

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.02.002

# 大尺寸密闭空间内甲烷—空气混合过程的数值模拟\*

王 博 李 斌 樊保龙 白春华

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 根据  $10\text{ m}^3$  多功能步入式爆炸罐的结构特点,依据进气—混气一体化的设计理念,建立了适用于  $10\text{ m}^3$  爆炸罐的轴对称直管式进气—混气系统,并利用计算流体力学软件 FLUENT,对进气—混气系统的具体设计参数进行了优化。通过模拟得到了直管上不同开孔孔径、开孔间距条件下小孔体积流量率的变化规律,发现减小整体开孔孔径、减小开孔间距、调整个别小孔大小能够提高小孔体积流量率的一致性,达到气体快速均匀混合的效果。

[关键词] 爆炸罐;大尺寸密闭空间;混气系统;数值模拟

[分类号] X932; O389

## 引言

气体混合物在人们生活和生产中有着十分广泛的应用。例如:在天然气管道运输中,对于氮气与天然气、氮气与空气混合后气体合理浓度的研究和确定是保障输气管道安全投产的关键<sup>[1-2]</sup>;作为未来航天重点发展的脉冲爆震发动机,对于如何在爆震室内形成均匀的燃料空气混合物,使得燃料得到充分利用,发动机性能得到最大发挥一直是人们研究的问题<sup>[3-4]</sup>;为了防止环境污染,在火电厂中对烟气进行脱硫作业是十分必要的,在火电厂脱硫反应器中,还原剂、催化剂与烟气能否充分混合,形成均匀的混合气体对于脱硫作业能否有效完成也有很大的影响<sup>[5-6]</sup>。

另外,气体的爆炸发生机理一直是众多学者关注的课题。激波管内或小型爆炸球中的气体爆炸实验开展如火如荼,而大尺寸密闭空间内气体爆炸的实验研究相对较少,其难点在于无法在大尺寸空间内快速形成均匀的爆炸性气体混合物,以保证实验结果的重复性和可信度。

为了研究混合气体爆炸事故发生的机理和原因,真实还原事故现场爆炸发展情况,大尺寸密闭空间内的混合气体爆炸实验变得很有意义。而如何得到在爆炸浓度范围内混合均匀的气体,成为实验结果是否准确、可信的前提。

为达到快速均匀混合甲烷—空气的目的,根据

实验室  $10\text{ m}^3$  爆炸罐的现有条件,设计出一套装置,并运用 FLUENT 软件对开孔直径、开孔间距等参数进行了优化。

## 1 研究对象

实验室现有  $10\text{ m}^3$  多功能步入式爆炸罐,其混气系统建模结构如图 1 所示。

爆炸罐长度  $L = 3.5\text{ m}$ ,中间部分为内径  $R = 1\text{ m}$  的圆柱,两侧为圆弧型结构,右侧有呈中心对称的 4 个测试孔(内径  $r = 12\text{ mm}$ )作为混气系统的进气孔,根据爆炸罐尺寸设计进气管道长度  $L = 3.3\text{ m}$ ,内径  $D = 12\text{ mm}$ ,通过在管道上开孔,使气体均匀地送入爆炸罐内,达到快速均匀混合的效果。

本文拟采用在管道上沿轴线旋转  $90^\circ$  均匀开孔的方式(如图 2),通过改变开孔大小和开孔间距,保证各小孔气体流量相等,使爆炸罐内一定空间里的甲烷气体相同,从而达到快速均匀混合的目的。

现用 4 根相同管道输送,按照现有流量计最快进气量为  $Q = 200\text{ L/min}$ ,平均每根管道最快进气量  $q = 50\text{ L/min}$ ,则最快进气速率  $v = 7.37\text{ m/s}$ 。

## 2 数值模拟计算方法

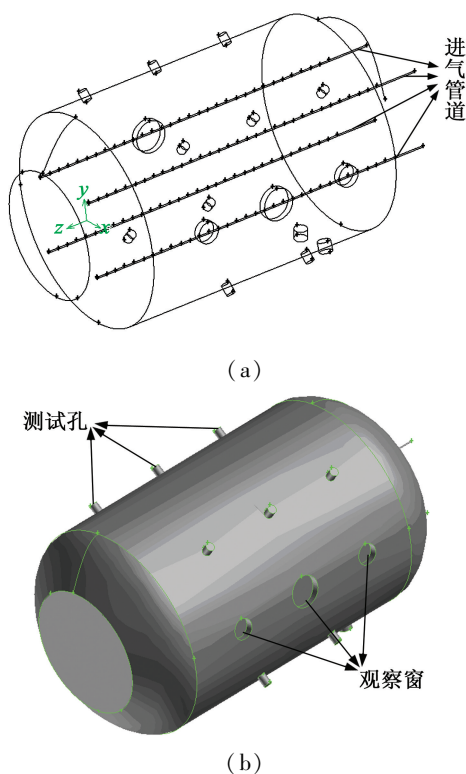
确定进气—混气系统的设计参数时,若直接采用实验的方法摸索,耗时长、成本高,故宜首先采用模拟仿真的手段确定混气系统中孔径和孔间距等重要参数,以模拟结果为依据,设计出合理的进气—混气系统后,通过混气实验来考核和验证。基于组分

\* 收稿日期:2013-09-03

基金项目:中国博士后科学基金(2013M530535)

作者简介:王博(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为气体混合技术研究。E-mail:173919674@qq.com

通信作者:白春华(1959~),男,教授,博导,主要从事安全技术及工程、爆炸理论方面的研究。E-mail:chbai@bit.edu.cn



(a) 框架几何模型; (b) 实体几何模型

图 1 爆炸罐、混气系统几何模型

Fig. 1 Models of the 10m³ explosion vessel and gas mixing system

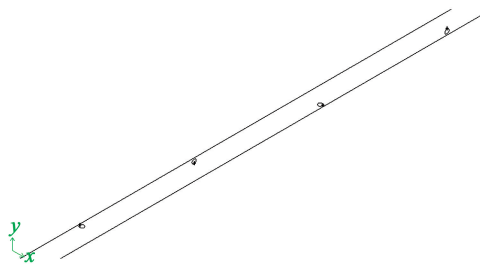


图 2 小孔 90° 旋转开孔示意图

Fig. 2 Schematic of the holes rotated 90°

输运方程和 Spalart-Allmaras 湍流模型, 拟采用 FLUENT 软件的物质传输与反应模块<sup>[7-8]</sup>, 进行数值模拟。

组分输运方程: 根据物质守恒方程, FLUENT 软件可以预估每种物质的质量分数  $Y_i$ 。守恒方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho v Y_i) = -\nabla J_i + R_i + S_i. \quad (1)$$

式中:  $Y_i$  为第  $i$  种组分的质量分数, %;  $S_i$  为离散相及用户定义的源相导致的额外产生速率, kg/s;  $R_i$  为第  $i$  种产品净产生速率, kg/s;  $J_i$  为物质  $i$  的扩散通量;  $\rho$  为气体密度, kg/m³;  $v$  为组分速率, m/s;  $t$  为时间, s。

Spalart-Allmaras 湍流模型能够很好地解决壁面

湍流现象与实际现象中的误差, 而其他模型则很少考虑壁面湍流误差问题。本次模拟为了保证罐内气体的均匀混合, 必须考虑壁面湍流现象的影响, 所以选择运用 Spalart-Allmaras 湍流模型。

该模型核心思想是引入中间变量  $\bar{v}$ , 通过求解  $\bar{v}$  的输运方程得到湍流黏度  $U_t$ 。

$\bar{v}$  的输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{v} u_i) = \\ G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \rho \bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2p} \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right\} - Y_v + S_v. \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $Y_v$  为湍流黏性耗散项;  $G_v$  为湍流黏性产生项;  $S_v$  为源项;  $\mu$  为流体动力黏度, Pa · s;  $\sigma_v$  为普朗克数;  $C_{b2p}$  为常数。

求得  $\bar{v}$  后, 湍流黏度  $U_t$  由湿润系数  $f_{v1}$  获得:

$$U_t = \rho \bar{v} f_{v1}. \quad (3)$$

该模型主要考虑低雷诺数情况下流体的流动状态,  $G_v$ 、 $Y_v$  包含了壁面湍流情况的影响因素, 适用范围自然从湍流核心区延伸到近壁区和壁面。

### 3 结果与分析

按照计算模型和理论公式, 本文选择的计算参数如下: 罐内为标准大气压, 即 101 kPa; 罐内温度为 300 K; 进气管道一端进气, 进气设置为速度入口, 进口处的湍流动能  $\kappa$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  由经验公式得到:

$$\kappa = \frac{3}{2} (UI)^2, \quad (4)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{\kappa^{3/2}}{l}. \quad (5)$$

式(4)、式(5)中:  $U$  为进气口平均流速, m/s;  $I$  为湍动强度,  $I = 0.16 (\text{Re}_{D_H})^{-1/8}$ ,  $\text{Re}_{D_H}$  为雷诺数;  $l$  是湍动强度长度尺寸,  $l = 0.07L$ , m;  $C_\mu$  为常数。

小孔设置为压力出口 (pressure outlet); 管道壁面和末端设置为墙壁 (wall)。通过改变开孔大小和开孔间距, 检测各小孔的体积流量率, 使各小孔体积流量率相同, 这样在爆炸罐内相同空间内流出的气体总量相同, 各部分气体浓度大致相同, 自由扩散时间缩短, 达到快速混合的效果。

#### 3.1 进气管开孔大小的确定

图 3 是相同条件下 (进气口速率  $v = 7.37$  m/s, 采用沿管道轴线旋转 90° 开孔方式, 开孔间距  $L = 10$  cm, 开孔编号从进气口开始依次增大), 不同开孔孔径下各小孔体积流量率示意图。

由图 3 可知, 在其他参数不变的情况下, 各小孔

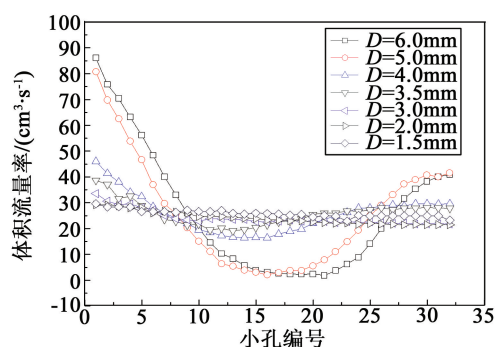


图3 不同开孔孔径下的小孔体积流量率

Fig.3 Volumetric flow rates with different pore openings

体积流量率随着孔径的减小逐步趋向稳定。

孔径为 4 mm、5 mm、6 mm 时,小孔流量率先减小后增大趋势明显,主要因为小孔孔径尺寸与管道管径尺寸相差不大,甲烷气体通过小孔迅速泄漏到管道外,呈现出小孔体积流量率下降的规律;又因为管道末端封闭,甲烷气体在管道末端聚集,管内压力增大,呈现出小孔体积流量率上升的规律;随着孔径的减小,小孔孔径尺寸远小于管道管径尺寸,甲烷气体在管内不断聚集形成相对稳定的管内压力,各小孔体积流量率趋于稳定。因此,孔径应该取相对较小的值。

### 3.2 开孔间距的确定

图 4 是相同条件下(进气口速率  $v = 7.37 \text{ m/s}$ , 采用沿管道轴线旋转  $90^\circ$  开孔方式,开孔孔径  $D = 1.5 \text{ mm}$ ),不同开孔间距下各小孔体积流量率示意图。

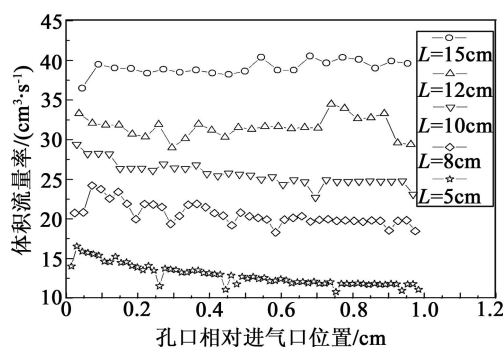


图4 不同开孔间距下的小孔体积流量率

Fig.4 Volumetric flow rates with different hole spacing

由图 4 可知,在其他参数不变的情况下,随着开孔间距的减小,各小孔体积流量率呈下降趋势,但在确定开孔间距一定时,孔口体积流量率相差不大。开孔间距减小,管道上开孔数量增多,在相同进气量情况下,管内气体减少,管内达到动态平衡时的压力

减小,使得各小孔出流速率减小,所以各小孔体积流量率减少。

综合考虑气体出流速率(保证能够喷射到罐体边缘而不是自由扩散过去)和开孔个数,选用间距 8 cm 的方案较为合适。

### 3.3 对于小孔孔径的确定

使得气体最短时间内混合均匀,要求爆炸罐一定空间内流出气体体积大致相同,由上述模拟结果可以看出,开孔孔径  $D = 1.5 \text{ mm}$ ,开孔间距  $L = 8 \text{ cm}$  时,各小孔体积流量率相差不大,只需改变个别开孔孔径,可以实现各小孔体积流量率基本相同。据此提出的小孔孔径设计方案见表 1(开孔编号从进气口开始依次增加)。

表1 小孔孔径设计方案

Tab.1 Design program about pore openings

方案序号	方案内容
A	所有孔开孔孔径均为 1.5mm
B	1~20 号孔孔径比 A 方案减小 3%
C	1~20 号孔孔径比 A 方案减小 5%
D	1~15 号孔孔径比 A 方案减小 5%

经过模拟,从图 5 可以看出,D 方案中各小孔体积流量率趋于一致,误差在 5% 以内,可以接受,因此 D 方案为最优设计。

### 3.4 爆炸罐气体混合均匀所用时间对比

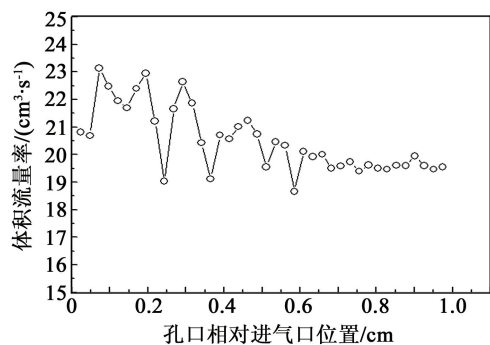
在相同进气条件下(进气口速率  $v = 7.5 \text{ m/s}$ ),对比宫广东等<sup>[9-10]</sup>学者所用进气方法(单独一个孔进气,如图 6 所示)与加入混气系统,采用优化后的 D 方案建模,模拟爆炸罐要达到体积比为 9% 的甲烷—空气混合气体所用时间,见图 7。实线表示采用混气系统后所用时间,虚线表示单独一个孔进气所用时间。

从模拟结果可以看出,加入混气系统后气体混合均匀,所用时间缩短了将近 4 倍。

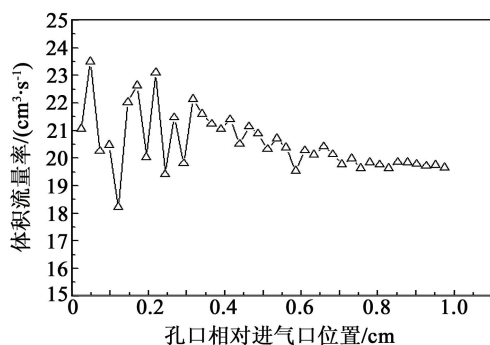
## 4 结论

本文以流体力学的基本知识为理论基础,借助计算流体力学软件 FLUENT,对  $10 \text{ m}^3$  多功能步入式爆炸罐内可燃气体—空气的快速混合系统进行了参数设计和模拟仿真,得到以下结论:

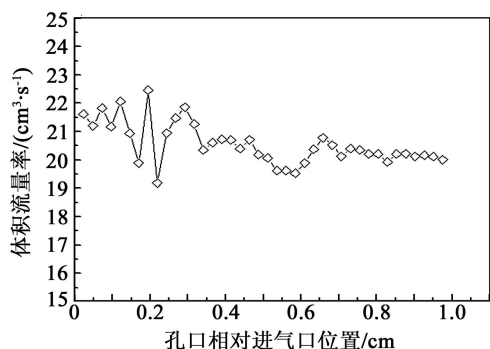
1)对设计管路来说,在同一进气速度条件下,改变孔径、孔间距对小孔体积流量率影响较大,当小孔孔径为 1.5 mm,孔间距为 8 cm 时,各小孔体积流量率趋于一致;再通过适当改变小孔孔径,即调整 1~15 号孔径大小,保证各小孔体积流量率相同,便于快速形成均匀的气体混合物。



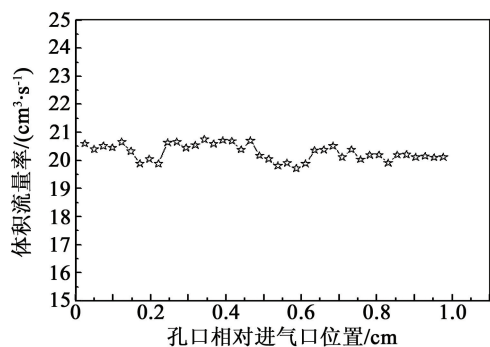
(a)



(b)



(c)

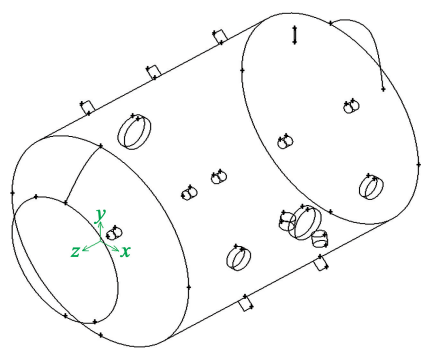


(d)

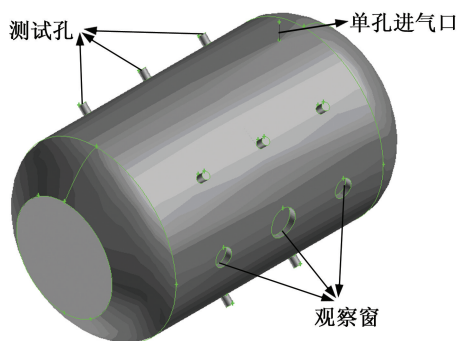
(a) A 方案; (b) B 方案; (c) C 方案; (d) D 方案

图 5 改变个别小孔孔径对小孔体积流量率的影响

Fig. 5 Effects of pore openings on volumetric flow rate



(a)



(b)

(a) 框架几何模型; (b) 实体几何模型

图 6 单孔进气几何模型

Fig. 6 Geometric model of single hole intake system

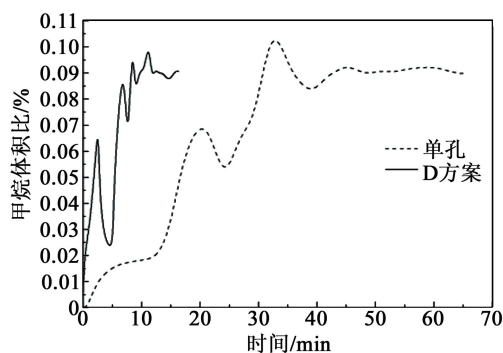


图 7 气体混合均匀所用时间对比

Fig. 7 Comparison of uniform mixing time on different programs

2) 两种形成同浓度甲烷—空气混合物混气方法的模拟分析表明,新设计的进气—混气系统的混气时间是原有单进气混气时间的 1/4,大大提高了混气效率。

### 参 考 文 献

- [1] 薛继军,张鹏云,王俊奇,等. 输气管道投产置换过程气体混合规律研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 147-149.
- [2] Johnson J E, Gregor J G, Lambeth A K, et al. Pipeline purging principles and practice [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998, 120(4): 249-



- 256.
- [3] 罗明宇. 脉冲爆震发动机汽油空气混合技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.
- [4] Ebrahimi H B, Merkle C L. Numerical simulation of a pulse detonation engine with hydrogen fuels[J]. Journal of Propulsion and Power,2002,18(5):1042-1048.
- [5] 付金良. 喷动流化床内气体混合实验研究和气固两相流动的数值模拟[D]. 南京:东南大学,2006.
- Fu Jinliang. Experimental research of gas mixing and numerical simulation for gas-solid two phases flow in a spouted-fluidization bed[D]. Nanjing: Southeast University,2006.
- [6] Chan C K, Guo Y C, Lau K S. Numerical modeling of gas-particle flow using a comprehensive kinetic theory with turbulence modulation [J]. Powder Technology, 2005,150(1):42-55.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2006
- [8] Anderson J D. Computational fluid dynamics-the basics with application [M]. USA:Mcgras-Hill, 2002.
- [9] 牛芳,刘庆明,白春华,等. 甲烷/空气预混气的火焰传播过程[J]. 北京理工大学学报,2012,32(5):441-445.
- Niu Fang, Liu Qingming, Bai Chunhua, et al. Observation of propagating flame of methane-air mixture [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2012,32(5):441-445.
- [10] 宫广东. 甲烷空气和甲烷煤层空气混合物点火爆炸发展过程研究[D]. 北京:北京理工大学,2010.
- Gong Guangdong. The explosion growth of methane-air and methane-coal dust-air mixtures with point ignition [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2010.

## Numerical Simulation of the Mixing Process of Methane and Air in Large Scale Confined Spaces

WANG Bo, LI Bin, FAN Baolong, BAI Chunhua

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] An axisymmetric straight tubes gas intake-mixing system was designed according to both the characteristics of a 10m<sup>3</sup> versatile stepping explosion vessel and the air-gas intake-mixing integrated design philosophy. FLUENT, the software of computational fluid dynamics, was used to optimize specific design parameters of the gas intake-mixing system. The variation of the hole volumetric flow rate of gas pipe under different pore openings and hole spacing is obtained, showing that reducing the overall pore openings and hole spacing and adjusting the size of the individual holes can improve the consistency of hole volumetric flow rate. By this means, rapid, efficient and uniform gas mixing can be achieved.

[KEY WORDS] explosion vessel; large scale confined spaces; gas mixing system; numerical simulation

## 文 摘

### 1 乳化炸药在连续工艺泵送过程中安全性和产品质量的研究

《爆破器材》,2001,30(4):8-12(中文)。

这是一篇有关乳化炸药泵送过程的评论文,重点在于安全问题和泵送过程对炸药质量的影响。

### 2 传爆药的烤燃试验

《火工品》,2001(2):5-7(中文)。

建立了一种新的缓慢烤燃试验方法,按此方法测量了几种传爆药的烤燃反应温度和反应级别。试验结果与外国传爆药的数据进行了比较。

### 3 PBX 传爆药制造中的界面化学问题

《火工品》,2001(2):21-22(中文)。

利用界面化学理论,分析了聚合黏合剂与炸药晶体成分之间黏结力的来源。分别讨论了溶剂混合蒸馏过程和浆液过程,特别是有关包覆效应。

### 4 新型乳化炸药及其制造

《爆破器材》,2001,30(2):21-23(中文)。

使用聚酰胺—胺(polyamide-amine,简称 PAM-AM)作为乳化炸药的安定剂。当使用这种附加物时,炸药的爆速有所增加。

### 5 粉状铵梯油炸药复合油相的研究

《爆破器材》,2001,30(4):4-7(中文)。

为了生产岩石铵梯油炸药,发展了各种材料和不同比例的各种类型的复合油相,使制得的炸药可满足工程爆破的需要。

### 6 化学沉积点火剂的制造机理和应用研究

《火工品》,2001(2):14-17(中文)。

介绍了多组分化学液相沉积点火剂的制备。通过多种点火试验,验证了这类点火剂的点火性能的稳定性和可靠性。

钟一鹏译自美国《化学文摘》

Vol. 136, No. 12 ~ 13(2002)