



基于计算流体力学的工业超音速喷管型面优化

赵安文^{1,2}, 林龙沅¹, 李鹏超¹

(1. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010 2. 南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了评估 2 种不同型面工业喷管出口位置气流参数的差异性, 采用计算流体力学数值分析方法, 对 2 种不同型面的工业喷管进行多种工况条件下的数值模拟。计算结果表明 2 种喷管在相同的入口工况参数条件下, 曲线型喷管与直线型喷管相比, 出口位置各项气流参数的均匀性均具有明显的优势。2 种喷管在多种工况条件下, 曲线型喷管出口位置气流的平均静温、平均静压、平均总压与直线型喷管出口位置对应的气流参数相比, 最高分别增加了 0.8%、2.25%、3.43%。采用根据超音速特征线理论设计出的曲线型喷管作为工业常用喷管可减小喷管内部机械能损失、优化喷管出口流场品质, 提高工业生产工艺技术的效率和精确性。

关键词: 超音速喷管; 喷管型面; 工业; 气流参数

中图分类号: TQ051.2 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)02-0006-06

Shape optimization of industrial supersonic nozzle based on computational fluid dynamic

ZHAO Anwen^{1,2}, LIN Longyuan¹, LI Pengchao¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to evaluate the difference of two different types of industrial nozzles' outlet flow parameters, using Computational Fluid Dynamics numerical analysis method, two different types of industrial nozzles under various working conditions were simulated numerically. The calculation results show that compared with linear nozzle, the curve nozzle has obvious advantages of uniformity of outlet flow parameters under

the same initial condition. Two kinds of nozzles under the different working conditions, average static temperature, average static pressure and average total pressure of outlet flow of curve nozzle compared to linear nozzle, the highest increases are 0.8%, 2.25%, 3.43% respectively. Therefore, using curve nozzle which is designed according to the supersonic characteristic line theory as the common industrial nozzle can reduce the internal mechanical energy loss, optimize outlet flow field quality, which can improve the efficiency and accuracy of industrial process technology.

Keywords: supersonic nozzle; nozzle surface; industrial; flow parameters

随着现代工业生产技术的发展, 超音速喷管在固体表面喷涂^[1-3]、高速切割^[4-6]、超细粉体制备^[7-8]等行业中扮演着愈来愈重要的角色。超音速喷管最早是瑞典工程师拉瓦尔在 1889 年发明并设计的^[9], 整个喷管的型面均采用直线设计。此后国内外的许多学者为改善喷管内部流场品质, 对喷管的型面设计进行了大量的研究工作: 1948 年, Foelsch^[10-11]基于源流区域的假设, 结合超音速特征线理论提出了一种以经验公式为主的曲线型喷管设计方法, 随后 Zanlan^[12]对上述经验公式进行改进, 提出了一种仍然基于转折点处达到源流假设的近似设计方法。史雨等^[13]针对现有的几种喷管收缩段型面设计曲线, 讨论了不同收缩段曲线如何与扩张段曲线合理匹配的问题, 结果发现不同的收缩段曲线会对超音速喷管内部流场产生一定的影响。赖林等^[14]基于超音速特征线理论对超音速风洞喷管设计技术进行了大量的研究工作, 并成功将一种新的任意长度喷管型面设计方法应用到了气动激光器的型面设计中。

曲线形超音速喷管的使用范围已从航空航天等领域逐渐扩展到部分工业生产领域^[15-17]。考虑到实际加工成本等因素, 目前许多工业技术中常用的喷管型面依然采用直线型设计。如此一来, 当气体介质流经喷管发生等熵膨胀加速时, 不仅会在喷管内部产生很大的机械能损失, 而且整个喷管内部的流场品质也很差。近年来, 非金属矿综合利用行业对喷管的使用效率和精度效果等要求在不断f提高。故此, 将依据

收稿日期: 2016-03-15, 修回日期: 2017-03-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目 编号: 11402218, 固体废物处理与资源化教育部重点实验室平台基金项目 编号: 13zxgk05。

第一作者简介: 赵安文(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃烧理论与数值模拟。E-mail: anwenmengjie@163.com。

通信作者简介: 林龙沅(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为超细气流粉碎技术。E-mail: dly7572@126.com。

Foelsch 方法设计出的曲线型喷管运用到现代工业生产技术中,有助于提高工业实际生产效率和加工精度。于是,如何简洁直观地评估直线型喷管和曲线型喷管在实际工业应用中的差异性具有十分重要的意义。为节省研究过程中的时间资源和物力成本,首先借助目前较为流行的商业计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)软件对 2 种不同型面喷管的流场参数进行数值模拟研究。

1 数值计算方法

1.1 物理模型

数值计算采用的物理模型分为曲线型喷管和直线型喷管 2 种。图 1 和图 2 分别为曲线型喷管型面网格和直线型喷管型面网格。为了对数值模拟结果进行对比,2 种不同型面的工业喷管不仅同时满足气体动力学中的面积等熵公式,而且 2 种喷管的入口直径、喉部直径以及出口直径均相同,三者分别为 10、4、6.75 mm。考虑到物理模型的对称性,在数值分析计算时,对模型进行了简化处理(即只建立模型的一半),如此便可以在很大程度上减少整个模拟的计算量。

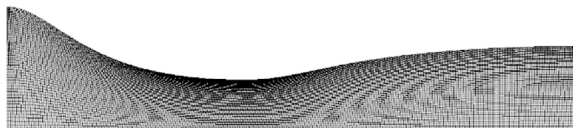


图 1 曲线型喷管型面网格
Fig. 1 Profile grid of curve nozzle

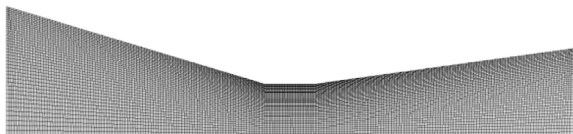


图 2 直线型喷管网格
Fig. 2 Profile grid of linear nozzle

1.2 控制方程

不考虑重力、热辐射和流体在流动过程中产生化学反应等因素,理想气体在二维直角坐标系下的可压缩流动纳维-斯托克斯守恒方程^[18-21]为

$$\frac{W}{t} + \frac{F}{X} + \frac{G}{Y} = \frac{Q}{X} + \frac{R}{Y} \quad (1)$$

其中:

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho uu + P \\ \rho vu \\ (e + P)u \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho vv + P \\ (e + P)v \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{xx}u + \tau_{yx}v + q_x \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{xy}u + \tau_{yy}v + q_y \end{bmatrix},$$
$$\tau_{xx} = \frac{4}{3}\mu \frac{u}{x} - \frac{2}{3}\mu \frac{v}{y},$$
$$\tau_{yy} = \frac{4}{3}\mu \frac{v}{y} - \frac{2}{3}\mu \frac{u}{x},$$
$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \frac{u}{y} + \mu \frac{v}{x},$$
$$q_x = K_\lambda \frac{T}{x} = C \cdot \frac{1}{x} \left(\frac{p}{\rho} \right),$$
$$q_y = K_\lambda \frac{T}{y} = C \cdot \frac{1}{y} \left(\frac{p}{\rho} \right),$$
$$C = K_\lambda \frac{K}{K-1} \frac{\mu}{P_r}, \quad K = \frac{c_p}{c_v}, \quad P_r = \frac{\mu c_p}{K_\lambda}.$$

式中 ρ 为气体密度 kg/m^3 ; u, v 分别为 x 和 y 方向的速度向量 m/s ; T 为气体静温 K ; P 为气体压强 Pa ; e 为单位体积气体含有的总能量 J ; μ 为气体动力粘性系数 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K_λ 为气体传热系数 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; K 为气体的比热容比; P_r 为气体分子的普朗特数。

1.3 边界条件与数值方法

数值计算过程中采用 2 种不同的气体材料作为直线型喷管和曲线型喷管内部气体流动介质,分别为空气和过热蒸汽。2 种喷管的所有边界条件均相同,入口边界条件设置为压力入口边界,出口边界条件设置为压力出口边界,壁面边界条件设置为无滑移绝热壁面边界。由于气体流动介质的不同,压力入口边界条件中的相关参数也将随之发生变化,因此,整个研究工作采用正交实验开展。根据不同的气体介质材料,数值模拟过程采用控制变量法将实验划分为 11 组进行,表 1 和表 2 所示为详细的喷管入口参数条件。

表 1 空气为介质时的喷管入口参数
Tab. 1 Entrance parameters when medium was air

序号	总压/MPa	总温/K
1	0.608	300
2	0.659	300
3	0.709	300
4	0.760	300
5	0.811	300
6	0.861	300
7	0.912	300
8	0.963	300
9	1.013	300
10	1.064	300
11	1.115	300

表 2 过热蒸汽为介质时的喷管入口参数

Tab. 2 Entrance parameters when medium was water-vapor

序号	总压/MPa	总温/K
1	0.608	473
2	0.659	473
3	0.709	473
4	0.760	473
5	0.811	473
6	0.861	473
7	0.912	473
8	0.963	473
9	1.013	473
10	1.064	473
11	1.115	473

从表中可以看出,在相同气体介质条件下,每组

实验中温度参数均保持相同,其中输入的压力边界条件参数值均为绝对值(工作环境压力设置为 0 Pa),并且喷管入口总压值以等差数列形式逐渐增加。

借助以有限体积法为理论基础的 FLUENT 软件,采用完全隐式的基于密度的算法求解器求解纳维-斯托克斯方程组,对上述 2 种不同型面的工业超音速喷管进行数值模拟。

2 模拟结果与分析

首先,在同一典型工况条件下比较 2 种不同型面喷管内部流场的静压、静温和速度场分布规律;其次,在多工况条件下对 2 种不同型面喷管的出口气流参数进行评估。

2.1 喷管内部流场参数分布规律

2 种不同型面的喷管在同一工况(气体介质为空气,总压为 0.608 MPa,总温为 300 K)参数条件下进行数值模拟,图 3、图 4 和图 5 为 2 种喷管内部流场的静压、静温和速度场分布云图。

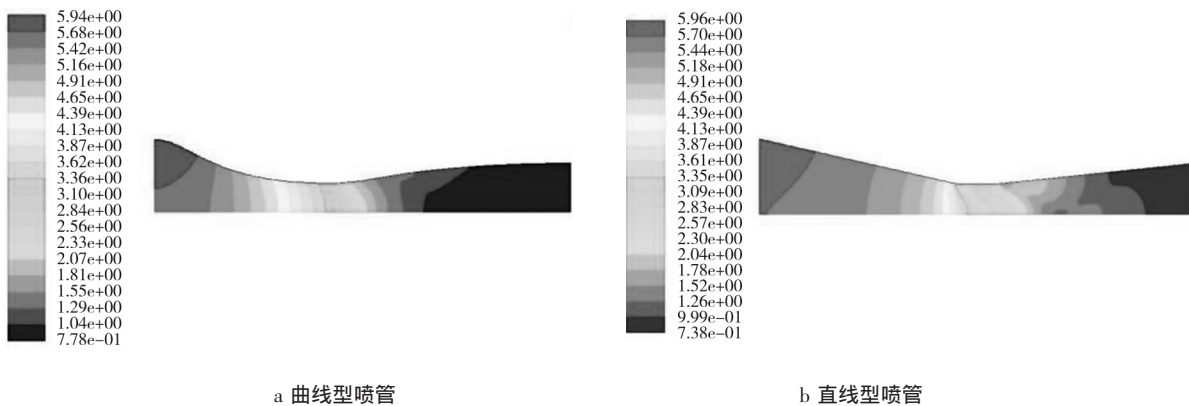


图 3 喷管的静压云图

Fig. 3 Static pressure contour of nozzles

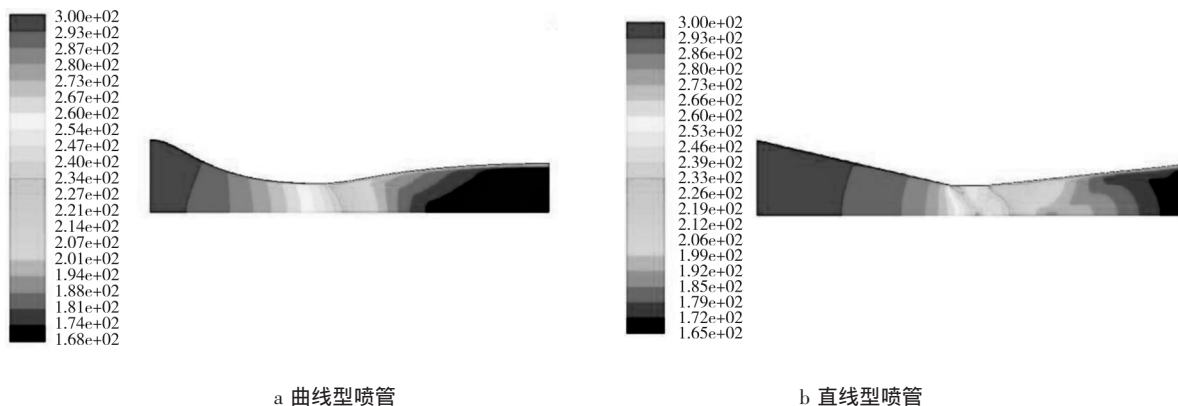


图 4 喷管的静温云图

Fig. 4 Static temperature contour of nozzles

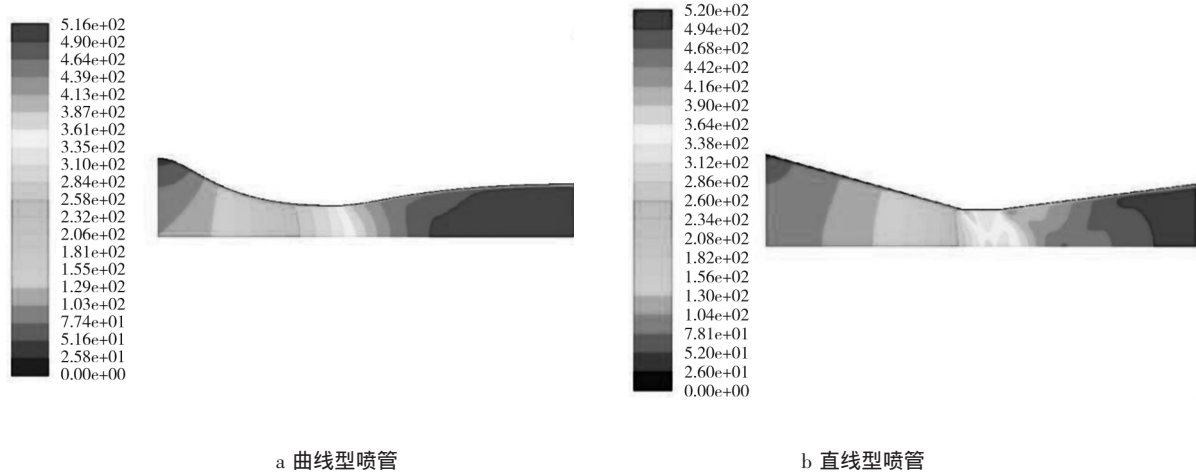


图 5 喷管的速度云图
Fig. 5 Velocity contour of nozzles

从图中可以看出直线型喷管中喉部与出口位置的静压、静温和流速分布的均匀性均不如按照 Foelsch 方法设计出的曲线型喷管中对应参数分布的均匀性。

本研究关注的是在给定入口参数条件下,如何评估直线型喷管和曲线型喷管在出口位置截面上各项气流参数的差异性。根据 2 种不同型面喷管在上述多种工况条件下的数值模拟结果,对 2 种不同型面喷管在出口位置截面上各项气流参数的差异性进行具体分析。

2.2 喷管出口气流参数分布差异性分析

当喷管内的气体流动介质为空气时,直线型喷管和曲线型喷管在同一工况条件下进行数值计算,对比分析喷管出口位置截面上各项气流参数的分布情况。图 6 所示为 2 种喷管出口位置截面静温分布对比。从图中可以看出,保持喷管入口位置处的工况参数条件相同,2 种型面喷管出口位置截面上的静温分布都较为均匀,但相比之下,曲线型喷管出口位置截面上的静温分布更加均匀。在不考虑粘性边界层厚度的条件下,直线型喷管出口截面上最高静温与平均静温之间的偏差为 2.65%,最低静温与平均静温之间的偏差为 1.48%;相应地,曲线型喷管各参数对应的偏差分别为 0.18%和 0.12%。

当保持 2 种喷管入口位置处的工况参数条件相同时,图 7 所示为喷管出口截面静压分布对比。从图中可以看出,直线型喷管出口位置截面上的静压分布均匀性较差,而曲线型喷管出口位置截面上的静压分布均匀性较优。在不考虑粘性边界层厚度的条件下,直线型喷管出口截面上最高静压与平均静压之间的偏差为 4.97%,最低静压与平均静压之间的偏差为 5.80%;相应地,曲线型喷管各参数对应的偏差分别为 0.94%和 0.41%。

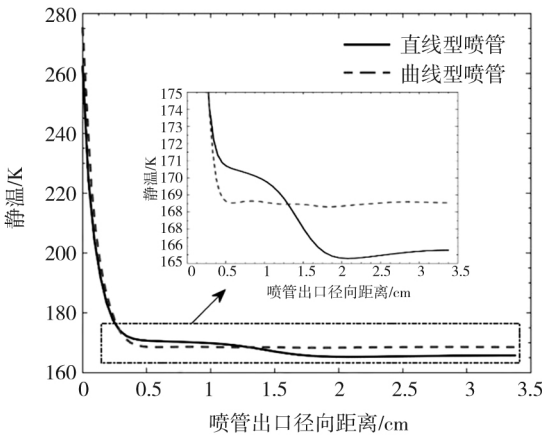


图 6 喷管出口截面静温分布对比
Fig. 6 Comparison of static temperature distribution about nozzle outlet section

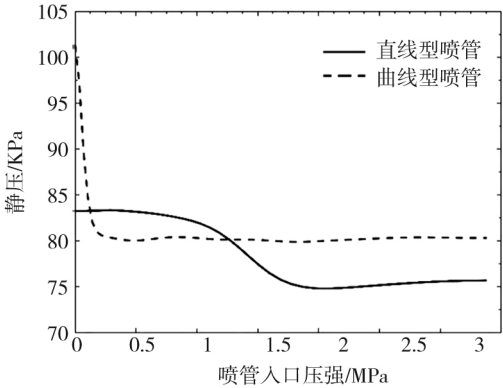


图 7 喷管出口截面静压分布对比
Fig. 7 Comparison of static pressure distribution about nozzle outlet section

保持喷管入口位置处的工况参数条件相同时,图 8 所示为喷管出口截面总压分布对比。从图中可以看出,直线型喷管和曲线型喷管出口位置截面上

的总压分布都十分均匀,但曲线型喷管出口位置截面上的总压分布情况与直线型喷管相比更加均匀。在不考虑粘性边界层厚度的条件下,直线型喷管出口截面上的最大总压与平均总压之间的偏差为 0.51%,最小总压与平均总压之间的偏差为 2.93%;相应地,曲线型喷管各参数对应的偏差分别为 0.10%和 0.41%。即严格按照超音速特征线理论设计出的曲线型喷管出口位置截面上的流场品质优于直线型喷管。

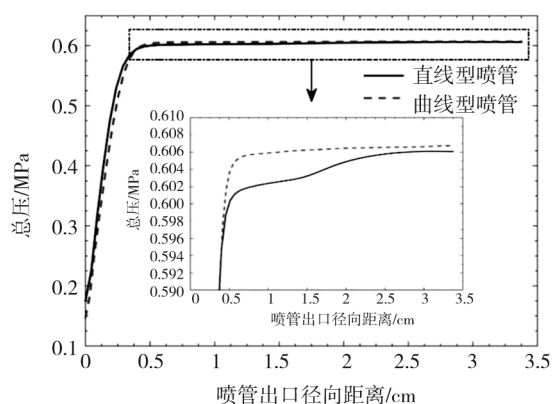


图 8 喷管出口截面总压分布对比

Fig. 8 Comparison of total pressure distribution about nozzle outlet section

当将喷管内的气体流动介质换为过热蒸汽时,同样使 2 种不同型面喷管入口位置处的工况参数条件和上述保持相同,最终得到的分析计算结果与上述结果相似。2 种结果之间的差异性仅体现在对应参数的数值大小上。

亦即无论喷管内的气体流动介质为何种气体,在相同的入口边界参数条件下,曲线型喷管出口位置截面上各项气流参数分布的均匀性都占有较为明显的优势。

2.3 喷管出口气流参数均值差异性分析

由于实际工况条件的复杂性和多样性,因此必须对 2 种喷管在多种工况条件下出口截面上的气流参数均值差异性做进一步分析。图 9 所示为 2 种喷管出口平均静温的变化趋势对比。从图中可以看出,2 种喷管入口位置处的总温保持不变时,改变入口位置处的总压,喷管出口位置截面上的平均静温将随着入口位置处总压的增大而呈现出一种较为平缓的线性递减趋势。在同一工况参数条件下,曲线型喷管出口位置截面上的平均静温比直线型喷管的略高;在多种工况条件下以直线型喷管出口位置截面气流平均静温作为基准,曲线型喷管出口位置截面气流平均静温在此基础上最高增加了 0.8%。

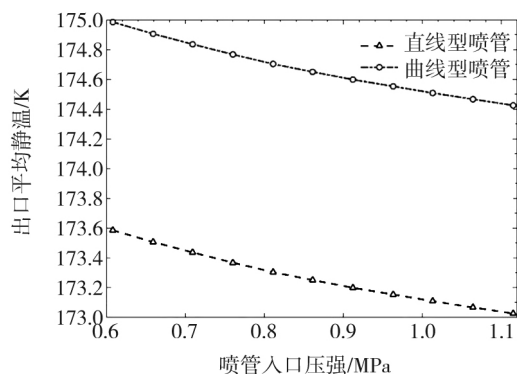


图 9 喷管出口平均静温变化趋势

Fig. 9 Tendency of average static temperature variety of nozzle outlet

图 10 和图 11 所示为 2 种喷管出口平均静压和平均总压的变化趋势对比,从图中可以看出,2 种喷管出口位置截面上压力参数与温度参数的变化趋势刚好相反。无论那种型面的喷管,出口位置截面上的平均静压和平均总压都随着入口位置处总压的增大呈现出一种较为明显的线性递增趋势。

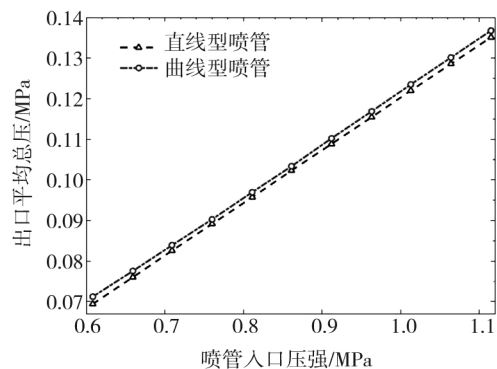


图 10 喷管出口平均静压变化趋势

Fig. 10 Tendency of average static pressure variety of nozzle outlet

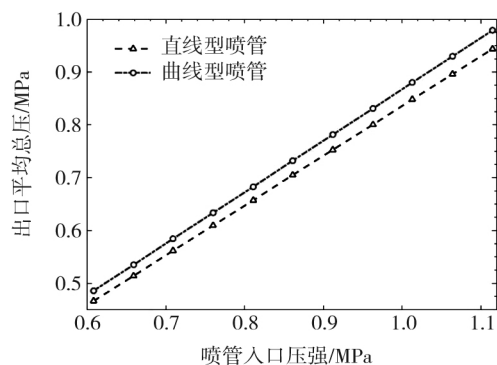


图 11 喷管出口平均总压变化趋势

Fig. 11 Tendency of average total pressure variety of nozzle outlet

在同一工况参数条件下,曲线型喷管出口位置截面上的平均静压和平均总压均比直线型喷管的略高,在多种工况条件下,以直线型喷管出口位置截面气流平均静压或平均总压作为基准,曲线型喷管出口位置截面气流平均静压在此基础上最高增加了2.25%,平均总压在此基础上最高增加了3.43%,即严格按照超音速特征线理论设计出的曲线型喷管出口位置截面上的各项气流参数与直线型喷管相比都稍占优势。

将喷管内的气体流动介质换为过热蒸汽时,保持上述各种入口位置工况参数条件不变,2种型面的喷管出口位置截面上的各项气流参数变化趋势与上述结果相似。这表明无论喷管内的气体流动介质为何种气体,只要保持喷管入口位置处工况参数条件相同,曲线型喷管出口位置截面上的各项气流参数均优于直线型喷管。

3 结论

通过对2种不同型面的工业喷管在多种工况条件下出口位置截面气流参数的均匀性以及机械能损失量进行分析比较,可得以下结论:

1)在相同的入口参数工况条件下,曲线型喷管出口位置截面上各项气流参数分布的均匀性更优。直线型喷管出口位置截面上静温、静压、总压与相应参数平均值之间的最大偏差分别为2.65%、5.80%、2.93%;而曲线型喷管相应参数的最大偏差分别为0.18%、0.94%、0.41%;表明曲线型喷管出口位置截面上的流场品质更优。

2)在相同的入口参数工况条件下,曲线型喷管出口位置截面上各项气流参数的平均值都略大于直线型喷管相应各项气流参数的平均值。分别以直线型喷管出口位置截面气流平均静温、平均静压、平均总压作为基准,曲线型喷管出口位置截面气流平均静温、平均静压、平均总压在相应基准上最高增加了0.8%、2.25%、3.43%。

综上所述,采用曲线型喷管作为超细粉体制备、金属表面喷涂、非金属矿综合利用等行业的喷管,可减小气流在等熵膨胀加速过程中的机械能损失,且曲线型喷管出口位置气流参数的均匀性更优,流场品质更高。

参考文献(References):

- [1] 张伟,郭永明,陈永雄. 热喷涂技术在产品再制造领域的应用及发展趋势[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6):1-10.
- [2] 张燕,张行,刘朝辉,等. 热喷涂技术与热喷涂材料的发展现状[J]. 装备环境工程, 2013, 10(3):59-62.
- [3] 郑学斌,谢有桃. 热喷涂生物陶瓷涂层的研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(1):12-20.
- [4] 阮鸿雁,吕建军,杨波,等. 激光切割超音速喷嘴的流场特性[J]. 中国激光, 2009, 36(5):1233-1238.
- [5] 胡俊,邱明勇,姚振强. 两种激光切割超音速喷嘴结构与辅助气体流场分析[J]. 中国激光, 2009, 36(4):1005-1010.
- [6] 徐良,王威,李小叶,等. 大功率激光水下切割用喷嘴设计[J]. 焊接学报, 2013, 34(11):57-60.
- [7] 铁生年,李星,李昀珺. 超细粉体制备技术的制备技术及应用[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(3):68-72.
- [8] 申盛伟,汪洋,朱兵兵,等. 超细粉体制备技术研究进展[J]. 环境工程, 2014, 11(9):102-105.
- [9] 易仕和. 超声速与高超声速喷管设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2013:20-80.
- [10] FOELSCH K. The analytical design of an axially symmetric Laval nozzle for a parallel and uniform jet[J]. Journal of the Aeronautical Science, 1949, 15(16):161-188.
- [11] KOKISH M G, DIETRICH M R, ODOM B C. Simple and compact nozzle design for laser vaporization source[J]. Journal of Physics B: Atomic Molecular and Optical Physics, 2016, 49(3):219-233.
- [12] ZAMAN K, BENCIC T J, FAGAN A F, et al. Shock-Induced boundary-layer separation in round convergent-divergent nozzles[J]. AIAA Journal, 2016, 54(2):434-442.
- [13] 史雨,桑为民,陈志敏. 超音速喷管收缩扩张段匹配问题研究[J]. 航空计算技术, 2013, 43(6):72-75.
- [14] 赖林,赵玉新,邵艳,等. 任意长度喷管型面设计方法在气动激光器喷管设计中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9):2287-2291.
- [15] 杨文,曹学文. Laval 喷管设计及在天然气液化中的应用研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(2):75-79.
- [16] 张乐,周洲,李盈盈,等. 飞翼无人机保形非对称尾喷管设计与流场特性[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(5):667-673.
- [17] 刘广龙,冯亮花,梁慧坤,等. 基于解析法的氧枪喷管设计及模拟[J]. 中国冶金, 2016, 26(1):59-62.
- [18] YUAN S, YANG S, HE X, et al. Design and experimental study of a novel three-way diffuser/nozzle elements employed in valve less piezoelectric micropumps[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015, 37(1):221-230.
- [19] 贾如岩,江振宇,张为华,等. 火箭低空级间热分离初期流场特性数值模拟[J]. 宇航学报, 2015, 36(11):1310-1317.
- [20] 韩占忠. FLUENT:流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004:80-106.
- [21] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:50-98.