

低温光谱实验中气动反应室装置—— 二维超声速微型风洞的设计

牛家玉 朱宗厚 袁翼 林烈

(中国科学院力学研究所)

摘要 为了给气体分子低温光谱实验研究提供必要的超声速膨胀流动(低温)条件,本文阐述了有关的二维超声速喷管装置的流动分析和设计思想。综合分析实验对本装置的要求,选择了三种喷管设计情况:其喉道高度分别为0.5毫米、0.05毫米和0.2毫米;实验区内的气流温度为70K、15K和70K;压力2266Pa、2133Pa和2493Pa;质量流量达到38克/秒、37.6克/秒和29.9克/秒。

一、前言

自从1951年Kantrowitz-Grey^[1,2]首次使用喷管射流技术进行分子性质的研究以来,在国外已经较广泛地采用这一技术以产生高强度的分子束^[3-5],近25年来发展到用超声速喷管流动技术作分子的低温光谱学研究^[6,7],从70年代开始,超声速膨胀技术在激光分离同位素的研究中又开辟了新的应用领域^[8-10]。

超声速喷管流动在这些领域的用途在于:首先通过它所产生的高速膨胀流动将分子热运动速度分布(麦克斯韦分布)变窄,从而提高分子束的强度;另外在膨胀流场所产生的低温环境中可以使工质气体分子保持所需要的气体状态而不发生冷凝,即可产生工质气体分子的过饱和状态。这两点正是进行低温光谱研究和用激光作同位素分离研究所需的必要条件。

过去,按照传统方法使用外加冷冻剂可以将分子的转动、振动等内部自由度冷却到很低温度,但是在那种情况下只能够

进行固相分子模型的光谱观测,从而研究内部分子之间的相互作用。如果要研究内部分子本身的性质就必须要达到:一方面分子内部自由度要处于基态(低温),另一方面要分子模型本身保持为单个的气相分子状态。如果仍按照传统方法处理的话,这两条基本要求是不可兼得的,然而使用超声速膨胀流动技术就可以同时满足。它的致冷原理就在于通过超声速膨胀,可以使气体分子的平均温度(即流场静温)降得很低,此时在维持膨胀低温的这段时间内它就成为了使分子的转动、振动等内部自由度“致冷”的冷冻剂(而无需再加什么另外的冷冻剂),这就使得在很短的(但是有限的)时间内达到内部致冷的要求。同时,由快速膨胀形成的低压、低密度可以避免出现气体分子间的碰撞,从而避免气体的凝聚和由碰撞而产生的谱线加宽。由此可见,超声速喷管流动在完成低温光谱和激光分离同位素的研究中起着不可缺少的重要作用。

本文阐述的工作就是为某些气体分子作低温下的光谱实验研究(谱线定标)提供

可用的超声速喷管装置(二维超声速微型风洞)。这里使用的工质气体是由种子气体(如SF₆)和辅助气体(如Ar)均匀混合构成。

二、通过喷管的一维流动

1. 流场分析

众所周知,要取得超声速膨胀流动必需应用拉瓦尔喷管技术,在低温光谱实验上用的亦然,只不过这里用的喷管和通常空气动力学实验用的或发动机用的喷管相比尺寸要小得多,我们可以称其为“微型”喷管,但就它的设计方法来说和大喷管是大同小异的。在给定了前室(混合气体贮气室)条件以后,用一维绝热等熵管流来计算流场各参数。关于粘性影响的问题只是在型线设计时给以边界层位移厚度的近似修正。从流动来看,在我们选定的条件下喷管出口雷诺数 Re 近似为 $10^5 - 10^6$ 的量级,可见边界层位移厚度仅达轴向距离的百分之一到千分之一的大小(我们取的是 $\delta^*/x=0.0087$),所以这样处理是可行的。另一方面,有些这种类型的实验^[9],也已经证实不考虑粘性对结果没有什么影响。

设贮气室条件给定为 P_0 (总压)、 T_0 (总温),喷管出口处的马赫数为 M ,则有

$$T/T_0 = [1 + (\gamma - 1)M^2/2]^{-1};$$

$$P/P_0 = [1 + (\gamma - 1)M^2/2]^{-\gamma/(\gamma-1)};$$

$$\rho/\rho_0 = [1 + (\gamma - 1)M^2/2]^{-1/(\gamma-1)},$$

式中 γ 为混合气体比热比,按照已给定的种子气体与辅助气体的克分子比数取两种气体比热的平均值,由此算得混合气体的比热比。作为初步的设计计算,沿喷管按常值 γ 使用是可以的,但是严格说来,随着喷管流动的发展,气体的热力学性质是

变化的, γ 值也应随之改变,这一点将在进一步作较详细的流场分析时予以考虑。

根据已经设计的三种喷管计算得到沿流向喷管轴上各参数的变化曲线,示于图 1、2 中。为了比较,在图 3 中以喉道高度为 0.2 毫米的喷管为例也画出了自由射流情况以及自喉道附近取斜直壁(其张角为型线壁在喉道附近 A 点处取的张角相同)的喷管流场参数变化情况,看得出型线喷管流场参数变化比较缓慢且均匀。

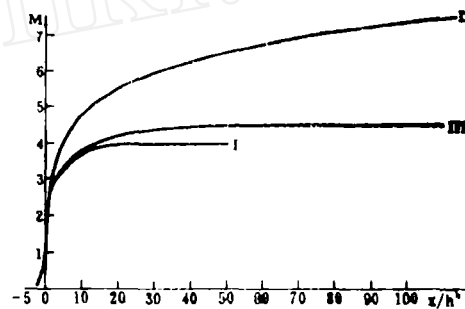


图 1 沿喷管轴线混合气流马赫数的变化

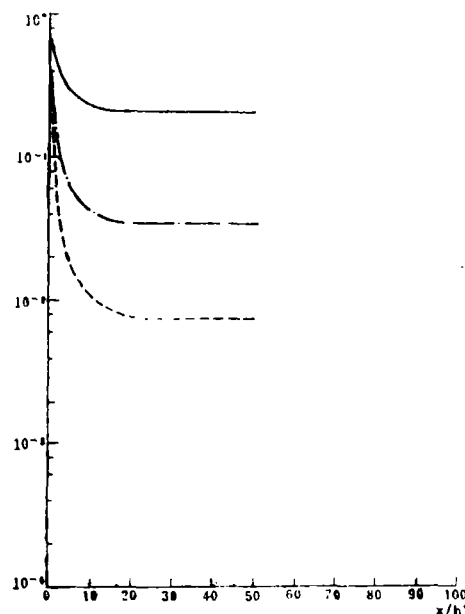


图 2(a) 沿喷管轴线混合气体温度、压力、密度的变化
(a) 辅助气体 Ar —— T/T_0 , --- P/P_0 , - · - ρ/ρ_0

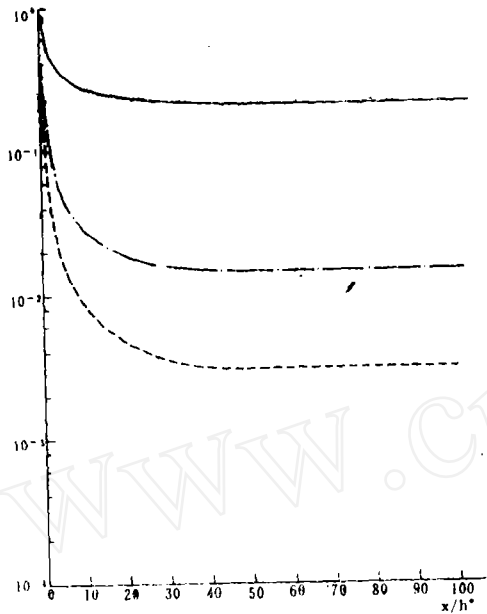


图 2(b) 沿喷管轴线混合气体温度、压力、密度的变化
(b) 辅助气体 He ———— T/T_0 ，----- P/P_0 ，- · - · - n/n_0

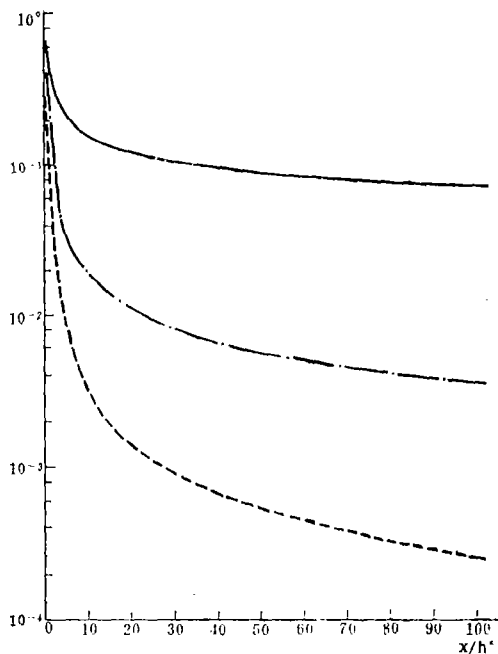


图 2(c) 沿喷管轴线混合气体温度、压力、密度的变化
(c) 辅助气体 N_2 ———— T/T_0 ，----- P/P_0 ，- · - · - n/n_0

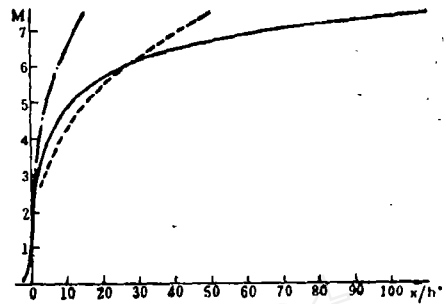


图 3(a) 沿轴线混合气流马赫数的变化(喉道高 0.2 毫米)
——型线喷管 -----斜直壁 - · - · -自由膨胀

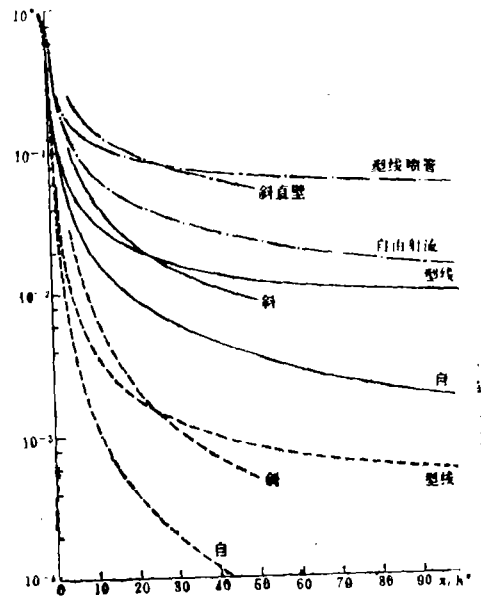


图 3(b) 沿轴线混合气流温度、压力、密度的变化(喉道高 0.2 毫米)
—— n_e/n_{s_0} ，----- P/P_0 ，- · - · - T/T_0

2. 参数选择

在选择参数时要考虑到光谱实验的目的要求，即：

- (1) 试验区内的温度要足够低，因此出口马赫数要足够高；
- (2) 试验区内地流的密度要足够低，因此压力要膨胀到足够低。

(3) 由于作光谱测量的仪器是付里叶分光光度计, 因此要满足仪器灵敏度的要求, 这就是说第一, 通过光束的种子气体质量不得低于一定值, 此处要求通过光束的种子气体质量 $m_s > 10^{-4} \sim 10^{-5}$ 克, 因此

种子气体的密度应该是

$$\rho_s > \frac{1}{\pi r^2 s} (10^{-4} \sim 10^{-5}) \text{ 克/厘米}^3,$$

其中 r 是光束截面半径, s 为二维喷管的宽度。第二是要使得气相分子流过光

表 1 喷管流动参数设计值

喷管号	贮室条件		出口马赫数 M_e	喉道高 (mm)	两种气体克分子比数 (%)				
	压力 (pa)	温度 (K)			Ar-UF ₆	Ar-SF ₆	He-UF ₆	He-SF ₆	N ₂ -SF ₆
I	303975	330	4	0.5	95~5	92.8~7.2			
II	5066250	360	10	0.05			95~5	92.9~7.1	
III	810600	330	4.5	0.2					97~3

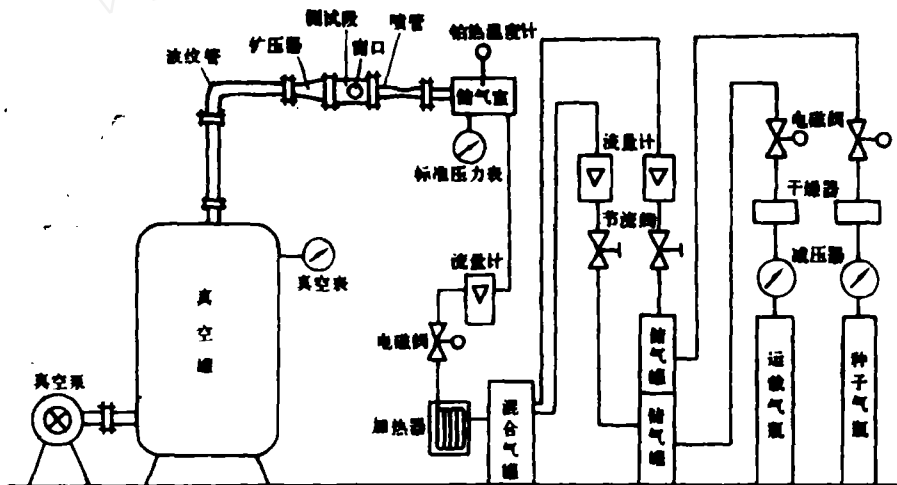


图 4 二维超声速微型(致冷)风洞系统示意图

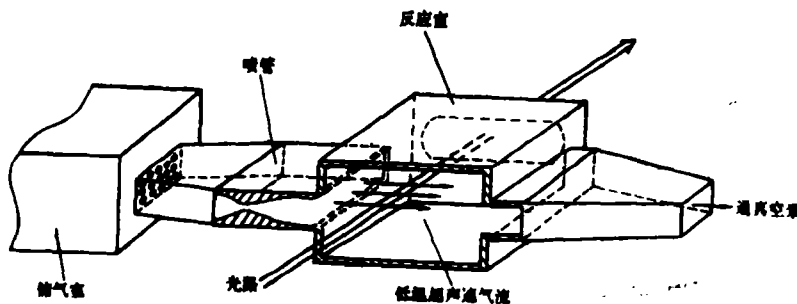


图 5 反应室部份的示意图

束的时间不低于它吸收光子的时间, 当吸收时间为 τ_i 时, 气流速度要满足

$$v_i < r / \tau_i$$

v_i 为实验区内气流的速度。

(4) 付里叶分光光度计在实验进行时的光扫描时间是 30 秒, 因此通过光束工质气体均匀流动的时间必须大于光扫描时间。

我们选了实验用的种子气体 SF_6 和 UF_6 , 辅助气体是 Ar 、 He 和 N_2 。基于上述要求作了三套喷管的设计计算, 条件列于表 1 内。

三、二维超声速微型风洞的设计

1. 一般要求

(1) 作为光谱实验用的气动反应室装置, 因受空间限制和避免震动的要求, 整体尺寸一定要小。以喷管段所处的空间为例, 现在的装置中穿过试验区流场的付里叶分光光度计光路前后距离总计仅有 225 毫米。

(2) 为了减少实验区分子之间的碰撞, 喷管流场及至出口流场必需要求均匀。

根据本实验的目的要求和可能性, 我们采取了类似压力吸气式风洞的设计方案。这类风洞的主要构件有气源系统(贮气室和稳定段), 膨胀系统(超声速微型喷管和实验段)以及扩压、真空系统(扩压段、真空罐和真空泵)。整个系统的示意图见图 4, 包含试验区的反应室部分示意图见图 5。

2. 气源系统

考虑到作为种子气体用的 UF_6 和 SF_6 在常温常压下物质状态的不同, 即 UF_6 为固体而 SF_6 为气态, 对气源系统的设计应

该有所区别, 作为第一步现在我们先设计 SF_6 所用的设备。

因 SF_6 在常温常压下呈气态存在, 所以种子气体和辅助气体均以高压气瓶供气。从气瓶到稳压段送气过程中要考虑这样几个问题:

(1) 在两种气体流入混合气室之前分别加两个稳压气室, 这是为了使高压气流出来的气体压力稳定, 而后再入混合室进行混合。

(2) 使用流量计来控制流量, 达到混合室内两种气体浓度的设计值。启动以后也是用流量计控制试验气流流量。

(3) 根据现在的设计参数, 气室的温度比室温稍高(330K), 需要有加温设备, 建议在从混合气室送气的过程中, 用回型管路置于热水槽中进行流动加温, 用电热器将水加温, 而后在风洞入口处(稳定段)测温以保证达到设计值。

关于材料, 因气室内压力不高, 用不锈钢即可。考虑到 SF_6 一旦有分解时可能会腐蚀容器, 最好采用一定的防腐措施。稳定段加工成孔型通道以便整流。

3. 膨胀真空系统

由图 5 可见, 选取的是平置的二维狭缝式超声速型线喷管。设计喷管型线时考虑了如下几个因素:

(1) 为能在有限的空间和距离内使气流充分地膨胀到所要求的低温和足够低的密度, 喷管的面积比要选得大一些, 为此超声速段起点的管壁张角要选得大些, 但是为避免出现膨胀过程中的碰撞加宽就一定要气流均匀, 所以张角又不得选得很大(这点正好不同于气动激光喷管设计的要求), 否则会出现流动分离现象而破坏流场。

(2) 试验区域内因受付里叶分光光度

计灵敏度的限制,种子气体的流量不得太低。为此总的混合气体流量不能太小,所以喷管喉道尺寸要选得大些,但是考虑到实验室的条件和气瓶的供气量(由气瓶供气,每次实验用气量不能太大),喷管的尺寸又应该选小些。

经过比较,调整了种子气体和辅助气体的浓度比数,我们确定了喷管的喉道尺寸分别为0.5、0.05和0.2毫米,设计流量均小于40克/秒(见表1)。

真空系统的设计主要决定于流量的大小。如前所述,因受实验室空间和仪器防震的限制,选用了500升的真空罐和80升/秒的真空泵。

为了避免因流场的低温而引起气动窗口外侧结冰,建议将气动窗口与光度计光线窗口密封连结,内部加放干燥剂,这样可以保证光线顺利通过。

综合分析上述各种情况,我们完成了低温光谱实验用的二维超声速微型风洞的整体设计,关于喷管型线计算及设计图纸可见另外的工作报告。

四、讨 论

以上的设计已经可以满足现在要作为气体分子低温光谱实验课题的基本要求。但是,有下述两个问题还可以作较详细的考虑:

(1) 如2.1节所述,现在的初步计算用常值比热比来近似,但就实际流动来看,因为经超声速膨胀气流温度下降得快,相应的气体分子内部自由度的弛豫过程也将随之加快,再按喉道附近的冻结热力学状态来近似就不能很好地反映真实流动气体的状态了,所以应该进一步在理论

上较详细地分析喷管流动过程中的热力学状态变化过程,在此基础上再作流场参数计算会更加合理。

(2) 关于试验段与喷管出口连结处的尺寸问题。现在设计的试验段尺寸比喷管出口尺寸要大(如图5所示),这样使流动自喷管出口向下游呈自由膨胀流动,由图3可见,按自由膨胀流动气体的密度比型线喷管流动气体密度下降快得多,相应的种子气体的密度也低了,一旦光线位置离喷管较远时气体密度的大小就可能满足不了设计要求。现在的保证办法是将光路紧贴喷管出口通过。现在的试验段尺寸放大是因为喷管出口高度小,如果试验段不放宽在工艺上就无法解决窗口问题,待条件改善后,二者尺寸吻合为最好,这样更能保证流场的均匀且参数符合设计要求。

参 考 文 献

- [1] Kantrowitz, A., Grey, J.; *Rev. Sci. Instrum.*, 22:328(1951).
- [2] Anderson J. B.; *Molecular Beams and low Density Gasdynamics*, New York (1974) 1.
- [3] Ristiakowsky, G.B. and Slichter W.P.; *Rev. Sci. Instrum.* 22:333 (1951).
- [4] Anderson, J. B. and Fenn, J. B.; *Physics of Fluid* 8. 5(1965).
- [5] Pine, A. S. and Nill, K.W.; *Journal of Molecular Spectroscopy*, 74 1(1979).
- [6] Moore, C. B.; *An Chemical and Biochemical Application of Laser*, 2
- [7] Levy, D.H.; *Ann. Rev. Phys. Chem.* (1980), 31: 197-225.
- [8] Robinson, C.P.; *Laser Isotope Separation* 美国专利。
- [9] *The Separation of Isotopes* 英国专利 1550049.
- [10] *Method and Apparatus for Separating Isotopes from a Gas by Means of a Laser* 美国专利 4156811.
- [11] Koura, Katsuhica; *Physics of Fluids* 25 8 (1982).
- [12] Bacal, M. et al; *Rev. Sci. Instrum.* 55 2 (1982), 159.