

# 利用 STAR-CD 模拟优化爆炸加工半球内自然通风

## Optimization of naturally ventilation in explosive working cavity with STAR-CD

吕继组<sup>1</sup> 白敏丽<sup>1</sup> 李晓杰<sup>2</sup> 秦小勇<sup>3</sup> 王军<sup>4</sup> 于盛华<sup>4</sup> 闫鸿浩<sup>2</sup>

(1 大连理工大学 能源与动力学院, 大连 116023)

(2 大连理工大学 工业装备国家重点实验室, 大连 116023)

(3 大连港重点工程指挥部, 大连 116004) (4 大连爆炸加工研究所, 大连 116021)

**摘要:** 爆炸加工过程, 炸药高温膨胀后会产生大量有害气体, 如不及时排出将危及作业工人的生命安全。为使洞内有害气体能尽快排出, 提高作业周期, 对洞内自然通风问题需深入了解。因此, 本文采用非稳态三维数值模拟对其进行深入研究。通过数值模拟试验可以得到, 在上排气口总面积相同条件下, 不同排气口布置方式对有害废气浓度衰减的影响; 在排气口直径相同条件下, 一定高度范围内, 不同排气口高度对有害废气浓度衰减的影响; 在上排气口高度相同条件下, 不同排气口直径对有害废气浓度衰减的影响; 为实际结构设计提供理论支持。

**关键词:** 优化设计; 自然通风; STAR-CD

**Abstract:** The process of explosive working can produce great quantities harmful gases after high temperature expansion, which will endanger the workers' lives. In order to vent the poisonous gas as soon as possible, and to shorten the period of work, the natural ventilated problem in the hole should be studied thoroughly. The deep study is performed by 3-dimensional transient numerical simulation. It can be seen by simulation computation that different exhaust port disposing mode effects on the reduce of the poisonous gas concentration, under the condition of the same total areas of the up and down exhaust ports; different height of the exhaust port effects on the reduce of the poisonous gas concentration, under the condition of the same exhaust port diameter and the height in a certain range; and different exhaust port diameter effects on the reduce of poisonous gas concentration under the condition of the same height of the up and down exhaust port. Therefore, it can provide theoretical support for actual structure design.

**Key words:** Optimizing Design; Naturally Ventilation; STAR-CD

## 1 前言

为生产加工一些特殊复合板, 需要采用爆炸加工工艺<sup>[1,2]</sup>。一般 2~3mm 的不锈钢复层需要的铵油炸药量为 25~35kg/m<sup>2</sup>, 因此, 10~20m<sup>2</sup> 的大板幅不锈钢复合板一次爆炸的总炸药量在 250~700kg 左右, 有时甚至达到 1000kg 炸药量。如爆炸焊接在地表进行裸爆, 将引

起极强空气冲击,对周围环境造成极大的影响,为了减少爆炸对周围环境造成的影响,爆炸加工需要在一定封闭的空间内进行,这就会产生爆炸后有害气体及时排出问题,如不及时排出将危及作业工人的生命安全,国家对工人工作区间有害废气浓度也制定了严格的法律法规<sup>[3,4]</sup>。为了能保证在作业周期内,爆炸加工车间内的有害气体达到国家工业企业设计卫生标准,需要对爆炸加工车间内通风问题进行深入研究。通过对原型和 1/6 模型的实验、理论和三维数值模拟研究可以看出,在当环境处于一级风,且风向符合下进上排时,原型爆炸加工洞气体自然对流能满足设计要求<sup>[5]</sup>。为了对实际设计爆炸洞自然通风效果有更深入的了解,本文利用大型通用 CFD 软件 STAR-CD 对其不同几何结构在自然通风条件下,进行三维瞬态数值模拟研究。通过计算可以预测各种几何参数对其影响的效果,为实际爆破加工洞设计提供理论支持。

## 2 模型建立

### 2.1 数学模型

由于采用自然对流模型对整个流动区域进行计算,计算采用的数学公式有<sup>[6]</sup>:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i \quad (2)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho h_t) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h_t + F_{h,j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h - \sum_m H_m s_{c,m} \quad (3)$$

$$\text{质量扩散方程: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j Y_m + F_{m,j}) = s_m \quad (4)$$

其中:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad h_t = \bar{c}_p T - c_p^o T_o$$

$$\text{密度: } \rho = \frac{p}{RT \left( \sum_m \frac{Y_m}{M_m} \right)} \quad \text{浮力项: } s_i = g_i (\rho - \rho_0)$$

能量方程中扩散项,假定流体中热扩散和质量扩散满足傅里叶定律和菲克原理。

$$\text{热扩散项: } F_{h,j} = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_m h_m \rho V_{m,j} \quad (5)$$

$$\text{质量扩散项: } F_{m,j} = \rho Y_m V_{m,j} \quad (6)$$

将  $V_{m,j}$  为  $j$  向的扩散速率, 用  $V_m$  代替,

$$V_m = -\frac{1}{X_m} D_m \nabla X_m - \frac{D_m^T}{\rho Y_m} \nabla \ln T = -\frac{D_m}{X_m} (\nabla X_m + K_{T,m} \nabla \ln T) \quad (7)$$

$$K_{T,m} = \frac{X_m}{\rho Y_m} \cdot \frac{D_m^T}{D_m} \quad (8)$$

式中:  $F_{h_i,j}$  为  $x_j$  向的热能扩散量;  $F_{m,j}$  为  $x_j$  向的质量扩散量;  $\bar{c}_p$  温度  $T$  时的定压比热;  $c_p^0$  温度为  $T_0$  时的参考比热;  $D_m$  是分子扩散项系数,  $D_m^T$  热扩散项系数;  $X_m$  是克分子分数系数;  $\rho$  为密度;  $u_i$  为  $x_i$  方向上的绝对速度分量;  $\tau_{ij}$  为压力张量分量;  $s_m$  为质量源相;  $p$  为测定压力;  $\rho_0$  是参考密度;  $g_i$  是重力加速度;  $h_i$  为热焓;  $R$  理想气体常数;  $T$  温度;  $s_h$  能量源相。

对于自然对流, 整个流动区域内压力与重力分布满足右手定则, 动量方程中的压力项  $P$  用  $P_{piezo}$  其数学表达式如下:

$$P_{piezo} = p_{stat} - \rho_0 [g_x(x-x_0) + g_y(y-y_0) + g_z(z-z_0)] \quad (9)$$

## 2.2 计算模型

为了考察爆炸洞内有害气体随时间的变化趋势, 数值模拟选用采用瞬态模式计算; 计算模型选用自然对流模型; 计算算法采用 PISO 算法, 空间差分格式采用二阶格式, 时间差分格式采用一阶完全隐式格式; 湍流模型选用 - 低 Reynolds 湍流模型。另外, 密度根据理想气体状态方程计算。计算过程中, 需要求解连续性方程、动量方程、能量守恒方程、质量扩散方程及湍能模型方程。

## 2.3 几何模型

几何结构的精确描述是实现准确三维数值模拟的重要前提, 爆炸加工洞整体结构较为简单, 因此为了保证计算结果的精确度, 在几何建模时, 完全可以按照真实几何结构进行建模, 而不作任何简化。利用三维 CAD 软件 Pro-e 建立不同结构的三维几何模型。图 1 给出的是单上排气口布置和四上排气口布置的几何示意图。

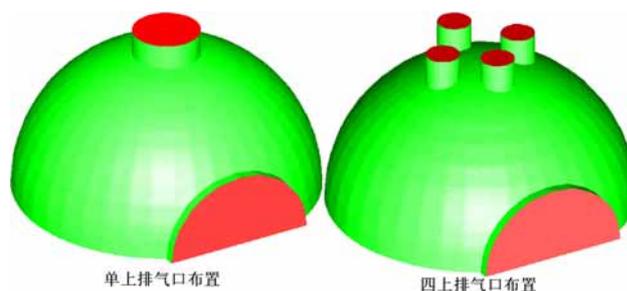


图 1 三维几何模型

## 2.4 几何参数

为了考察几何结构对爆破洞内有害气体衰减速率的影响, 本文分别计算了 8 种不同的改型结构, 总体分为三种类型, (1) 不同上排气口布置对比; (2) 相同上排气口直径, 不同排气口高度对比; (3) 相同上排气口高度, 不同排气口直径对比。不同改型结构参数如表 1 所示。

表 1 爆炸加工洞几何尺寸

Tab. 1 Geometrical Dimensions of Explosive Working Cavity

	爆炸洞直径(m)	上排气口个数(个)	上排气口直径(m)	上排气口高度(m)
原型	36	1	8	20.55
改型 1	36	4	2	20.55
改型 2	36	1	8	21.55
改型 3	36	1	8	22.55
改型 4	36	1	8	23.55
改型 5	36	1	10	20.55
改型 6	36	1	12	20.55
改型 7	36	1	14	20.55
改型 8	36	1	15	20.55

## 2.5 计算网格

三维数值模拟中网格的生成是一件极其困难的事情,主要原因是实际流动区域往往具有不规则且十分复杂的几何外形。为了保证计算精度,希望在网格生成时能尽量保持计算区域与实际流动区域相一致;另外,网格的类型、质量、结构、尺度等都对计算的精度和稳定性有着直接的影响。对爆炸加工洞来说,其结构比较简单,因此,内部采用六面体网格,壁面附近采用边界层网格处理,使计算精度有所提高。在实际计算网格划分中主体采用非结构化的六面体网格,六面体网格不但可以使计算网格数量减少,而且有计算精度高、适应的算法较多等优点。但是,由于几何表面十分复杂,想要完全与几何表面吻合,则局部采用非结构化的多面体网格。利用 STAR-CD 自动网格生成器 Pro-am,采用网格单元与任意的交界面技术和局部加密技术相结合对爆炸洞进行网格划分,从而产生完全非结构化的贴体网格如图 2 所示。单元网格总的数量根据不同结构各不相同。

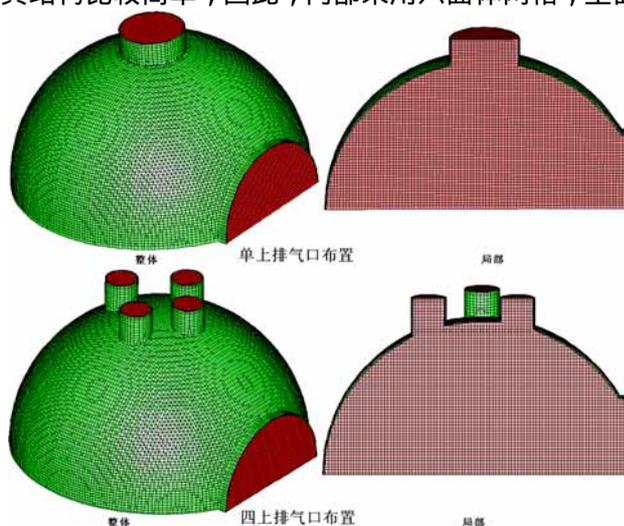


图 2 网格示意图

## 2.6 初边界条件

初始条件主要是爆炸热膨胀后洞内有害气体的速度、浓度、温度、压力分布等。本文通过理论计算,假定 1 吨炸药完全爆炸从而求出洞内有害气体浓度、温度、压力等;并且认为初始状态洞内气体无流动。

爆炸加工洞边界条件较为简单,主要包括两个排气口和壁面。两个排气口定义为压力边界条件,压力值取一个大气压,壁面定义为 Wall 边界,给定壁面温度为 300K。

## 3 计算结果及分析

在爆炸洞内通风问题中主要是考察工人作业区内的有害废气的浓度分布,已能满足工业企业法律法规的要求<sup>[2]</sup>。因此在计算结果中主要考察工人作业区内的情况。

### 3.1 不同上排气口布置方式对有害废气衰减速度的影响

图 3 给出了两种不同上排气口布置方式下爆破加工洞内工人作业区范围——低层 2.5m 空间内 CO 最高浓度随时间的变化趋势。从中可以看到在每个时刻状态,除 10s 状态点以外,溶洞内 CO 的衰减速度原型都要大于改型 1,从而使原型整体衰减时间小于改型 1 结构。进而说明爆炸加工洞结构布局中,单上排气口布置明显优于多排气口布置。其主要原因通过不同时刻的速度矢量分布可以非常清楚地知道。

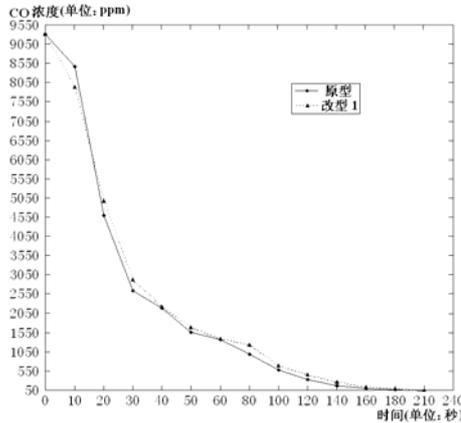


图 3 CO 最高浓度随时间的变化

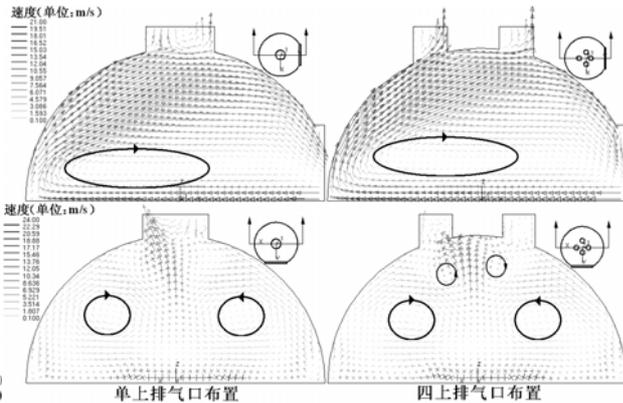


图 4 30 秒时刻速度示量切面

图 4、5 分别给出不同时刻两种不同上排气口布置方式的爆炸加工洞内速度矢量切面分布。对比不同时刻速度矢量分布可以看出,对于四上排气口布置结构,在爆炸加工洞上排气口附近形成非常明显的旋涡流动,这就阻碍洞内有害气体向外排出,从而使 CO 浓度衰减速率下降。而对于单上排气口布置结构,由于排气口位于溶洞中心,从而避免排气口附近旋涡的形成,进而使 CO 浓度衰减速率提高。这就使得四排气口布置结构洞内 CO 浓度衰减到 50PPM 所用的时间大于单排气口布置结构。

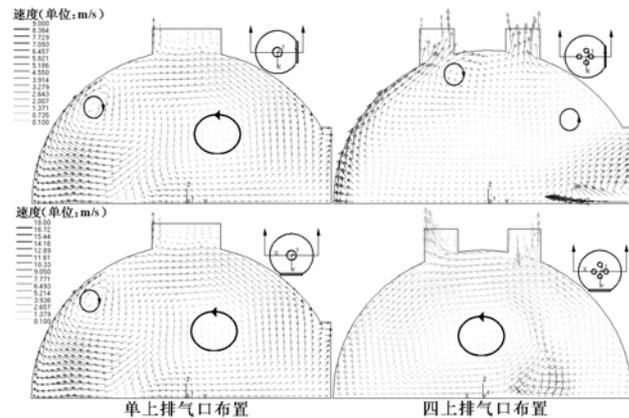


图 5 速度示量切面 140 秒时刻

### 3.2 不同上排气口高度对有害废气衰减速度的影响

图 6 给出了相同上排气口直径,不同上排气口高度下,爆炸洞内 CO 在工人作业区——低层 2.5m 空间内浓度最高值随时间的变化趋势。对比不同状态下的计算结果,整体分析可以看出,其规律随高度的增加出现两种情况,在初始阶段,CO 的浓度衰减速率随高度的增加而增加,但时间超过 1 分钟后,爆炸洞内 CO 浓度衰减速率却随高度的增加而减小。

通过图 7、8 爆炸洞内不同时刻速度示量切面分布分析,可以看到其主要原因是:初始阶段,上排气口越高,爆破洞内气体产生的浮升力越大,气体流动速度越高,从而使 CO 浓度衰减速度加快。但时间超过 1 分钟后,由于温差的减小,在爆破洞内上排气口部位形成非常明显湍流涡团,随着上排气口高度的增加,涡团强度越大,这就阻止爆破洞内气体向外扩散,从而使爆炸洞内 CO 浓度衰速度降低,整体使得 CO 浓度衰减到标准状态所用的时间随

上排气口高度增加而增大。

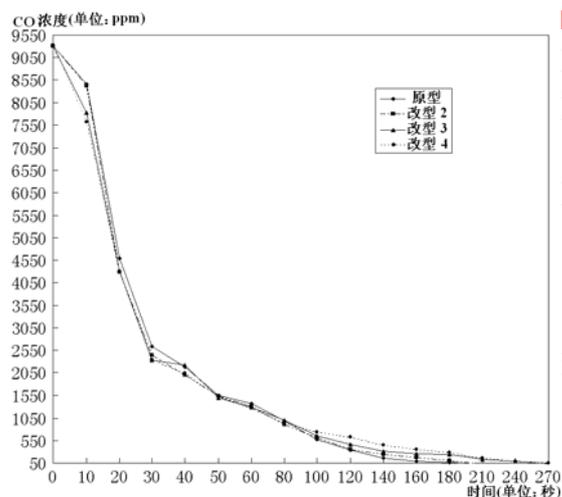


图 6 CO 最高浓度随时间的变化

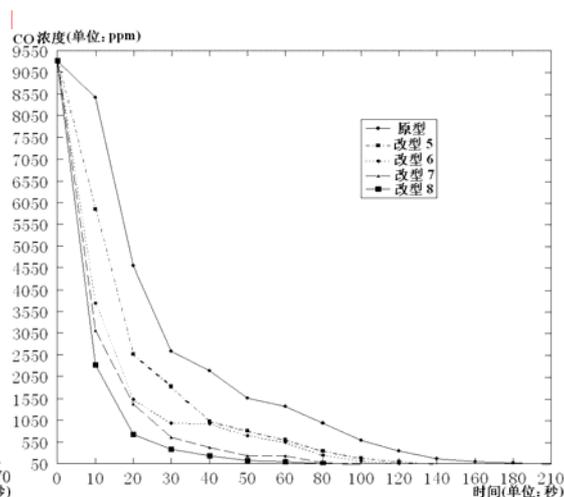


图 9 工人作业区内 CO 最高浓度随时间的变化

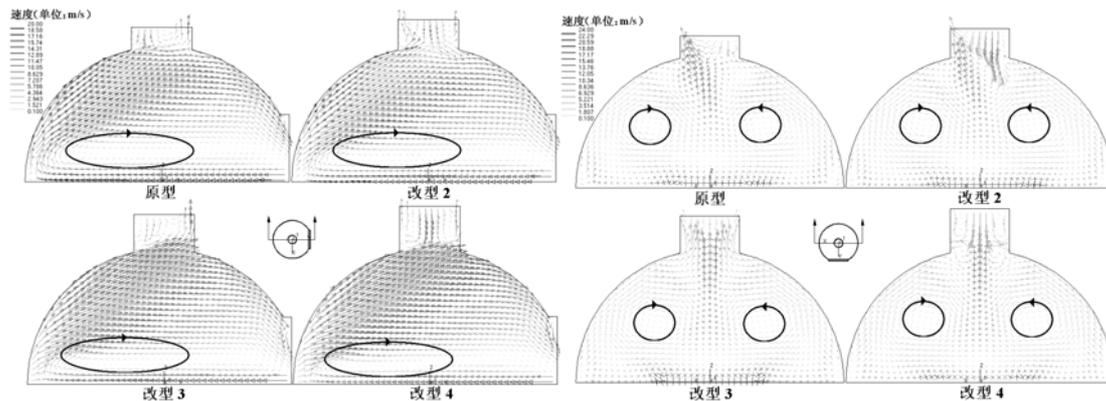


图 7 30 秒时刻速度示量切面

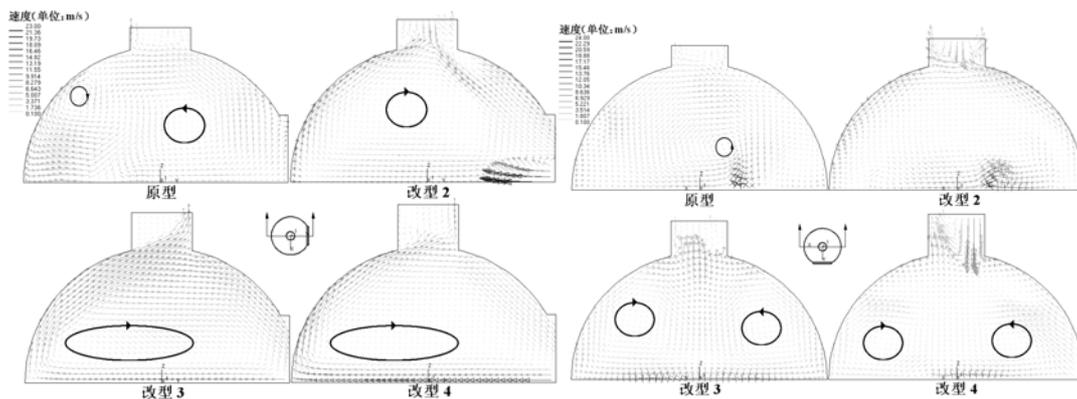


图 8 140 秒时刻速度示量切面

### 3.3 不同上排气口直径对有害废气衰减速度的影响

图 9 给出了相同上排气口高度，不同上排气口直径下，爆炸洞内 CO 在工人作业区——低层 2.5m 空间内浓度最高值随时间的变化趋势。对比分析可以看到，随开口直径的增大，CO 浓度衰减速度增加，爆炸洞内有害气体达到标准状态所用的时间减小。因此，在结构允

许的情况下,适当加大上排气口直径有利于自然对流的形成,也就有利于有害气体的排出。

### 3 结论

- (1) 对比不同上排气口布置方案可知,在上排气口总面积相同条件下,单排气口布置方式明显优于多排气口布置方式。
- (2) 根据数值模拟计算结果,对于单上排气口布置结构,在相同排气口直径条件下,一定范围内,随排气口高度的增加,CO 浓度衰减速率先增大后减小,但衰减到 50PPM 所用的总时间是增加的;在排气口高度相同条件下,随排气口直径的增加,CO 浓度衰减速率增大。
- (3) 建议:设计方案应采用单上排气口布置;在结构强度允许的情况下,尽量加大排气口截面积。

### 5 参考文献

- [ 1 ] 胡广胜,刘兴龙,侯发臣等. 爆炸复合板在城市轨道交通中的应用. 材料开发与应用,2006(6):45-46
- [ 2 ] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用. 昏暗:中南大学出版社,2001
- [ 3 ] 孙一坚主编. 简明通风设计手册. 中国建筑工业出版社,1997:16-29
- [ 4 ] 工业企业设计卫生标准(TJ36-79)
- [ 5 ] 吕继组,白敏丽,李晓杰等. 爆炸加工洞自然通风理论、实验和三维数值模拟研究.
- [ 6 ] CD adapco Group. STAR-CD Methodology(Version 3.2). Japan: Yokohama Computational Dynamics Limited, 2004.