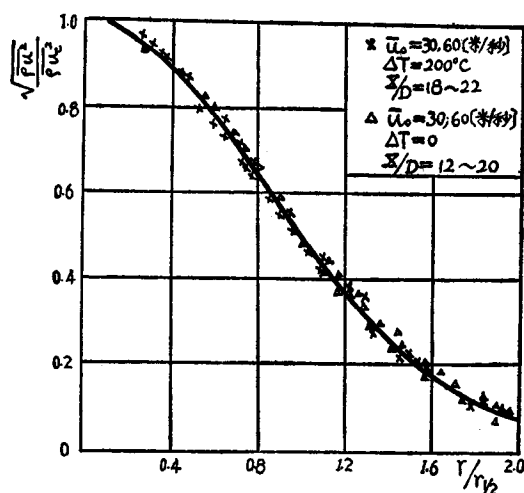


图 11 等温与不等温时径向动量流速分布

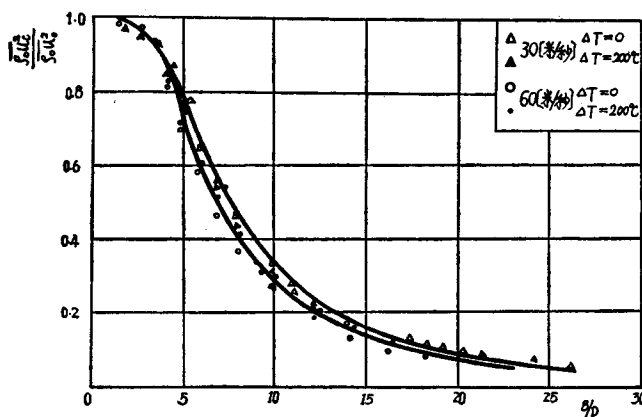


图 12 等温与不等温时轴向重力流速分布

三、温度分布和浓度分布

图 13, 14 是轴向和径向温度分布。实验结果表明速度、温度差(相对于环境)对温度分布没有明显的影响。由 Baron^[5] 能量分布关系式

$$\overline{\rho u c_p \theta} / (\overline{\rho u c_p \theta})_0 = [d^2 / 4c_0^2 x^2] \exp \left[-\left(\frac{r}{c_0 x} \right)^2 \right], \quad (15)$$

与动量分布关系式

$$\overline{\rho u^2} / \overline{\rho_0 u_0^2} = (d^2 / 4c_m^2 x^2) \exp \left[-\left(\frac{r}{c_m x} \right)^2 \right], \quad (16)$$

合并, 并假定各脉动量和时均值的比值不变, 得

$$(\sqrt{\rho} / \sqrt{\rho_0}) (\overline{c_p \theta} / \overline{c_{p0} \theta_0}) = \left(\frac{c_m d}{2c_0^2 x} \right) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r}{c_m x} \right)^2 - \left(\frac{r}{c_0 x} \right)^2 \right]. \quad (17)$$

在轴心处, $r=0$, 得

$$(\sqrt{\rho_0} / \sqrt{\rho_0}) (\overline{c_{p0} \theta_0} / \overline{c_{p0} \theta_0}) = \left(\frac{2c_0^2}{c_m} \right) \left(\frac{x}{d} \right); \quad (18)$$

假定 c_p 不随温度而变, 得

$$(\sqrt{\rho_0}/\sqrt{\rho_c})(\bar{\theta}_0/\bar{\theta}_c) \Big/ \left(\frac{x}{d}\right) = 2 \frac{c_\theta^2}{c_m}; \quad (19)$$

从图 13 实验求得

$$(\sqrt{\rho_0}/\sqrt{\rho_c})(\bar{\theta}_0/\bar{\theta}_c) \Big/ \frac{x}{d} = 0.222,$$

如取 $c_m = 0.083$, 得能量传递系数 $c_\theta = 0.095_9 \pm 0.096$ 。

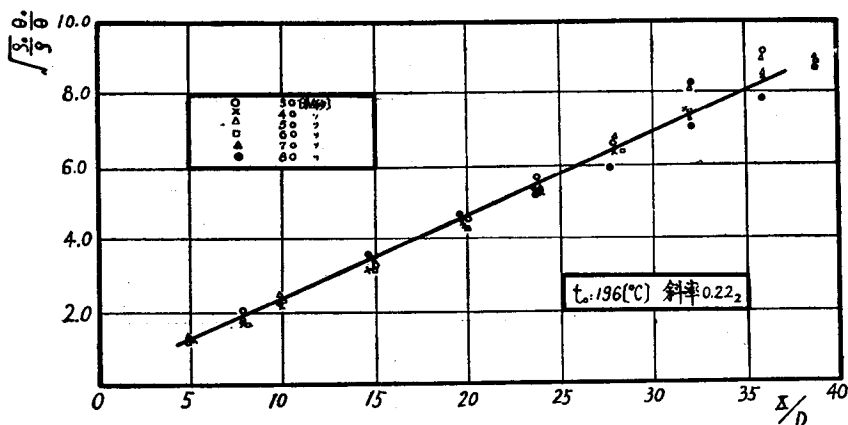


图 13₁ 不同出口速度时轴向温度分布

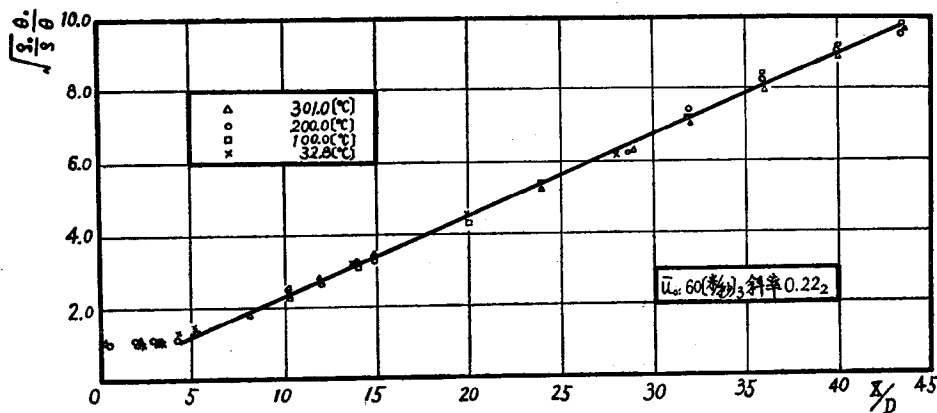


图 13₂ 不同出口温度时轴向温度分布

等温的 CO_2 -空气轴向浓度分布的实验结果(图 15) 也表明了浓度差和流速对浓度分布也没有明显的影响。同样, 由 Baron 质量分布关系式

$$\overline{\rho u c} / (\overline{\rho u c})_0 = (d^2 / 4 c_x^2 x^2) \exp \left[- \left(\frac{r}{c_x x} \right)^2 \right], \quad (20)$$

与动量分布关系式合并得

$$(\sqrt{\rho}/\sqrt{\rho_0}) \left(\frac{\bar{c}}{c_0} \right) = \left(\frac{c_m d}{2 c_x^2 x} \right) \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{r}{c_m x} \right)^2 - \left(\frac{r}{c_x x} \right)^2 \right]. \quad (21)$$

在轴心处, $r=0$, 得

$$(\sqrt{\rho_0}/\sqrt{\rho})(\bar{c}_0/\bar{c}) \Big/ \left(\frac{x}{d}\right) = \frac{2 c_x^2}{c_m}.$$

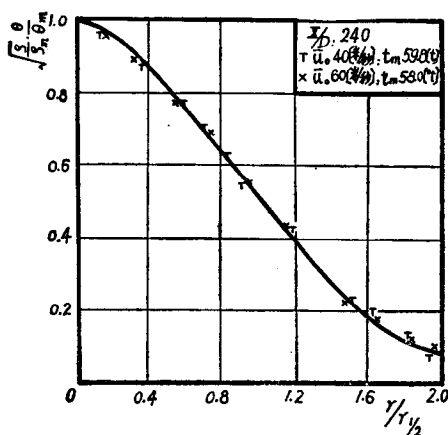


图 14₁ 徑向温度分布

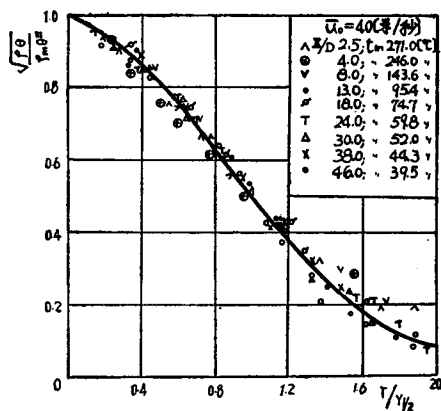


图 14₂ 徑向温度分布

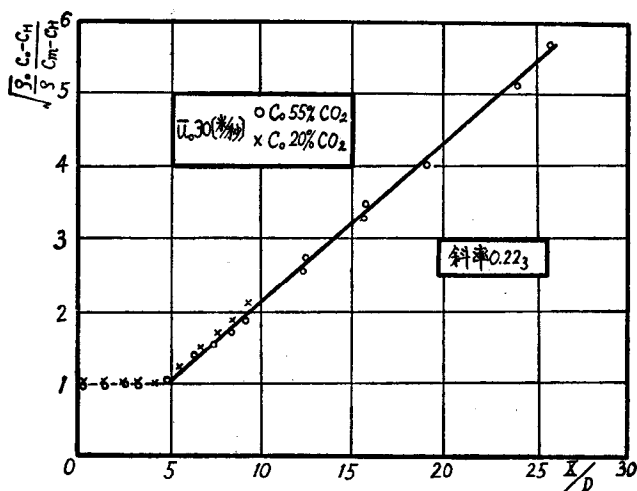


图 15 CO_2 -空气轴向浓度分布

从图 15 实验得 $2c_x^2/c_m = 0.223$ 。如取 $c_m = 0.083$ ，得质量传递系数 $c_x = 0.096_2 \pm 0.096$ 。显然能量传递系数和质量传递系数是等值的。

結 論

1. 考察了流速 30~84 米/秒 ($Re = 14,000 \sim 40,000$) 范围内的等温射流的轴向和径向动量流速度分布。实验表明速度对分布没有显著的影响。动量传递系数 $c_m = 0.083$ 。
2. 非等温场合下的自由射流中动量分布的实验结果，验证了所提出的近似公式的正确性。从而，由此式可以估计各种情况下浮力对动量分布的影响。
3. 实验测定了轴、径向的温度分布和轴向的浓度分布，获得了能量传递系数和质量传递系数，并且两者数值相同，即 $c_\theta = c_x = 0.096$ 。实验还表明了速度对温度和浓度分布没有明显的影响，温度差和浓度差也没有明显的影响。
4. 用电模拟法求解了射流中的动量分布。在所有的 x/d 均能和实验结果吻合，间接证明了 Reichardt 假定有一定的物理意义。电模拟法是计算某些边界层问题的有效工具。

符 号 說 明

c —濃度	T —温度
c_p —定压比热	$u, u', \bar{u}$ —軸向瞬时, 脉动、时均速度
c_m —动量傳遞系数	$v, v', \bar{v}$ —徑向(橫向)瞬时, 脉动、时均速度
c_θ —能量傳遞系数	x —軸向坐标
c_x —质量傳遞系数	y —橫向坐标
d —噴嘴直径	ε —湍流粘度
E —电压	θ —相对温度
g —重力加速度	ν —运动粘度
I —电流	ρ —密度
$l(y)$ —混合长度	$Re-Re = \frac{\bar{u}_0 d}{\nu}$
p —压力	足注
r —柱坐标系的徑向坐标	c —軸心
$r_{1/2}$ —速度等于軸心速度一半处的徑向坐标	o —出口
r_p —势心区的寬度	s —环境
R —电阻	
t —時間	

参 考 文 献

- [1] Forstall, W. and A. H. Shapiro, J. Applied Mech., **17** 399(1950).
- [2] Tollmien, W. and Z. angew, Math. Mech. **6** 468(1926).
- [3] Howarth, L., Proc. Cambridge Phil. Soc., **34**, 185(1938).
- [4] Tomotika, S., Proc. Roy. Soc. London **A165**, 65(1938).
- [5] Kuethe, A. M. and J. Applied, Mech. **2**, A-87 (1935).
- [6] Абрамович, Г. Н., Теория Турбулентных Струй, гос. изд. физ.-мат. лит Москва, 1960,
- [7] Hinze, J. O. and B. G. van der, Hegge Zijnen Applied Sci. Research, **A1**, 435(1949).
- [8] Reichardt, H. and Z. angew, Math. Mech. **20** 297(1940).
- [9] Baron, T. and L. G. Alexander, Chem. Eng. Prog. **47** 181(1951).
- [10] Baron, T., Chem. Eng. Prog. **50**, 73(1954).
- [11] Taylor, J. F., H. L. Grimmett and E. W. Comings, Chem. Eng. Prog. **47** 175(1951)