

湿喷机喷嘴流场仿真分析

胡仕成¹, 刘 操¹, 王祥军², 龚 俊², 高 云²

(1. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南中铁五新集团, 湖南 长沙 410100)

摘 要:为了研究湿喷机喷嘴出口混凝土的均匀程度,根据湿喷机喷嘴流场的结构建立物理模型,再根据流体动力学方程建立混合流体在喷头内部流场中的力学模型,得到混合流体在喷嘴流场出口的理论速度和理论压力。然后利用 Gambit 软件对湿喷机喷嘴内流体进行三维建模,结合 CFD 软件 Fluent 选用 RNG 湍流模型与多相流中的欧拉模型,对喷嘴内气固两相流进行仿真计算,得到喷嘴内流体的压力、速度云图和相体积分数云图。在此基础上分析混合流体在出口截面上各相的体积分数,得到了混合物中空气的均匀度为 93.88%。研究结果表明:通过将理论值与仿真值进行对比,发现混合流体的理论值与仿真值较为接近;在喷嘴出口处混凝土和空气混合的很均匀;通过混凝土喷射试验验证了仿真计算的正确性,且现有的喷嘴结构具有一定的合理性,并为今后喷嘴结构的改进与优化提供依据。

关键词:机械工程;湿喷机;喷嘴;流场分析;均匀度

中图分类号:TH123 **文献标志码:**A

Simulation analysis of flow field on the nozzle of concrete spraying machine

HU Shi-cheng¹, LIU Cao¹, WANG Xiang-jun², GONG Jun², GAO Yun²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. China Railway Wuxin Group of Hunan, Changsha 410100, Hunan, China)

Abstract: In order to study the degree of homogeneity of concrete in the exit of wet spraying machine nozzle, this paper first established the physical model according to the structure of wet spraying machine nozzle flow field, and then established the mechanical model of mixed fluid in the internal flow field of nozzle according to the fluid dynamics equations to get the theoretical velocity and pressure of mixed fluid in flow field of nozzle. Through Gambit, the three dimensional model of fluid in the concrete spraying machine's nozzle was set up, and with the CFD software Fluent, the turbulence model RNG and the Eulerian model in multiphase flow were selected to perform simulating calculation on the flow field of gas-solid two-phase in the nozzle. The fluid's contour about pressure, velocity and phase volume fraction in the nozzle were obtained. On this basis this paper analyzed each phase's volume fraction of the mixed fluid in the outlet section and obtained the air's uniformity in the mixture which was 93.88%. The result of simulating shows that the theoretical value of mixed fluid is close to the simulation values. Besides it, the concrete at the exit of the nozzle is mixed with air very well. Finally the test of the concrete jet verifies the correctness of the simulation calculation, and the existing structure of

nozzle shows certain rationality, which provides a theoretical basis for future improvement and optimization. 3 tabs, 10 figs, 12 refs.

Key words: mechanical engineering; concrete spraying machine; nozzle; flow field analysis; uniformity

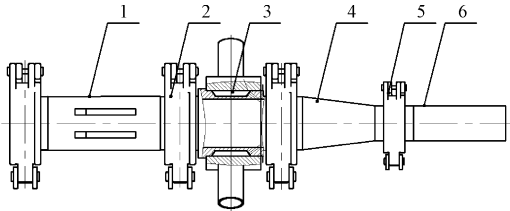
0 引言

近年来,随着喷射混凝土支护的推广应用,混凝土湿喷机广泛应用于矿山巷道、铁路和公路隧道、水利涵洞、各种地下工程、军事工程等的施工中。而施工中,喷嘴口径过大或者过小,会造成喷嘴出料不均匀,喷嘴堵管和混凝土反弹率大,严重影响施工质量和进度。所以,为了提高湿喷机的技术水平和产品质量,有必要对湿喷机喷嘴内的流动情况加以研究。

影响湿喷机的喷射效果的因素主要有:出口直径、喷嘴结构形式、出口直流段长度、喉部扩张角、流体的配比、流体混合的均匀度等。如王金东等针对不同直径的喷嘴进行两相流模拟,对得到的气相和固相的出口速度进行对比,来分析喷射效果^[1];郭建等通过设计合理变化的壁面型线,得到混合流体在出口的速度和压力,来分析喷射器的性能^[2];王安麟等通过在三维流固两相流的颗粒流向研究中使用的离散单元法(EDM),也为此类问题的研究提供了新思路^[3]。国外有 Kaya 等通过力学模型修正和预测流型来模拟两相流,但对具体问题往往不能完全适用,同时也需要大量试验的支持^[4]。但因喷嘴结构引起出口均匀性的变化,导致喷射效果好坏的研究很少见。湿喷机实际喷射中,基本是凭经验来判断出口的均匀性,所以本文从数值模拟仿真来研究湿喷机喷嘴出口混凝土均匀度对喷射效果的影响^[5-9]。为此,本文先研究了喷嘴内部流场混合流体的动力学方程,得出压力、速度等理论参数;然后采用计算流体动力学(CFD)方法对喷嘴内部流场进行分析,得出喷嘴内部流场的压力、速度及气体的体积分数分布情况,并计算出喷嘴出口混合物的均匀度,结果证明了现有喷嘴结构的合理性。

1 湿喷机工作原理及喷嘴的结构

喷嘴是由直管、连接管、变径管和喷射管组成,如图 1 所示。在混凝土喷射的实际工作过程中,混凝土是通过交替的混凝土泵推到喷嘴的直管处 1,而高压空气和速凝剂在连接管 3 充分混合后,再通到喷嘴的变径管 4 的流场中与混凝土混合,最后混凝土从喷嘴管 6 离开喷嘴^[2]。



注: 1-直管; 2-卡箍; 3-连接管; 4-变径管; 5-卡箍; 6-喷嘴管

图 1 喷嘴模型
Fig. 1 Nozzle model

2 混合流体动力学的性质

2.1 气-固混合流体的密度和质量流率

在喷嘴中气-固两相流体颗粒相具有物浓度,采用欧拉生标相描述颗粒相,在流场中可以任意选取这样的微元,该微元尺寸对流场的几何尺寸足够小,而又对颗粒的尺寸足够大,并且在微元内含有足够的颗粒数。

管道输送气-固相流体密度及含固(气)率为

$$\rho_s = \rho_1 + \varphi_1 (\rho_2 - \rho_1) \tag{1}$$

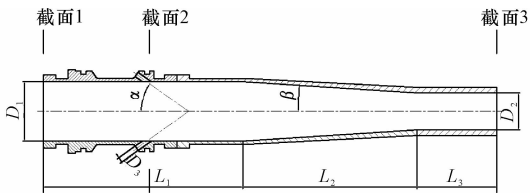
式中: ρ_1 、 ρ_2 分别为气体及固体颗粒密度; φ_1 为气-固混合流体含固体颗粒的百分率(简称含固率); ρ_s 为气-固混合流体的密度。

经计算喷嘴流场中混合流体的密度为 228 kg/m³。

2.2 喷头内部流体力学方程

喷嘴的内部结构如图 2 所示。设从截面 1 至截面 3 之前,气-固混合流体、抽吸液体及混合后流体的质量流量依次记为 Q_2 、 Q_3 及 Q_1 ,则有

$$Q_i = \rho_{si} v_i S_i \quad i=1,2,3 \tag{2}$$



注: D_1 -直管直径; D_2 -细直管直径; D_3 -进风管直径; α -细管偏角; β -半锥角; L_1 -直管长; L_2 -变径管长; L_3 -细直管长。

图 2 喷嘴的内部结构

Fig. 2 Internal structure of nozzle

由连续性方程可得

$$Q_2 + Q_3 = Q_1 \tag{3}$$

式中: v_i 、 ρ_{si} 分别为气-固混合流体在截面 3 到截面 1

的速度和密度。

从截面 3 到截面 1,流体的冲量方程为

$$\rho_{s3} v_3^2 S_3 + \rho_{s2} v_2^2 S_2 - \rho_{s1} v_1^2 S_1 =$$
$$P_1 S_1 - P_2 S_2 - P_3 S_3 \tag{4}$$

式中: P_i 为混合流体在截面 3 到截面 1 的压强; S_3 为截面 3 面积; S_1 为截面 1 面积; S_2 为截面 2 面积。

引入

$$\alpha = \frac{S_3}{S_2}, \beta = \frac{S_3}{S_1}, \mu_1 = \frac{Q_2}{Q_3} \tag{5}$$

式中: μ_1 为引射系数; α 、 β 为截面比。

由式(2)、式(3)、式(5)可得

$$v_1 = \frac{\rho_{s3}}{\rho_{s1}} \beta v_3 (1 + \mu_1) \tag{6}$$

将式(5)、式(6)代入式(4),化简后可得

$$P_1 = \left(P_3 + \frac{P_2}{\alpha} \beta \right) + \rho_{s3} v_3^2 \left(1 + \frac{\rho_{s3}}{\rho_{s2}} \alpha \mu_1^2 \right) \beta -$$
$$\rho_{s3} v_3^2 \frac{\rho_{s3}}{\rho_{s1}} \beta^2 (1 + \mu_1)^2 \tag{7}$$

由湿喷机喷射工况求出: $v_1 = 40.58 \text{ m/s}$, $P_1 = 0.32 \text{ MPa}$ 。

3 湿喷机喷嘴建模与数值仿真

3.1 喷嘴计算区域的几何模型和网格模型

3.1.1 几何模型

喷嘴模型由混凝土管、空气速凝剂管组成。混凝土管是由圆管和椎管组成。空气速凝剂管均布在混凝土管的四周。具体的几何模型见图 3,其喷嘴的主要参数如表 1 所示。

表 1 喷嘴参数
Tab. 1 Nozzle parameters

| | |
|------------------------|-----|
| 直管直径 D_1 /mm | 80 |
| 细直管直径 D_2 /mm | 50 |
| 进风管直径 D_3 /mm | 7 |
| 细管偏角 $\alpha/(^\circ)$ | 35 |
| 半锥角 $\beta/(^\circ)$ | 4 |
| 直管长 L_1 /mm | 274 |
| 变径管长 L_2 /mm | 240 |
| 细直管长 L_3 /mm | 110 |

3.1.2 网格模型

如图 3 所示,对喷嘴进行三维网格划分,采用分区网格划分技术,混凝土管采用 Hex/Wedge 网格划分格式,网格大小为 2 mm,空气速凝剂管采用 Hex/Wedge 网格划分格式,网格大小为 1 mm。整个模型网格总数为 119 477。

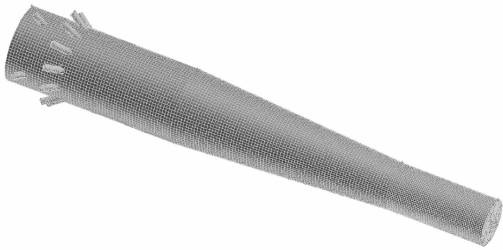


图 3 喷嘴计算区域的网格模型
Fig. 3 Nozzle computing regional grid model

3.2 数值仿真

3.2.1 计算中的假设

在喷射过程中,喷嘴内流动极其复杂,为了便于计算分析,现对流场作如下假设:①混凝土湿喷机中的工作介质为典型的不可压缩粘性流体;②混合流体是水、空气、水泥、砂和石子等多相混合物,为了简化研究,本文仅考虑空气和混凝土两相;③只研究工作介质的运动状况,不探讨工作介质的温度变化以及水泥的水化反应,不考虑工作介质内能的变化;④喷嘴中所有的构件为绝对刚体,忽略形成流动区域的固体壁面与工作介质之间相互作用而产生的变形。

3.2.2 边界条件

操作环境为 101 325 Pa。前处理采用分离求解器,多相流模型采用的是欧拉模型,对整个流体作稳态处理。湍流模型采用 $\kappa\epsilon$ 模型中的 RNG 模型。

计算边界条件如下。

(1)空气进口采用的是压力进口。进口压力为 0.8 MPa。假定入口截面上的气体轴向速度服从光滑管中充分发展湍流流动,而径向速度为 0;湍流系数取湍流强度为 3.55%,水力直径为 7 mm。

(2)混凝土进口采用的是速度进口,入口速度轴向均匀为 1.65 m/s,湍流系数取湍流强度为 3.68%,水力直径为 80 mm。

(3)出口采用的是压力出口,出口的压力为 0.32 MPa。取充分发展的管流条件,即求解的各变量法向导数取值均为 0。湍流系数取湍流强度为 6.50%,水力直径为 50 mm。管壁面取无滑移的边界条件^[10]。

4 计算结果与分析

通过对喷嘴模型在正常工况时进行数值模拟,得到了喷嘴流场内速度分布、压力分布和相浓度体积分数分布等结果,并分析了喷头结构对喷射性能的影响。

4.1 仿真结果

4.1.1 压力分布

图 4 是 $Z=0$ 截面上的压力云图,从入口到出口,压力呈现出递增的趋势。这种变化在加入 0.8 MPa 的压缩空气后尤为明显。云图结果显示在混凝土进口处压力最低,为 0.2 MPa。在加入 0.8 MPa 压缩空气后压力得到了大幅的增加,压力基本保持在 0.3 MPa,这是由于高速压缩空气进入到喷嘴后与混凝土相互碰撞,同时混凝土进入喷嘴的锥管段后,管道截面积不断减小,这造成了混凝土进一步挤压,导致压力逐步缓慢的增加,在喷嘴出口处压力达到 0.32 MPa。

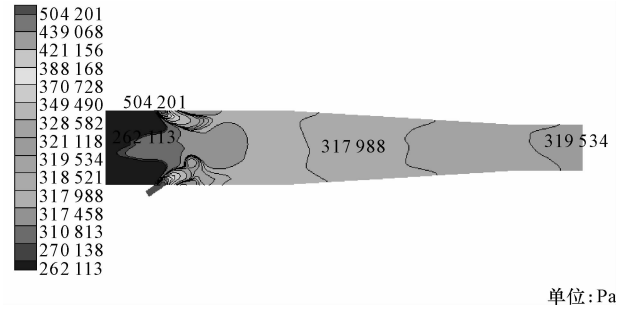


图 4 混合物在 $Z=0$ 截面上的静态压力云图
Fig. 4 Static pressure contour of mixture on the $Z=0$ section

4.1.2 速度分布

图 5 是喷嘴在 $Z=0$ 的截面上的速度云图。空气和混凝土速度的变化呈现出一致性:从入口到出口的过程中,速度呈现出递增的趋势,在直管和变径管处速度增加缓慢,在进入细直管后速度梯度越来越大,表现出速度较快增加的过程。由于混凝土的密度远大于空气的密度,与空气速度的增加相比,混凝土速度的增加表现出一定的滞后性,两者之间有一定的速度滑移。这种变化在出口处表现的更为明显,在出口中心处空气的速度最高达到 41 m/s,混凝土的速度最高达到 34 m/s。另外,从图中还可以得到喷嘴管壁附近流体速度增加明显,其速度梯度比中间区域的速度梯度大。

4.1.3 出口速度分布

下页图 6 是出口截面处的速度云图,从图中可知:空气和混凝土速度均成环形分布,壁面上的速度基本为 0,然后向中间区域递增。速度梯度的增加在壁面附近大,而在中心区域较小,呈现出喷嘴内部靠近壁面的区域速度高,而中心区域的速度低的现象。壁面附近空气速度达到 100 m/s 左右,而中心区域空气的速度只有 50 m/s。在壁面附近混凝土速度达到 80 m/s 左右,而中心区域混凝土的速度只

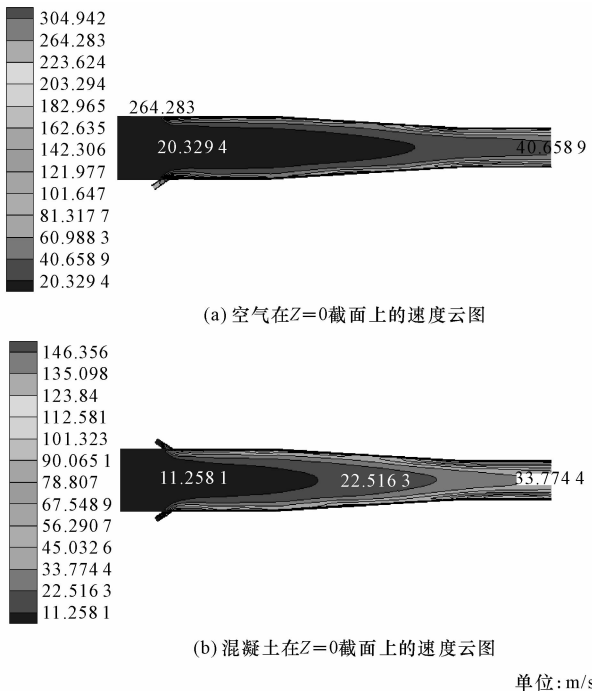


图 5 空气和混凝土在 $Z=0$ 截面上的速度云图
Fig. 5 Velocity contours of air and concrete on the $Z=0$ section
有 39 m/s。同样,从图中可以看出相同区域内的混凝土的速度比空气的速度低,这说明了混凝土的速度变化仍与空气一致,并且有速度滑移。

从下页图 7 中可以得到混合流体的平均速度为 43.07 m/s,出口截面积为 50 mm,可求得湿喷机的生产率为 18.34 m³/h。

这种结果的形成与喷嘴的结构设计有关:在喷嘴入口处均匀分布压缩空气入口,空气入口与主管道的夹角小。所以进入管道的空气很容易在喷嘴壁面附近形成一层包裹着混凝土的气体层,即为气膜。其能量损失少,速度值大。而进入管道中间的压缩空气,在冲击混凝土后,能量得到一部分损失,速度值相对低一些。

4.1.4 相浓度均匀性

下页图 8 为出口处的体积分布云图,从图 8 中看出在出口截面上,相浓度体积分数成环形分布,混凝土料流较为集中在出口截面的中心区域,然后向外逐渐递减,在管道上壁面混凝土的浓度只达到最低。空气相体积分数刚好与混凝土体积分数相反。这是理想的风包料的状态。

另外从出口处的体积分布云图来看,结合出口速度云图(图 6),在靠近中心部分区域,混凝土的体积分数较大,一方面受混凝土密度大的影响,另一方面在这一区域的空气速度较低,使混凝土集中在这一区域。由于速度作用的影响,在出口速度高的区

域混凝土的组分较低。

在图 4 中的 y 轴方向,从压缩空气入口到喷嘴出口(Y=135 到 Y=525)之间,取 10 个截面。把每

个截面中各个单元网格上的空气体积分数提取出来。然后得到每个截面上空气体积分数的均值、方差和标准差。其值见表 2。

表 2 各个截面空气体积分数的均值,方差和标准差

Tab. 2 Mean, variance and standard deviation of each section of air volume score

| 类别 | 截面 1 Y=135 | 截面 2 Y=145 | 截面 3 Y=165 | 截面 4 Y=185 | 截面 5 Y=265 | 截面 6 Y=365 | 截面 7 Y=465 | 截面 8 Y=485 | 截面 9 Y=505 | 截面 10 Y=525 |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| 均值(X) | 0.912 4 | 0.914 4 | 0.922 2 | 0.923 9 | 0.927 3 | 0.921 5 | 0.941 8 | 0.948 2 | 0.955 0 | 0.961 3 |
| 方差(σ) | 0.020 0 | 0.018 8 | 0.018 6 | 0.018 0 | 0.012 3 | 0.013 3 | 0.007 9 | 0.006 6 | 0.004 9 | 0.003 4 |
| 标准差(S) | 0.141 4 | 0.137 0 | 0.136 4 | 0.134 4 | 0.111 2 | 0.115 4 | 0.089 0 | 0.081 5 | 0.070 6 | 0.058 8 |

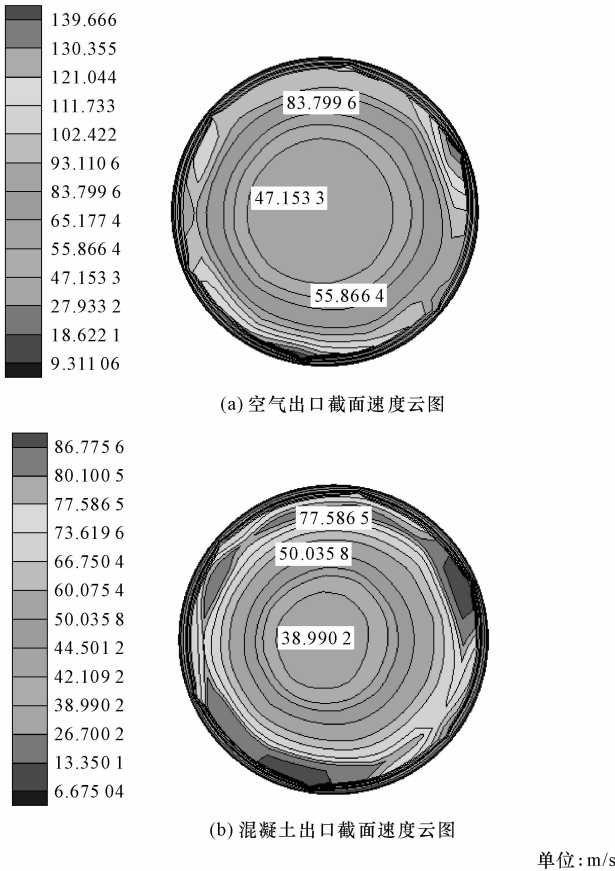


图 6 空气和混凝土出口截面速度云图
Fig. 6 Velocity contour of export cross section of concrete and air

混合效果的好坏实际上是指混合程度上的高低。但这是比较笼统的。通常混合效果的量化评价指标是标准偏差和均匀度。均匀度越大,混合物混合得越均匀。在本文中,空气相百分比的均匀度可表示为^[11]

$$H = \left(1 - \frac{S}{\bar{X}}\right) \times 100\%$$
 (8)

式中: $\frac{S}{\bar{X}}$ 为离散度。

经计算,并绘制截面间均匀度的曲线图,如下页

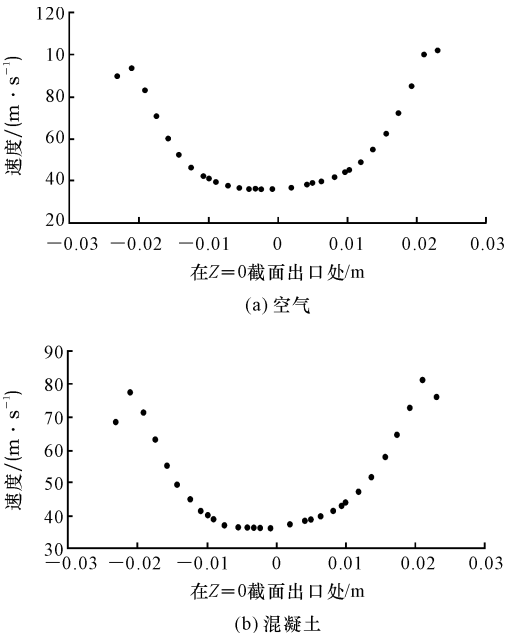


图 7 出口处空气和混凝土的速度曲线
Fig. 7 Velocity curves of export cross section of concrete and air

图 9 所示。图 9 中得知:随着混合物在管道中不断的推进,均匀度也不断的提高。在出口处的均匀度达到了 93.88%。这说明喷嘴出口混凝土和空气混合的很均匀。

4.2 仿真分析

压缩空气明显分成两部分:一部分在壁面附近,形成切向流,即为风膜。另一部分进入管壁内部,形成冲击流,与混凝土充分混合。两股气流共同作用使得混凝土与空气混合的更均匀。

切向流主要是由环形高速气流组成,分布在喷嘴内壁附近,它包裹着低速的混凝土并推动其加速运动。这种切向流出现的位置与产生较高静态压力的区域一致。正是这种切向流使得喷嘴内壁附近出现了较高的压力。这也解释了在喷嘴前端靠近壁面区域的速度较高,而中心区域速度值低的缘故。切向流起到了多种作用:①减小混凝土颗粒与壁面和

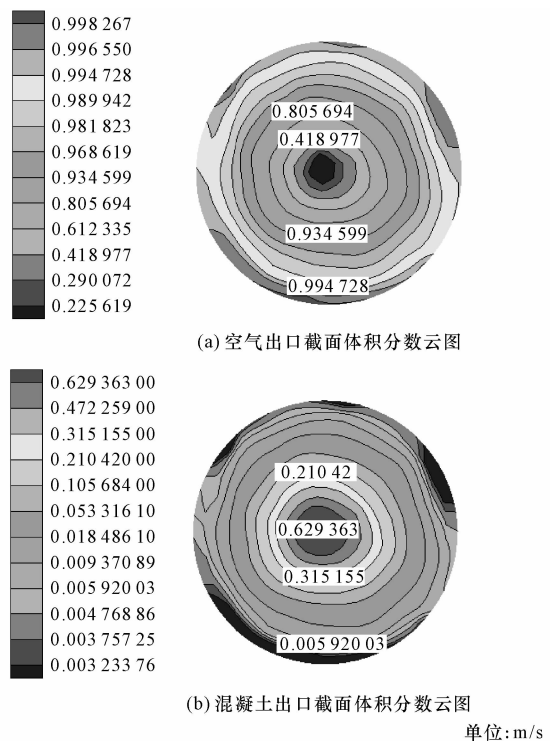


图 8 空气和混凝土出口截面体积分数云图

Fig. 8 Volume fraction contour of the outlet section of air and concrete

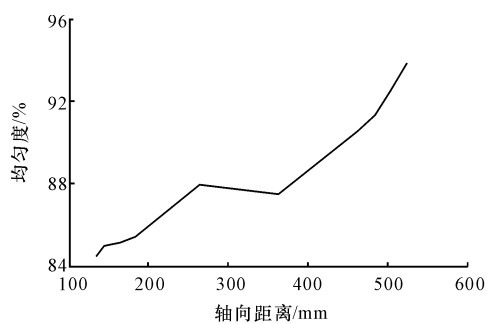


图 9 均匀度分布

Fig. 9 Uniformity distribution

颗粒之间的碰撞;②减少局部涡流的产生;③减小对喷嘴的反作用力;④减少混凝土与喷嘴椎管内通道的粘接;⑤有利于获得较高的出口速度。

冲击流进入喷嘴中间区域,高速冲击混凝土,使混凝土变成悬浮的颗粒状,使空气、速凝剂与之充分混合。而混凝土与速凝剂混合的均匀性对喷射效果具有很大的影响。当混凝土混合不够均匀,不但很容易引发喷嘴处堵管故障,影响施工进度。还将存在很大反弹率,造成材料上的浪费,影响施工质量。

这是理想的输送状态,从流动状态上看,混凝土料流的流动和空气表现出高度的一致性。切相流的产生,有利于减少流动中颗粒与管壁的相互碰撞。冲击流的产生,空气与混凝土的充分混合,能够获得

较高的出口均匀度^[12]。

5 试验验证

由于多相流流场的复杂性,直接检测空气和混凝土在喷嘴内的流动状态非常困难。喷嘴内的空气和混凝土流动状态可根据喷射效果间接表征出来,因此试验主要分析和测量混凝土塌落度、水灰比、回弹量和喷嘴处的脉动情况等;通过脉动情况和回弹量,可间接表征空气和混凝土在喷嘴内的流动情况和喷嘴出口均匀度的高低。

5.1 试验设备

喷射试验采用湖南五新重型装备有限公司研制的 CHP30 型车载湿式混凝土喷射机,如图 10 所示。重量计量工具采用 TGT-1 000 A 型机械磅秤。最大量程为 1 000 kg,精度为 0.5 kg。



图 10 湿喷机喷射试验现场

Fig. 10 Spray test site of wet spraying machine

5.2 试验条件

根据现行的《锚喷混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)以及 CHP30 型湿喷机喷射工艺要求,采用定容重法配制混凝土。喷射试验情况如下:空压机供气量为 10 m³/min,混凝土泵送量为 20 m³/h,供气压力为 1 MPa;混凝土塌落度为 180 mm,速凝剂掺量 3%~5%,混凝土喷射总量 32 m³;试验次数 5 次。

5.3 试验结果

试验期间收集的喷射混凝土回弹量见表 3。

表 3 湿喷机喷射回弹量

Tab. 3 Wet spraying machine spray springback

| 试验次数/次 | 喷射量/m ³ | 喷射时间/min | 回弹量/kg | 回弹率/% |
|--------|--------------------|----------|---------|-------|
| 1 | 6 | 21.2 | 1 603.5 | 10.69 |
| 2 | 6 | 21.0 | 1 560.0 | 10.40 |
| 3 | 7 | 24.5 | 1 935.5 | 11.06 |
| 4 | 6 | 21.8 | 1 630.5 | 10.87 |
| 5 | 7 | 24.3 | 1 907.5 | 10.90 |

采用该喷嘴喷射时,料流喷出更加均匀,没有出

现脉动流,回弹率有进一步的降低(原井下煤矿掘进巷道工业性试验期间,回弹率为12%~14%)。

从表3中可以看出,该湿喷机的平均实际生产率为 $16.99 \text{ m}^3/\text{h}$ 。而从仿真计算得到的生产率为 $18.34 \text{ m}^3/\text{h}$,两者的相对误差为7.36%。

6 结 语

(1)混合物是水、空气、水泥、砂和石子等多相混合物,仅考虑空气和混凝土两相与实际情况有所差别,将混合料视为空气和混凝土两相组成的流体能够反映混凝土在喷嘴内流动的大致情况。

(2)通过仿真计算,得到出口截面混合流体的均匀度,验证了仿真结果的正确性和喷嘴结构具有一定的合理性,对产品优化具有实际指导意义。

(3)在喷嘴流场内的流体可以分为空气、水泥浆和砂粒3种类型,这3种类型的流体对应为气体、液体和固体三相组成的流体,能够更好地模拟流体在喷嘴内的流动情况,这也是研究混凝土在喷嘴内流动的下一个研究方向。

参考文献:

References:

- [1] 王金东,吕志利,刘树林,等.基于FLUENT的气动喷砂两相流分析[J].科学技术与工程,2009,9(17):5113-5115.
WANG Jin-dong,LU Zhi-li,LIU Shu-lin,et al. The analysis of two-phase flow in pneumatic sandblasting based on FLUENT[J]. Science Technology and Engineering,2009,9(17):5113-5115. (in Chinese)
- [2] 郭建,沈恒根,孙明明,等.一种新型喷射器的内部流场分析[J].流体机械,2009,37(8):25-28.
GUO Jian,SHEN Heng-gen,SUN Ming-ming,et al. An analysis of the internal flow field of new type injector[J]. Fluid Machinery,2009,37(8):25-28. (in Chinese)
- [3] 王安麟,邵萌,梁波,等.三维流固两相流的颗粒群轨道柔性模型[J].上海交通大学学报,2005,39(5):790-794.
WANG An-lin,SHAO Meng,LIANG Bo,et al. Particles trajectory flexible model of 3D fluid-solids two-phase flows[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2005,39(5):790-794. (in Chinese)
- [4] Kaya A S. Mechanistic modeling of two-phase flow in deviated wells[J]. SPE Reprint Series,2004,58(2):

34-36.

- [5] 谷立臣,贺利乐,曹辉.泵式混凝土湿喷机的研究与设计[J].矿山机械,2001(6):22-23.
GU Li-chen,HE Li-le,CAO Hui. Pump type concrete wet spraying machinery research and design[J]. Mining Machinery,2001(6):22-23. (in Chinese)
- [6] 王金明,谢旭时,陈海.气-固-液混凝土喷射机喷头结构的力学性能分析[J].机械开发,2000,30(5):33-35.
WANG Jin-ming,XIE Xu-shi,CHEN Hai. Analysis of the mechanics characteristic in gas-solid-liquid concrete jet nozzle[J]. Mechanical Development,2000,30(5):33-35. (in Chinese)
- [7] 车德福,李会雄.多相流及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,2007.
CHE De-fu,LI Hui-xiong. Multi phase flow and its application[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007. (in Chinese)
- [8] 刘谊宾,汪秀山,才委,等.混凝土搅拌运输车多相流动的数值模拟与分析[J].建筑机械,2012(5):67-72.
LIU Yi-bin,WANG Xiu-shan,CAI Wei,et al. Numerical simulation and analysis on multi-phase flow in concrete mixing and transporting vehicle[J]. Construction Machinery,2012(5):67-72. (in Chinese)
- [9] 周俊杰,徐国权,张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
ZHOU Jun-jie,XU Guo-quan,ZHANG Hua-jun. Analysis of fluent technology and engineering examples [M]. Beijing:Chinese Water Conservancy and Hydro-power Press,2010. (in Chinese)
- [10] 贺超.湿喷机送排料系统关键结构的分析与优化[D].北京:煤炭科学研究总院建井研究分院,2010.
HE Chao. Analysis and optimization of the discharge system of key structures of feeding wet spraying machine[D]. Beijing:The Shaft Building Branch Academy of China Coal Research Institute,2010. (in Chinese)
- [11] Quinn W R,Militzer J. Effect of nonparallel exit flow on round turbulent free jets[J]. Heat and Fluid Flow,1989,10(2):.
- [12] Eames I W,Aphornratana S,Haider H. A theoretical and experimental study of a small-scale steam jet refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration,1995,18(6):378-386.