

喷射器一维设计理论的研究进展

刘志强, 沈胜强, 李素芬

(大连理工大学 动力工程系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 主要概述气体喷射器一维设计理论研究的近期进展, 分别介绍了定压混合理论、定常面积混合理论及其实验研究情况, 最后提出了作者的一些展望。

关键词: 喷射器; 定压混合; 定常面积混合

中图分类号: TQ 051.5

文献标识码: A

符号表

P —压力	T —温度
M —当地马赫数	W —质量流量
A —面积	u —喷射系数
L_c —喷嘴出口至混合室距离	L_{op} —喷嘴出口至混合室最佳距离

下标

p —工作流体	s —引射流体
d —压缩流体	m —混合流体

1、2、3、4—截面

1 引言

喷射器是一种用高压流体吸收低压流体的装置, 因其结构简单, 运行可靠而得到广泛应用。为了满足一定的要求, 气体喷射器一般要求工作流体在喷嘴出口的马赫数大于1, 即形成所谓的超音速喷射器。图1是一种典型的超音速喷射器原理图: 工作流体在收放喷嘴中加速形成高速喷射流, 在吸收室里形成低压, 引射流体进入喷射器的吸收室后在工作流体的作用下加速, 两股流体

在混合室里逐渐形成单一均匀的混合流体, 经过扩压管减速压缩达到一定的背压。喷射器尽管结构简单, 但其内部气体相互作用过程复杂, 机理还不十分清楚, 因而设计理论各种各样。本文通过实验和理论分析, 介绍了作者对喷射器最新设计理论的评述。

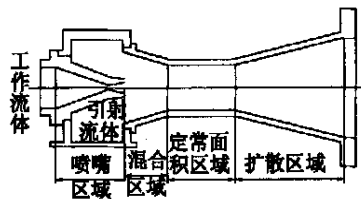


图1 喷射器原理图

2 喷射器一维设计理论研究

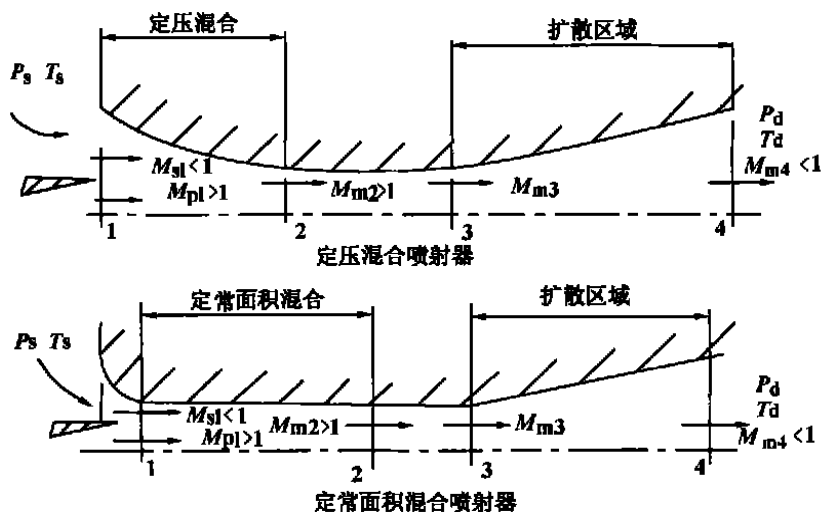


图2 喷射器类型

收稿日期: 2000-06-20

作者简介: 刘志强(1970—), 男, 湖南湘阴人, 大连理工大学硕士研究生。

有均匀的物性分布, 喷嘴和扩散器里面的过程都是等熵过程, 不计喷射器的壁面阻力, 在理想气体的基础上, 运用动量守恒、能量守恒、质量连续性方程计算工作过程, 推导出具有最大压缩比 (P_d/P_s) 或最大喷射系数的喷射器几何参数的优化设计公式。并且把喷射器的效率定义为实际的喷射系数与理想的喷射系数之比。

定压混合理论广泛地应用于喷射器的设计中, 同时也给设计带来许多问题, 最主要的问题是混合阶段流动过程的复杂性, 准确一点说是如何确定混合室形状, 以保证定压混合的充分性和有效性。Keenan 等人忽略喷嘴和扩散器的效率是因为这样可以使问题简化, 况且当时也无法知道喷嘴和扩散器的效率, 同样, 工作流体和引射流体的流动过程也忽略了速度系数。前苏联热工研究所考虑了喷嘴和扩散器的效率以及工作流体和引射流体的速度系数, 对混合室入口段各种不同剖面形状的研究表明: 锥形入口段具有最大的速度系数, 因而一般采用这种形式。

Work 和 Haedrich^[7] 等人的实验表明流体的分子量对喷射系数是有很影响的, 这也是 Keenan 等所没有考虑的。Defrate 和 Hoel^[7] 等修正了 Keenan 等的这个理论, 考虑了理想气体的分子式, 同时也考虑了工作流体和引射流体在喷射器里不同位置的比热容的变化影响, 开发了一个电算程序用来确定分子量和温度分布对喷射器运行的影响, 可因为当时无法知道喷射器里温度变化情况, 比热容的变化就很难精确确定。后来, Khoury^[7] 应用 Defrate 和 Hoel 的理论分析结果与分别

用瓦斯气和正丁烷作为工作流体的实验结果相比较, 发现实验数据和理论分析结果并不一致, 他们认为这是由于工作流体为真实流体并且存在冷却现象所致。

Keenan 等也没有考虑到阻力的影响, 他们当时认为: 在定压混合阶段工作流体在很短的距离内加速至超音速, 当超音速气体流过截面相同的管道时, 阻力的影响是可以忽略的。Hoggarth 和 Francis 试图考虑阻力的影响, 对流动过程作细致的数学描述从而建立一个最优运行工况模型, 但他们假定两股流体的入口温度相同, 正是这一点限制了在实际中的应用。

Keenan 等人的方法可以避免使用一些经验常数, 但是有时候实际的压缩比和喷射系数只有计算值的 80% 左右, 当调整喷嘴到适当的位置时, 实际的喷射系数可以超过计算值的 20%。Watanabe 进行了一些实验以决定喷嘴位置和扩散器长度的影响, 他发现喷嘴相对于混合室存在一最佳位置, 喷射器具有最高的喷射系数, 扩散器长度的增加能提高扩散器的效率而不利于喷射器效率的提高, 但他同时指出喷嘴位置对喷射器工作的影响超出了当时的理论范围。

笔者利用一维定压混合理论^[9] 设计制造了蒸汽喷射器进行实验研究。整个喷射器的各个部分采用活动连接以便对其结构及尺寸进行改变。实验结果证实了 Watanabe 的发现, 喷嘴的出口至混合室入口距离有一最佳位置

L_{op} , 同时发现: 在混合室的直径稍大于理论尺寸时, 喷嘴向混合室移近一点 ($L_c < L_{op}$) 对热泵的工作影响不大, 但远离混合室 ($L_c > L_{op}$) 时, 热泵的工作状况迅速恶化, 如图 3 所示, 图中 $L_c = 32 \text{ mm}$ 为计算最佳距离。

Matsuo^[8] 等人利用矩形横截面混合室和矩形横截面喷嘴的喷

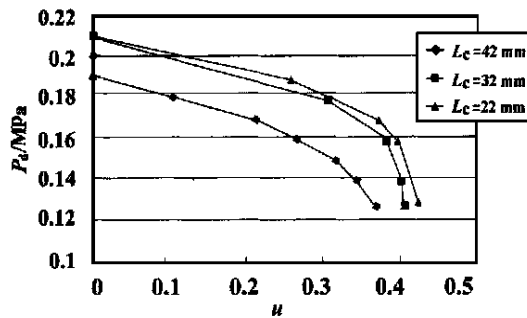


图 3 $P_p=0.45 \text{ MPa}$, $P_s=0.12 \text{ MPa}$, $P_d=f(u)$ 曲线比较

射器, 采取不同的喷嘴 (M_{1p}) 和不同的 Ψ 值 (Ψ 代表了混合室截面与喷嘴截面的面积比) 组合用来观察它们对喷射器工作的影响。他们发现: 给定一个 Ψ 值, 存在一个最佳的压力比 $(P_p/P_d)_{op}$, 可以满足引射流的流量最大而压力比 P_s/P_d 最小; 给定一个固定马赫数 (M_{1p}), 存在一个最优的面积比 Ψ_{op} , 可以满足 $(P_p/P_d)_{op}$ 值最小。同时, 他们依据实验中测量到的压力数据和拍摄到的纹影照片把喷射器的工作性能曲线分成五类。

Nahdi^[7] 等人也观察了面积比对喷射器工作的影响, 他们所用的喷射器是固定在用 R11 作制冷剂制冷系统的制冷系统中, 他们用一圆形截面替代矩形截面以便有可变的面积比 Ψ 。结果表明: 对一给定的 P_s/P_d 和面积比, 仍存在满足最大喷射系数的压力比 P_s/P_d 随面积比的变化而变化。在所有这些条件中存在一个最优的面积

比和最大的喷射系数。Watanabe 也观察了面积比的影响, 得出了最佳值。所有的这些实验结果表明: 当工作条件发生改变时, 喷射器的最优几何参数也改变, 因而, 为维持最优运行, 喷射器的变参数设计看来就很有必要。

当工作流体处于超音速而背压较低时, 所有喷射器都存在壅塞现象。而 Keenan 等人的分析并不能预测这一现象的发生。Munday 和 Bagster^[4] 提出的理论认为: 工作流体从喷嘴里喷射出来并没有立即与引射流体混合, 而是旋转向前, 对引射流体来说正好形成了一个收缩管道, 引射流体就好像在收缩喷嘴里流动一样, 在某一有效截面上达到音速而形成了壅塞现象, 只有通过这一有效截面以后, 工作流体和引射流体才开始混合。他们进一步认为: 发生壅塞的引射流体的有效面积是一个与运行工况无关的常数, 可以由实验测定。Huang^[4] 等人利用 Munday 和 Bagster 的方法及数据计算了这一个有效面积后发现它并不是一个常数而是随运行工况变化而变化的。

2.2 定常面积混合理论

所谓定常面积混合理论是指工作流体和引射流体的混合过程是在截面积不变的情况下完成的, 如图 2 所示。

Keenan 等人在研究定压混合理论的同时也研究了定常面积混合过程, 它们的研究表明: 利用定压混合理论设计的喷射器具有较好的工作特性, 正因为如此, 定常面积混合理论的研究在一段时间内处于停滞状态。

Fabri 和 Siestrunk^[7] 的研究发现一般的喷射器即 $M_s < 1 < M_p$ 在定常面积混合时, 喷射器

里流体的流动有时与背压无关, 而有时与背压有关。Fabri 和 Siestrunk 把混合过程与背压有关的区域叫混合区域 MR, 而把混合过程与背压无关的区域叫超音速区域 SR 或饱和区域 SSR。为了更好地认识其机理, Addy 和 Dutton^[5] 在三维图上把它们表示出来(图 4), 喷射器的运行工况由状态面上的一点来决定。因而, 有了工作流体和引射流体的进口压力比 P_p/P_s 和背压与引射流体的压力比 P_d/P_s , 就可以得到喷射系数 W_s/W_p 。

以图 4 中的 V-X-Z 曲线为例, 当 P_d/P_s 从零开始升高时即从 V 到 X, W_s/W_p 保持不变, 过了点 X 后, P_d/P_s 的增加引起 W_s/W_p 的陡降, 所有类似于 X 点形成一条曲线, 这条曲线作为两个不同区域的分界线。Addy 等人在此基础上, 提出了一种定常混合面积喷射器的流体模型, 把它推广到了引射流体为超音速即 $M_{s1} > 1$ 。这个模型包含了两个基本的组成部分(如图 5 所示): 第一步是对定常面积混合过程作整体分析, 假设在混合入口 1 上工作

流体和引射流体具有均衡的速度和压力分布, 在混合出口 3 上流体充分混合均匀, 在截面 1 和 3 之间运用各守恒方程, 可以得到混合出口流体的状态。但这不能唯一地确定混合过程中的工作状况。第二步作为一种必要的补充, 假定工作流体和引射流体在截面 1 和截面 2 之间不发生粘性相互作用, 是相互独立的等熵过程, 在截面 2 上发生壅塞现象即 $M_{p2} = 1$ 或 $M_{s2} = 1$ 。

分析结果表明: 对定常面积混合喷射器来说, 其运行区域取决于 P_{s1} 和 P_{p1} 的关系(图 2), 如果 $P_{s1} < P_{p1}$, 在 P_d 足够小时, 工作流体膨胀出来在截面 2 处形成最小的气体通道, 引射流体在此发生壅塞, 喷射系数与 P_d 无关而保持不变, 这就是图 4 中的 SR

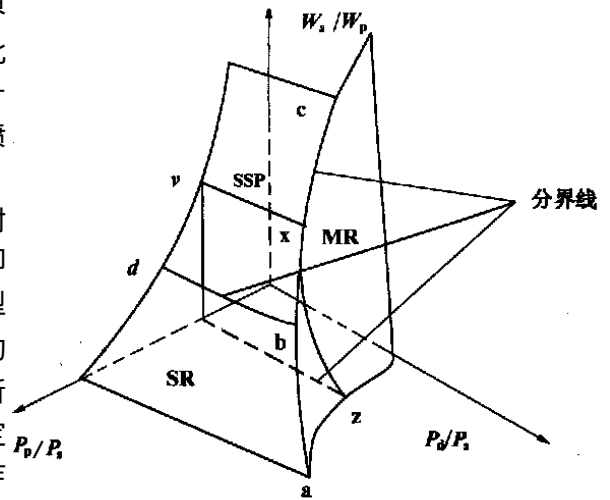


图 4 定常面积混合原理三维表示图

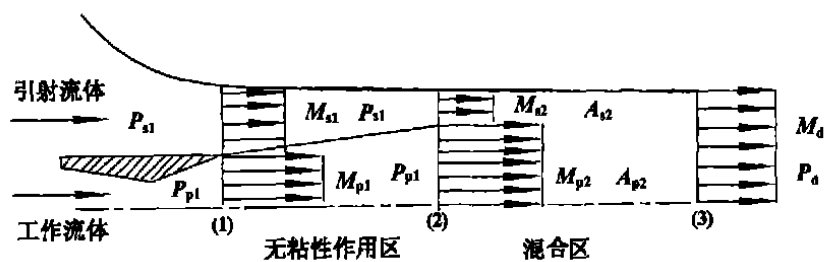


图 5 定常面积混合流体模型示意图

面。如果 $P_{s1} > P_{pl}$, 引射流体逆着工作流体膨胀出来, 工作流体的最小截面积发生在截面 2 处, 当 P_d 足够小时, 工作流体在此形成壅塞, 这种情形便是图 4 中的 SSR 面。当在 MR 面上工作时, 要求 P_d 比较高, 在通过混合区域时引射流体或工作流体保持超音速, 其喷射系数才会随 P_d 的变化而变化。所有的假设都是由定常面积混合理论而得到的, 故此法不适用于定压混合理论。

以上述理论为基础的分析能和实验结果较好的吻合, 除非引射流体的压力非常低, 因为这样的话, 工作流体从喷嘴膨胀出来以后将与混合室的四壁发生相互作用, 流场已经变成了明显的二维, 故一维理论不能说明这个问题。

除了 Addy 等之外, 还有其它一些分析方法, Ziv 和 Wolfshtein^[7] 发展了一维无粘性和轴对称湍流方法, Lu 等人^[6] 发展了一种微分分析方法, 等等。

2.3 一维定压混合理论和定常混合面积理论的比较

一维定压混合理论和定常面积混合理论都是把喷射器里的流动看成一维稳定的理想气体的无粘流动, 并且不计壁面的摩擦影响, 也不考虑热量损失。尽管有不少学者对此加以改进使它更加接近于实际, 但出发点都一样。两理论不同之处在于前者认定混合过程是在等压下完成的, 后者认为

混合过程是在截面积不变下完成的, 这都是一种理想的情况。正是这关键的条件不同, 在对能量、动量和质量连续性三个守恒方程求解时, 求得混合后气体的马赫数 M 、温度 T 和压力 P 的表现形式不同。理论上可以推导, 当 $M_{s1} > 1$ 时, 两者得到的结论基本上相同, 这也就证实了二者没有本质区别。

实际设计中, 利用定压混合理论所设计的喷射器被证明具有较好的工作性能。Addy 等人提供的定常面积混合理论分析方法尽管很少应用, 但已被证明是设计定常面积混合喷射器的较为有效的好方法。所有这些说明, 喷射器的设计理论呼唤一维理论以外的方法。

3 结束语

以上对气体喷射器一维设计理论和实验进行了简单介绍。喷射器虽然结构简单, 但内部机理复杂, 除了应该吸收空气动力学最新的研究成果以外, 超音速喷射器本身还有自己的特点。

用一维方法对喷射器里真实流体的流动进行描述, 精确性受到很大的限制。多年来, 人们运用了不少的二维模型, 试图更为准确地描述喷射器里的流动特别是在混合阶段的流动。特别是近年来, 由于 CFD 的发展, 喷射器的三维数值模拟研究正方兴未

艾。

参考文献:

- [1] KEENAN J H, NEUMANN E P. A simple air ejector [J]. *J Applied Mechanics, Trans ASME*, 1942, **64**: A75—A81.
- [2] ELROD H G. The theory of ejectors [J]. *J Applied Mechanics, Trans ASME*, 1945, **67**: A170—174.
- [3] KEENAN J H, NEUMANN E P, LUSTWERK F. An investigation of ejector design by analysis and experiment [J]. *J Applied Mechanics, Trans ASME*, 1950, **72**: 299—309.
- [4] HUANG B J, JIANG C B, HU F L. Ejector performance characteristics and design analysis of jet refrigeration system [J]. *J Eng Gas Turbines and Power, Trans ASME*, 1985, **107**: 792—802.
- [5] DUTTON J C, MIKKELSEN C D, ADDY A L. A theoretical and experimental investigation of the constant area, supersonic-supersonic ejector [J]. *AIAA J*, 1982, **20** (10): 1392—1400.
- [6] LU K T, KOU H S, LAN T H. Geometrically and thermally non-optimum ejector heat pump analysis [J]. *Energy Convers. Mgmt*, 1993, **34**(12): 1287—1297.
- [7] SUN D. Recent developments in the design theories and applications of ejectors—a review [J]. *J Inst Energy*, 1995, **68** (6): 474—481.
- [8] MATSUO K, SASAGUCHI K, TASAKI K, et al. Investigation of supersonic air ejectors [J]. *Bull JSME*, 1981, **24**(198): 2090—2097, 1982, **25** (210): 1898—1905.
- [9] 沈胜强, 李素芬, 夏远景. 喷射式热泵的设计计算与性能分析 [J]. *大连理工大学学报*, 1998 **38**(5): 558—561.

(何静芳 编辑)

敬告作者

本刊加入“万方数据——数字化期刊群”

为了实现科技期刊编辑、出版发行工作的电子化, 推进科技信息交流的网络化进程, 我刊现已入网“万方数据——数字化期刊群”, 所以, 向本刊投稿并录用的稿件文章, 将一律由编辑部统一纳入“万方数据——数字化期刊群”, 进入因特网提供信息服务。凡有不同意见者, 请另投它刊。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬, 不再另付。

“万方数据——数字化期刊群”是国家“九五”重点科技攻关项目。本刊全文内容按照统一格式制作, 读者可上网查询浏览本刊内容, 并征订本刊。

2001 年 4 月

喷射器一维设计理论的研究进展 = **Recent Advances in the Study of One-dimensional Ejector Design Theory** [刊, 汉] / LIU Zhi-qiang, SHEN Sheng-qiang, LI Su-fen (Power Engineering Department, Dalian University of Science & Technology, Dalian, Liaoning Province, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 229 ~ 232

This paper mainly focuses on the recent progress in the theoretical research on one-dimensional gas ejector design theory. Discussed are such a variety of topics as constant pressure mixing theory, constant area mixing theory as well as their experimental research results. The authors end the paper with a forecast of the future prospects of the above-mentioned ejectors. **Key words:** ejector, constant-pressure mixing theory, constant-area mixing theory

DG-1000/17.6-IIIb 型锅炉 NO_x 排放特性试验研究 = **Experimental Study of NO_x Emission Characteristics of a Model DG-1000/17.6-IIIb Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Xiang-qian, LI Wen-xue (Huaneng Shantou Power Plant, Shantou, Guangdong Province, China, Post Code: 515071) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 233 ~ 238

An analysis is performed of the emission characteristics of a model DG-1000/17.6-IIIb boiler at Huaneng Shantou Power Plant. Through a comprehensive combustion adjustment test compared were the various factors liable to have an influence on NO_x emission characteristics and fly-ash combustibles C_{fh} . The test results indicate that the above-mentioned boiler features low NO_x emissions but an excessively high amount of fly-ash combustibles C_{fh} . In view of this, some proposals have been put forward for the reduction of fly-ash combustibles C_{fh} . **Key words:** utility boiler, combustion adjustment, NO_x emissions

切向炉燃烧器区涡量分布的实验研究 = **Experimental Investigation of Vorticity Distribution in the Burner Zone of a Tangentially Fired Boiler** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (National Key Laboratory of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Institute of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 239 ~ 242

With the help of a six-sensor hot-wire probe the authors have measured for the first time the velocity and vorticity field in the burner zone of the cold model of a tangentially fired boiler. Presented are the parameters depicting turbulent flow characteristics, such as turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The results of an experimental investigation indicate that there emerges a wall-attachment phenomenon as soon as the jet flow at the burner zone reaches its outlet. Furthermore, a high intensity of vorticity and turbulence can be observed near the wall surface. **Key words:** tangentially fired pulverized-coal boiler, vorticity, skewness factor, flatness factor

分离式热管小螺旋管蒸发段换热特性的实验研究 = **Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Small Spiral-tube Evaporating Section in a Segregation-type Heat Pipe** [刊, 汉] / YI Jie, WANG Jing (Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), ZHANG Hong, et al (Nanjing Chemical Engineering University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(3). — 243 ~ 246

Small-diameter spiral tubes were employed in the evaporating section of a segregation-type heat pipe. Through the use of a glass tube and stainless steel tube a simulation was conducted of the evaporating section of the above-mentioned heat pipe. Under the condition of different liquid-filling rates and heat flux densities an experimental investigation was undertaken of the fluid flow and heat exchange characteristics inside the small-diameter spiral tube. By way of a visualized test observed was the flow pattern inside the evaporating section of the spiral tube. A preliminary analysis was conducted of the influence of the heat flux density and liquid-filling rate on the transformation of flow pattern. A discussion of the relationship between wall temperature distribution and in-tube two-phase flow pattern has led to the following conclusion: the pulsation shock in the spiral tube and secondary return flow can bring about an intensified turbulence of the in-tube fluid. As a result, there emerged an enhancement of the average heat exchange factor and critical heat flux density as well as an