

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.007

喷嘴雾化流场数值仿真及结构改进研究*

黄垂浪¹, 刘新续², 张振东¹, 陈忠¹

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093; 2. 艾耐基科技股份有限公司, 上海 200080)

摘要:针对空气喷嘴形状对雾化性能影响的问题, 对不同扇面结构参数下的空气喷嘴的雾化性能进行了研究, 对空气喷嘴结构参数与雾化流场之间的规律进行了归纳, 提出了一种空气喷嘴的结构模型, 基于雷诺 N-S 方程与标准 K- ϵ 湍流模型以及标准壁面函数法, 采用 CFD 方法对不同扇面孔数量及不同扇面锥角下的空气喷嘴的雾化性能进行了数值仿真, 分析了空气喷嘴不同扇面参数的改变对雾化性能的影响, 并通过搭建喷枪台架实验, 对优选的结构模型进行了实验验证。研究表明, 仿真结果与实验数据基本符合要求, 改进后的空气喷嘴雾化性能得到了改善, 为今后空气喷嘴结构的优化设计提供了一定的参考。

关键词:空气喷嘴; 扇面孔; 扇面锥角; 数值模拟; 参数优化

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)01-0033-06

Numerical simulation of the flow field and structural improvement in the nozzle atomization

HUANG Chui-lang¹, LIU Xin-xu², ZHANG Zhen-dong¹, CHEN Zhong¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai AINAIJI Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: Aiming at the problem that the atomization performance is influenced by air nozzle shape, the atomization performance of air nozzle was studied with different fan structure parameters, the general pattern could be summarized between the structure parameters of air nozzle and the change of atomization flow field, a kind of air nozzle structure was proposed. Based on Reynolds N-S equations and standard K- ϵ turbulent mode as well as standard wall function method, the atomization flow field of air nozzle was simulated with different fan cone angle and fan hole number by using CFD method, and the atomization performance was analyzed by the change of fan parameters in air nozzle. Besides, the better structure models were verified by the bench tests of spray gun. The results indicate that the experimental data is similar that of simulation, and the atomization performance is actually improved which provide a certain reference for optimizing the air nozzle structure.

Key words: air nozzle; fan hole; fan cone angle; numerical simulation; parameter optimization

0 引言

喷枪的功用是利用喷嘴向空气中喷射液体, 通过压缩空气将液柱破碎成小液滴, 并吹送到物体表面形成一层涂料膜, 喷嘴的形状对雾化效果具有显著影响^[1]。目前, 国际以及国内的中、高端的涂料喷枪市

场主要被德国的 SATA 喷枪和日本的岩田喷枪所占据, 由于受结构设计与工艺制造的限制, 国内一些喷枪公司在技术上相比国外公司滞后很多, 因此提高喷嘴雾化效果显得十分重要。

国内外学者对喷枪喷嘴的雾化研究由来已久。Wang^[2]以不同的气体压力和不同的喷嘴直径为参数

收稿日期: 2016-10-10

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(200802520001)

作者简介: 黄垂浪(1994-), 男, 海南东方人, 硕士研究生, 主要从事燃油喷射系统方面的研究. E-mail: 1183273290@qq.com

通信联系人: 张振东, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: usstzdz@126.com

变量,通过分析喷雾流场,得到适合的喷雾雾化结构参数。Sanghoon^[3]等通过实验分析了不同孔数量下喷嘴的喷雾特性。刘国雄^[4]通过分析中心雾化孔直径的变化、扇面控制孔的开关以及扇面控制孔夹角的变化,说明中心雾化孔直径的扩大会增大雾化气流量,进而提高了流速,从而造成过喷现象,因而在保证雾化效率的基础上,选择直径较小的喷嘴。同时扇面控制孔关闭时喷嘴气流为圆形,开启时为椭圆形,且随着出气孔压力的增大椭圆形状越明显。钱丽娟等^[5]通过气液两相仿真分析雾化液体速度的变化趋势。Zhai 等^[6]通过计算流体力学软件分析了雾化粒子的速度场和温度场。张朝平^[7]通过 Fluent 软件分析了四种不同结构下喷枪的气液两相模型的流场数值仿真。Ahmad 等^[8]通过实验比较了两种不同结构喷嘴的喷雾特性,提出增大雾化角度会减小喷射雾距以及增加液体压力也会减小喷射雾距的理论。近年来,在流体机械的设计和计算时,计算流体力学(CFD)被广泛应用,成为喷嘴雾化流场分析的重要方法。Ozer 等^[9]通过 CFD 软件仿真和实验分析了气体雾化喷嘴的喷雾特性,发现雾化气体压力大小对喷雾特性有显著的影响。

目前,利用 CFD 软件研究空气喷嘴结构参数对雾化流场的影响比较少,而 Fluent 作为 CFD 的一种重要软件所提供的离散相中,具有可使喷雾破碎的 TBA 模型和 WAVE 模型,为了更好地满足喷雾模型的仿真分析,也可设置喷雾碰壁模型。

本研究运用 CFD 仿真软件 Fluent 以及实验验证的方法对空气喷嘴雾化流场进行研究,以得到空气喷嘴扇面孔结构参数和雾化流场的一般规律,为今后的喷枪喷嘴结构优化设计提供一定的理论依据。

1 空气喷嘴的流体模型与数值模拟

1.1 空气喷嘴的结构和工作原理

空气喷嘴的三维模型如图 1 所示。

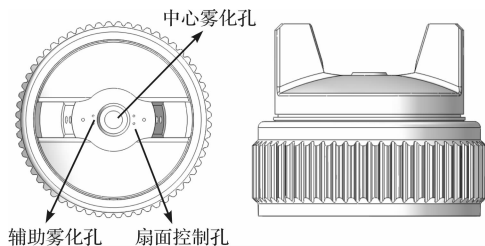


图 1 空气喷嘴三维建模

空气喷嘴的二维模型如图 2 所示。

本研究选取国内某款涂料喷枪的空气喷嘴作为研

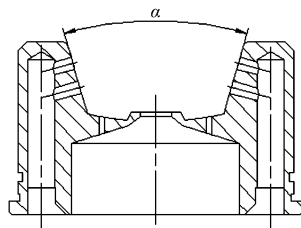


图 2 空气喷嘴二维结构图

究对象,由图 1 可以看出空气喷嘴上有 1 个中心雾化孔、6 个辅助雾化孔、4 个扇面控制孔。其工作原理为:

(1)在涂料喷嘴与中心雾化孔之间的环状空气柱气压冲击下,产生巨大的速度差,将涂料液柱破碎成细小液滴称为第一极雾化;

(2)空气喷嘴端面上的辅助雾化孔能有效控制喷雾形状的扩展速度,并且能对第一极雾化后的喷雾形成第二极雾化,并能提高雾化效果;

(3)扇面控制孔出口气柱控制主要雾化气流成形角度,将喷雾由圆形成形为椭圆形,有利提高喷雾效果。并可以设置控制孔不同的边界条件控制喷雾的椭圆度。

1.2 空气喷嘴流体域建立

空气喷嘴的雾化流体域如图 3 所示。

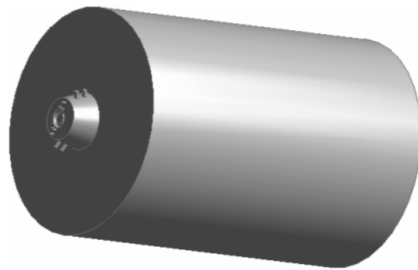


图 3 空气喷嘴雾化流体域

本研究根据空气喷嘴的三维结构简要模拟出喷嘴的外部流场。所建立的空气喷嘴雾化流体域如图 3 所示,包括空气喷嘴出口与雾化场。雾化区域应设有足够大的空间,将空气雾化仿真区域包含在内,并且气流场与雾化区域主要集中在轴线附近,为了计算与仿真的可操作性,因此将雾化场简化为圆柱形。雾化控制域直径设为 100 mm,整个流体域长设为 160 mm。经过后面的模拟仿真,可以看出气流场与雾化场均包含在所设定的雾化域内,因此所设流体域符合仿真要求。另外,再扩大流体域的空间只会增加网格划分与仿真计算的复杂性,基本不会影响结果分析。

1.3 嘴结构方案配置

相关文献对边界条件与喷孔形状等参数的改变对雾化影响的研究较多,包括进气压力、速度、流量的大

小、喷孔直径大小以及出气孔形状的差异。本研究选取国内某款喷枪为研究对象,通过改变某种结构参数而固定其它结构参数来研究结构参数变化对雾化流场的影响。本研究中空气喷嘴的初始结构参数为:中心雾化孔1个、辅助雾化孔6个、扇面控制孔4个、扇面锥角 α 为 30° 。以扇面控制孔数量 N 和扇面锥角 α 为变量参数,保持其它结构参数不变,可配置出8种方案进行研究,配置方案如表1所示。

表1 模型的参数方案

扇面控制孔数量 N	扇面锥角 α /deg	扇面控制孔数量 N	扇面锥角 α /deg
2	30	4	30
2	35	4	35
2	40	4	40
2	45	4	45

1.4 计算模型

本研究采用 Ansys Icem 软件进行网格划分,考虑到计算边界结构与流场仿真的复杂性,故采用非结构性四面体网格划分方法。网格划分如图4所示。

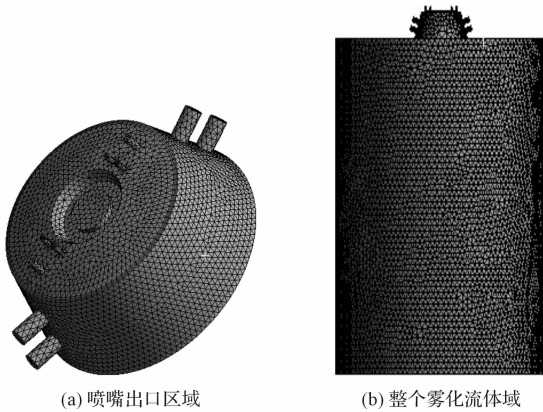


图4 空气喷嘴雾化流场网格划分

本研究将流体域^[10-13]划分成两个子块区域分别是喷嘴出口和雾化场,由于空气喷嘴出口附近是仿真的重要区域,本研究采用局部网格加密的方法,细分网格以提高计算精度。为了提高网格精度设置了边界层网格层数为3,模型网格节点数为188 309个,网格数为930 498个,网格检查未生成负体积网格,经过后面的迭代计算,残差已经符合收敛要求。同时,发现减小网格单元尺寸,网格再加密基本不会提高计算精度,只会增加计算的复杂性。

1.5 湍流模型的选择

通过计算雷诺数确定了液体流动为完全湍流,分子间黏性可忽略不计,计算过程如下所示:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (1)$$

式中: ρ —流体的密度, v —流速, d —流体孔的直径, η —粘度。

代入数据可得流体的计算雷诺: $Re = 10\,434.782\,61 > 10\,000$,因此液体流动为完全湍流。

本研究选用标准 $k-\varepsilon$ 模型对雾化流场进行模拟,其控制方程^[10]为:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: G_k —平均速度梯度引起的湍动能产生项, $G_{1\varepsilon}$ —浮力引起的湍动能产生项, Y_M —可压缩湍流中脉动膨胀对总的耗散率的影响, μ_t —湍流粘性系数。

其中, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_u = 0.09$;取 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.6 边界条件

假设雾化流体为不可压缩理想流体,主相为空气,辅相为液态水,采用耦合隐式算法,一阶迎风差分格式。中心雾化孔、辅助雾化孔、扇面控制孔均采用压力入口,流体域的下表面为压力出口,流体域四周设定为壁面。基于实验室与查阅文献经验,中心雾化孔入口压力大小设为2.0 bar,辅助雾化孔入口压力大小设为2.0 bar,扇面控制孔入口压力大小设为0.7 bar,其他参数设置为默认值。液体喷嘴运用 DPM 模型设置,流量大小为0.011 kg/s。

2 结果分析

2.1 气体流场仿真计算

两个扇面控制孔初始模型的气流速度场如图5所示。

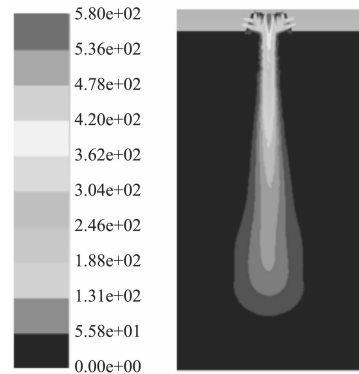


图5 初始模型的气流速度场

由图5可以看出:高速气流主要集中在进气口附近且气流形状呈锥形喷射出,这有利于提升雾化效果。当 $\alpha = 40^\circ$ 时,气流呈锥形喷射且形状相比其他扇面

锥角较为顺滑规则。

两个扇面控制孔气流的轴向速度如图 6 所示。

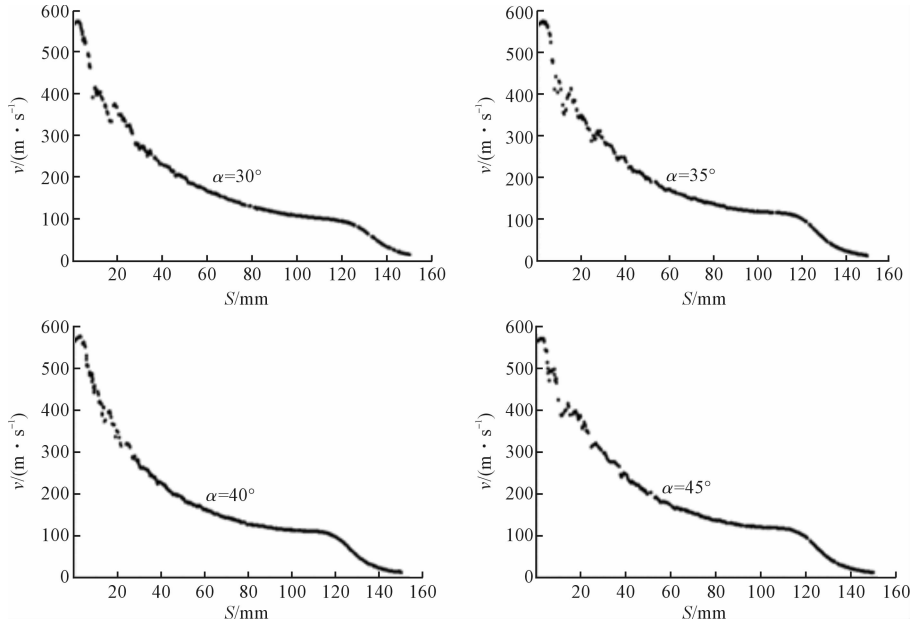


图 6 两个扇面控制孔气流的轴向速度

由图 6 可以看出:高速度主要集中在进气口附近,这有利于液柱的快速碎裂,随着轴向距离的增加速度先迅速减小后缓慢减小至趋向于平稳。在 0 ~ 40 mm 处,气流速度处于波动不平稳状态。且当 $\alpha = 40^\circ$ 时,在 0 ~ 40 mm 处的流速度相比其它扇面锥角较为光滑平稳,曲线拟合度较好,有利于减小气流扰动以及提升液柱破碎的效果。因此,综合图 5、图 6 可知当扇面锥角 $\alpha = 40^\circ$ 时,其气流喷射效果相比其他扇面锥角是最理想的。

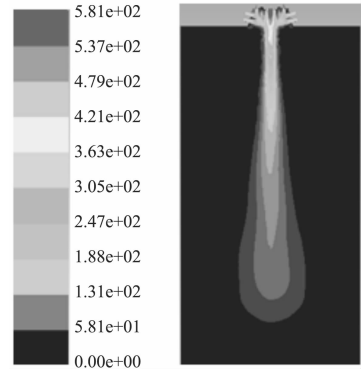


图 7 初始模型的气流速度场

4 个扇面控制孔初始模型的气流速度场如图 7 所示。

4 个扇面控制孔气流的轴向速度如图 8 所示。

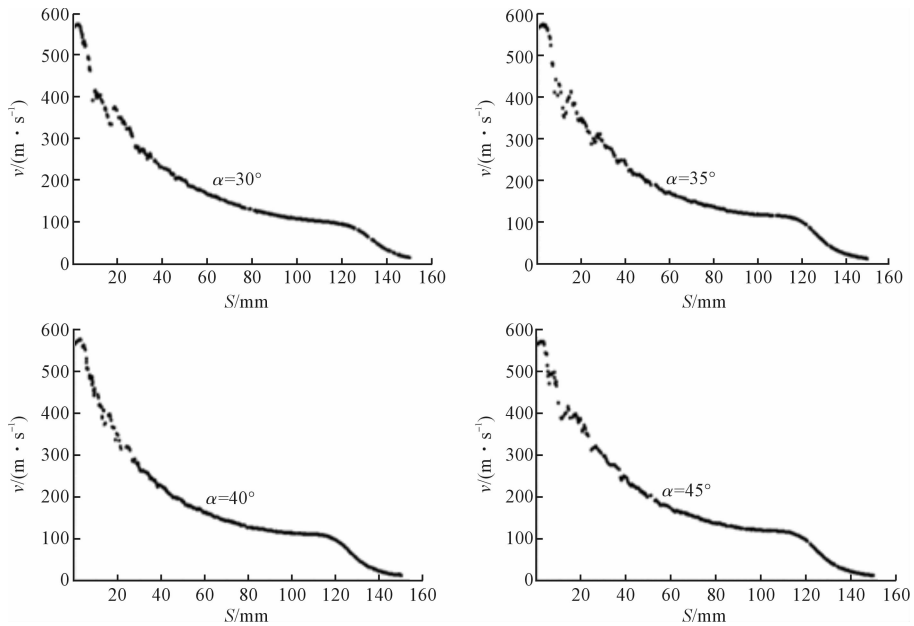


图 8 4 个扇面控制孔气流的轴向速度

由图 7 可以看出:高速气流主要集中在进气口附近且气流形状呈锥形喷射出,这有利于液滴的扩散以及提升雾化效果。且当 $\alpha = 40^\circ$ 时,气流喷射距离较长以及气流不仅呈锥形喷射而且形状相比其它扇面锥角更为对称圆滑,这一定程度上提高了液柱的破碎效果以及锥形雾状的规则性。由图 8 可以看出:在进气口附近集中高气流速度,较高的速度有利于液柱的破碎。随着轴向距离的增加速度先迅速减小后缓慢减小至趋向于平稳。在 $0 \sim 40$ mm 处,气流速度处于波动不平稳的状态。且当 $\alpha = 40^\circ$ 时,在 $0 \sim 40$ mm 处的液滴速度曲线相比其它扇面锥角较为光滑平稳,有利于提升液柱破碎以及减小气流扰动的效果。因此,综合图 7、图 8 可知当扇面锥角 $\alpha = 40^\circ$ 时,其气流喷射效果是最理想的。

2.2 雾化场离散相(DPM)模拟分析

由图(5 ~ 8)分析可知 1#模型:扇面孔数量个数为 2、扇面锥角 $\alpha = 40^\circ$ 和 2#模型:扇面孔数量个数为 4、扇面锥角 $\alpha = 40^\circ$ 分别是最优的两组参数模型。选择离散相 DPM 模型加入液滴,将两组模型进行液滴的喷雾模拟,并比较两组模型的雾化流场。液滴粒径分布如图 9 所示。

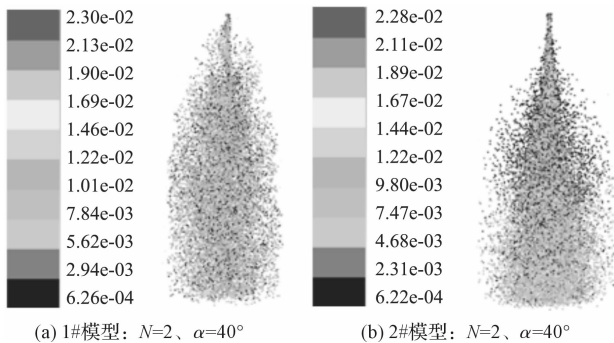


图 9 雾滴粒径(mm)模拟图

由图 9 可以看出:模型喷雾形状较为明显且接近于圆锥形,同时液滴群主要集中在轴线附近,这与实际情况相符合。其中 1#模型在距离进气口处液柱破碎比较分散,破碎后的液滴比较散乱,并且随着喷射距离的增加液滴散乱程度更加明显。2#模型喷雾形状轮廓比较明显基本呈圆锥形喷射,且液滴颗粒群聚集程度相比 1#模型更加集中,并且随着喷射距离的增加雾化形状基本保持不变,液滴散乱程度较小。另外,2#模型整体液滴粒径比 1#模型的液滴粒径小,这有利于液滴均匀地覆盖到物体表面,从而提高雾滴的传递效率。液滴横截面速度分布如图 10 所示。

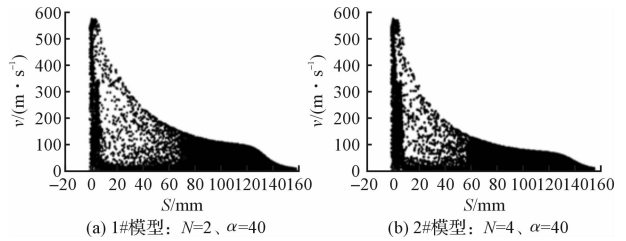


图 10 液滴横截面速度

由图 10 可以看出:液滴群速度分布随着轴向距离的增加由散乱逐渐平稳聚集,液滴速度的平稳有利于避免发生过喷现象以及提高雾滴传递效率。1#模型液滴群速度在距离喷嘴大约 70 mm 时开始平稳聚集,而 2#模型液滴群速度在距离喷嘴大约 60 mm 时开始平稳聚集,并且速度下降的坡度比 1#模型较为平稳。因此,综合图 9、图 10 可知 2#模型比 1#模型雾化效果较为理想。

3 实验验证

由于生产成本和时间的限制,为了验证仿真结果,本研究只对初始模型、1#模型、2#模型试制样品并搭建实验平台进行实验验证。本研究在出口边界处通过对发生过喷的液滴质量进行统计,大致可以计算出喷雾过程中损失的液体质量,再根据水泵供给喷嘴的液体总质量,可以得到喷雾的有效传递效率。实验的基本条件如下:

- (1)实验温度:常温环境 T 为 20°C ;
- (2)空气压缩机供给压力:2.0 bar;
- (3)水泵供给喷嘴流量:0.011 kg/s。

实验原理图如图 11 所示。

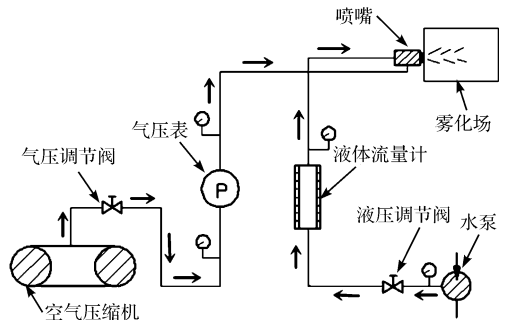


图 11 喷雾实验原理图

实验结果如表 2 所示。

表 2 喷雾实验结果

3 组优选的空气 喷嘴模型	液体供给喷嘴 总质量/kg	过喷损失的液体 质量/kg
初始模型	0.10	0.048
1#	0.10	0.047
2#	0.10	0.045

从表 2 实验结果中可以得出:初始模型的液体传递效率大约为 52%,1#模型的液体传递效率大约为 53%,2#模型的液体传递效率大约为 55%。2#模型的液体传递效率比初始模型的液体传递效率提高了 3%,比 1#模型的液体传递效率提高了 2%。国外类似喷枪液体传递效率在 60%左右,实验的 3 组模型液体传递效率与其差距较小,因此仿真与实验结果具有一定的准确性。

4 结束语

(1)空气喷嘴是喷枪雾化时的关键结构。通过对不同扇面孔数量以及不同扇面锥角下的结构进行气流场仿真,本研究分析了不同结构参数对气流速度流场的影响规律。

(2)在气流场仿真结果的基础上,分别在各组结构模型仿真中筛选出两组最优的模型结构,加入 DPM 喷雾模拟,并通过实验验证仿真结果的准确性,减少了实验成本,为今后空气喷嘴的设计和优化提供了一定的参考。

(3)仿真模拟与实验验证结果表明,2#模型空气喷嘴结构液体传递效率比初始模型的液体传递效率提高了 3%,比 1#模型空气喷嘴结构液体传递效率提高了 2%,其喷雾性能得到改善。

参考文献 (References):

[1] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
 [2] WANG Z T. Experimental Investigation on spray characteristics of Aerodynamic Cooling Nozzle for Metal Cutting[J]. **Energy and Environment Technology**, 2009 (3): 322-326.

[3] LEE S, PARK S. Spray atomization characteristics of a GDI injector equipped with a group hole nozzle[J]. **Fuel**,2014, 137(137):50-59.
 [4] 刘国雄. 空气雾化涂料喷枪喷涂流场仿真及特性研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
 [5] 钱丽娟,熊红兵,林建忠. 湍动雾化射流液雾粒径分布的数值模拟[J]. 工程热物理学报,2007,28(2):250-255.
 [6] ZHAI P, YANG Y. Two-phase Numerical Simulation for Flow Field of Ablation Spray Gun Based on FLUENT[J]. **Journal of Projectiles Rockets Missiles & Guidance**, 2012,14(3):186-192.
 [7] 张朝平,许涛,柯昌华,等. 气液搅拌流场中不同通气结构的 CFD 模拟[J]. 热能动力工程,2008,23(5):520-522.
 [8] AHMAD HUA, PAHIMA. Spray characteristics of jet-swirl nozzle for thrust chamber injector[J]. **Aero space science and technology**,2009,13(4):190-198.
 [9] OZER A, RAHMI U. Experimental and numerical modeling of the gas atomization nozzle for gas flow behavior [J]. **Computer&Fluids**,2011,42(1):36-45.
 [10] 张悦刊,刘培坤,杨兴华,等. 基于 CFD 的泥浆净化旋流器湍流流场数值模拟[J]. 流体机械,2014,42(6):26-32.
 [11] 路芳,吴健兴. 基于 CFD 的液压挖掘机负载敏感多隙阀流道改进优化分析[J]. 液压气动与密封,2015(3):18-20.
 [12] 刘丹丹,刘朝霞,邵万珍,等. 基于 CFD 的 YOTCGP650 型液力偶合器流场仿真分析[J]. 液压气动与密封,2015(7):22-25.
 [13] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

黄垂浪,张振东,陈 忠. 喷嘴雾化流场数值仿真及结构改进研究[J]. 机电工程,2017,34(1):33-38.

HUANG Chui-lang, ZHANG Zhen-dong, CHEN Zhong. Numerical simulation of the flow field and structural improvement in the nozzle atomization[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(1):33-38.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>