

长寿命氘灯的特性及其使用

杨啸涛¹ 蒋晓波² 刘木清² 马向南³ 汪雨³

(1 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 2 复旦大学电光源研究所, 上海 200433;
3 北京市理化分析测试中心, 北京 100089)

摘要 本文介绍了氘灯的工作原理及其构造, 并详细阐明了影响氘灯寿命的因素及在原子吸收光谱和紫外-可见分光光度计中氘灯启动特性, 高能量长寿命氘灯的开发和生产带来了新的使用问题, 为了规范氘灯的质量建议引入启弧电流的概念和参数, 并建立新的标准以利于推广使用。

关键词 氘灯; 新工艺; 寿命; 启动特性

中图分类号: O657; TH744.11⁺6 **文献标识码**: A **文章编号**: 2095-1035(2011)01-0083-06

The characteristics and applications of long life deuterium lamps

YANG Xiaotao¹, JIANG Xiaobo², LIU Muqing², MA Xiangnan³, WANG Yu³

(1 National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China;

2 Institute for Electric Light Source, Fudan University, Shanghai 200433, China;

3 Beijing Centre for Physical & Chemical Analysis, Beijing 100089, China)

Abstract The working principle and structures of deuterium lamps were introduced in this paper. The factors that influence the lifetime of a deuterium lamp were discussed in detail. The start-up characteristics of the deuterium Lamps when used in atomic absorption spectrometer (AAS) and ultraviolet-visible spectrophotometer were demonstrated. The new problems that brought by recent development and manufacture of high-energy long-life deuterium Lamps were described. In order to establish some standards for universal quality evaluation for deuterium lamps, it was suggested to introduce the start-up arc current concept and corresponding parameters. For better utilizing deuterium lamps for more users, new rules should be established.

Keywords deuterium lamp; new technology; lifetime; start-up characteristic

1 引言

氘灯作为一种理想紫外光源, 广泛用于多种分析装置, 例如: 液相色谱紫外检测器, 紫外分光光度计, 薄层色谱和胶片厚度测量仪等。

最早作为分析仪器紫外连续光源的是氢灯, 是 Steiner 于 1927 年研究成功; 1935 年 Munch 发展了金属氧化物涂覆的热阴极 (灯丝), 并研究了热阴极

和阳极之间用金属板隔离的灯结构, 这些结构与现在氘灯的结构完全相同。1961 年 Levikov 以氘气代替氢气封入灯中, 就是现在的氘灯。接着很快就在紫外-可见分光光度计和原子吸收光谱仪^[1]中得到了广泛的应用。还有氘灯在太空技术中研究和应用的报道^[2]。

一些专利技术代表了氘灯改进和发展的轨迹。其中专利^[3]明确指出: 如果把氘灯内氘气的充气压力比最大能量时的充气压力提高 10%~50%, 其使用寿

收稿日期: 2010-12-07 修回日期: 2011-01-10

作者简介: 杨啸涛, 男, 教授。E-mail: bunaas@163.com

命可以延长到原来的 150%。Hamamatsu 的专利^[4]中,将陶瓷材料置于阳极和发光孔径之间,这改变了氙灯内部的温度场,由于其专利保护要求的广泛性,使得该公司的产品在噪声等性能上较之其他公司的产品更为优越。

2 氙灯工作原理和结构

2.1 发光原理

氙灯是一种气体放电光源,灯丝阴极发射的热电子在电场加速下向阳极运动与氙气分子实现非弹性碰撞继而使氙气分子激发,在氙分子分解成氙原子时多余的能量辐射光子,由于电子能量的随机性所以该辐射为一定波段的连续光谱,具体而言主要在 170~400 nm 区域。其原理在文献^[5]中早有解释,见图 1 所示。

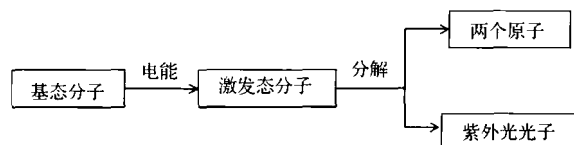


图 1 氙灯发光原理示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the light emission principle of a deuterium lamp

电子能量与光子能量之间的关系可以用下式表述:

$$E_e - E_{D_2} = E_{D'} + E_{D''} + h\nu$$

其中: E_e 为电子能量; E_{D_2} 为激发氙分子所需能量; $E_{D'}$ 和 $E_{D''}$ 分别为两个氙原子的动能, $h\nu$ 为光子能量。

2.2 光谱分布

图 2 是典型的氙灯光谱分布,在 486.0、583.0、656.1 nm 三处各有一条特征谱线,其中 656.1 nm 线通常作为分光光度计波长校正使用的谱线。

关于氙灯的光谱有以下几点值得注意:

(1) 灯辐射光谱中包括氢原子位于真空紫外区域的莱曼(Lyman)线系和位于可见区域的巴尔默(Balmer)线系,与氢原子谱线相比有一定的同位素位移。另外,它们的总辐射功率与连续光谱相比要小很多。

(2) 氙灯辐射光谱中还包含着臭氧的辐射谱,这可以在 160 nm 附近观察到。臭氧的存在会在 220~280 nm 区域内形成吸收,气体的热运动(外部臭氧的流动)会带来光辐射的波动和严重的噪声,这也是我们希望氙灯尽量少产生臭氧的原因之一。

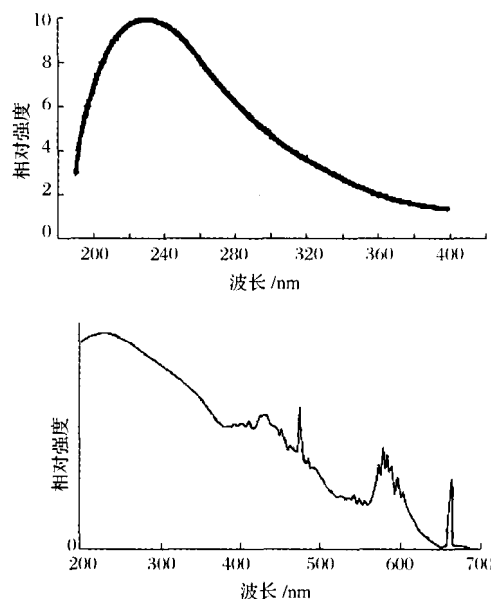


图 2 氙灯的光谱分布

Fig. 2 The spectral distribution of deuterium lamps

另外,由于臭氧对光学元件的镀铝表面有极大的氧化作用,往往成为石英玻壳氙灯的诟病。然而,近来 Heraeus 公司开发了一种氙灯,它在石英管壳内壁涂上一层涂层,称之为 Enhanced Lifetime Performance(ELP)技术,不仅减少了灯产生的臭氧,而且使得灯的寿命得以延长,据称在传统产品的使用寿命末端,使用该技术,在 210 nm 处能量为原来的 2 倍。据介绍,该技术申请了多国专利,但直至本文发稿时作者尚未查到。

(3) 如果发现在 310 nm 附近的发射谱带中叠加了锐线成分,那就说明氙灯漏气了,氢和空气中的氧形成了 OH,会在所述的波段产生双原子分子的锐线辐射。这也可以作为检测氙灯是否漏气的一个标志。

2.3 构造

氙灯的结构主要有标准氙灯和背透(see through)氙灯两种,如图 3 所示。

两者的区别是发光点有所不同,后者用于一些紫外可见分光光度计,把碘钨灯的辐射聚焦于背透氙灯的弧斑,免去了更换光源使用的反射系统和驱动马达,增加了光学结构的稳定性和可靠性。Buck 公司至今还在原子吸收中使用背透氙灯作为背景校正光源,使用背透氙灯使得背景校正光源和空心阴极灯的光学平衡变得十分简单,两个光源的光斑在原子化器中的重合性较好,使得背景校正性能提高。

这样使用遇到的主要问题是光能量:小的弧光

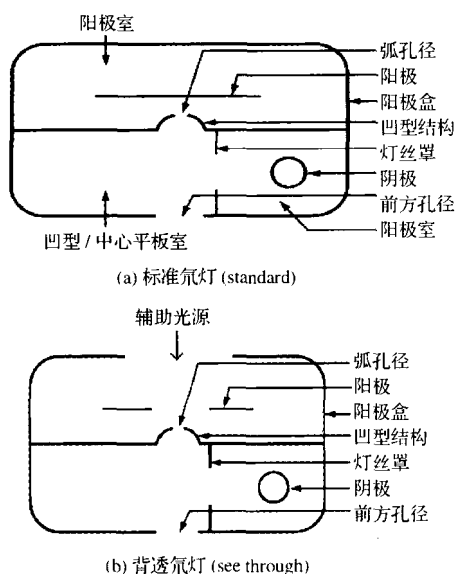


图 3 氙灯的构造

Fig. 3 The construction of deuterium lamps

孔径会限制空心阴极灯的辐射能量,而如果选用大的弧光孔径,氙灯的能量又会显著下降。

值得注意的是:当氙灯的辐射光聚焦之后,在聚焦点外还有光线,表明虽然有法拉第暗区把阳极和阴极的弧光区分开了,但是阴极弧光区在起作用,这往往与灯结构的设计有关。在仪器光学设计时应尽量避免这部分辐射照到原子化器上,特别是石墨炉原子吸收光谱法中,它在石墨管管壁的反射会带来信号的波动。

对于不同光谱段的应用需要使用不同的窗材料。

真空紫外区: 105 nm 以上	LiF 窗
115 nm 以上	MgF ₂ 窗
紫外区: 160 nm 以上	熔融石英
185 nm 以上	透紫玻璃

资料^[6]对各种窗材的透过特性有详尽的图解。

3 氙灯寿命与影响因素

3.1 灯丝

氙灯灯丝加热是氙灯由辉光放电迅速转换为弧光放电的必要条件,灯丝表面的电子粉质量及粘合剂配方是灯寿命的关键之一。正确和充足的预热灯丝也是非常必要的。

当氙灯不易被点亮时(一般是灯老化造成,即氙灯已经到了使用寿命,其表面的氧化物已经耗尽),可以适当提高灯丝电压以点亮氙灯。

3.2 漏气

如果氙灯有缓慢漏气现象产生,其使用寿命也会缩短,能量下降很快,此时启动电压随使用周期的变化与灯丝表面氧化物耗尽的情况相反,即变得越来越容易点亮。

3.3 日曝现象

日曝现象是指随着氙灯使用时间的增加(即长时间的紫外光照射下),窗材料对光的透过率会有所下降,尤其是紫外部分。这主要是由于某些污染物粘附在窗体的内、外表面造成的。相对而言合成石英的日曝现象较弱,虽然 MgF₂ 的日曝效应也较小,但其暴露在空气中,由于化学蒸汽沉积会形成薄膜^[6],图 4 表示的是氙灯日曝效应与寿命的关系。

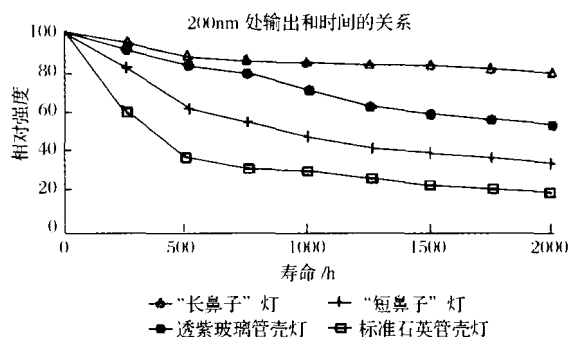


图 4 氙灯日曝效应与寿命的关系

Fig. 4 Effects of solarization on the lifetimes of the deuterium lamps

3.4 外部温度

外部温度变化会引起输出漂移,一种观点认为,可以加外部罩子而不用风冷,风冷更易造成漂移,特别有臭氧存在时;外罩应该离灯壳有 1~3 mm 距离,可作为气隙。一种观点认为最佳的外部温度为 20~30 °C。高的外部温度使阴极温度升高材料蒸发,低的外部温度使灯内气压变低,离子动能增加,使阴极电子发射材料溅出更多。两种情况都会使灯内气体消耗更快,能量下降,寿命减短。灯壳温度不能超过 300 °C。这两种说法都没有拿出更为令人信服的数据。

3.5 制作工艺

现代的氙灯有很多工艺较之先前有很大改进,其中大部分与增加辐射强度,延长使用寿命有关,可以用表 1 来描述。

现有氙灯生产厂均采用提高氙气纯度和充气压来增加氙灯的强度和寿命,这是增加氙灯使用寿命最简单的办法之一。同时,也由于这种工艺改进给它的使用带来一些新的问题。

表 1 现代氙灯的部分工艺要点

Table 1 Technological essentials for some advanced deuterium lamps

工艺要点	目的
石英窗内表面和玻壳的精密抛光	减少“日曝”效应,增加寿命
灯内金属件的烧氢、脱氧处理(在氢还气氛围下进行)	表面氧化物分解,增加寿命和强度
全自动模具化芯柱制作	增强通用性
模具化对光法兰固化	增强通用性
灯丝电子粉和粘结剂配方和工艺	增加使用寿命
提高氙气纯度和充气压	增加强度和寿命

4 氙灯的启动

4.1 启弧电流的提出

氙灯工作于弧光放电区域,文献^[7]详尽描述弧光放电的伏安特性曲线,及辉弧过渡过程。为了更好的研究氙灯在 AAS 和 UV 中的应用,需要掌握氙灯的启动特性。

近年来,国内外厂家将氙灯内的充气压提高,增加内部压力,进而提高氙灯强度和寿命。但是增加了氙气充气压,也致使氙灯点亮存在问题,许多仪器原有的电路会产生点不亮氙灯或者自动熄灭的现象。

针对这个问题,文献^[8]对氙灯启动作了深入的研究。图 5 是使用高速示波器(Tektronix 的 TDS3000 系列)测试氙灯启动过程中灯管压降的时间曲线,与文献^[6]的结果完全相同。从图中可见在氙灯点亮时,从辉光放电过渡到弧光放电的过程里并没有经过一个更高的电压区域,与传统所示的气体放电曲线(图 6)有一定的差异。

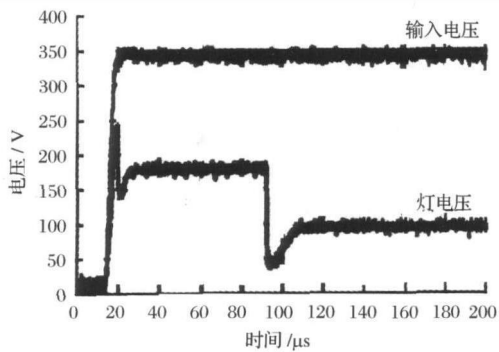


图 5 氙灯正常启动时的管压降 & 时间曲线

Fig. 5 The voltage-drop and time-curve at a normal start-up of a deuterium lamp

进一步的试验指出:如果让氙灯形成弧光放电,必须维持一定的初始电流。如果初始电流没有达到要求,则氙灯只是在辉光放电区,没有形成达到弧光放电状态,氙灯只有闪烁而不能正常点亮。因此,作为氙灯的参数,除了击穿电压(Strike Volt-

age, 又称:启辉电压,即图 6 曲线中 D 点的电压)必须提供最小启弧电流这一参数(图 6 曲线中 G 点的电流),才能为设计氙灯电路提供完整的依据。这是因为氙灯在弧光放电下恒流工作其工作电压仅为 60~90 V 之间,而击穿电压接近或大于 300 V。为了节省电源的消耗,几乎所有的氙灯电源把触发用的高压部分和恒流工作部分分开。也就是说,对于一个氙灯电源,触发部分不仅需要提供大于击穿电压的高电压,而且在触发过程中必须能提供足够的电流保证氙灯的辉弧过渡,正常点亮。

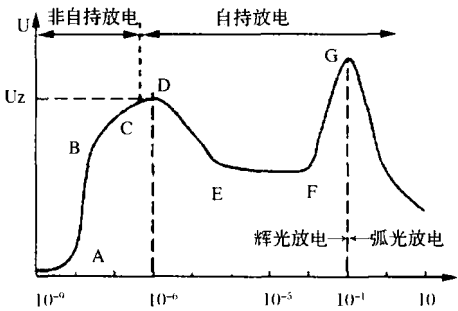


图 6 气体放电全伏安曲线

Fig. 6 The volt-ampere curve of the gas discharge

如果氙灯电源的触发高压部分和工作电压部分不分开,只要电源的电压超过灯的击穿电压就不易发生点不亮的情况,本文的试验中,用 Agilent 的 6812B(具有高精度直流和交流输出的电源)试验几个在多个仪器上点不亮的灯。发现全能点亮,并且所测击穿电压并不比正常灯高,这也是一个重要的佐证,说明启弧电流参数的重要性,也说明在当前氙灯工艺改进后更需关注这一参数。文献^[8]同时给出了测量启弧电流的方法。

4.2 灯丝预热电压和放电特性的关系

增加灯丝预热电压,灯的击穿电压和启弧电流都有降低,以一个标称为 10 V 灯丝电压的氙灯为例进行试验,使用不同的预热电压,多次测量得到数据如表 2 所示。

表 2 不同预热电压下氙灯的击穿电压和启弧电流测量值

Table 2 The measured values of breakdown voltages and start-up arc currents of the deuterium lamp under different preheating voltages		
预热电压/V	击穿电压/V	启弧电流/mA
8	301	1.60
10	292	1.46
12	279	1.24

结果表明增加预热灯丝电压可以使氘灯更易点亮,这与一些文献^[6]的经验完全相同。

4.3 灯的温度和放电特性的关系

灯温度升高后,气压增加,这时击穿电压和启弧电流都发生了变化,笔者曾使用一个灯在冷却情况下点亮,其击穿电压和启弧电流分别为 286 V 和 1.44 mA,点亮一小时不完全冷却后,所测其击穿电压和启弧电流分别为 294 V 和 3.40 mA。所以灯在熄灭后再点更难(由于温度升高,引起灯内压力增加而需要更大的启弧电流,从而增加点亮的难度),这种现象在原子吸收光谱仪方面更为明显(脉冲点灯方式):在与氘灯特性不匹配的电路中点亮的灯经过一段时间,因灯的温度升高而自动熄灭,因为大多数原子吸收光谱仪的氘灯电路在脉冲供电情况下,每个供电周期都需要重新启动氘灯。

4.4 氘灯阳极盒作为加速极的运用

从目前看,各公司生产的氘灯,击穿电压比较恒定,启弧电流偏差比较大。一些生产厂将电阻和电容连接到氘灯的阳极盒和阳极之间以解决新工艺氘灯难以点亮的问题,这同样会发生一些问题。

在灯的阳极盒电极上加了一个对阴极的电压源,先打开预热电源预热,20 s 后打开 40 V 的第四电极的加速电源,发现灯已点亮,实验中用了三个灯进行重复实验,现象相同。在 10 V 灯丝的样品上,进行了如下的附加实验,即先加上加速电源,电压 40 V,同时升高预热电源电压,发现升到 5 V 左右灯就亮了。

对四种不同的氘灯进行了测试,分别是不同灯丝电压的充气压,其中充气压以油柱高表示。在阳极盒和阳极之间连接不同大小的电容,用可以产生脉冲方波的 Agilent-6812B 进行试验,测试四电极氘灯+电容的效果。脉冲电源的输出为一个上升沿很陡的电压波。经过示波器的检测,电源能输出上升沿约 43 ns 的波形,能满足测试的需求。测试所用的方法是逐步调高脉冲峰值的电压值,等氘灯被击穿时,记录下击穿电压。所得结果如表 3,表中的数据是击穿电压。

表 3 各种氘灯在增加阳极盒电容时的击穿电压

Table 3 The breakdown voltages of different deuterium lamps with the increasing anodic capacitances

电容值	0.1nF	2.2nF	10nF	电压/V 第四电极不用时
2.5V_90mmoil	206	204	204	215
2.5V_105mmoil	309	289	298	327
10V_80mmoil	247	205	146.	314
10V_105mmoil	324	256	237	333

从表 3 中数据可见高充气压氘灯,击穿电压高。在灯的阳极盒和阳极之间加电容能有效降低灯的击穿电压,由于电源是在脉冲情况下工作,启弧电流的测量比较困难,试验并未得出有效的数据。

从以上的实验也可以看出,对于直流恒流使用下的氘灯(例如:紫外分光光度计等)阳极盒和阳极之间连接电容比较合适,因为其触发是靠触发电路开关供电,瞬间接通的高压触发电源通过电容形成脉冲电流,加速了氘灯的启弧。而对于原子吸收光谱仪等在脉冲供电下使用的氘灯,连接电阻更为合适,因为往往其触发电压是通过降压电阻直接接在氘灯的阳极上,电容的存在不能起到加速作用。另外,所接的电阻不能太小,以免氘灯未经预热就点亮。在这一点上需要氘灯供需双方充分协同,研究协商定型,根据需要设计相应电路参数,以保证仪器的质量,充分利用新工艺下氘灯长寿命、高强度的特性。

在第四线上施加电压加速氘灯的启弧,不会对氘灯产生任何伤害;而且在第四线增加的电流不会发光,即不会干扰氘灯正常的使用。在原子吸收光谱法中使用四线氘灯还能对电路的设计带来更大灵活性。

王建平等^[9]以开关电源模块设计了用于紫外分光光度计的直流氘灯电源,也以同样的构思设计了用于原子吸收的脉冲氘灯电源。本文作者也将另文讨论各种氘灯电源电路的设计。

5 结论

1. 高能量长寿命氘灯的开发和生产带来了新的使用问题,为了规范氘灯的质量有必要引

入启弧电流的概念和参数,并建立新的标准以利于推广使用。

2. 用于 UV 和 AAS 的氘灯在制造规格上应有所区别,特别是阳极盒和阳极之间连接器件

的使用,需要氘灯生产和使用双方共同探讨磨合,以利于充分获得新工艺氘灯的最佳使用效果。

3. 无论是使用于 UV 或者 AAS,利用开关电源的特性,把工作电源和触发电源合并在一起省去高压继电器一类器件是可行的,在原子吸收中推荐使用四线氘灯,这样可以使控制更为灵活。而这样一些改进同样可以延长氘灯的使用寿命。

参考文献

[1] Koirtyohann S R, Pickett E E. Background Corrections

- in Long Path Atomic Absorption Spectrometry[J]. Anal. Chem., 1965, 37: 601-603.
- [2] Finkenzeller J, Labs D. Deuterium Lamp As a UV Continuum Source from 160nm to 320nm for Space Applications[J]. APPLIED OPTICS, 1979, 23: 3938-3941.
- [3] Cassidy R L., Cosco R J, Pappas J A. Deuterium Lamp [J]. US Patent No. : 4,016,445. 1997.
- [4] Sei Yujiro, Ito Masaki. Deuterium Lamp Box and Portable Light Source Apparatus[J]. US Patent No. : 6,601, 972 B2. 2003.
- [5] Samson J A R. Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy[J]. (Wiley, New York, 1967).
- [6] Deuterium Lamps. pdf. <http://www.cathreon.com>.
- [7] 王妙康. 弧光放电型谱[J]. 光源与照明, 2007(3): 8-11.
- [8] 蒋晓波, 杨啸涛, 刘木青. 氙灯启动对于电流的要求[J]. 中国照明电器, 2009, 11: 1-4.
- [9] 王建平, 李伟, 张炜. 氙灯开关电源的研制[J]. 电源技术应用, 2001(3): 21-22.

2011 第九届山东国际科学仪器及 实验室装备展览会

The 9th Shandong International Scientific Instrument & Laboratory Equipments Exhibition

时间: 2011 年 3 月 24—26 日

地点: 济南国际会展中心

经过八年的精心组织和培育, 山东国际科学仪器及实验室装备展览会(英文 SISILEE)在广大业界用户和国内外仪器设备厂商的关心和支持下, 展会规模持续扩大, 影响不断增强, 专业观众登记数量不断攀升。作为国内大规模的区域性科仪展会, 其极具特色的交流平台, 丰富多彩的会期活动, 在业内产生了巨大影响, 有力地促进了业界的交流与合作。

★组织机构

支持单位: 中国分析测试协会 中国环境科学学会 中国机械工程学会

主办单位: 山东省科学技术厅

承办单位: 山东省理化分析测试协会 山东省分析测试中心 青岛市分析测试学会 山东新丞华展览有限公司

★时间安排

2011 年 3 月 22—23 日 报到、布展
2011 年 3 月 24—26 日 展示洽谈、参观交流
2011 年 3 月 26 日 16:00 撤展、闭会

★同期活动精彩纷呈(欢迎广大参展单位参与, 日程安排等详细资料备索)

- * 2011 年分析测试学术交流大会
- * 山东省理化分析测试协会理事换届选举大会
- * 山东省质谱学术研讨会
- * 现代色谱技术发展论坛
- * 山东省医学检验新技术发展论坛
- * 2011 山东计量发展论坛

★观众组织

重点邀请山东、北京、河南、河北、天津、江苏、上海、辽宁、内蒙、山西、安徽、黑龙江等省市;
科研院所、大专院校、测试机构、重点实验室、重点代理经销商;
制药、食品/饮料、环保、水工业、化学化工原料、生物技术、石油化工、日用化工、烟草、机械制造、材料、电子、半导体、纺织、汽车、冶金、钢铁、军工等生产企业;
质检、环保、药检、检验检疫、疾控、农业、畜牧、科技、教育、卫生、石油、化工、煤炭等主管单位及行业协会/学会;
政府采购部门及省市招标单位。

★大会联络

济南联络处 青岛联络处
联系人: 王娜娜 联系人: 王琦(青岛市分析测试学会)
电话: 0531-88879911 13869104938 电话: 0532-82886390
传真: 0531-88879811 88879944 传真: 0532-82898462
E-mail: shandongzhanhui@126.com 网址: www.sisilee.com
地址: 山东省济南市高新技术开发区大学科技园北区 G 座 邮编: 250101