

文章编号: 0253-2239(2007)10-1883-6

# 泡沫红外消光影响因素的实验研究

赵 军<sup>1,2</sup> 潘功配<sup>1</sup> 陈 昕<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学化工学院, 南京 210094)  
(<sup>2</sup> 防化指挥工程学院 4 系, 北京 102205)

**摘要:** 通过红外光谱实验和红外热成像实验,研究了影响泡沫红外消光的因素,结果表明:泡沫溶液的红外光谱特征决定红外光谱吸收峰位,且溶质浓度越高,吸收越强;泡沫结构是造成光线强烈衰减的重要原因,透射光强随光线穿过泡沫液膜界面的次数成指数衰减,泡沫直径越小,达到相同遮蔽效果的泡沫溶液的用量就越少;当泡沫直径远大于入射光线波长时,透射比随光束大小变化不大;泡沫溶液升温可在一定程度上增强泡沫的红外吸收强度。各因素影响程度从大到小的次序为:泡沫结构,红外光谱特征,内充气体折射率,泡沫直径,温度。

**关键词:** 光谱学; 红外电子对抗; 泡沫消光因素; 红外光谱; 红外热成像

中图分类号: TN976 文献标识码: A

## Experimental Study on Infrared Attenuation Factors of Foam

Zhao Jun<sup>1,2</sup> Pan Gongpei<sup>1</sup> Chen Xin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)  
(<sup>2</sup> 4th Department, Institute of Chemical Defense and Technology, Beijing 102205)

**Abstract:** The infrared spectral and thermal imaging experiments on infrared attenuation factors of foam were carried out. The infrared spectral characteristics of solution determine the absorption peaks, with a stronger absorption for a higher content. The foam structure is an important factor of attenuation, the transmission intensity decreases by the times of transmission through foam interfaces, and the smaller bubble diameter it is, the less dosage is used with the same shield effect. Once the bubble diameter is much larger than radiation wavelength, the transmissivity will depend less on the sizes of beam. Temperature rising can increase the infrared absorption intensity in some extent. The grade of impact factors declines in the sequence of foam structure, spectral characteristics, refractive index of inner gas, bubble diameter, and temperature.

**Key words:** spectroscopy; infrared electronic countermeasures; attenuation factors of foam; infrared spectroscopy; infrared thermal imaging

## 1 引 言

泡沫具有很好的电磁波衰减效果。Jianjun Guo 等<sup>[1]</sup>研究了海洋泡沫对微波遥感通信的不利影响; Oleg O. Drobakhin 等<sup>[2]</sup>研究了 8~12 GHz 频率电磁波在水基泡沫上的强烈反射和吸收; 金良安<sup>[3]</sup>基于 S-4 液体发烟剂发明了一种无源干扰泡沫,在被保护目标上方或周围形成干扰泡沫云或干扰泡沫层,加上特种添加剂的综合作用,对军事上常用的可见光、红外、激光、雷达等<sup>[4,5]</sup>频段电磁波都

有很好的干扰效果。赵娟<sup>[6]</sup>发现泡沫能较好地衰减红外和激光,大量细密的泡沫可有效降低目标与周围背景之间的衬比度,使目标图像难以辨别。

泡沫具有非常大的气液界面面积,表面自由能比较大,产生方便,具有价格低廉、流动性好<sup>[7]</sup>、适配性好、无污染等优点,可较好解决光电无源干扰材料有效作用时间短、遮蔽波段窄等难题<sup>[3]</sup>。本文通过红外光谱实验和红外热成像实验,研究了影响泡沫红外消光的因素,为指导干扰泡沫的配方设计、应用及机理研究等打下基础。

**作者简介:** 赵 军(1978—),男,江西人,讲师,博士研究生,主要从事军事化学与烟火技术、光电无源干扰方面的教学和科研工作。E-mail: zhjnust308@163.com

**导师简介:** 潘功配(1945—),男,安徽人,教授,博士生导师,主要从事军事化学与烟火技术、光电无源干扰方面的研究。E-mail: pangongp@163.com

收稿日期: 2007-03-26; 收到修改稿日期: 2007-04-28

## 2 实 验

### 2.1 泡沫样品的制备

以直链十二烷基苯磺酸钠(LAS)、聚乙二醇20000(PEG20000)和少量表面活性剂6501等为主的表面活性剂在常温下配制成泡沫基本水溶液(以下简称基本液)。根据遮蔽波段的需要,在基本液中添加一定的添加剂,将不溶性气体导入泡沫溶液中,充分振荡起泡得到待测泡沫样品<sup>[8]</sup>。在几乎没有湍流(无人员走动、说话,关闭门窗)的情况下,样品于起泡后1 min开始测试,此时泡沫的液体体积分数<sup>[9,10]</sup>大约3%~4%、泡沫直径<sup>[11]</sup>约为0.5~3 cm。

### 2.2 测试方法

红外光谱测试:德国Bruker OPAG33傅里叶变换红外遥测光谱仪,监测器/分束器为MCT/ZnSe,设置分辨力 $4\text{ cm}^{-1}$ 、扫描速度40 kHz;上海福源HFY200B标准黑体为光源,温度设置为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、光阑为 $\Phi 8\text{ mm}$ 。红外热成像测试:广州飒特SAT-HY6800型非制冷焦平面红外热像仪(工作波段 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ ),黑体辐射炉,温度设为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光阑为 $\Phi 50\text{ mm}$ ,辅助光阑为 $\Phi 15\text{ mm}$ 。测试原理如图1所示。

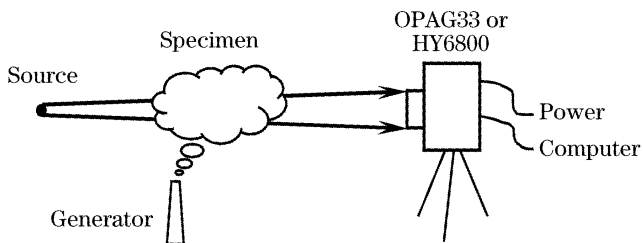


图1 测试原理图

Fig. 1 Principle of foams measurement

## 3 结果与讨论

### 3.1 添加剂种类的影响

研究添加剂,是选择泡沫消光材料的重要环节。综合考虑药品的红外光谱特征、经济效益和来源等方面因素,选定葡萄糖、丙酮、乙醇和玫瑰精四种功能添加剂。在3份100 ml基本液中分别加入葡萄糖5 g、丙酮5 ml、乙醇5 ml,由于玫瑰精标准谱图的吸收强度极强,经实验测试,在第4份基本液中加入玫瑰精2.5 g。测得谱图如图2。

由谱图可以看出,泡沫水分的影响非常明显;相同泡沫厚度下的遮蔽能力强弱依次是丙酮、乙醇、玫瑰精、葡萄糖,虽然玫瑰精的用量最少,但是它的遮蔽效果最好。但是,尽管玫瑰精标准谱图的吸收位置和强度都非常理想,但它在很低浓度时颜色就特别深,而且着色能力很强,不易清洗,考虑到实际应

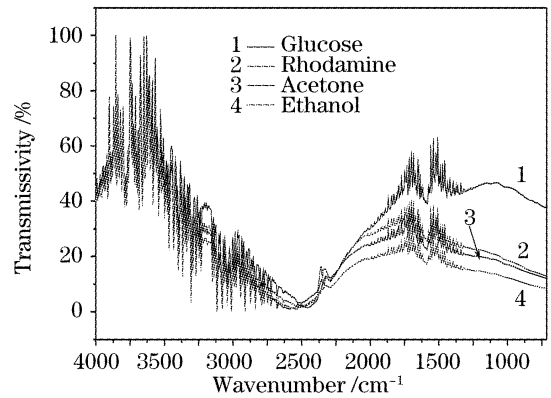


图2 加不同添加剂后的红外光谱图

Fig. 2 Infrared spectrograms of foams with different additives

用时会造成诸多不便,所以放弃继续研究玫瑰精。其它三种材料中,乙醇和丙酮在相同浓度下的遮蔽能力稍好于葡萄糖,但它们的挥发性导致泡沫稳定性差,易破而寿命很短。而葡萄糖可使泡沫水溶液增稠,大大提高了泡沫的稳定性,添加葡萄糖后泡沫寿命可达40 min以上,是另外三种干扰剂的几倍,见表1。葡萄糖的溶解度很大,而且非常环保,其红外吸收强度稍差的缺陷可以通过提高浓度来加以弥补。

表1 泡沫寿命的实验数据表

Table 1 Experimental foam longevity of different components

Sample No.	Solution	Foam longevity /min
1	Basic solvent (BS)	20~30
2	BS+rhodamine	5~15
3	BS+acetone	5~15
4	BS+ethanol	20~30
5	BS+glucose	>40

### 3.2 添加剂浓度的影响

在基本液中添加葡萄糖,制成葡萄糖质量分数为1.6%、4%、9%的样品,起泡进行检测,所得谱图如图3。从图上可以看出,遮蔽效果与添加剂质量

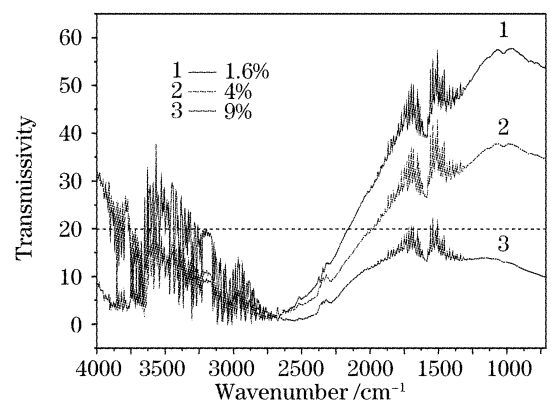


图3 不同浓度葡萄糖的红外透射比

Fig. 3 Infrared spectrograms of foams at different glucose consistency

分数成正比,添加剂质量分数越高,透射比越低;当葡萄糖为 9% 时,以上波段的透射比均小于 20%。质量分数与透射比之间的关系很好用比尔定律揭示。实验还发现,当某种表面活性剂浓度超过其临界胶束浓度(如 LAS 为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ) 时,透射比反而变大,这是由于表面活性剂分子缔合成胶束、亲油基链增长所致;而且胶束的形成将使溶液表面张力增大<sup>[12]</sup>。

### 3.3 泡沫状态及结构的影响

L. A. Filins'kyy<sup>[13]</sup> 通过实验证明泡沫的特殊结构是造成电磁波强烈吸收的重要原因。金良安

等<sup>[14]</sup> 认为泡沫气液界面的多界面特征造成光线传播的锐减和传播路径的剧增。

为此,我们实验制备了直径为 0.5~6 cm 的独立泡沫若干,测定了泡沫的红外热成像图<sup>[15]</sup>,如图 4,图 5 所示。在表 2 中列出了不同泡沫直径对应于不同光阑孔径的实验数据及计算结果。据此可判断,当泡沫直径(毫米级)远大于入射光线波长(微米级)时,透射比随光束大小变化不大。李微等对平行光束入射水中气泡的体散射函数曲线的模拟计算,也同样发现,当气泡半径在远大于光波波长的前提下变化时,气泡上散射光强分布规律与气泡半径无关<sup>[16]</sup>。

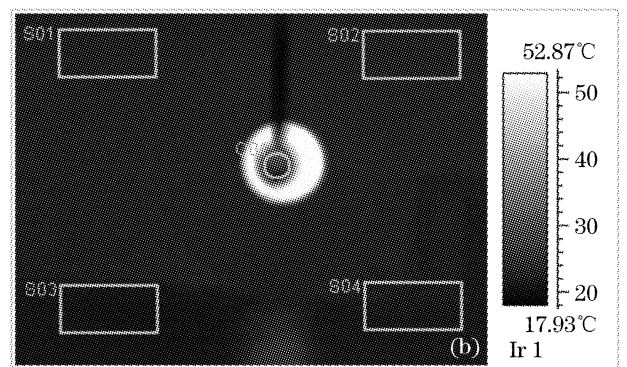
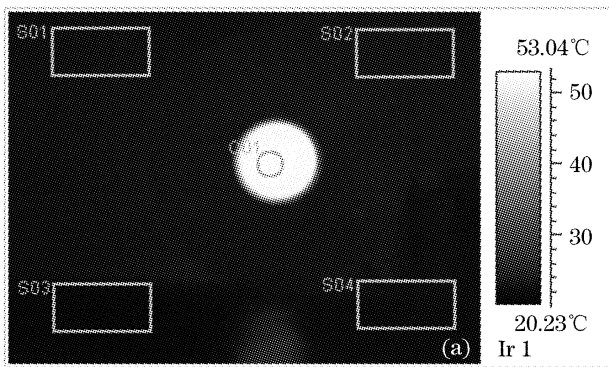


图 4 独立泡沫遮蔽效果(泡沫直径小于光阑,光阑 50mm,透射比 16.48%)。(a) 本底,(b) 热像图

Fig. 4 Effect of isolated spherical bubble with diameters less than that of the diaphragm of 50 mm and transmissivity of 16.48%. (a) Background, (b) thermal image

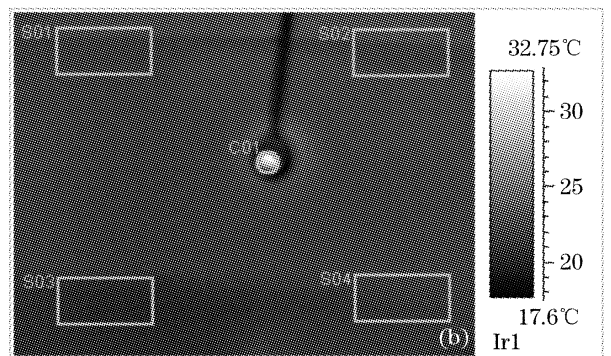
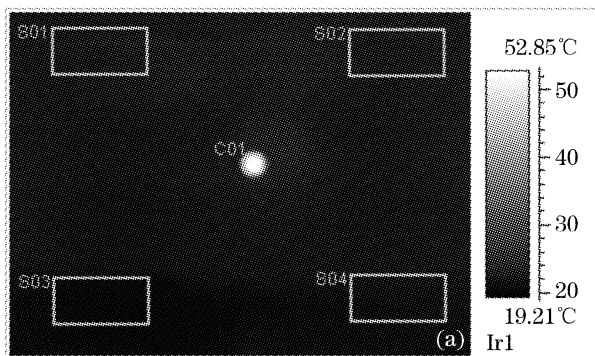


图 5 独立泡沫遮蔽效果(泡沫直径大于光阑,光阑 15 mm,透射比 15.99%)。(a) 本底,(b) 热像图

Fig. 5 Effect of isolated spherical bubble with larger diameters than that of the diaphragm of 15 mm and transmissivity of 15.99%. (a) Background, (b) thermal image

表 2 独立泡沫的红外热成像实验数据

Table 2 Experimental thermal imaging data of isolated spherical bubbles

Sample No.	Original background temperature /K	Original object temperature /K	Background temperature /K	Object temperature /K	Transmissivity /%	备注
1	295.13	325.3	295.06	300.69	16.48	Foam diameter larger than diaphragm diameter
2	295.13	325.3	295.53	301.20	16.68	
3	295.13	325.3	295.74	302.31	19.46	
4	295.13	325.3	303.63	310.19	21.01	
5	294.84	317.85	294.78	300.08	21.05	Foam diameter smaller than diaphragm diameter
6	294.84	317.85	294.78	298.24	13.62	
7	294.84	317.85	294.55	298.61	15.99	

当泡沫气液比较大、液膜很薄时,忽略液膜的厚度。由电介质(电导率为零)的界面反射、折射关系,根据菲涅耳定律推导出正入射情况下单次反射/折射时的反射比( $r$ )和透射比( $t$ )<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} r = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2, \\ t = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $n_1, n_2$  分别为泡内外气体的折射率。透射光强随光线穿过泡沫液膜界面的次数成指数衰减,透射能量迅速下降。赵娴还发现通过提高表面活性剂溶液的导电能力可增强液膜的消光特性<sup>[6]</sup>(本实验测得泡沫的电导率为  $9.15 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ )。光波在数量巨大、结构复杂的泡沫气液界面上发生复杂的反射、折射、吸收、色散等作用,甚至还可能发生全反射<sup>[5]</sup>,将造成传播方向上透射能量的大量损失。因此,在适当范围内,泡沫直径越小,单位体积泡沫的气泡数越多,单位体积界面数也越多,达到相同遮蔽效果的泡沫溶液的用量就越少。

一般情况下,对粘连泡沫群的数学处理非常困难,这是因为在每一界面上都存在光的多次反射和折射,而且光线所通过的粘连泡沫群的泡沫液膜通常是不平行的。但界面与界面之间是否“平行”并不重要,重要的是,光线经液膜界面反射、折射后,将导致光线传播方向和能量密度的较大改变<sup>[18]</sup>,从而影响探测器的检测。一般引入多层介质薄膜的矩阵分析方法、运用电磁场的边界条件,将粘连泡沫群对光线的衰减看作多层介质薄膜对光线的衰减来处理<sup>[14]</sup>。

可以预见,粘连泡沫群(湿泡沫状态)的遮蔽效果将不如离散泡沫群好,这是因为前者更易因排液<sup>[19]</sup>而加速泡沫液膜变薄、破裂。

### 3.4 内充气体的影响

通常,对于离散泡沫,泡外气体为空气,泡内气体为起泡气体;对于粘连泡沫群,处于边缘位置的粘连泡沫泡外气体为空气,中心泡沫的内外气体均为起泡气体。基于(1)式,设  $n_1 = 0.8, 1.0, 1.2$ , 忽略泡沫液膜厚度及吸收、色散等因素的单次透射简单规律如图 6 所示。结果表明,泡外气体折射率  $n_2 > 1$  时,内充气体折射率  $n_1$  越小,透射比越小;而  $n_2 \leq 1$  时,  $n_1$  越小,透射比越大。

因此,我们设计实验研究了不同内充气对红外衰减的影响。配置添加剂为葡萄糖浓度为  $0.1 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$  的泡沫溶液,分成三份,分别充入空气、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  起泡,  $0^\circ\text{C}$ ,  $101.325 \text{ kPa}$  下的折射率分别为:

1.000292, 1.000449, 1.000298。所测红外光谱见图 7。

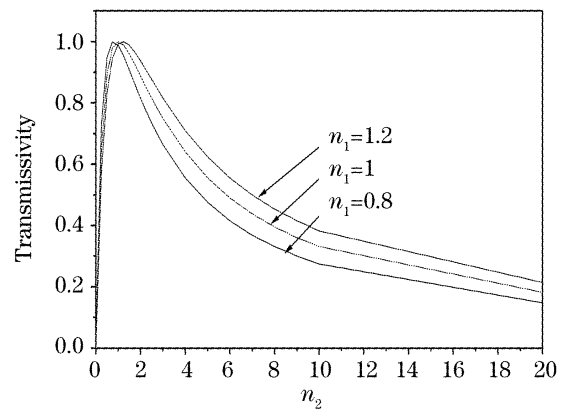


图 6 单次透射时的透射比

Fig. 6 Transmissivity through a dielectric film by once

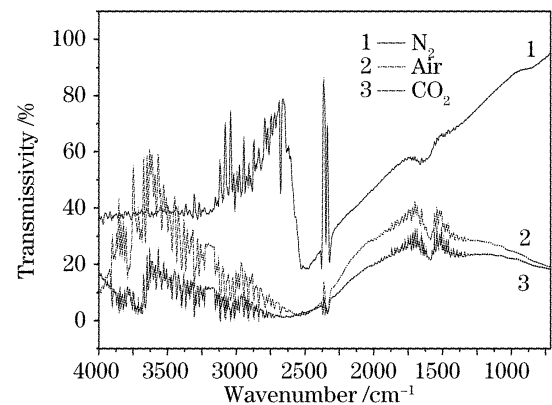


图 7 不同内充气条件下的红外光谱图

Fig. 7 Infrared spectrograms of foams with different inner gases

可以发现实际透射比变化较图 6 所示更显著,这是因为实际条件下,液膜的吸收、色散并不能忽略。图 7 中,充  $\text{N}_2$  的透射比最大,充空气的次之,充  $\text{CO}_2$  气的最小,除符合图 6 所示的规律外,气体分子的红外活性也起到一定作用。 $\text{CO}_2$  为极性分子,具有较强的红外活性;而  $\text{N}_2$  这种对称分子“无”红外活性,但由于  $\text{N}_2$  折射率的影响,  $\text{N}_2$  仍具有一定衰减作用;空气为多种气体的混合物,其吸收能力介乎前二者之间也就可以理解了。

干扰泡沫应用时,我们希望其留空时间长一些,那么,根据液相和气相的密度制备一种适合漂浮的安全轻质混合气是非常有意义的。

### 3.5 固体附着物的影响

石墨粉、金属粉等都是常用的无源干扰材料,实验时我们尝试加入了石墨粉和铜粉(均为 120 目)。结果发现,由于相容性差,这些固体粉末仅极少量的附着于泡沫的平台区,其他的迅速沉淀于容器底部;

而且使泡沫的稳定性大幅度下降,泡沫寿命一般只能维持几秒钟。如此差的稳定性,无法实际应用。

### 3.6 溶液温度的影响

这是在以上实验过程中偶然发现而补充进行的实验。在进行泡沫静态实验时,我们试图监测 60 min 内红外透射比的变化规律,结果发现,10 min 以后透射比越来越低,这是和常理相违背的。考虑到可能是样品受到黑体光源的近距离连续照射,可能对泡沫性质产生了一定的影响。我们设计将样品溶液事先加热到不同温度,测得结果如图 8 所示,温度越高,透射比越小,证实了我们的猜测。并且局部放大的观察发现,在  $3333 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$  波段范围内存在轻微的红移现象(图 9)。

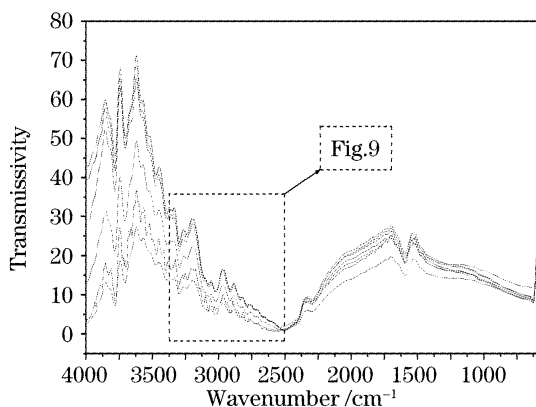


图 8 不同温度的红外光谱图(经平滑处理,由上至下温度分别为  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $62 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,溶质质量分数为 10%)

Fig. 8 Smoothed infrared spectrograms of foam under  $16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $62 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively from the upper to the lower, the mass fraction of solution is 10%

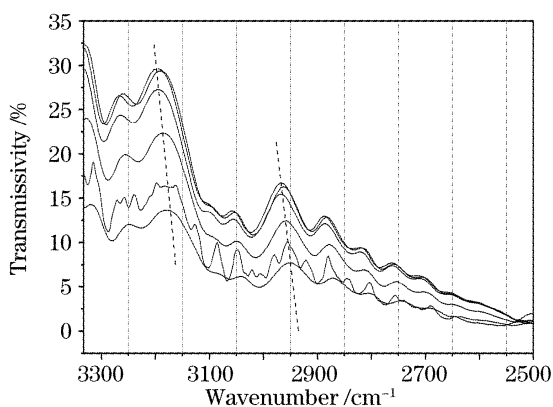


图 9 温度升高导致轻微红移(放大图 8 中  $3333 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$  段)

Fig. 9 Image of zooming in Fig. 8 from  $3333 \sim 2500 \text{ cm}^{-1}$ , slight red shift with temperature rising

这是由于材料的光学特性即复折射率  $N = n + ik$  是温度(T)的函数<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} n = A + BT, \\ k = C \exp(T/D), \end{cases} \quad (2)$$

式中  $n$  为折射率实部,  $k$  为折射率虚部,  $A, B, C, D$  均为实验测得的正的常量。在复折射率的情况下,根据菲涅耳公式,反射比( $r$ )与透射比( $t$ )为

$$\begin{cases} r = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}, \\ t = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2}, \end{cases} \quad (3)$$

将(2)式代入(2)式中,即可导出光线从空气正入射泡沫的反射比和透射比的温度依赖关系式。对于斜射光,反射比和透射比强烈依赖于入射光的偏振特性及入射角。

由于实验条件限制,我们只能将温度控制在  $16 \sim 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,至于能不能推广到所有温度范围内,还会不会存在其他的问题,还有待于实验条件完善后进一步验证。当然,在实际应用时,干扰泡沫的温度一般会在  $0 \sim 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,只要研究这个范围内的情况即可。

## 4 结 论

通过以上研究,得到以下结论可供干扰泡沫设计 and 应用时借鉴:

1) 泡沫溶液的红外光谱特征决定红外光谱的吸收峰位置,且浓度越高,吸收越高;但溶液浓度不宜超过表面活性剂的临界胶束浓度。

2) 泡沫的特殊结构是造成光线强烈衰减的重要原因,透射光强随光线穿过泡沫液膜界面的次数成指数衰减,透射能量迅速下降。因此,泡沫直径越小,单位体积泡沫数越多,单位体积界面数也越多,达到相同遮蔽效果的泡沫用量就越少。

3) 当泡沫直径远大于入射光线波长时,透射比随光束大小变化不大。

4) 泡外气体折射率  $n_2 > 1$  时,内充气体折射率越小,透射比越小;而  $n_2 \leq 1$  时,  $n_1$  越小,透射比越大。

5) 固体附着物将极大降低泡沫稳定性和寿命,应尽可能减少或避免。

6) 泡沫溶液温度的升高可在一定程度上增强泡沫的红外吸收能力。

采用正交设计法对各因素进行方差分析和趋势分析,得出影响程度从大到小的次序为:泡沫结构,红外光谱特征,内充气体折射率,泡沫直径,温度。

## 参 考 文 献

- 1 Jianjun Guo, Leung Tsang, William Asher *et al.*. Application of dense media radiative transfer theory for passive microwave remote sensing of foam covered ocean[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(5): 1019~1027
- 2 Oleg O. Drobakhin, Yeugen V. Kondrat'yev, Leonid A. Filinsky. Foam absorbing material properties in range of 8~12 GHz[C]. *IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques. Sevastopol, Ukraine*, 2003, **9**: 684~686
- 3 Jin Liang'an. Method of multiband passive interference[P]. CN 1691563A, 2005. 11  
金良安. 多波段无源干扰方法[P]. CN 1691563A, 2005. 11
- 4 Jin Liang'an, Wang Xiaotong, Fu Jianguo *et al.*. Study on special foam screen and its multi-band interfering performance[J]. *Acta Armamentar II*, 2006, **27**(2): 248~251 (in Chinese)  
金良安,王孝通,付建国等. 泡沫型干扰幕及其多波段干扰特性研究[J]. *兵工学报*, 2006, **27**(2): 248~251
- 5 Zhan Xichen, Jin Liang'an, Chi Wei *et al.*. Multi-interfacial feature of disturbing foam and sharply-decrease effect of laser transmission[J]. *J. Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2006, **21**(1): 155~158 (in Chinese)  
战希臣,金良安,迟卫等. 泡沫型干扰幕对激光透射的多界面效应研究[J]. *海军航空工程学院学报*, 2006, **21**(1): 155~158
- 6 Zhao Xian. Liquid-based bubble apply in photoelectricity counterplot[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2004. 31~37 (in Chinese)  
赵 娴. 光电对抗用水基泡沫的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004. 31~37
- 7 Simon Cox, Denis Weaire, James A. Glazier. The rheology of two-dimensional foams[J]. *Rheol Acta*, 2004, **43**(5): 442~448
- 8 Dai Gance, Chen Minheng. *Fluid Mechanics in Chemical Engineering* [M]. 2nd edition, Beijing: Chemical Industrial Press, 2005 (in Chinese)  
戴干策,陈敏恒. 化工流体力学[M]. (第二版), 北京: 化学工业出版社, 2005
- 9 Sun Qicheng, Ge Wei, Huang Jin. Influence of gravity on narrow input forced drainage in 2-D liquid foams[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(3): 423~427
- 10 D. Weaire. Froths and Foams[C]. *Complex Fluids: Proc. XIII Sitges Conference Sitges*, Spain, 1993, **415**: 351~359
- 11 Denis Weaire, Stefan Hutzler. Making, modelling and measuring foams[J]. *Europhysics News*, 1999, **30**(3): 73~75
- 12 Liu Cheng, Zhang Wanfu, Chen Changming. *Applied Handbook of Surface Activity* [M]. 2nd edition, Beijing: Chemical Industrial Press, 1995 (in Chinese)  
刘 程,张万福,陈长明. 表面活性剂应用手册[M]. 第二版, 北京: 化学工业出版社, 1995
- 13 L. A. Filins'kyy. Absorbed media dielectric permittivity research in form of water foam specimens [C]. 5th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, 2005. 515~517
- 14 Jin Liang'an, Wang Xiaotong, Yang Chengqing *et al.*. Study on optics attenuation with foam interfering screens[J]. *Acta Optics Sinica*, 2005, **25**(2): 237~240 (in Chinese)  
金良安,王孝通,杨常清等. 泡沫型干扰幕的光学衰减性能研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 237~240
- 15 An Gang, Wang Xuanyu, Feng Zongwei. Research of measuring method about anti-infrared extinction coefficient of smoke-screen with a thermal imager[J]. *Modern Instruments*, 2006, (4): 38~39 (in Chinese)  
安 刚,王玄玉,冯宗伟. 利用热像仪测试烟幕红外消光系数方法研究[J]. *现代仪器*, 2006, (4): 38~39
- 16 Li Wei, Yang Kecheng, Zhang Xiaohui *et al.*. Simulation and computation of bubbles volume scattering function in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 647~651 (in Chinese)  
李 微,杨克成,张晓晖等. 水中气泡上的体散射函数的模拟与计算[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 647~651
- 17 Pan Duwu, Jia Yurun, Chen Shanhua. *Optics* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1997. Vol. 1 (in Chinese)  
潘笃武,贾玉润,陈善华. 光学(上册)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1997
- 18 Qicheng Sun, Stefan Hutzler. Light scattering through 2D Plateau borders and foams [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Engng.*, 2007, doi: 10.1016/j.colsarfa.2006.11.058
- 19 S. Hutzler, N. Péron, D. Weaire *et al.*. The foam/emulsion analogy in structure and drainage[J]. *The European Physical Journal E*, 2004, **14**: 381~386
- 20 Liu Jing. *Heat Transmission at Micron/Nanometer Scales* [M]. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)  
刘 静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2001