



流体力学与国土安全*

Gary S Settles[†]

Mechanical and Nuclear Engineering Department,
Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania 16802

摘要 国土安全涉及到流体力学的广泛应用, 并为其研究发展提供了诸多机遇. 本评论选择列举了流体力学在反恐领域的各类课题, 还建议了今后的研究方向. 课题范围从防备、遏制策划中的恐怖袭击, 一直到探测、应对和恢复. 具体的内容则包括飞机加固, 爆炸缓冲, 传感器取样, 爆炸物探测, 微流控和芯片实验室, 城市环境中化学羽流弥散以及建筑物通风等. 此外, 本文还讨论了蒸气羽流与远距探测, 非致命武器, 疾病空气传播, 人员防护装备以及污染移除问题. 涉及这类的应用, 要求流体力学家跨越传统领域的边界, 进行交叉学科研究, 特别是要结合化学、生物学、气溶胶学与大气科学协同工作.

关键词 反恐怖主义, 微流控, 羽流, 爆炸, 通风

1 引言

当前, 流体力学发展到这样一个阶段: 尽管它依然保持着重要的影响, 但某些传统的应用已显得乏味而缺乏吸引力了. 此时, 国土安全(或反恐怖主义)问题的出现为它提供了许多机遇. 国土安全研究将流体课题中业已成熟的部分(如羽流弥散)与崭露头角的部分(如微流控)结合起来. 这些“崭新”领域鼓励我们与化学家和生物学家一起研究, 回报我们所做出的创新工作, 而且将我们在理论、实验和计算诸方面的才能紧密交联在一起.

国土安全其实就是古代先民保护自己的家庭或城镇不受强盗侵犯这种需求的一个新名称而已. 从史前开始, 流体力学就在这个领域发挥了作用. 例如, 利用护城河来减少入口通道, 利用弹道特性来发射防御武器. 恐怖主义的兴起则给液体力学家提出了一些新的挑战, 与早先冷战时期的空间计划相比, 现在他们可以用一些更加直接的方式为公众利益服务了.

最近, 美国国家研究咨询委员会(NRC)^[1]提出了一个观点, 即可以利用高新技术来应对恐怖主义的

非对称威胁. 例如, 长期监测环境异常的传感器就能够维持值守警戒状态. 我们在这里有限度地采纳上述观点, 但并不期待高技术能够补救每一个事件(一直到包括全球政治出问题这种事情).

国土安全技术表面看上去似乎全是计算机和激光, 但事实上其中处处都有流体力学, 而且绝大部分是我们业已知晓的流体力学知识. 例如, 生物恐怖主义便是通过气溶胶传播疾病的一种形式, 而化学-生物-辐射武器(CBR)所释放的羽流弥散则类似于从环境污染源所释放的羽流弥散问题.

1.1 范畴与目标

由于内容繁杂而篇幅有限, 本评论只能选择国土安全的一些流体课题并给予简略的概述, 同时给读者挑选一定数量的既容易找到又可提供更大深度的参考文献. 这里特别要注意的是引用了几篇 NRC 报告, 它们是本文关于国土安全问题科学思想的支柱.

范畴的选定要满足公认客观性. 例如, 国土安全中的海洋问题必须等待一个不同的场合和有资历的作者. 类似地, 气象学问题仅仅是在羽流弥散的范畴

收稿日期: 2006-09-23, 修回日期: 2007-09-12

* Annual Review of Fluid Mechanics 惠允版权翻译此文 (Published with kind permission from Annual Review of Fluid Mechanics, Volume 38 © 2006 by Annual Reviews, fluid.annualreviews.org).

[†] E-mail: gss2@psu.edu

内考虑, 而核武器效应则由 Glasstone 和 Dolan^[2] 在别处全面讨论过了. 因此, 剩下的是一组折中性质的课题. 一般而言, 它们从对于策划中的恐怖分子袭击的防备与遏制一直到探测、应对和恢复. 我们在通篇均特别关注流体问题研究与发展的机遇.

2 防备与遏制

为了达到更有利的政治目标, 恐怖主义特别青睐某些目标. 这些目标是众所周知且可以(在一定程度上) 抵挡攻击的. 因此, 我们要做的事是迫使恐怖分子考虑后退到另外一些吸引力较小的目标上.

2.1 飞机加固

商业航空历来是恐怖分子的一个目标. 因此, 必须采取措施来加固飞行器, 以对付隐蔽爆炸物在飞行中爆轰所导致的灾难性故障. Pan Am 103 惨案和其它的飞机失事都证明了: 中等数量炸药造成的机身穿孔和劈裂便能摧毁整架飞机, 因为它导致了结构破坏和气动失效. 诚然, 目前尚不是所有的恐怖爆炸都成功地击落目标飞行器. 尽管已经进行过若干次昂贵的整机爆破试验, 但人们对这类机上爆炸的气动现象其机制的了解依然甚少.

Settles 等人^[3] 对此问题作过一个详细的评述. 简言之, 飞机中(也包括建筑物中)的内爆炸十分复杂, 这是由于激波从表面反射时会形成激波回响(shock wave reverberation) 和超压放大(overpressure amplification). 目前, 人们尚不明了激波超压、激波衰减(因行李、碎片击穿造成的)、准静态超压以及机身设备压差等因素的相对重要性. Edwards 和 Owen^[4] 开展过小尺度爆破试验, 揭示了飞机铝制类蒙皮上有花瓣状空洞的爆炸撕裂, 这在 Pan Am 103 的残骸上亦有发现^[5].

Settles 等人^[3] 还进行了 Pan Am 103 爆炸及机身洞穿的实验模拟, 他们的实验是在行李舱及机身下部宽体截面的 3/5 缩比模型上完成的(见图 1 所示). Pan Am 103 的法庭证据表明恐怖分子的炸弹是放在一个硬壳箱子中, 在行李舱外壁附近, 与飞机蒙皮相距不到 1.5 m. 该事故报告曾推测激波在机身内部运动并回荡着, 但此现象从未观测或研究之. 因此, 上述模拟实验的目的就是要提供这类观测并说明全尺寸飞机试验中可能出现的那种类型的光学结果. 图 1 示出了爆炸起始后 2 ms 左右时的火球及激波运动情

况, 其中包括激波在部分充填的行李舱内部的反射图像.

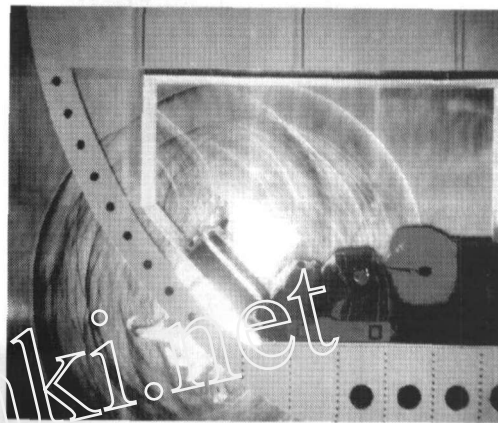


图 1 缩比模型实验的纹影图像, 用以模拟恐怖分子摧毁 Pan Am 103 航班的行李舱爆炸. 这是一架波音 747 飞机左前方货舱的横截面视图. 图中示出了爆破起始后约 2 ms 时的火球、机身上锯齿状孔洞以及激波运动的状态, 5 μ s 曝光. 取自文献^[3], 由本作者拍摄.

2.2 建筑物爆炸缓冲

恐怖分子喜欢采用的另一种战术是对重要且易受攻击的建筑物实施汽车炸弹袭击(Murrah 联邦大厦、Khobar 塔楼以及美国大使馆的袭击, 世界贸易中心的第 1 次攻击等等). 现在已经发布了一些指导意见, 如 FEMA^[6] 和 NRC^[7]. 它们可以用于建筑物设计工作, 以遏制和缓冲这类爆炸.

一般而言, 对建筑物的威胁程度是按照预计的炸弹质量(TNT 当量) 和离开距离来定义的. 经典的空中爆炸相似理论(如参见 Glasstone 和 Dolan^[2]) 指明, 出现激波超压给定值的距离同爆炸能量的立方根成正比. 因此, 一个重要的设计原则是: 只要可能, 就要将交通工具停放在一定远的距离处. 而且, 建筑物设计的外形若是捕获激波的, 那么损失将会放大; 若形状是圆拱式的, 则会更好地将激波反射掉.

这类袭击的灾害后果主要是人员伤亡, 这是由于跟随激波而不断膨胀着的气体将爆炸碎片以超声的速度抛出所造成的. 玻璃碴和建筑物外端碎块变成了致命的子弹, 像冰雹一般砸向人们. 理解此现象便于促进建筑物要更安全的设计. 而且, 建筑物的基础必须更加坚实厚重, 以便防止像在 Murrah 联邦大厦袭击中发生的那种情况, 爆炸导致了结构破坏和坍塌.

人们可以找到各种计算爆炸效应的程序(例如 CONWEP, BLASTX, AIRBLAST 以及 EBLAST

等), 来帮助进行设计 (NRC^[7]). 这些程序不仅预报激波超压, 还包括碎片生成甚至损伤估计等. 但是, 这些程序都是近似分析, 并非完全的三维计算流体力学 (CFD) 解. 不过, Löhner 等人^[8] 的工作则是 CFD 解, 其中还包括了流体 - 结构的相互作用.

2.3 爆炸缓冲研究机遇

在爆炸缓冲、飞机加固以及爆破遏制方面, 人们需要更好的计算机模拟和更多的实验输入数据. 这里, 采用缩比模型和激波光学影像方法, 人们便有机会对爆炸效应进行廉价、安全和快速的模拟. 这类缩尺试验与全尺寸试验相比较符合得相当好 (Edwards 和 Owen^[4], Reichenbach^[9], Smith 等^[10]), 但后者则是昂贵、危险而且耗时的. 现在, 高速数字照相机可以用来记录不同时刻的激波位置 (Settles^[11]), 人们可通过纹影法或阴影法来确定波后流体的属性. 在缩尺模型中只要使用克级爆炸物来模拟激波对设计中建筑物的绕射和超压, 便可以很好地确定其 TNT 当量 (Kleine 等^[12]). 大学里那些长期搁置不用的激波管也可以用来研究建筑物和交通工具在激波载荷作用下的材料破碎. 还有一种激波图像的光学方法叫作逆反射阴影法 (retroreflective shadowgraphy), 它甚至可能离开实验室内到户外去做试验 (Settles 等^[13]).

人们还需要对内爆炸进行更基础性的研究. 至少, 在公开发表的文献中, 只有一些零星分散的研究而未见到关于此问题的系统综合探索.

为了设计未来的抗爆飞机, 还需要进行飞机爆炸的应用研究. 面临航空安全检查的强化, 一些恐怖分子已从飞机转向高密度地面交通 (公共汽车和火车). 这类交通工具尚未像飞机的设计那样格外地重视关于抗爆炸、抗碎裂、激波吸收以及其它潜在的反恐措施等设计特征. 此外, 交通工具的通风系统亦应充分利用来探测爆炸物.

3 探测

由于恐怖分子要挑选袭击的时间和地点, 因此若想事先挫败这类袭击, 一般需要提高警戒的程度. 这样就刺激了各种探测技术的蓬勃发展, 其中流体力学虽难成为表演明星但常常要担当关键的台柱子.

3.1 取样

许多研究都呼吁要更好地对环境取样, 以监测空中的威胁物, 无论它们是来自化学蒸气、颗粒物或是

生物气溶胶. 一些可用于现场的 CBR 探测器的最新产品只带有初级的空气取样器, 或者根本就没有取样装置. 生物气溶胶取样器 (Griffiths 和 Decosemo^[14], Macher 和 Burge^[15]) 必须收集空气中依然存活的、未受损伤的细菌和病毒, 才能进行续后的鉴定程序直到成功. 空气中颗粒取样技术已经是高度发展了, 因为环境污染监测已有多年的经验 (Chow^[16], Hering^[17], Lippmann^[18], Marple 等^[19]). 当然, 人们目前依旧在设计制造各类新型的收集器、旋流分离器和过滤器.

但是, 化学痕量嗅探——像狗犬探测那样 (Syrotuck^[20]), 则研发得相当不足. 这里还有许多事情要向大自然学习 (Settles^[13]): 例如, 狭长的狗犬鼻子既是一个入流分流器又是一个出流 (而且其几何形状是可变的) 分流器. 鱼类嗅觉器官则十分简单, 不必与呼吸共用一个流动通道. 利用飞行器采样近来会成为国土安全研究的一个课题, 然而它是鸟类最先开创的. 海鸟带有皮托管类型的鼻子, 因此能跟踪食物源痕量气味在海上飞行几千公里. 这为 Mueller 和 DeLaurier^[21] 所介绍的那类空中微型飞行器提供了一个范例. 在研制发展新型吸入式生物取样系统方面, 流体力学家们具有不少机会.

3.2 痕量爆炸物探测

恐怖分子习惯偏好采用即时组装而成的爆炸装置 (自制炸弹). 因此, 现在国土安全最优先考虑的是探测环境中痕量硝酸盐是否异常 (Fainberg^[22], Steinfeld 和 Wormhoudt^[23]). 传统上, 犬类是探测的最佳标准 (Furton 和 Myers^[24], Syrotuck^[20]), 但是人们近来则采用特制探测器或电子鼻 (参阅文 [25]). 像硝化甘油 (nitroglycerin) 和三丙酮三过氧化物 (triacetone triperoxide, TATP) 一类的挥发性爆炸物可以根据它们的蒸气便直接探测出来, 而像 RDX (它是 C-4 塑料炸药的活性成分) 一类的非挥发性爆炸物则必须通过痕量粒子方式来探测, 这些粒子恰好与表面有一种亲合性.

“人员入口 (people portals)” 是一个组合装置 (Hallowell^[26]), 它有着快速敏感的探测器 (通常是一个离子迁移质谱仪), 再加上蒸气和颗粒的气动采样措施 (通常是先收集一定容积的含有痕量物的空气并进行预浓缩, 再利用空气射流冲击之). 最近, 史密斯检测公司和通用电气公司已经生产出两种“入口”探测装置商品并上市出售了 (Linker 等^[27], Settles^[28]). 它们是非侵入式的, 只需用几秒钟就可以将每个人

扫描一遍,而且虚假警报十分罕见.这个技术主要应用于航空安全中乘客扫描,不过,它仍然处在初始发展期.

人类身体的气动力学在乘客痕量物取样中起着关键的作用.在静止空气中,每秒种有几十升(1/s)的浮力流从身体上升起,这就是所谓的“人体热羽流(human thermal plume)”(参见 B. A. Graven 和 G. S. Settles 尚未发表的论文).当步行速度超过 0.2 m/s 左右时,羽流便让位给“人体气动尾迹(human aerodynamic wake)”,如图 2 所示(Edge 等^[29]).在这些流动中,发现了痕量化学物质并可以取样之,它们是

作为被动标量从身体上产生的.在人体羽流或尾迹中的蛋白质分泌物图谱可以作为 CBR 袭击的早期指示(NRC^[1]).有朝一日,甚至可能测试人体羽流中皮屑丝裂基因(mitochondrial DNA from skin flakes),将它作为入口控制的生物学措施(NRC^[30]).

货物的痕量爆炸物扫描更为复杂困难,因为不可能为了检查而采用人力将百万计的货舱逐一打开并卸货.因此,人们十分迫切需要有一种方式,只要通过抽取空气就能对货舱内部进行取样. Settles^[25]对已有的途径进行了评述,但这里还有另外一个机遇留给了流体力学发明创新.

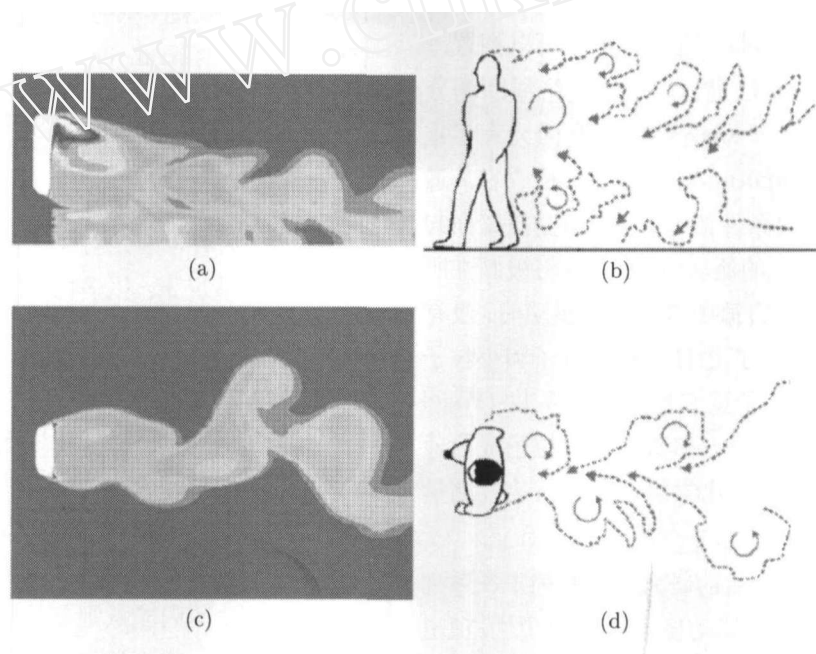


图 2 一名行人尾迹中痕量污染物的瞬时浓度,取自 Edge 等^[29].其中图(a)和(c)是 RANS 数值解,采用了混合的 $k-\omega/k-\epsilon$ 两方程湍流模式,而行人身体则采用了一个简化的表示.图(b)和(d)是根据流动显示实验结果画出的,其中行人是实际的形象.图(a)和(b)是侧视图,图(c)和(d)是顶视图.行走速度为 1.34 m/s 而基于身体宽度(0.58 m)的雷诺数是 53 000.

3.3 传感器

近来传感器技术又经历了一个复苏发展时期.对于国土安全中防止恐怖袭击的使命而言,实时变化检测和侵入式检测是最核心的.目前最重视的是广泛配置的廉价传感器网络(NRC^[30]),以及探测致病因子(如炭疽、天花、鼠疫)和食物饮用水微生物污染的生物传感器(Hobson 等^[31]).由于生物气溶胶的背景水平相当高,这类环境生物敏感技术十分复杂(Jones 和 Harrison^[32]).“微刺(Motes)”(Culler 和 Mulder^[33])是一类微型计算机,它们连接在网络中并装满了各种传感器.这些传感器除了进行痕量爆炸物以及化学、生物学的检测外,还可以作为风速计和环境压力监测器,从而给出激波的信号.从大小

规模上讲,另外一个极端则是军方使用的综合生物学逐点探测系统(Joint Biological Point Detection System, JBPDS),它要装载在一个卡车上.另外,根据 NRC^[1],了解某些动物嗅觉敏锐性的机制,可以为新型传感器的设计提供重要的启示.

3.4 微流控和芯片实验室

20 世纪 70 年代,流控学第一次夭折了.但是,现在微流控又呈现出十分旺盛的生命力并且已经诞生了两本注册期刊.它成为了分析化学和生物化学的一个新兴园地:笨重的实验室仪器正让位于廉价而又快捷的芯片微型实验室,后者亦称作 μ TASs (micro total analysis systems).由于它们的尺寸很小,运行

起来就比传统的实验室过程更快,所需的试剂更少.这类微型总分析系统的应用包括细胞培养,基因测试,药物开发,生物材料分析,以及各种各样的物化测量(Beebe和Folch^[34],Schulte等^[35],Sharp等^[36],Srinivasan等^[37]).

事实上,微流控范围要比国土安全问题广阔得多,但是对于国土安全应用,它所具备的轻便快捷的特征十分关键.这些应用包括现场快速免疫测定和现场基因分析,以及战场或城市恐怖袭击现场中化学、生物学和环境的致害分子的探测与鉴定.这类反恐应用均不允许人们为进行传统的实验室分析而坐等数日.

微实验室的流体力学既不同寻常又令人痴迷(Stone等^[38]).尽管Stokes流区和湍流可以搁置一边不予考虑,但仍然无法进行简单的包络线回溯分析(back-of-the-envelope analysis),这是因为有多重同时效应(multiple simultaneous effects)的存在.通常情况下,无滑移边界条件依旧成立.但是在壁面起主控作用且无自由来流的流动中,热对流将被黏性所削弱.流体在芯片的微管道中流动是电驱动的,没有压力降.由于距离甚短,扩散便可以将分子和小粒子分离开来,其作用大小依据它们的扩散系数(Weigl和Yager^[39]).激光诱导荧光和微米量级粒子成像速度仪(PIV)可以定量测定化学组分并进行速度测量(Devasenathipathy等^[40]).

Stone等人^[38]为今后的研究工作开列了一系列的可能机会,其中包括微流动显示(Sinton^[41]),流道优化,三维微流动,黏弹性微流动,以至最终将尺度下降到纳米流动范围(nanoflow regime).通常,液滴是微流体质量通量的单位,因此液滴的形成、聚并、迁移、内混合以及破碎均需进一步探索理解.当然,需要了解的还有管道壁面处的接触角、浸湿、表面剂效应等问题.最后,在射流、喷雾、微阀、微泵(Laser和Santiago^[42])的设计与过程方面亦存在不少的争论. Stone等人^[38]预料这些课题将会吸引未来好几代的流体力学家介入.

但是,这样一个新的 $Re \sim 1$ 领域并不是适合于每一个人的,尽管有些流体力学家已经成功地完成了这种飞跃.诚然,对于那些愿意变革的人们而言,这是一个具有大量机遇的新兴领域:它可以称作为乐高块流体力学(Lego-block fluid mechanics),或者说,它也许是要试图实现高科技版本的明星牛车巡演(the sci-fi vision of a Star-Trek Tricorder).

3.5 蒸气羽流和远距探测器

国土安全问题中湍羽流占主导地位.有关羽流运

动的背景知识在Turner^[43]著作的第6章和List^[44,45]著作中均有论述.但是,我们现在考虑的是尺度相对小并含有痕量蒸气的羽流.它们可能产生于货舱出气口、敞开的轿车窗户、建筑物通风口、货车拖车,甚至一个个自杀式炸弹携带者的身上.这类羽流一般都是湍动的,而且几乎总是浮力(或动量)驱动的.人们感兴趣的痕量信号仅仅是一种被动标量(Warhaft^[46]).

让我们以恐怖分子使用的最剧烈的炸药(TATP)为例,它在饱和状态下的蒸气压约为7 Pa.即使在这种相对较高的浓度下,该炸药亦不会在羽流动力学行为中起重要作用,羽流依然是由羽流动量、环境风速以及温度差异来控制.那次毁坏了俄克拉荷马城(Oklahoma) Murrah 联邦大厦的硝化甘油(ANFO)汽车炸弹所产生的羽流中,化学示踪物则要比上述蒸气压值低好几个数量级.因此,我们必须将这类含蒸气示踪物羽流与那些稠密气体羽流(Britter^[47])区分开来.后者可能是对化学工厂的恐怖袭击所产生的,在这种情况下,化学物质便会在羽流动力学中发挥重要作用.

DARPA 计划是研究自然界中化学羽流的(参见Atema^[48],Murlis等^[49],Webster和Weissburg^[50]),它亦考虑了含示踪物的湍羽流结构与性态,后者为该研究计划的一部分.最近出版了一份NRC报告(NRC^[51]),其标题有点冷僻,但内容却都是正确的流体力学知识,其闪光点则是关于含爆炸物蒸气示踪物的小尺度羽流.这份报告里期待着人们能够理解爆炸物蒸气羽流的动力学行为,从而可以协助支持成功研制出远距光谱仪探测器,特别是能够检测挥发性炸药(如硝化甘油,EGDN和TATP).这种探测仪的离开距离为10 m或更远,因而检测程序就完全不同于前面讨论过的、以点探测为特色的嗅探技术了.

远距探测器(standoff detectors)通常是设置在恐怖分子炸弹的危险区之外,它们的探测范围很大.流体力学的任务就是给它们指明道路.对于导引探测器而言,羽流的形状和位置、随时间变化的性态、颗粒含量、对环境微风的响应以及近表面效应等都是十分重要的.

这类远距探测器都是光学型仪表.它们包括红外热谱仪,紫外吸收和荧光,反Stokes-Raman相干光谱(CARS),以及光探测定位(LIDAR).其中LIDAR可以生成有威胁羽流的真实图像(NRC^[1,51]).附着在产生羽流的物体表面上的颗粒也可能探测出来.除了爆炸物蒸气羽流以外,与CBR试剂相关的气溶

胶亦有可能采用类似的光学远距探测器探测出来。

现举一个实例来说明流体力学在这一过程中所起的作用, 请参考图 3. 考虑有一股风均匀地吹过放置在地面上的含能“货舱”, 其速度为 0.45 m/s. 图中矢量的颜色代表地平面和货舱外壁上气流的当地速度, 其变化范围从 0.45 m/s (红色) 到 0.02 m/s (兰色). 有一个化学蒸气羽流从货舱正侧面中心处的出气口泄放出来. 该羽流 (由兰色实线表示) 起初向着前缘端运动, 然后分离 (图中未示出), 最终逐渐被卷吸到货舱的尾流之中.

图 3 的目的仅仅是图示说明而已, 它将绕立方体的三维分离流动典型化. Castro 和 Robins^[52], Higson 等^[53], Hunt 等^[54], 以及其他一些研究都对这类流动作过描述和介绍. 这类流动的计算是十分重要的 (Lakehal 和 Rodi^[55], Rodi 等^[56]). 如果利用大涡模拟 (LES), 则可以得到更好的模拟结果 (Rodi 等^[56], Moin^[57]). 总而言之, 关键之点是化学羽流远距探测器需要从流体力学获得输入参数, 这样才能知道从哪里以及为什么指向探测器.

因此, 对于流体力学家来说, 这里有一个研究机遇: 探究并最终发展出关于爆炸物蒸气羽流演化的分类学, 例如它是停放在阳光下货舱一个出气口处发出的羽流, 或者是一辆运动的交通工具尾迹中痕量物质的行为. 这类演化的简化模型可以在风洞中进行试验, 从而揭示流动物理、建立数据库并验证计算模型. 当然要充分地应用上述成果, 尚需借助对这类流动 (包括可以相互比较的环境污染演化历程) 已有的知识才能完成. 致力于国土安全问题的回报是对小尺度蒸气羽流的行为可以达到全面的理解, 从而可以指导羽流远程探测器的研发人员和使用者.

最后, NRC^[51] 推荐采用紫外吸收或纹影技术来获取爆炸物-蒸气羽流的图像, 以此作为研究了解羽流的一种途径. 尽管这种图像技术在实验室中是可行的, 但在现场里却难以独立地探测出大多数蒸气羽流的蒸气浓度. 纹影光学方法可以给出空气中的折射图像 (Settles^[11]), 但它们主要是由于室外的巨大温差而产生的. 重 (或轻) 气体的泄漏可以从背景起伏中区分出来, 但是爆炸物蒸气通常是无法鉴别的 (除非是如 TATP 那类的高度挥发性炸药). 这样, 我们应当另外关注了解热羽流, 它们极有可能携带着人们感兴趣的痕量蒸气. 为了建立一个更好的羽流图像知识库, 应当有一整套方法. 这里, 紫外、纹影、烟流显示、LIDAR 等等都是这个综合体系中相互补充、并协的手段.

4 应对

尽管人们有着最好的准备、威慑和长时间监守警戒, 在某些场合下恐怖分子仍可能成功地袭击国土目标. 一旦袭击发生, 装备精良的首批应对人员和医院就必须待命行为, 以减少伤亡并在必要的地域疏散撤离居民.

4.1 非致命武器

在遭遇恐怖分子时, 城市的战斗便可能发生, 为了减少公民的伤亡, 就需要有各种各样的人道主义的、非致命性的战斗武器. 有一个例子可以说明流体力学在这类武器中的作用, 那就是 Sandia 热塑黏稠泡沫枪 (Valenti^[58]). 其设计指标是将一名作战人员阻挡在 10 m 距离上并且不受到伤害. 类似的例子则是高压水枪, 它们不仅可以投射动量, 而且可能喷射胡椒迷雾. 现在尚在研制中的一种涡旋枪, 是利用燃烧驱动的涡环来撞击和扰乱作战人员, 它类似于一种成功的商业产品——AirZooka 玩具, 但是功效更强且难以应对. 另一种非致命武器是将低频声能分布在 1 km 范围上 (SARA Inc.). “闪响 (flashbangs)” 本质上是手榴弹, 但没有致人丧命的碎片. 它只是产生一道瞬态致盲闪光, 一记致聋爆炸, 甚至是一股令人作呕的气味. 多谱线烟尘炸弹则可以产生一片气溶胶云, 它对于人眼来说是不透明的, 但对于特殊的视像系统来说却是透明的. 到目前为止, 流体力学家尚未完全涉入到非致命武器的研发之中, 但是这一领域为各种闪光的想法留有大量的机遇.

4.2 CBR 羽流和大气弥散

恐怖袭击最令人害怕的可能也许是一类核爆炸. 这是在大城市中将一种 CBR 试剂实施大尺度的空中泄放, 这样会造成大规模伤亡并摧毁急救设施. CBR 羽流是肉眼看不见的, 它无嗅味而且寂静无声. 化学工厂破坏事件中产生的浓稠羽流亦包括在 CBR 羽流范畴里, 不过两者在羽流动力学方面稍有不同.

恐怖分子可以买到许多可气溶胶化的 CBR 试剂, 其中最危险的产品有: (a) 炭疽杆菌 (Bacillus Anthracis) 或炭疽 (anthrax), 尺寸范围 1 ~ 10 μm , 具有可吸入性、耐药性及致命性; (b) 天花病毒 (smallpox virus), 致命性弱于炭疽但极易传染; (c) 放射性降尘 (radioactive fallout), 来自一种“脏弹”. 对于上述的每一种情况, 近来都有先例存在, 尽管它们大部分都与恐怖分子无关, 但人们从中学到了一些沉重痛苦的教训.

4.2.1 先例

1979年,前苏联斯维尔德洛夫斯克(Sverdlovsk)的一个国防实验室发生过炭疽武器的意外泄漏(Dixon等^[59], Meselson等^[60]).羽流在主导风向上扩散到乡村中,城镇死亡人数达66名,下风更远处还有大批牲畜死于炭疽.最近的2001年,美国邮政系统出现的炭疽极大地提高了公众对这类恐怖威胁的警觉性,尽管它所导致的伤害相对不大(Cole^[61], Fennelly等^[62]).

1972年,南斯拉夫爆发了一次自然导致的天花.它起源于一个单指标病例,感染了175人,其中35人死亡.被感染者中,有60%的人接种过疫苗(Henderson^[63]).感染是通过气溶胶传播的.

2003年,香港爆发了严重的非典(SARS),它显然是通过一座公寓楼房的通气井道而传播的(Yu^[64]).总共有187人被感染.

1986年,前苏联切尔诺贝利(Chernobyl)的核事故将一股放射性羽流传播到好几个国家.10年内死亡人数估计为32000人(Shcherbak^[65]).当时所做的大气弥散模型是不精确的.

1984年,印度博帕尔(Bhopal)的联合碳化物农药厂泄漏了40t甲基氰化物,将一股稠密的气体羽流散布到整个沉睡的城市.瞬间间便有16000人死去,另外大约有520000受到了毒气影响(List^[66], Sharan和Gopalakrishnan^[67]).

1991年,科威特油井大火的多股羽流最终合并成一股巨大的羽流,其发展的速率比现有各种弥散模型的预报值都要更快些(Cooper^[68]).

总而言之,这些先例说明了大气弥散的关键作用.它们亦表明了具有一种精确的预报能力是最核心的,这已不仅仅是限于国土安全问题的范畴了.

4.2.2 CBR 试剂散布

想要用一种CBR试剂去伤害居民,必须将它广泛地散布开去.当试剂是气体、雾化液体或者固体颗粒时,主要是通过大气弥散来实现.例如,制造液态的化学战试剂并不困难,但是分散则要求有一个地气溶胶发生器,像农药喷雾器或作物抛撒器那样.

因此,对于将液体雾化喷射这样一个流体力学步骤,尽管恐怖分子可以成功实现,但该步骤十分精密严格,并不能任意实施.例如,通过喷射孔来雾化流体要取决于压力大小,它能够产生纵向应变并足以损坏流体中的细菌和病毒.

恐怖分子还可以找到一些其它的气溶胶化方式,其中包括干式混合器-喷管分配器、超声雾化器,以及流化床等等.这些方法的说明介绍可参阅相

关文献(Fuchs^[69], Horvath^[70]). Henderson^[71], Griffiths和Decosemo^[14]则涵盖了生物气溶胶方面的内容.切尔诺贝利事件中的散布机制是燃烧驱动产生的气溶胶(Lighty等^[72]).国土安全问题十分关注进一步推进气溶胶科学研究,使之包括团聚和移除方式的探索(NRC^[73]).

关于气溶胶重新再分散的问题亦存在着争议.已经完全沉积下来的致病粒子还可能又重新飘浮到空中,其原因是风的作用(Jones和Harrison^[32]),汽车或甚至是行人的尾迹(Edge等^[29];参见图2).最近的一些研究(Phares等^[74], Smedley等^[75])加深了人们关于粒子从表面上重新再分散开来这一过程的认识,但对此问题仍需做更多的工作.

“脏弹”是公众对放射性播撒武器的一种称呼,其主要的威胁在于释放可吸入性粒子(NRC^[1]).衣服上、皮肤上的放射性尘埃可以洗掉,但是如果你吸入了放射性尘埃,你就“拥有”了它.市场上可以买到的致命性、低规格但具有很长半衰期的放射性材料有:铯137,钴60,镅,钚,以及各种核废料成分.脏弹中常规炸药的主要作用是使这些材料气溶胶化.恐怖分子用脏弹袭击所想获得的效果大概是要对他们永远无法接近的标志性目标实施报复并对公众形成威胁.

4.2.3 羽流的大气弥散模型

对于国土安全而言,羽流弥散模型是一个核心问题.NRC报告^[76]归纳综述了专家们对此问题的观点,所有感兴趣的读者应当参考之.了解一些微气象学背景知识(如参阅Arya^[77])也是十分有益的.

简言之,成功地预报,处理CBR羽流要求具备:
(a) 弥散模型,这样可以给出羽流路径和扩展速率;
(b) 当地地形图和气象资料;
(c) 大气科学与警报应答社区之间的沟通.紧急情况应对者对于羽流方向、覆盖范围和致命性的预报需要具备一种快捷、简单和传递的能力.另一方面,超级计算机采用大涡模拟(LES)湍流模式来求解Navier-Stokes方程,具有非常高的精度(如参阅Boris^[78]).但是现在考虑利用它来服务紧急情况应对的需求,则速度又太慢了.在上述两个极端之间,还有许多难以决断的弥散模型:有的是Lagrangian模型,有的是Euler模型,还有不少是基于简单时间平均的高斯羽流假设(参见NRC^[76], Lee等^[79]).

这些模型可以揭示一些令人惊奇的流体动力学特性. Boris^[78]在模拟Washington D. C.羽流弥散时,分辨出来从华盛顿纪念碑下泻的Kármán涡.图4则给出了俄勒冈州波特兰(Portland)城的模拟

结果, 当时有一股西风, 弥散的污染物源于一个小黄色的“十”处. 没有预料的是羽流一开始向北方传播, 这表明了“城市街道峡谷”效应. 没有建筑物时, 羽流随着污染源东向距离的增加而线性增长, 这符合于传统的羽流理论的预期. Brown^[80] 评述了上面这个例子以及其它一些实例中发现的城市街道旋涡和建筑物效应等特异性态.

Gauss 模型将所有的湍流运动都平均掉了. 正如图 5 所示的那样, 如此得到的 CBR 羽流横向安全边界是一个不真实的图像. 事实上, 在一个大气弥散的羽流中, 瞬时峰值浓度可能超过局部平均值的 6 倍.

模型验证来自两个数据源: 现场测量 (如参阅 Allwine 等^[81]) 和气象风洞试验 (如参阅 Cermak^[82,83]; Meroney 和 Melbourne^[84]). 许多早期的有关环境污染羽流弥散的研究结果 (包括在风洞、计算流体力学以及现场等方面) 都可以同等地应用于 CBR 武器羽流. 相关文献可参阅 Castro 和 Robins^[52], Fedorovich^[85], Robins^[86].

NRC 报告^[76] 建议应当进一步研究城市地表对当地气象的影响, 发展更易于运行的城市模型, 在弥散预报中增加误差范围, 并且将气象学和传感器数据纳入到模型之中. 此外, 它还呼吁进行精密设计的城市现场试验和风洞试验, 从而可以尝试与改进各种模型.

近来在大涡模拟 (LES) 方面的进展亦增加了人们关于用它取代简单弥散模型的期望. 中尺度旋涡的无耗散数值方法的发展, 再加上计算能力的显著提高, 已允许对复杂的湍流进行大涡模拟了. 这完全超出了人们曾经设想可能达到的水平 (Moin^[57]). 尽管这是超级计算机而非笔记本电脑, 但是下一步城市大气弥散现场预报将可能基于这些高保真计算的低阶 CFD 模型 (P. Moin 私人通信).

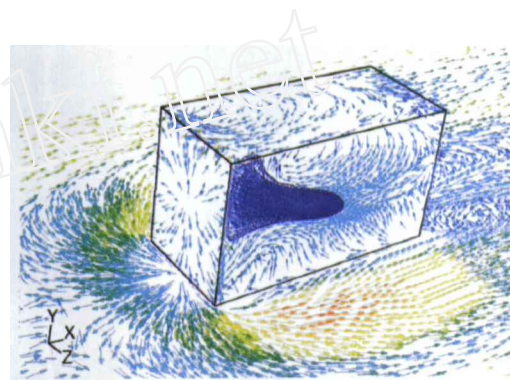


图 3 含能“货舱”绕流的 RANS 计算, 该货舱停放在地平面上, 均匀风自左向右, 风速 0.45 m/s. 一股热 ($\Delta T=20\text{ K}$) 化学蒸气从货舱正面中心处的出气口泄放出. 基于货舱高度的 Re 数为 11520. 地平面上来流边界层厚度为 $0.19h$. $k-\omega$ 湍流模式的 FLUENT 模拟是由 W. J. Smith, Jr. Pennsylvania 州立大学, 气动力学实验室完成的.

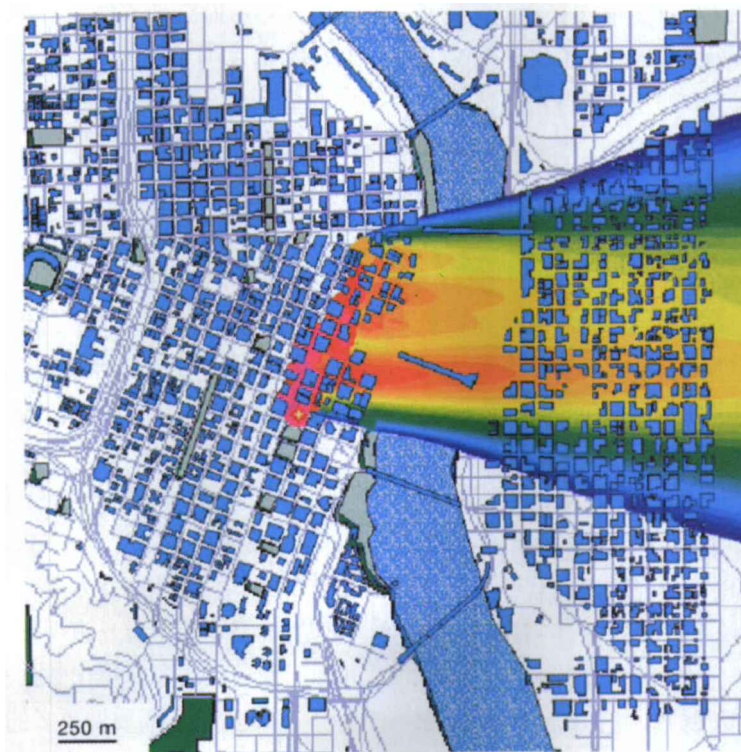


图 4 从俄勒冈州 Portland 城泄放的污染物的大气弥散模拟. 风来自西方, 污染物泄放源位于黄色的小“十”字处. 英国国防科技实验室研究发展了 UDM 弥散模型, Los Alamos 国家实验室在本模拟计算中采用了此模型. 本结果由 G. E. Streit 提供.

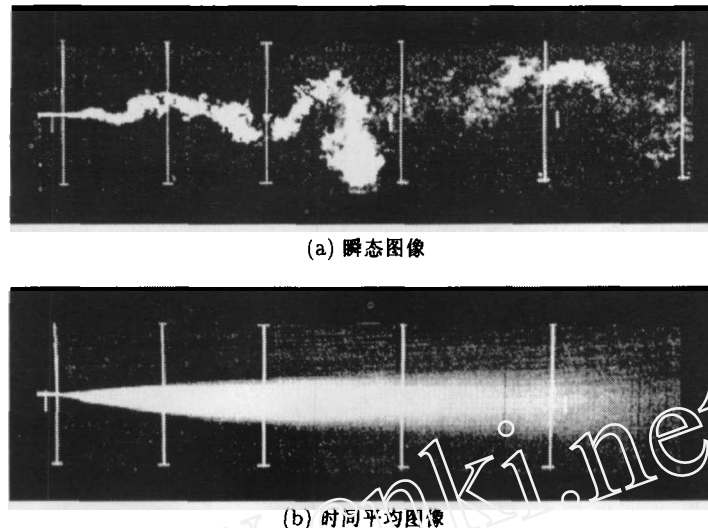


图5 一个污染源下游处湍羽流的流动显示。由美国 EPA/NOAA 流体模型设备提供。

4.3 建筑物内部气流

尽管恐怖分子更偏好于摧毁重要建筑物，但是利用 CBR 试剂播撒到建筑物的加热、通风和空调 (HVAC) 系统中来伤害居住者，亦可为他们的目的服务。这些系统在开始设计时几乎都没有考虑过这种威胁，不过现在 HVAC 工程师协会 (ASHRAE) 正在严肃认真地探究此问题 (ASHRAE^[87], Henderson^[63], Persily^[88])。

从传统上讲，HVAC 工程并不属于基础的和应用的流体力学范畴，但它们之间偶尔亦有交叉。最著名的工作由 Linden 给出 (如参阅 Lin 和 Linden^[89], Linden^[90])。流体力学家们不应当被建筑物通风问题吓跑，因为它不过就是通过一个复杂三维套罩的气流而已。当然这里处处都有压降、温差、羽流、射流、分离流、风道和通风口。由于建筑物有着许多不同的类型：办公楼、公寓楼、机场、火车与地铁站、学校、体育馆、剧院以及生产设施等等，它们从未经历过分类研究，因而情况变得更加复杂 (NRC^[91])。简而言之，使未来关于建筑物通风的研究进入到“基础”流体力学问题的范畴，将是一种挑战。

不过，在新建筑物的 HVAC 设计中，至少已经出现了一些国土安全纪元里应当具备的基本原则 (ASHRAE^[87], NIOSH^[92])。简略地说，那就是人们应当过滤进风口空气 [高效粒子空气过滤器 (HEPA) 可捕获生物性和放射性粒子，但对化学试剂不起作用]，避免室外有害试剂进入，隔离室内已出现的污染。室外空气的渗入是件很糟的事情，因为它是一个潜在的污染源。在新建筑物中可以设计一些通风 - 隔离的“安全区域”，而且可以采用分布式 CBR 传感器来触发启动受感染区域的隔离措施 (NRC^[1], Persily^[88])。

污染问题以及应对恐怖袭击这两个方面都要求 HVAC 系统是可调控的，以便中止污染的扩散，此外还要求具有可以捕获或中和建筑物中 CBR 试剂的手段。HVAC 系统可能需要关闭，这时居住者必须撤离建筑物或就地隐蔽。

最近，人们在预报建筑物 HVAC 流动时，采用了快速的多重区域气流和输运模型，特别是 NIST CONTAM 和 LBNL COMIS (Haghighat 和 Megri^[93])。这里，人们又一次感触到目前超级计算机的 CFD 仍然是太慢了。不过，LES 方法又使人们对未来充满了期望。在采用这类 CFD 求解时所遇到的挑战是：既要为建筑物几何形体提供真实的网格，又要为流动真实性提供足够的格点。Reshetin 和 Regens^[94] 提出了另一种完全不同的模型方法，它建立在坚实的流体力学基础上，可以预报炭疽孢子如何在整个建筑物中迅速扩散。

为了验证计算程序，急迫需要有意义的数据。例如，为了画出旧金山新机场终端处的气流图，就需要对雾和痕量气体进行测量。这是 Sandia PROACT 计划的一个组成部分。

建筑物通风的实验室研究则偏好采用水模型 (water models) (如参阅 Lin 和 Linden^[88], Thatcher 等^[95])。在典型的 1/6 缩比下，就可以达到动力学相似，而且水流很容易可视化 (Settles^[96])。这些实验可以了解流动现象，得出数据来验证程序 (Finlayson 等^[97])。人们还需要做更多的这类试验，以便更好地认识污染在建筑物中扩散情况，指导污染控制设计及传感器配置方案，甚至可以为污染排除策略提供信息。

最后，大规模转运设施的开放空间大而且人员密度高，因此应给予特别的关注 (NRC^[1])。地铁系统

中, 由于列车运动的活塞效应, CBR 泄放将能够在地下传播开来. 至少已经有一个 CFD 模拟计算预报了有害云团在普通地铁站中的运动情况 (Camelli 和 Löhner^[98]). 因此, 分布式 CBR 传感器是需要设置的, 而且目前在华盛顿地铁系统中已经安置到位了.

4.4 疾病空气传播

空气传染的流体力学机制与前面刚刚讨论过的建筑物通风问题是紧密关联的. 这并不是一个新的课题 (如参阅 Sattar 和 Ijaz^[99]), 但是近来一些天然的恶性病毒爆发 (如 SARS) 以及恐怖分子引入天花的潜在可能性都使得人们又重新强调起这个问题.

关于空气感染的 Wells-Riley 传统模型 (Nardell 等^[100], Nicas 和 Hubbard^[101], Fennelly 和 Nardell^[102]) 给天花传染描绘出一幅可怕的图像. 由于病毒的恶性程度高且生命周期长, 甚至每立方米空气中只有一个病毒, 就足以产生空气感染的严重危险. 通风使病毒浓度稀释, 从而可以在一定程度上降低这种危险. 如果加用一个防护口罩, 则危险性可以大大降低.

然而正如 Jennison^[103] 首先指出的那样, 一个受感染的病人是空气中含有病毒粒子的巨源 (亦可参见 Papineni 和 Rosenthal^[104]). 这里, 图 6 给予了说明. 呼吸和说话会抛射出一些粒子并飘浮在空中; 而一声咳嗽, 特别是一个喷嚏则将人类的嘴巴和鼻子变成雾化器.

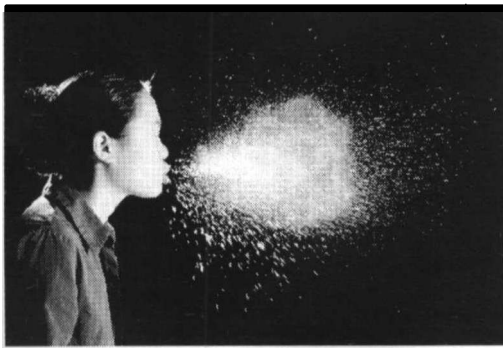


图 6 人类打喷嚏的高速闪光照明图片, 揭示了其中有数百万个气溶胶粒子. 由 Rochester 技术研究所的 A. Davidhazy 提供.

流体力学可以在若干方面对这个重要问题做出贡献. 利用现代光学方法 (如 PIV) 可以定量地给出呼吸、讲话、咳嗽以及喷嚏的速度场和粒子浓度. 空气流的相互作用以及相邻个人之间的交叉感染也可以定量给出 (Bjørn 和 Nielsen^[105]). 为了寻求医院病房最安全的通风方案, 可以同时进行模型研究和全

尺度空气流 (实验) 研究. 医院是应对生物袭击并使之复原的核心. 按照 Franz 和 Zaitchuk^[106] 的说法, “一个坚实的公共健康构架要将我们大家和我们的资源都包括在内. 它会使国家很好地控制疾病, 而不论疾病是因何而起的”.

5 恢复

反恐的最后一个步骤是袭击之后的清理和前进. 这里简要地讨论一下与人员防护装备和污染排除等相关的流体问题.

5.1 人员防护装备

当前使用的气体面罩是 WWI 产品, 它们要用 HEPA 过滤层来阻挡细菌和病毒 (Hawley 和 Eitzen^[107]). 更好的是带有自备呼吸装置的帽罩, 它的防护效果比面罩改善了 10 倍而且避免了配合的问题. 当然, 帽罩有着其它的缺点. 因此, 人们需要设计更轻巧更舒适的产品, 并且它们应当能够与呼吸及人体对流形态等相兼容.

目前人们使用的防护服又笨又重, 而且很容易引起热应力 (NRC^[108]). A 级防护服穿用的时间只能在 1 个小时以内, 而且它会影响到穿用人员的操作功能 (Goldman^[109]). 舒适的 CBR 防护服目前尚不存在.

为了更简捷、更有效、更系统地解决上述问题, 应当从流体力学家和生理学家那里寻求知识. 人们对于高效舒适的防护装备有着长期的需求.

5.2 污染排除

多年来, 人们对污染排除问题开展了广泛的研究. 它主要是一个化学 - 微生物 - 放射学问题, 其中亦包含着流体力学知识. 若欲了解相关的背景, 可以参阅 Fitch 等^[110], Hawley 和 Eitzen^[107], Raber 等^[111], NRC^[90], 以及 NRC^[108] 的第 7 章. 在典型的情况下, 液体净化表面而气体净化剂则是熏蒸表面.

喷水可以洗涤空气及移除气溶胶. 工作人员所造成的空气扰动会导致炭疽孢子或放射性尘埃又重新弥散开来. 这是个令人关注的问题. 前面介绍过的人员入口可以对受害者和工作人员是否携带痕量污染物进行扫描. 前面讨论过的预报空气污染物弥散图像, 对于排除污染的努力将是一种导向. 最后, 举一个将热科学引入到这项工作中来的例子. Buffalo 大学的生物鼓风机 (Bioblower) 就是利用一个正位移压缩机快速加热其中空气的方法来给空气排除污染的.

污染排除方面尚未解决的问题包括: 如何处理多

孔材料, 如何给敏感设备、高价物品及难以接触的部位排污, 以及如何测定剩余污染水平. 而且, 近来表面清洁和涂层移除方面取得了不少新进展 (包括高压射流、CO₂/冰冲击、闪频灯、激光、超声表面处理以及泡沫), 但是需要评估它们的排污潜力.

6 结论与展望

本文在论述中指出了国土安全领域有许多流体力学研究发展的机遇. 其中最重要的是: 气溶胶取样 (特别是吸入式生物取样器), 分布式敏感系统中流体传感器, 爆炸效应的缩尺模型模拟, 微流控和芯片实验室, 城市羽流弥散模型, 气溶胶的产生、团聚与移除, 以及建筑物通风的水模型试验. CFD 起着重要的作用, 它很快就会实时地为紧急警报管理系统提供输入数据. 所有各类羽流都很显著, 因此需要进一步研究之. 毫无疑问, 现有的流体力学设备, 特别是气象风洞和激波管, 将会发挥更大的活力, 而设计一些新型实验设备亦将构成发展机遇.

国土安全问题需要了解更多的流体力学信息. 本文已经引用的文献表明人们目前对于羽流、湍流的本质、压力 - 速度关联以及声波与激波之间的差别等问题尚有一定的误解. 在每一个对于流体力学来说是“崭新”的领域里, 人们应当走的第一步总是教育. 这里, 权威性的 NRC 报告^[1] 提倡将培训和模拟作为国土安全总体工作的一个组成部分. 我们除了做研究以外, 还要发展多媒体材料来解释流体力学在国土安全领域中的作用. 这里要采用非专业术语提出流体力学概念, 通过一点点流动显示的方法使之更加生动易懂. 这将是有益的作法.

在这个崭新的领域中, 流体力学必将不断地被推动向前, 随之我们将进行宣传教育并学习许多新鲜事物. 沿着这一途径, 我们不仅能为反恐做出贡献, 而且还会为室内空气品质的改善、环境污染的减轻、公共健康体系的增强等等做出贡献. 在后面这些情况中, 拯救的生命可能比恐怖分子残杀的还会多一些. 与选择流体力学研究发展的其它课题 (例如, 载人空间飞行, 或者弹道导弹防御) 相比, 上述工作看起来要好得多.

参 考 文 献

- 1 Natl. Res. Coun. (NRC). Making the Nation Safer: The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. Washington D C: Natl Acad Press, 2002
- 2 Glasstone S, Dolan P. The Effects of Nuclear Weapons. 3rd ed. Washington D C: USDOD/DOE. 1977

- 3 Settles G S, Keane B T, Anderson B W, Gatto J A. Shock waves in aviation security and safety. *Shock Waves*, 2003, 12(4): 267~275
- 4 Edwards M R, Owen C L. The tearing of petalled holes in 2014-T651 aluminum-alloy produced by explosions and its possible contribution to the loss of aircraft by sabotage. *Proc Inst Mech Eng*, 1995, G 209(1): 53~63
- 5 U K Dep. Transp. Report on the accident to Boeing 1989.747~121, N739PA at Lockerbie, Dumfriesshire, Scotland on 21 December 1988. Air Accid. Investig. Branch. Aircr. Accid. Rep. 2/90 (EW/C1094), 1989
- 6 Fed. Emerg. Manag. Agency (FEMA). Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks. FEMA Rep, 2003. 427
- 7 Natl. Res. Coun. (NRC). Protecting Buildings from Bomb Damage: Transfer of Blast-Effects Mitigation Technologies from Military to Civilian Applications. Washington D C: Natl Acad Press, 1995
- 8 Löhner R, Cebral J, Yang C, et al. Large-scale fluidstructure interaction simulations. *Comput Sci Eng*, 2004, 6(3): 27~37
- 9 Reichenbach H. In the footsteps of Ernst Mach — a historical review of shock wave research at the Ernst-Mach-Institut. *Shock Waves*, 1992, 2: 65~79
- 10 Smith P D, Mays G C, Rose T A, et al. Small-scale models of complex-geometry for blast overpressure assessment. *Int J Impact Eng*, 1992, 12(3): 345~360
- 11 Settles G S. Schlieren and Shadowgraph Techniques: Visualizing Phenomena in Transparent Media. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- 12 Kleine H, Dewey J M, Ohashi K, et al. Studies of the TNT equivalence of silver azide charges. *Shock Waves*, 2003, 13(2): 123~138
- 13 Settles G S. Sniffers: Fluid-dynamic sampling for olfactory trace detection in nature and homeland security. *J Fluid Eng*, 2005, 127(2): 189~218
- 14 Griffiths W D, Decosemo G A L. The assessment of bioaerosols — a critical review. *J Aerosol Sci*, 1994, 25(8): 1425~58
- 15 Macher J M, Burge H A. Sampling biological aerosols. In: Cohen B S, McCammon C S Jr, eds. Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants. Cincinnati: ACGIH, 2001. 662~701
- 16 Chow J C. Measurement methods to determine compliance with ambient airquality standards for suspended particles. *J Air Waste Manag Assoc*, 1995, 45(5): 320~382
- 17 Hering S V. Impactors, cyclones, and other particle collectors. In: Cohen B S, McCammon C S Jr, eds. Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants. Cincinnati: ACGIH, 2001. 315~75
- 18 Lippmann M. Filters and filter holders. In: Cohen B S, McCammon C S Jr, eds. Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants. Cincinnati: ACGIH, 2001. 281~314
- 19 Marple V A, Olson B A, Rubow K L. Inertial, gravitational, centrifugal, and thermal collection techniques. In: Baron P A, Willeke K, eds. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications. Hoboken, NJ: Wiley-Intersci, 2001. 229~260
- 20 Syrotuck W G. Scent and the Scenting Dog. Rome, NY: Arner, 1972

- 21 Mueller T J, DeLaurier J D. Aerodynamics of small vehicles. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 89~111
- 22 Fainberg A. Explosives detection for aviation security. *Science*, 1992, 255(5051): 1531~1537
- 23 Steinfeld J I, Wormhoudt J. Explosives detection: a challenge for physical chemistry. *Annu Rev Phys Chem*, 1998, 49: 203~232
- 24 Furton K G, Myers L J. The scientific foundation and efficacy of the use of canines as chemical detectors for explosives. *Talanta*, 2001, 54(3): 487~500
- 25 Settles G S, Grumstrup T P, Miller J D, et al. Full-scale high-speed "Edgerton" retroreflective shadowgraphy of explosions and gunshots. In: Proc Pacific Symp FlowVis Image Proc, 5th, Australia Pap, PSFVIP-5-251, 2005
- 26 Hallowell S F. Screening people for illicit substances: a survey of current portal technology. *Talanta*, 2001, 54(3): 447~458
- 27 Linker K L, Hannum D W, Conrad F J. Vertical flow chemical detection portal. U S Patent, 5, 915, 268, 1999
- 28 Settles G S. Chemical trace detection portal based on the natural airflow and heat transfer of the human body. U S Patent, 6, 073, 499, 2000
- 29 Edge B A, Paterson E G, Settles G S. Computational study of the wake and contaminant transport of a walking human. *J Fluids Eng*, 2005, 127: 967~977
- 30 Natl. Res. Council. (NRC). Science and Technology for Army Homeland Security. Washington D C: Natl Acad Press, 2003
- 31 Hobson N S, Tothill I, Turner A P F. Microbial detection. *Biosens Bioelect*, 1996, 11(5): 455~477
- 32 Jones A M, Harrison R M. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations — a review. *Sci Total Environ*, 2004, 326(1-3): 151~180
- 33 Culler D E, Mulder H. Smart sensors to network the world. *Sci Am*, 2004, 287(6): 85~91
- 34 Beebe D, Folch A. The science and applications of cell biology in microsystems. *Lab Chip*, 2005, 5(1): 10~11
- 35 Schulte T H, Bardell R L, Weigl B H. Microfluidic technologies in clinical diagnostics. *Clin Chim Acta*, 2002, 321(1-2): 1~10
- 36 Sharp K V, Adrian R J, Santiago J G, Molho J I. Liquid flows in microchannels. In: MGad-el-Hak, ed. The MEMS Handbook, Boca Raton, FL: CRC Press, 2002. 6-1-33
- 37 Srinivasan V, Pamula V K, Fair R B. An integrated digital microfluidic lab-on-a-chip for clinical diagnostics on human physiological fluids. *Lab Chip*, 2004, 4(4): 310~315
- 38 Stone H A, Stroock A D, Ajdari A. Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annu Rev Fluid Mech*, 2004, 36: 381~411
- 39 Weigl B H, Yager P. Microfluidics — Microfluidic diffusion-based separation and detection. *Science*, 1999, 283(5400): 346~347
- 40 Devasenathipathy S, Santiago J G, Wereley S T, et al. Particle imaging techniques for microfabricated fluidic systems. *Exp Fluids*, 2003, 34(4): 504~514
- 41 Sinton D. Microscale flow visualization. *Microfluid Nano-fluid*, 2004, 1(1): 2~21
- 42 Laser D J, Santiago J G. A review of micropumps. *J Micromech Microeng*, 2004, 14(6): R35~64
- 43 Turner J S. Buoyancy Effects in Fluids. Cambridge, UK: Cambridge Univ Press, 1973
- 44 List E J. Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes. In: Rodi W, ed. Turbulent Buoyant Jets and Plumes, New York: Pergamon, 1982. 1~68
- 45 List E J. Turbulent jets and plumes. *Annu Rev Fluid Mech*, 1982, 14: 189~212
- 46 Warhaft Z. Passive scalars in turbulent flows. *Annu Rev Fluid Mech*, 2000, 32: 203~240
- 47 Britter R E. Atmospheric dispersion of dense gases. *Annu Rev Fluid Mech*, 1989, 21: 317~344
- 48 Atema J. Eddy chemotaxis and odor landscapes: exploration of nature with animal sensors. *Biol Bull*, 1996, 191(1): 129~138
- 49 Murlis J, Willis M A, Cardé R T. Spatial and temporal structures of pheromone plumes in fields and forests. *Physiol Entomol*, 2000, 25(3): 211~222
- 50 Webster D E, Weissburg M J. Chemosensory guidance cues in a turbulent chemical odor plume. *Limnol Oceanogr*, 2001, 46(5): 1034~1047
- 51 Natl. Res. Council. (NRC). Existing and Potential Standoff Explosives Detection Technologies. Washington D C: Natl Acad Press, 2004
- 52 Castro I P, Robins A G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *J Fluid Mech*, 1977, 79(2): 307~335
- 53 Higson H L, Griffiths R F, Jones C D, Hall D J. Concentration measurements around an isolated building — a comparison between wind-tunnel and field data. *Atmos Environ*, 1994, 28(11): 1827~1836
- 54 Hunt J C R, Abell C J, Peterka J A, Woo H. Kinematical studies of the flows around free or surface-mounted obstacles; applying topology to flow visualization. *J Fluid Mech*, 1978, 86(1): 179~200
- 55 Lakehal D, Rodi W. Calculation of the flow past a surface mounted cube with two-layer turbulence models. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1997, 67/68: 65~78
- 56 Rodi W, Ferziger J H, Breuer M, Pourquie M. Status of large eddy simulation: results of a workshop. *J Fluid Eng*, 1997, 119(2): 248~262
- 57 Moin P. Advances in large eddy simulation methodology for complex flows. *Intl J Heat Fluid Flow*, 2002, 23(5): 710~720
- 58 Valenti M. Lawbreakers beware the web of justice. *Mech Eng*. 1994, 116(4): 86~87
- 59 Dixon T C, Meselson M, Guillemin J, Hanna P C. Anthrax. *N Engl J Med*, 1999, 341(11): 815~826
- 60 Meselson M, Guillemin J, Hughjones M, et al. The Sverdlovsk anthrax outbreak of 1979. *Science*, 1994, 266(5188): 12028
- 61 Cole L A. The Anthrax Letters: A Medical Detective Story. Washington DC: Joseph Henry Press, 2003
- 62 Fennelly K P, Davidow A L, Miller S L, Connell N, Ellner J J. Airborne infection with *Bacillus anthracis* — from mills to mail. *Emerg Infect Dis*, 2004, 10(6): 996~1001
- 63 Henderson D A. The threat of aerosolized biological weapons. *ASHRAE J*, 2004, 46(12): 50~53
- 64 Yu ITS, Li Y G, Wong T W, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med*, 2004, 350(17): 1731~1739
- 65 Shcherbak Y M. Confronting the nuclear legacy-part 1: ten years of the Chernobyl era. *Sci Am*, 1996, 274(4): 44~49
- 66 List E J. Environmental fluid mechanics. In: Lumley J L, Acrivos A, Leal L G, Leibovich S, eds. Research Trends in

- Fluid Dynamics, Woodbury, NY: AIP, 1996. 148~166
- 67 Sharan M, Gopalakrishnan S G. Bhopal gas accident: a numerical simulation of the gas dispersion event. *Environ Model Softw*, 1997, 12(2-3): 135~141
 - 68 Cooper W A. Dispersion of smoke plumes from the Kuwait oil fires. In: Proc ASME FED, Vol.143/HTD Vol.232, 1992. 153~158
 - 69 Fuchs N A. Dispersal of powders as aerosols. The Mechanics of Aerosols, Ch8 New York: Dover, 1989. 353~377
 - 70 Horvath H. Aerosols — an introduction. *J Environ Radioact*, 2000, 51(1): 5~25
 - 71 Henderson D A. The looming threat of bioterrorism. *Science*, 1999, 283(5406): 1279~1282
 - 72 Lighty J S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: factors governing their size and composition and implications to human health. *J Air Waste Mgt Assoc*, 2000, 50(9): 1565~618
 - 73 Natl. Res. Council. (NRC). National Security and Homeland Defense: Challenges for the Chemical Sciences in the 21st Century. Washington, DC: Natl. Acad. Press, 2003
 - 74 Phares D J, Smedley G T, Flagan R C. Effect of particle size and material properties on aerodynamic resuspension from surfaces. *J Aerosol Sci*, 2000, 31(11): 1335~1353
 - 75 Smedley G T, Phares D J, Flagan R C. Entrainment of fine particles from surfaces by gas jets impinging at normal incidence. *Exp Fluids*, 1999, 26(4): 324~334
 - 76 Natl. Res. Council. (NRC). Tracking and Predicting the Atmospheric Dispersion of Hazardous Material Releases: Implications for Homeland Security. Washington D C: Natl. Acad. Press, 2003
 - 77 Arya P S. Introduction to Micrometeorology. San Diego: Academic, 2001
 - 78 Boris J. The threat of chemical and biological terrorism: preparing a response. *Comput Sci Eng*, 2002, 4(2): 22~32
 - 79 Lee R L, Albritton J R, Ermak D L, Kim J. Computational fluid dynamics modeling for emergency preparedness and response. *Environ Model Softw*, 1997, 12(1): 43~50
 - 80 Brown M J. Urban dispersion — challenges for fast response modeling. Los Alamos Natl Lab Rep LA-UR-04-5129, 2004
 - 81 Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. Overview of Urban 2000 — A multiscale field study of dispersion through an urban environment. *Bull Am Meteorol Soc*, 2002, 83(4): 521~536
 - 82 Cermak J E. Applications of fluid mechanics to wind engineering — a Freeman Scholar Lecture. *J Fluids Eng*, 1975, 97(3): 938
 - 83 Cermak J E. Aerodynamics of buildings. *Annu Rev Fluid Mech*, 1976, 8: 75~106
 - 84 Meroney R N, Melbourne W H. Operating ranges of meteorological wind tunnels for the simulation of convective boundary-layer (CBL) phenomena. *Bound Layer Meteorol*, 1992, 61(1-2): 145~174
 - 85 Fedorovich E. Dispersion of passive tracer in the atmospheric convective boundary layer with wind shears: a review of laboratory and numerical model studies. *Meteorol Atmos Phys*, 2004, 87(1-3): 3~21
 - 86 Robins A. Wind tunnel dispersion modelling some recent and not so recent achievements. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 2003, 91(12-15): 1777~1790
 - 87 Am. Soc. Heat. Refrig. Air-Cond. Eng. (ASHRAE). Risk management guidance for health, safety and environmental security under extraordinary incidents. Report Atlanta, GA, ASHRAE, 2003
 - 88 Persily A. Building ventilation and pressurization as a security tool. *ASHRAE J*, 2004, 46(9): 18~26
 - 89 Lin Y J P, Linden P F. Buoyancy-driven ventilation between two chambers. *J Fluid Mech*, 2002, 463: 293~312
 - 90 Linden P F. The fluid mechanics of natural ventilation. *Annu Rev Fluid Mech*, 1999, 31: 201~238
 - 91 Natl. Res. Council. (NRC). Review of EPA Homeland Security Efforts: Safe Buildings Program Research Implementation Plan. Washington, D C: Natl Acad Press, 2003
 - 92 Natl. Inst. Occup. Safety Health (NIOSH). Guidance for protecting building environments from airborne chemical, biological, or radiological attacks. Publ. No. 2002-139, 2002
 - 93 Haghghat F, Megri A C. A comprehensive validation of two airflow models — COMIS and CONTAM. *Indoor Air*, 1996, 6(4): 278~288
 - 94 Reshetin V P, Regens J L. Simulation modeling of anthrax spore dispersion in a bioterrorism incident. *Risk Anal*, 2003, 23(6): 1135~1145
 - 95 Thatcher T L, Wilson D J, Wood E E, et al. Pollutant dispersion in a large indoor space: Part 1 — Scaled experiments using a water-filled model with occupants and furniture. *Indoor Air*, 2004, 14(4): 258~271
 - 96 Settles G S. Indoor environments. In: Yang W J, ed. Handbook of Flow Visualization. Washington D C: Hemisphere, 1989. 619~626
 - 97 Finlayson E U, Gadgil A J, Thatcher T L, Sextro R G. Pollutant dispersion in a large indoor space. Part 2: Computational fluid dynamics predictions and comparison with a scale model experiment for isothermal flow. *Indoor Air*, 2004, 14(4): 272~283
 - 98 Camelli F, Löhner R. Assessing maximum possible damage for contaminant release events. *Eng Comput*, 2004, 21(7-8): 74860
 - 99 Sattar S A, Ijaz M K. Spread of viral-infections by aerosols. *CRC Crit Rev Environ Control*, 1987, 17(2): 89~131
 - 100 Nardell E A, Keegan J, Cheney S A, Etkind S C. Airborne infection — theoretical limits of protection achievable by building ventilation. *Am Rev Respir Dis*, 1991, 144(2): 302~306
 - 101 Nicas M, Hubbard A. A risk analysis approach to selecting respiratory protection against airborne pathogens used for bioterrorism. *AIHA J*, 2003, 64(1): 95~101
 - 102 Fennelly K P, Nardell E A. The relative efficacy of respirators and room ventilation in preventing occupational tuberculosis. *Infect Control Hosp Epidemiol*, 1998, 19(10): 754~759
 - 103 Jennison M W. Atomizing of mouth and nose secretions into the air as revealed by high-speed photography. In: Moulton F R, ed. Aerobiology. Washington D C: AAAS, 1942. 106~128
 - 104 Papinini R S, Rosenthal F S. The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J Aerosol Med*, 1996, 10(2): 105~116
 - 105 Bjørn E, Nielsen P V. Exposure due to interacting airflows between two persons. In: Proc ROOMVENT'96, 5th Int Conf Air Distrib Rooms, Yokohama, Jpn, 1996. 107~114

- 106 Franz D R, Zaitchuk R. Biological terrorism: understanding the threat, preparation, and medical response. *Dis Month*, 2002, 48(8): 493~564
- 107 Hawley R J, Eitzen E M. Biological weapons — a primer for microbiologists. *Annu Rev Microbiol*, 2001, 55: 235~253
- 108 Natl. Res. Counc. (NRC). Chemical and Biological Terrorism: Research and Development to Improve Civilian Medical Response. Washington D C: Natl. Acad. Press, 1999
- 109 Goldman R F. Personal protective systems for first responders. *ASHRAE J*, 2005, 47(2): 50~55
- 110 Fitch J P, Raber E, Imbro D R. Technology challenges in responding to biological or chemical attacks in the civilian sector. *Science*, 2003, 302(5649): 1350~1354
- 111 Raber E, Jin A, Noonan K, et al. Decontamination issues for chemical and biological warfare agents: How clean is clean enough? *Int J Environ Health Res*, 2001, 11(2): 128~148

(中国科学院力学研究所 王柏懿 译自
Fluid mechanics and homeland security.

Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 87~110)

FLUID MECHANICS AND HOMELAND SECURITY*

Gary S Settles †

Mechanical and Nuclear Engineering Department, Pennsylvania State University,
University Park, Pennsylvania 16802

Abstract Homeland security involves many applications of fluid mechanics and offers many opportunities for research and development. This review explores a wide selection of fluids topics in counterterrorism and suggests future directions. Broad topics range from preparedness and deterrence of impending terrorist attacks to detection, response, and recovery. Specific topics include aircraft hardening, blast mitigation, sensors and sampling, explosive detection, microfluidics and labs-on-a-chip, chemical plume dispersal in urban settings, and building ventilation. Also discussed are vapor plumes and standoff detection, nonlethal weapons, airborne disease spread, personal protective equipment, and decontamination. Involvement in these applications requires fluid dynamicists to think across the traditional boundaries of the field and to work with related disciplines, especially chemistry, biology, aerosol science, and atmospheric science.

Keywords counterterrorism, microfluidics, plumes, explosions, ventilation

* Published with kind permission from Annual Review of Fluid Mechanics, Volume 38 © 2006 by Annual Reviews, fluid.annual-reviews.org

† E-mail: gss2@psu.edu

~~~~~  
**更正:**

力学进展 2007 年第 2 期刊登的周洪伟, 吴舒, 陈璞的论文“有限元分析快速直接求解技术进展”其英文题目应为“Advances in direct solution technique of finite element analysis”误写为“Advances in direct solution technique of finite element analysis”, 特此更正. 致歉!

《力学进展》编辑部