

文章编号: 1671-0444 (2018)05-0787-05

基于 FLUENT 的 3D 印花网版自动清洗机射流参数分析

李培, 李培波, 孙以泽

(东华大学 机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 根据 3D 印花网版的清洗要求和自动清洗机存在的问题, 优化扇形喷嘴的布局。选择连续性微分方程和 N-S 方程作为控制方程, 与标准的 $\kappa-\epsilon$ 方程组成封闭控制方程组, 以求解高压水射流流场。使用 Gambit 和 FLUENT 软件对高压水射流流场进行仿真, 仿真结果与计算结果非常接近。由仿真分析得到最优的射流参数: 喷嘴喷射角为 30° , 靶距为 100 mm, 喷嘴间距为 40 mm, 喷嘴移动速度为 50 mm/s, 射流入射角为 30° 。

关键词: 网版清洗; 高压水射流; 扇形喷嘴; FLUENT 软件; 软件射流参数分析

中图分类号: TP 69

文献标志码: A

Jet-Flow Parameters Analysis of Automatic Cleaning Machine of 3D Printing Screen Based on FLUENT

LI Pei, LI Peibo, SUN Yize

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: According to the cleaning requirements of 3D printing screen and the problems existing in the automatic cleaning machine, the layout of the fan nozzle was optimized. Continuous differential equations and N-S equations were chosen as governing equations. Together with $\kappa-\epsilon$ equations, a closed governing equations was constructed to solve the flow field of high pressure water jet. The flow field of high pressure water jet was simulated by Gambit and FLUENT software, and the simulation results were very close to the calculation results. The optimal jet-flow parameters were obtained by analyzing the simulation results. That is the injection angle of spray nozzle 30° , the target distance 100 mm, the spray nozzle spacing 40 mm, the moving speed of spray nozzle 50 mm/s, and the incidence angle of jet-flow 30° .

Key words: screen cleaning; high pressure water jet; fan nozzle; FLUENT software; jet-flow parameter analysis

3D 印花是指图案厚度要求在 0.8 mm 以上, 需多块网版叠印、套印数十次的印花技术。是已经成为了 3D 印花的主要手段, 机械印刷所用网版的尺寸和重量都很大, 人工清洗难度很大, 而且容易堵

版, 因此往往使用自动清洗机冲洗。由于 3D 印花网版特定的结构和清洗要求, 普通的自动清洗机存在清洗效果不佳和清洗效率较低的问题。目前国内外对 3D 印花网版自动清洗技术的研究很少, 还没

收稿日期: 2017-05-08

基金项目: 教育部创新团队发展计划资助项目 (TRT_16R12)

作者简介: 李培 (1993—), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向为 3D 印花系统的若干关键技术, E-mail: 794192514@qq.com

孙以泽 (联系人), 男, 教授, E-mail: sunyz@dhu.edu.cn

有完全符合 3D 印花网版清洗要求的自动清洗机。

FLUENT 软件可用来模拟从不可压缩到高度可压缩范围内的复杂流动,由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因而能达到最佳的收敛速度和求解精度。3D 印花网版自动清洗机大多使用高压清洗技术,为改善自动清洗机的清洗效果并提高清洗效率,本文首先优化喷嘴的布局,在此基础上,以喷嘴为研究对象,使用 Gambit 软件进行模型建立和网格划分,使用 FLUENT 软件对高压水射流流场进行仿真,分析仿真结果,得到最符合 3D 印花网版清洗要求的射流参数,为自动清洗机的设计提供依据。

1 喷嘴布局及入口压力的计算

1.1 喷嘴布局

3D 印花网版上的图案由无数细小的网孔组成,印花时通过外力挤压使油墨透过网孔印在织物上,因此网版清洗的关键是清除所有网孔里残留的油墨,否则会造成堵版,影响印花质量。普通的网版自动清洗机是将多个喷嘴线性排列,并正对网版表面,这种布局方式存在以下问题:(1)喷嘴的射流在网版上的作用区域与零件的加工和安装精度有关,因此难以精确控制。若相邻喷嘴的射流无法做到无缝衔接,则会出现网版部分区域清洗不到或者射流产生干涉的现象,均会影响清洗效果。(2)喷嘴数量过多,流量分配极不均匀,导致喷嘴的射流应力差别较大,会出现清洗效果不均匀的现象。(3)网版的清洗包括网孔清洗和表面清洗,若喷嘴正对网版表面,则无法将网版表面清洗干净。因此,本文将喷嘴数量减为 4 个,使其呈交错分布,并且与网版表面成一定的角度,增加喷嘴的竖向移动,即可完成网版的清洗。

1.2 喷嘴入口压力计算

仿真前需要计算喷嘴入口处的静压和总压,其中总压为静压与动压之和。如图 1 所示,取增压泵出口处的断面 B-B、靠近喷淋杆入口处的渐变流断面 K-K 以及任意一个喷嘴入口处的断面 1-1,假设各喷嘴的流量相同,则有:

伯努利方程为

$$z_B + \frac{p_B}{\gamma} + \frac{\alpha_B v_B^2}{2g} = z_K + \frac{p_K}{\gamma} + \frac{\alpha_K v_K^2}{2g} + h_{wBK} \quad (1)$$

$$z_K + \frac{p_K}{\gamma} + \frac{\alpha_K v_K^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_{wK1} \quad (2)$$

连续性方程为

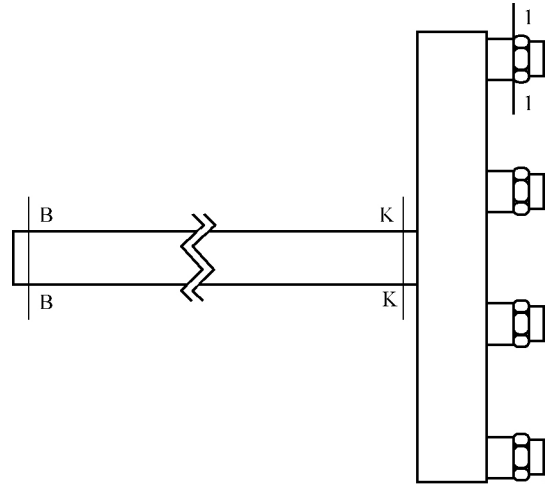


图 1 喷嘴结构图

Fig. 1 Structure diagram of spray nozzle

$$v_B A_B = v_K A_K = 4v_1 A_1 = Q_B \quad (3)$$

达西公式为

$$h_{wBK} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g} \quad (4)$$

喷嘴入口处的动压为

$$p_b = \frac{\alpha_1 \rho v_1^2}{2} \quad (5)$$

式中: p_B 、 Q_B 分别为增压泵所提供的压力和流量,本文选择的增压泵型号为 QDLF 4-19,其额定扬程为 153 m,额定流量为 4 m³/h; λ 为沿程阻力系数,其值根据布拉休斯(Blasius)公式确定; l 为断面 B-B 到断面 K-K 的管道长度。忽略断面 K-K 到断面 1-1 的水头损失,以及 3 个断面之间的高度差,即令 $h_{wK1} = 0$, $z_B = z_K = z_1$ 。联立式(1)~(5),解得喷嘴入口处的静压和动压分别如式(6)和(7)所示。

$$p_1 = p_B + \frac{\alpha_B \rho Q_B^2}{2A_B^2} - \frac{\alpha_1 \rho Q_B^2}{32A_1^2} - \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (6)$$

$$p_b = \frac{\alpha_1 \rho Q_B^2}{32A_1^2} \quad (7)$$

2 射流流场仿真

2.1 几何模型建立与网格划分

本文以喷嘴为研究对象,对高压水射流流场进行仿真。采用扁平扇形喷嘴,其内部结构如图 2 所示。入口段形式采用锥形,主要结构参数有入口段大径 D 和入口段长度 K ;出口段的主要结构参数有

圆柱段的直径 d 、椭圆长半轴的长度 a_2 、V 形槽的半角 α 、椭圆中心至 V 形槽底部的长度 b ^[1-2]。

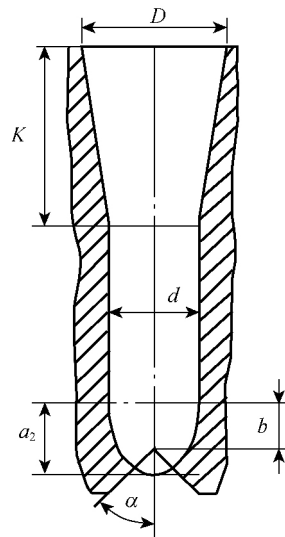


图 2 扁平扇形喷嘴的内部结构
Fig. 2 Internal structure of flat fan nozzle

本文选取喷嘴的结构参数如下: $D=6\text{ mm}$, $K=10\text{ mm}$, $d=2.5\text{ mm}$, $a_2=d/2=1.25\text{ mm}$, $b=0$ 。喷嘴喷射角 θ 是指射流上下边界之间的夹角,它与 V 形槽的半角 α 之间的关系可由经验公式(8)表示^[3]。本文要对 θ 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 的喷嘴进行仿真分析,对应的 α 分别为 56° 、 45° 、 35° 、 28° 。

$$\theta = 188.67 - 7.27\alpha + 0.119\alpha^2 - 7.99 \times 10^4 \alpha^3 \quad (8)$$

为了对喷嘴的外部流场进行仿真,在喷嘴出口处接一个三棱柱,然后再接一个直径较大的圆柱^[4]。使用 Gambit 软件进行网格划分,将模型主要划分为四面体网格单元,但在某些位置包含一定数量的六面体、锥体和楔形单元。喷嘴及外流场的网格模型如图 3 所示。

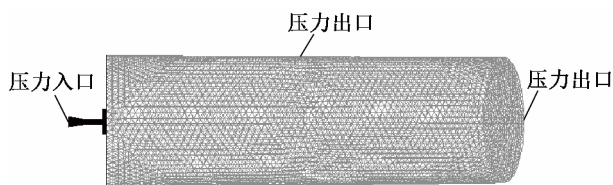


图 3 喷嘴及外流场的网格模型
Fig. 3 Mesh model of spray nozzle and the outer flow field

2.2 控制方程的选用

喷嘴高压水射流处于高湍流状态,选择连续性微分方程和运动微分方程(即 N-S 方程)作为控制

方程,采用标准的 $\kappa\epsilon$ 方程模型组成封闭控制方程组,可求解喷嘴高压水射流流场^[5-7]。

不可压缩流体的连续性微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (9)$$

不可压缩黏性流体的运动微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (10)$$

对于不可压缩流体,标准 $\kappa\epsilon$ 方程模型的湍动能 κ 和耗散率 ϵ 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho \kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{\kappa} (C_{1\epsilon} G_\kappa - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \quad (12)$$

式中: G_κ 为平均速度梯度引起的湍动能,由式(13)计算。

$$G_\kappa = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (13)$$

μ_t 为湍流黏性系数,由式(14)计算。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (14)$$

在 FLUENT 软件中,作为默认值常数: $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\kappa = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

2.3 FLUENT 参数的设置

喷嘴高压水射流属于稳态流动,采用基于压力的求解器,即分离式求解器,选择多相流模型中的 VOF(volume of fluid)模型,湍流模型选用标准的 $\kappa\epsilon$ 模型。主项为水,第二项为空气,入口压力由式(6)和(7)计算,其中,静压为 1.46 MPa ,总压为 1.51 MPa ,出口压力为大气压,设定入口的空气体积分数为 0,出口的空气体积分数为 1。选择 SIMPLE 算法,以压力入口的数值为计算的初始条件,并将整个区域的空气体积分数初始化为 1。

2.4 仿真结果及验证

喷嘴高压水射流流场的轴向截面速度云图如图 4 所示。高压水射流离开喷嘴之后,与外界产生质量和动量的交换,空气被不断地卷入射流之中,因此,随着离开喷嘴距离的增加,射流的边界层逐渐扩

张,卷入更多的空气,速度逐渐降低^[8]。仿真得到的喷嘴射流出口速度为 54.69 m/s。

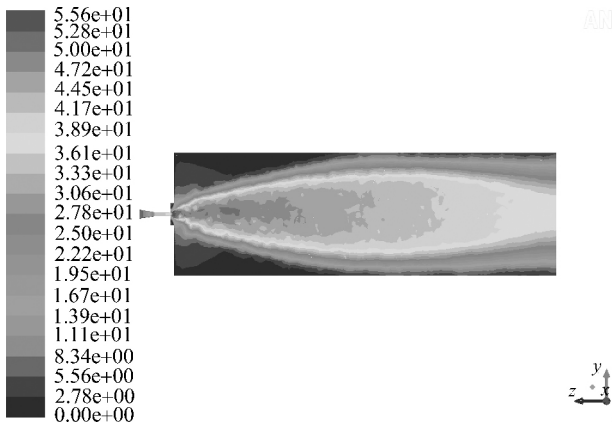


图 4 射流流场的轴向截面速度云图

Fig. 4 Velocity nephogram of axial section of jet-flow flow field

喷嘴射流出口速度可由式(15)计算^[9-10]。

$$v_0 = 44.77 \sqrt{p_1} \quad (15)$$

式中: p_1 为喷嘴入口处的静压,其值为 1.46 MPa。由式(15)计算得到的喷嘴射流出口速度为 54.10 m/s,仿真结果与计算结果非常接近,说明仿真可靠。

3 射流参数分析

3.1 喷射角与靶距

当射流应力大于油墨本身的极限应力时,油墨就会被清除,因此可用射流应力表征射流的清洗效果。射流应力 σ 可由式(16)计算^[11]。

$$\sigma = \rho v^2 (1 - \cos\beta) \quad (16)$$

式中: v 为射流到达网版表面时的速度; β 为射流作用在网版表面上,其方向变化的角度。

靶距是指喷嘴出口至网版表面的距离。选择合适的喷射角和靶距对清洗效率和清洗效果至关重要,本文对喷射角分别为 15°、30°、45°和 60°的喷嘴射流进行仿真,得到不同喷射角射流应力与靶距的关系如图 5 所示。

由图 5 可知,对于不同喷射角的喷嘴,其射流应力在出口(靶距为 0)处基本相同。由式(15)可知:在入口压力相同的情况下,喷嘴出口处的射流速度相同,因此射流应力也相同,符合实际情况;对于不同喷射角的喷嘴,其射流应力随靶距的变化趋势基本相同,即射流应力在靶距为 0~50 mm 之间迅速减小,之后再慢慢地减小;在靶距相同的情况下,射流应力随着喷射角增大而减小,在喷射角为 30°~

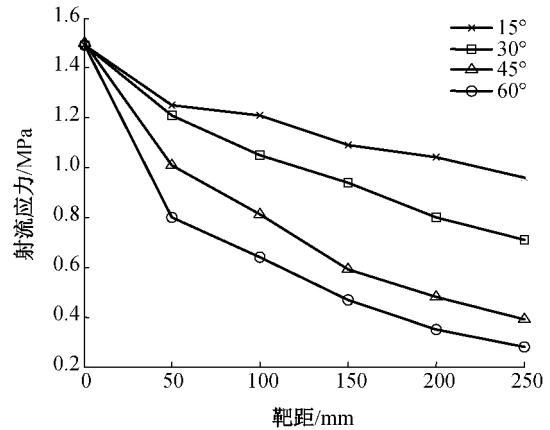


图 5 不同喷射角射流应力与靶距的关系

Fig. 5 Relationship between the stress of jet-flow and the target distance under different injection angles

45°之间的变化幅度较大。

若喷射角或靶距大,则射流的清洗范围大、应力小,反之则清洗范围小、应力大。清洗范围大则可提高清洗效率,而较高的应力有利于清洗效果的保证。考虑到网版结构和空间的限制,同时要保证较高的清洗效率和较好的清洗效果,本文取喷射角为 30°,靶距为 100 mm。

3.2 喷嘴间距

对于 3D 印花网版的清洗,需要保证每个网孔都被清洗干净。本文设计喷嘴呈交错分布,因此在靶距一定的情况下,喷嘴间距在一定范围内可避免出现网版部分区域清洗不到或者射流产生干涉的现象,同时较少的喷嘴数量可减少喷嘴之间的射流应力差异。但由于单个喷嘴的射流应力径向分布是不均匀的,因此依然会存在清洗效果的差异。当喷射角为 30°、靶距为 100 mm 时,得到射流应力的径向分布如图 6 所示。

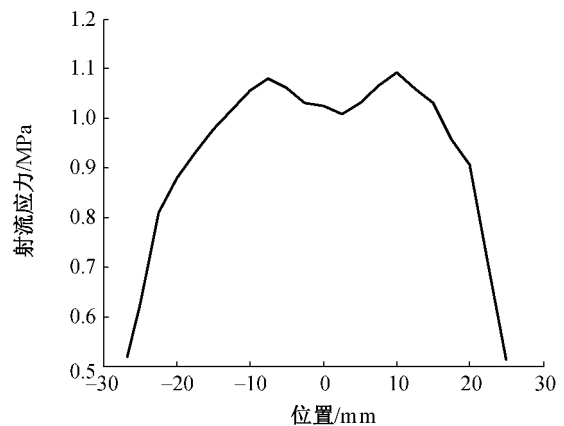


图 6 射流应力的径向分布

Fig. 6 Radial distribution of the stress of the jet-flow

射流应力的径向分布呈“M型”,由于重力的影响,并非完全对称。为了减小清洗效果的差异,保证网版的每个网孔都被清洗干净,应使网版各处所受的射流应力至少为最大射流应力的80%。由图6可知,-20~20 mm内的射流应力满足要求,因此本文取喷嘴间距为40 mm。

3.3 喷嘴移动速度

为了完成整个网版的清洗,喷嘴需要反复地移动,其移动速度影响清洗效率和清洗效果。为了研究喷嘴的移动速度对射流应力的影响,本文对移动速度分别为0、0.5、1.0、1.5和2.0 m/s的情况进行仿真,当喷射角为30°、靶距为100 mm时,得到射流应力与移动速度的关系如图7所示。

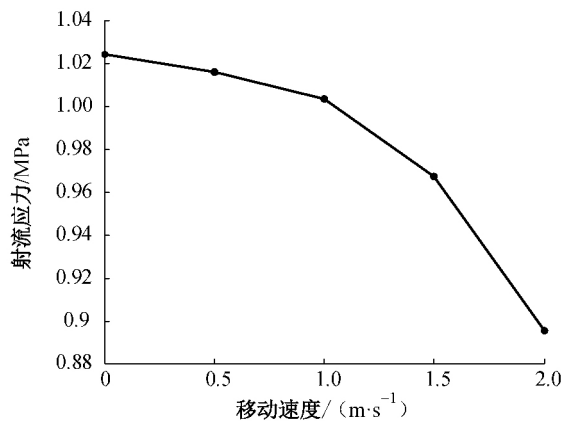


图7 射流应力与移动速度的关系

Fig. 7 Relationship between the stress of the jet-flow and the moving speed

由图7可知:随着喷嘴移动速度增大,射流应力下降,且下降速率越来越快;当喷嘴移动速度小于1.0 m/s时,射流应力基本没有变化。在实际工程中,喷嘴移动速度往往远小于1.0 m/s,因此可忽略移动速度对射流应力的影响。除了射流应力,清洗效果还与清洗时间有关。综合考虑清洗效率和清洗效果,本文取喷嘴移动速度为50 mm/s。

3.4 射流入射角

射流入射角是指射流轴线与网版平面法线之间的夹角。3D印花网版的清洗包括网孔清洗和表面清洗,因此需要优化射流的入射角,以保证足够的法向应力和切向应力。本文对射流入射角分别为0°、15°、30°、45°和60°的情况进行分析比较,当喷射角为30°、靶距为100 mm、喷嘴移动速度为50 mm/s时,不同入射角的射流法向应力和切向应力如表1所示。

表1 不同入射角的射流法向应力和切向应力

Table 1 Normal stress and tangential stress of jet-flow under different incidence angles

入射角/(°)	法向应力/MPa	切向应力/MPa
0	1.02	0
15	1.01	0.27
30	0.87	0.50
45	0.67	0.67
60	0.40	0.69

当射流入射角为0°时,法向应力最大,切向应力为0;随着入射角的增大,法向应力逐渐减小,切向应力逐渐增大;入射角为30°和45°时,法向应力与切向应力均较大。考虑到网孔的清洗难度较大,法向应力需稍大一些,因此本文取射流的入射角为30°。

4 结 语

本文首先优化了3D印花网版自动清洗机的喷嘴布局,在此基础上,使用Gambit和FLUENT软件对高压水射流流场进行仿真,分析仿真结果,得到最优的射流参数。具体结论如下:

(1)随着喷射角和靶距的增大,射流应力减小。喷射角30°~45°之间的射流应力变化幅度最大,因此取喷射角为30°;考虑到网框的尺寸和空间的限制,同时要保证清洗效果和清洗效率,取靶距为100 mm。

(2)为减小喷嘴射流应力径向差异造成的清洗效果不均匀,取喷嘴间距为40 mm,以保证网版各处所受射流应力至少为最大射流应力的80%。

(3)当喷嘴移动速度在1.0 m/s以内时,射流应力几乎不受移动速度的影响。根据经验取喷嘴移动速度为50 mm/s。

(4)为保证射流的法向应力和切向应力均较大,取射流的入射角为30°,此时法向应力略大于切向应力,符合3D印花网版的清洗要求。

参 考 文 献

- [1] 李洪旗,刘鸿飞. FLUENT软件在扁平扇形喷嘴设计中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2008(5): 106-128.
- [2] 康津,罗静,龚文均,等. 高压无气喷涂扇形喷嘴内部流场数值模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2013(10): 34-38.
- [3] 张晓东,董志国,郝鹏飞,等. 扁平扇形喷嘴设计及试验研究[J]. 机械设计与研究, 2008(1): 89-92.
- [4] 周万阳,于兰英,邓斌,等. 基于CFD的地铁隧道壁面冲洗扇形喷嘴的参数优选[J]. 液压气动与密封, 2015(9): 78-80.

(下转第820页)

- [10] MUGICA-ÁLVAREZ V, FIGUEROA-LARA J, ROMERO-ROMO M, et al. Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49(7): 284-293.
- [11] 胡泽源. 地铁环境中颗粒物污染水平的理论分析及数值模拟研究[D]. 西安:西安建筑大学环境与市政工程学院, 2014.
- [12] 何生全, 金龙哲, 吴祥. 不同地铁环控系统可吸入颗粒物研究及防治[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(3): 128-132.
- [13] 严国庆, 赵敬德, 施振扬, 等. 上海人民广场站站空气颗粒物浓度的实测分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(s1): 541-545.
- [14] 樊越胜, 胡泽源, 刘亮, 等. 西安地铁环境中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 CO_2 污染水平分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(5): 120-124.
- [15] 吴喜平. 地铁站台应用屏蔽门对空调节电系统的分析[J]. *华北电力*, 2001, 29(2): 20-23.
- [16] CHAN L Y, LAU W L, LEE S C. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(21): 5831-5840.
- [17] PARK D U, HA K C. Characteristics of PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea[J]. *Environment International*, 2008, 34(5): 629-634.
- [18] HARRISON R M, DEACON A R, JONES M R, et al. Sources and processes affecting concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in Birmingham (U K) [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(24): 4103-4117.
- [19] 北京城建设计研究总院有限责任公司, 中国地铁工程咨询有限公司, 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 等. 地铁设计规范(附条文说明): GB 50517-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [20] CHAN L Y, LAU W L, LEE S C. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(21): 3363-3373.
- [21] 郝吉明. 大气污染控制工程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] QUEROL X, MORENO T, KARANASIOU A, et al. Variability of levels and composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the Barcelona metro system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(11): 253-261.
- [23] ONAT B, STAKEEVA B. Personal exposure of commuters in public transport to $PM_{2.5}$ and fine particle counts [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, 4(3): 329-335.
- [24] KWON S B, JEONG W, PARK D, et al. A multivariate study for characterizing particulate matter(PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 297: 295-303.
- [25] CUSACK M, TALBOT N, ONDRÁČEK J, et al. Variability of aerosols and chemical composition of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 on a platform of the Prague underground metro [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 176-183.

(责任编辑: 杜 佳)

(上接第 791 页)

- [5] QIAO H, GAO D, XIAO X. Numerical simulation for three dimensional spray field of the wet skin-pass mill nozzle[C]// International Conference on Fluid Power and Mechatronics. IEEE, 2011: 123-127.
- [6] NIE B S, MENG J Q, JI Z F. Numerical simulation research of liquid-solid two-phase flow in abrasive water jet nozzle[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009, 18(2): 157-161.
- [7] 陈亮. 高压水射流扇形喷嘴内外流场仿真分析[D]. 兰州: 兰州理工大学机械电子工程学院, 2010.
- [8] 屈长龙, 王喜顺. 基于 FLUENT 的高压水射流除锈的流场仿真及射流参数优化[J]. *机械与电子*, 2016(2): 24-27.
- [9] 余留芳, 张金阳, 刘志农. 旋转喷头喷射外流场计算流体力学仿真分析[J]. *清洗世界*, 2011(5): 15-28.
- [10] 任小增. 高压水射流清洗用扇形喷嘴的结构及磨损研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2009.
- [11] 张佳福, 高善兵, 畅通, 等. 基于高压水射流清洗技术的研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2011(5): 24-26.

(责任编辑: 杜 佳)