

危险品泄漏的风洞实验 与数值模拟

宁平 张朝能 沈武艳 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

危险品泄漏的风洞 实验与数值模拟

宁 平 张朝能 沈武艳 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2010

内 容 简 介

危险品泄漏事故会造成巨大的损失,确定危险物质泄漏可能造成的影响程度和范围,对于拟定重大突发性污染事故的应急预案和现场救护方案以及指导紧急救灾等都具有重要的理论价值和实践意义。本书针对危险品泄漏后造成的影响程度和范围进行了风洞示踪实验与数值模拟方法的探索及研究。全书共分7章,主要包括小球测风、现场风廓线的风洞还原、风洞示踪实验、危险风速确定、数值模拟、重气扩散的影响因素分析等。

本书可供环境工程、安全工程的工程技术人员和高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

危险品泄漏的风洞实验与数值模拟/宁平,张朝能,
沈武艳著. —北京:冶金工业出版社,2010.2

ISBN 978-7-5024-5171-4

I. ①危… II. ①宁… ②张… ③沈… III. ①危险品
—泄漏—风洞试验—数值模拟 IV. ①TQ086.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第021698号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 张媛媛 版式设计 葛新霞

责任校对 白 迅 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5171-4

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010年2月第1版,2010年2月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32;5.125印张;135千字;149页;1-1500册

22.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

城市人口稠密，建筑物密集，危险品尤其是重气一旦在城市发生泄漏，就会造成巨大的损失。虽然近年来人们对重气造成的危害非常重视，进行过重气扩散过程的数值模拟和风险分析，但在高原山区气候条件下还未开展过城市重气泄漏扩散的风洞实验和数值模拟方面的研究工作。高原山区城市由于地面粗糙度大，气压又较低，其扩散行为有其独特的一面，开展这方面的研究十分必要。

本书以高原山区城市——云南省个旧市区为研究对象，在个旧市区局地流场特征研究中，以小球测风法观测了现场不同高度的风速，得出不稳定、中性和稳定条件下的风廓线指数，结果表明，山区城市的风廓线指数较大。

以1:1000的比例制作个旧市城区及周边地区模型，采用现场风廓线的观测结果调整风洞流场，通过调节速度分布器、布置粗糙元段和调整风栏，使风廓线指数达到目标值。通过布置不同间隔的测点考察不同地形下的风速变化情况，实验结果表明，由于城市复杂的地形和密集的建筑群，使得同一高度下各测点的风速和不同测点的风廓线指数存在较大的差异，通过分析下风轴线上的风场特征，结果表明过山气流和地物的黏滞等作用对流场的影响较大。

示踪实验采用以氟利昂12为示踪剂，采用扇形布点的方法对下风向不同点位进行采样分析。为了示踪实验的顺利进行，开发了一个快速分析示踪剂氟利昂12含量的气相色谱分析方法，峰高的定量效果略好于峰面积。通过分析示踪实验结果，发现存在某一风速（即危险风速）下重气浓度出现最大值，进一步研究后发现，危险风速下的宏观黏滞系数也出

现最大值，并可以通过多项拟合求出此危险风速为 1.21 m/s 。由于泄漏口下风向地势逐渐向下倾斜，因此，下风向的横风向重气浓度出现偏态分布，最高浓度出现在偏离下风轴线且地势较高的一侧。重气浓度在下风向 500m 以后随下风距离的变化趋缓，在下风向同一地面点随高度增加而减小， 20m 高度以上重气浓度随高度的变化趋于平缓。

本书采用了气相流动和扩散的控制微分方程，选择了三种较为常用的湍流流动模型，通过分析比较，确定采用 Realizable $\kappa\text{-}\epsilon$ 双方程湍流模型，运用 SIMPLE 方法为基础的控制容积法对控制微分方程进行离散化，选取中性条件下的风廓线指数作为边界条件，对离散化方程进行求解。流场和浓度场模拟结果与风洞实测结果吻合得良好，说明本书确立的模拟重气流动和扩散的数值模型和算法是适合高原山区地形条件的。通过分析重气密度、气压和气温对重气扩散过程的影响，发现在泄放质量流率等其他条件不变的情况下，重气密度越大，重气效应越明显；对于同一模拟点，标准大气压下的重气浓度比高原地区大气压 $8.10 \times 10^4 \text{ Pa}$ 下的低 $6.2\% \sim 24.7\%$ ，平均低 18.6% ； 0°C 时的重气浓度比 23.5°C 时的低 $6.9\% \sim 8.9\%$ ，平均低 8.2% 。

本书是教育部春晖计划“ADMS 系统在个旧市空气质量预报中的应用”（项目编号 2003009）的研究成果之一，作者在此感谢教育部的大力支持！本书在编写过程中，得到了昆明理工大学环境科学与工程学院和个旧市环境保护局的支持和帮助，作者在此谨向他们表示由衷的谢意！

由于作者水平所限，书中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2009 年 6 月

目 录

1 绪论	1
1.1 目的及意义	1
1.2 重气泄漏的现状	6
1.2.1 现场实验	6
1.2.2 风洞模拟实验	8
1.2.3 数学模型	10
1.3 评价与展望	18
2 实验方法及装置	20
2.1 实验方法	20
2.1.1 风洞模拟的基本理论	20
2.1.2 风洞模拟的相似准则	22
2.1.3 中性大气边界层的近似模拟	25
2.2 实验装置	26
2.2.1 风洞及模型构建	26
2.2.2 风洞的调试	28
3 现场观测	33
3.1 观测地概况	33
3.1.1 自然环境	33
3.1.2 气候气象及污染气象特征	33
3.1.3 重气源分析	41
3.2 现场风廓线的观测	42
3.2.1 观测仪器和材料	42
3.2.2 观测方法	42

3.2.3	气象特征	46
3.3	观测结果	48
3.4	风廓线指数对大气污染物预测浓度的影响	52
4	风洞实验	54
4.1	流场调试	54
4.1.1	实验方法	54
4.1.2	风洞现场观测对照点流场调试	56
4.1.3	实验结果与分析	58
4.2	重气扩散示踪实验	67
4.2.1	实验方法	67
4.2.2	分析方法	70
4.2.3	示踪实验结果分析	72
5	重气扩散过程的数值模拟	77
5.1	重气流动和扩散过程的基本微分方程	77
5.1.1	气相流动和扩散的控制微分方程	78
5.1.2	湍流流动模型	80
5.1.3	近壁处理	84
5.2	微分方程的通用形式	88
5.3	定解条件	89
5.3.1	求解区域的确定	89
5.3.2	初始条件	90
5.3.3	边界条件	90
5.3.4	进口风速与温度的分布	95
5.3.5	大气边界层相似理论	95
5.4	重气扩散过程数值模拟计算方法	98
5.4.1	求解区域的网格化	98
5.4.2	微分方程的离散化形式	101
5.4.3	速度与压力耦合的处理方法	104

5.4.4	变量迭代的松弛	106
5.4.5	泄漏源的处理	107
5.4.6	计算步骤及框图	107
5.5	模型验证	108
5.5.1	实验条件	108
5.5.2	计算步骤	110
5.5.3	模拟结果比较与分析	112
6	重气扩散的影响因素分析	120
6.1	引言	120
6.2	重气密度对重气扩散的影响	120
6.3	大气稳定度对重气扩散的影响	121
6.4	大气压对重气扩散的影响	128
6.5	气温对重气扩散的影响	131
7	结论与建议	133
7.1	结论	133
7.2	主要创新点	134
7.3	建议	135
附录	重大危险源	137
参考文献	144

1 绪 论

1.1 目的及意义

随着工业的发展,使得化学物质在各行各业大量使用,尤其是在现代化的石油、化工、能源、交通等行业,大规模的生产、使用、运输、贮存易燃、易爆、有毒有害等特性的危险物质,隐藏了危险物质的爆炸、火灾、中毒等事故,泄漏造成人员伤亡,环境受到破坏的隐患。事故的发生不仅会导致巨大的经济损失,还可能带来灾难性的后果;不仅事故现场内部,而且邻近地区人员的生命与财产都将遭受巨大的损失和危害,尤其是对生态环境的损害更是无法挽回。

国内外曾发生过多次严重的化学物质泄漏事故,造成了巨大的危害。例如,1984年印度博帕尔市郊的联合碳化物公司农药厂45t剧毒液体——异氰酸甲脂储罐事故性泄漏^[1],致使3150人死亡,5万人失明,2万多人受到严重毒害,15万人接受治疗,20多万人被迫转移;1987年10月30日,位于美国得克萨斯州得克萨斯市的马拉松石油公司炼油厂发生约10.03m³氢氟酸事故性泄漏,并形成蒸气扩散于大气中,污染范围约达13km²,迫使约4000名居民避难,使230人因眼睛疼痛和呼吸困难被送进医院,其中约50人因伤势严重住院治疗;1989年,美国得克萨斯石油化工厂发生的异丁烷泄漏事故,造成爆炸灾害,损失高达7.3亿美元。在我国此类事故也时有发生,1991年9月3日,江西省贵溪农药厂一辆甲胺运输车在行至江西上饶沙溪镇时,一甲胺储罐阀前短管根部与法兰焊接处断裂,发生一甲胺严重泄漏事故,污染面积达23×10⁴m²,126户居民受害,中毒595人,156人重度中毒而住院,其中死亡42人^[2];1998年,西安市煤气公司液化气管理

所储罐区发生了一起因液化气泄漏而引发的恶性火灾爆炸事故。事故从3月5日16:00时左右开始一直持续到3月7日19:05,其间共发生4次爆炸。这次恶性爆炸事故造成11人死亡(其中消防人员7名,罐区工作人员4名)、1人失踪、33人受伤(烧伤者多数已终身残废)。炸毁400m³球罐2个,100m³卧式储罐4个,烧毁气罐车十余辆,经济损失惨重^[3];据报道,2002年8月23日凌晨,株洲市白石港航运码头发生一起严重的氯气泄漏事故,75个装满液体氯气的钢瓶在洪水的浸泡下发生泄漏,当地数百名居民出现不同程度的中毒;2004年4月15日晚,位于重庆市区的天原化工总厂发生氯气泄漏事件,16日凌晨和下午又分别发生了两次爆炸,造成十余人死伤,附近约15万市民被迫紧急疏散;2004年10月6日,陕西省榆林市神木县境内的天然气管道被一装载机挖裂,发生了一起天然气泄漏事故,泄漏时间长达7h,4000人连夜疏散,约有2×10⁶m³的天然气泄漏,造成经济损失600余万元。此类恶性事故不胜枚举,所带来的严重后果和环境与社会问题远远超过了事故本身,严重地影响了当代过程工业及相关行业的顺利健康发展。

危险物质发生泄漏事故造成的人员伤亡非常大。据不完全统计^[4],自1949年10月到2001年4月,我国化工系统发生的51起重(特)大典型泄漏事故,涉及到24种危险物质,从事故的发生频率和造成危害来看,其中有8种危险物质应优先考虑并进行控制,如液氨、液氯、氯乙烯、液化石油气、一氧化碳、苯、一甲胺、硫化氢等。根据资料^[4]报道,截至1987年的20~25年间,在95个国家登记的化学事故中,发生过突发性泄漏的常见化学品及其所占比例如表1-1所示。

从表1-1数据分析可以得知,液化气和气体类物质泄漏事故占到全部危险物质泄漏事故的46.4%,且基本上都会形成重气云团。

表 1-1 发生突发性泄漏的常见化学品

类 别		比例/%	类 别		比例/%
物质名称	液化石油气	25.3	事故来源	运 输	34.2
	汽 油	18.0		工艺过程	33.0
	氨	16.1		贮存过程	23.1
	煤 油	14.9		搬 运	9.6
	氯	14.4			
	原 油	11.2			
物质形态	液体物质	45.5	事故原因	机械故障	34.2
	液化气	27.6		碰撞事故	26.8
	气 体	18.8		人为因素	22.8
	固 体	8.2		外部因素 (如地震、雷击)	16.3

危险物质泄漏后会由于以下三个方面的原因而形成比空气重的气体：(1) 泄漏物质的分子量比空气大，如氯气等物质；(2) 由于储存条件或者泄漏物质的温度比较低，泄漏后的物质迅速闪蒸，而来不及闪蒸的液体泄漏后形成液池，其中一部分液态介质以液滴的方式雾化在蒸气介质中，达到气液平衡，因此泄漏的物质在泄放初期，形成夹带液滴的混合蒸气云团，使蒸气密度高于空气密度，如液化石油气等；(3) 由于泄漏物质与空气中的水蒸气发生化学反应导致生成物质的密度比空气大^[5,6]。

根据有关统计数据，在因毒物泄漏造成的人员伤亡中，约有 90% 与重气泄漏有关。在通常情况下，为了贮存和运输的方便，经常将气态的化学物质贮存在钢瓶等压力容器中，以密闭、常温加压或低温常压的形式保存。一旦储存容器、输送管道由于种种原因失效时，泄漏物质在扩散初期容易形成密度大于空气、扩散规律不同于中性气体扩散的重气云团。重气云团由于重气效应，有下沉并沿着地面扩展的趋

势，不易扩散、稀释，因此更容易产生较大的伤害和严重的后果。

重气泄漏扩散事故具有突发性强、危害性大、行为复杂等特点，这些严酷的事实表明，对重气泄漏扩散方面的研究，对其扩散规律采用适当的模拟试验进行描述，深入开展重气事故性泄漏过程数学模型研究，从而确定危险物质泄漏可能造成的影响程度和范围，这些对相关法规和标准的制定，重大突发性污染事故的应急预案和现场救护以及建设项目的安全、环境评价、科学预防事故性泄漏的发生、指导紧急救灾等都具有重要理论价值和实践意义。个旧市为预防危险物质泄漏对环境造成的影响，迫切需要危险品泄漏的风险评估与应急预案方面的技术支撑条件。国家 863 计划资源环境技术领域办公室于 2007 年 9 月 28 日发布“关于发布 863 计划资源环境技术领域‘重大环境污染事件应急技术系统研究开发与应用示范’重大项目第一批课题申请指南的通知”中的课题 5——突发性大气污染事件模拟与风险控制技术即与此研究相关。

对于涉及有大量有毒有害危险物质的生产或储存装置，一旦发生事故性泄漏，便会导致严重后果，不仅源区内部，而且邻近地区人员的生命和环境都将遭受巨大的损失。以往发生的灾难性事故案例的严酷事实证明，对事故性重气泄漏过程进行研究刻不容缓。同时，该研究也是建立和完善社会防灾体系及城市减灾工作的重要内容之一。因此，本书内容不仅具有重要的理论价值，而且还具有很高的经济和社会意义。

高原山区城市由于地面粗糙度大，气压又较低，其扩散行为有其独特性的一面。本书以高原山区中小城市个旧作为研究对象，在风洞中模拟个旧市城区流场，并考虑不同气象条件的影响，采用 CFD 模拟城区事故性重气连续源泄漏扩散。

本书的主要内容包括：采用风洞实验的方法获得流场和浓度场的测定值，并使用测定值校验数值模拟方法，将数值模拟方法应用于风洞不能模拟的大气稳定度条件，对扩散过程的影响因素进行数值研究。

具体内容包括：

- (1) 采用小球测风观测个旧市区近地层流场；
- (2) 制作个旧市区 1 : 1000 的地物模型；
- (3) 通过小球测风获取不同大气稳定度条件下的风廓线指数，将现场小球测风获得的中性稳定度条件下的风廓线指数还原到风洞；

- (4) 采用 CFC12 作为示踪剂，采用扇形布点的方法对下风向的测点采样分析，考虑泄放源和地物的特点，分析中性条件下的重气浓度分布规律；

- (5) 采用有限体积法对包括质量守恒、动量守恒、能量守恒定律的方程组进行离散化，依据传递过程原理，结合国外研究的成果，确立重气纯气相流动扩散的流动、传热及传质相互耦合的微分方程组，提出一套流动、传热及传质相互耦合的比较完备的算法，采用重气流动和扩散过程数值模拟 CFD 计算程序，对实验工况进行模拟计算，并将计算结果与实验结果进行比较，检验数值模拟结果的可靠性；

- (6) 针对不同气象条件等计算参数，对重气流动和扩散过程进行数值模拟研究，并对各项计算参数对重气流动和扩散过程的影响进行分析。

总之，本书目的在于获取高原山区城市的流场特征，寻找重气浓度出现最大值时的危险风速，找出一套比较适合于模拟高原山区重气流动和扩散的数值模拟模型和算法，从而进一步提高我国在重气流动和扩散的数值模拟领域的水平，以便更好地为安全管理、事故调查分析、工程设计、应急措施及风险评估等提供依据。

1.2 重气泄漏的现状

自 20 世纪 70 年代以来,随着石油化工生产规模的扩大,危险性物质被频繁、大量地使用,导致重大事故性泄漏的频繁发生,引起了世界各国的广泛关注。国际上相继通过了《作业场所安全使用化学制品公约》(第 170 号国际公约,1990 年)、《预防重大工业事故公约》(第 174 号国际公约,1993 年)等,敦促世界各国实施相应的政策及预防保护措施,发展基础研究和重大灾害防治应用技术研究。同时,人们的安全环保意识增强,人们迫切要知道自己工作、居住场所的环境状况和潜在的危险性以及当发生有毒有害物质泄漏时,应该怎样选择紧急处理措施来消除这些危险。美国、加拿大等许多工业发达国家先后投入了大量的人力、物力和财力开展事故性泄漏基础理论和相关控制技术的研究工作,并取得了水平较高的研究成果。

国外有关重气泄漏扩散过程的研究开展得较早,然而开展危险性重气事故性泄漏过程理论的研究却是在最近二三十年。事故性泄漏模式直接影响泄漏后危险性物质在大气中的迁移扩散,开展事故性泄漏模式的研究,确立相应的泄漏源模型,对于开展扩散研究具有重要意义。

国外在重气泄漏扩散方面的研究工作始于 20 世纪 70~80 年代,直到现在该领域的研究还比较活跃,其间提出了不少扩散的数学模型,同时也进行了许多大规模的试验。

重气泄漏研究方法分为三种,即现场实验、风洞模拟实验和数值模拟。

1.2.1 现场实验

进入 20 世纪 80 年代,英美等许多工业发达国家加强了对易燃易爆等危险物质泄漏扩散模型的深入研究,有计划、有步骤地开展了一系列的现场模拟实验^[7-11],见表 1-2。

表 1-2 国外进行的大型气体泄放试验一览表

试验名称	Thorney Island (瞬时)	Thorney Island (连续)	Maplin Sands	Burro	Coyote	Desert Tortoise	Goldfish
试验次数	9	2	12	8	3	4	3
试验介质	氟利昂 氮气	氟利昂 氮气	LNG	LNG	LNG	NH ₃	HF
泄放形态	气体重气	气体重气	沸点重气	沸点重气	沸点重气	二相重气	二相重气
泄放总量 /kg	3150 ~ 8700	4800	1000 ~ 6600	10700 ~ 17300	6500 ~ 12700	10000 ~ 36800	35000 ~ 38000
泄放时间 /s	瞬时	460	60 ~ 360	79 ~ 190	65 ~ 98	126 ~ 381	125 ~ 360
泄放表面	沙土	沙土	水	水	水	沙土	沙土
表面粗糙 度/m	0.005 ~ 0.018	0.01	0.0003	0.0002	0.0002	0.003	0.003
大气稳定 度等级	D ~ F	E ~ F	D	C ~ E	C ~ D	D ~ E	D
扩散最远 距离/m	500 ~ 800	472	460 ~ 650	140 ~ 800	300 ~ 400	80	3000
试验年份	1985	1985	1984	1982	1983	1985	1987

(1) Thorney Island Tests 通过三个系列常温常压下不同比例的氟利昂 12—氮气混合气的现场瞬时释放和连续释放实验来研究重气在事故排放后的扩散情况。实验地点在英国南海岸的一个废弃的空军基地 Thorney Island。

(2) Maplin Sands Tests 由壳牌石油公司在英国 Thames 海湾北海岸的 Maplin 沙漠地区做的一系列冷冻的液化天然气和液化丙烷的现场释放实验，实验目的是为了研究可燃重气泄漏扩散和燃烧行为。

(3) Burro/Coyote Tests 试验是在美国能源部的支持下，在

美国加州中国湖 (China Lake) 上做的一系列液化天然气的现场释放实验。

此外, 还有很多其他的现场实验, 如 Desert Tortoise Tests (美国能源部内华达实验基地 NTS)、Goldfish Tests (美国内华达实验场)、Eagles Tests 在美国空军支持下进行的一系列 N_2O_4 现场释放实验、Water Curtains (法国消防人员在处理化学品泄漏做的实验, 1997 年)。

在大型实验方面, 国内进行的比较少, 1988 年在河南进行了氟化氢泄漏事故、二硫化碳贮罐爆炸事故的演习, 检验了这类化学毒物泄漏灾害发生后的应急系统。

1.2.2 风洞模拟实验

风洞模拟实验研究自 20 世纪 80 年代以来取得了进展, 相对于现场实验来说, 更具有深入研究的意义, 实验条件可以人为控制、改变和重复, 在机理性研究和复杂地形条件下的扩散研究具有较大的优越性。由于花费的人力、物力、财力均大为降低, 具有很强的现实可行性, 因此很多科研人员进行了这方面的研究。

(1) 1982 年 Robert N. Merony^[12] 指出, 风洞模拟重气扩散首先要模拟弗劳德数 (Fr), 密度比是次要的参数, 为了使风速增大同时满足 Fr 的要求, 可以增大在模型中使用的重气密度。

(2) 1986 年 P. A. Krogstad 等^[13] 模拟了一个地面连续源情形的扩散, 发现了烟羽沿轴线的分叉现象, 建筑物对烟羽改变的影响很大。

(3) 1989 年 Neff D. G.^[14] 通过风洞实验模拟重气烟羽扩散, 并与现场实验进行了对比, 模拟效果较好。

(4) 1991 年 G. Konig-Langlo 和 M. Schatzman^[15] 利用风洞实验研究了可燃性气体 (重气) 在不利气象条件下的可燃距离, 模拟了瞬时源和连续源两种情况, 并用实验证实了密度比是次要的。

(5) 1992 年 K. C. Heidorn 等^[16]在小风条件下研究了障碍物对重气烟团扩散行为的影响。

(6) 1994 年 P. T. Robert 等^[17]研究了粗糙度的影响, N. J. Duijm 等^[18]通过风洞实验研究了两大类障碍物对重气扩散的影响, 结果表明障碍物和地面其他障碍物对中性气体和重气的扩散有着重要的影响。

(7) 1996 年 Winston L. Sweatman 等^[19]用风洞实验研究了重气瞬时源扩散现象, 主要研究了浓度随时间的变化。

(8) 1997 年 I. R. Cowan^[20~22]对风洞模拟结果与数值模拟结果进行了比较, 其风洞模拟简单建筑物的情形, 泄放源开口于建筑物的侧面。

(9) 1998 年 Guwei Zhu 等^[23]研究了重气烟羽对流场的影响, 所用源是一个地面上的圆形面源, 并用源理查逊数区分扩散过程的特性。

(10) 2001 年 Alan Robins 等^[24,25]分别在中性、稳定层结合不同粗糙度表面上进行了烟羽的扩散规律研究。

(11) 2005 年 J. P. Kunsch 等^[26]用光学测量技术研究了冷重气烟云的卷挟和热力特性。

我国风洞模拟实验始于“八五”期间, 中国环境科学研究院大气所与原化工部劳保所做过重气管道泄漏和储罐爆炸两种情形的风洞模拟实验, 但实验工作未能全部完成; 1995 年中国环境科学研究院大气所^[27]在中性大气条件下对重气瞬时源和连续源的扩散现象进行了风洞实验, 模拟了丘陵地区化工厂生产装置管道破裂造成的有毒气体连续 30min 泄漏扩散情况, 实验结果表明, 在小风时下沉过程和卷吸过程明显分开, 扩散为贴地扩散, 无论在污染浓度还是污染范围上, 都比大风时严重; 2001 年北京大学环境科学中心^[28]做了风洞实验, 研究重气瞬时和连续泄放后的扩散行为, 并讨论几种障碍物对重气扩散的影响; 此外, 北京城市有毒有害易燃易爆危险源控制技术研究中心与北京大学环境科学中心合作对重气连续泄漏和瞬时泄漏两