

## 长寿命 He-Ne 激光器的加速寿命试验

杨之昌 马秀芳

(复旦大学物理系, 上海)

## Accelerated life test on long life-time He-Ne lasers

Yang Zhichang, Ma Xiufang

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai)

提要: 本文主要介绍一种检验 He-Ne 激光管寿命的新方法——加速寿命试验。

关键词: 加速寿命试验

## 基本假设

我们对加速 He-Ne 激光管的寿命试验作了二个基本假设。

一个假设是在考虑了失效机理后建立的。根据对失效机理的研究, 可知 He-Ne 激光管的寿命失效大致由激光管内气体成份的改变、激光管反射镜的污染或损坏、毛细管的污染等三方面因素决定的。而后两个因素是长寿命激光管失效的主要原因。所以激光管失效的物理模型属于链式结构, 由此假设 He-Ne 激光管的寿命分布是符合威布尔分布的, 它的密度分布函数可用下式表示:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{m(t-r)^{m-1}}{t_0} e^{-\frac{(t-r)^m}{t_0}} & t \geq r \\ 0 & t < r \end{cases} \quad (1)$$

上式中  $m$  是威布尔分布的形状参数,  $r$  是位置参数,  $t_0$  是尺度参数。

形状参数  $m$  与激光管的失效机理有关。当  $m$  在 1 左右, 激光管的寿命较短, 这就属于

早期失效的产品。当  $m$  大于 1, 激光管的寿命应该较长, 它的寿命指标可用特征寿命  $\eta$  来描述:

$$\eta = t_0^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

其它的寿命参数也可由形状参数  $m$ 、尺度参数  $t_0$  算出:

$$\text{平均寿命 } \mu = \eta \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right);$$

$$\text{中位寿命 } t_E = \eta (\ln 2)^{\frac{1}{m}};$$

$$\text{可靠寿命 } t_R = \eta (-2.3026 \ln R)^{\frac{1}{m}} \quad (R \text{ 是可靠度, 事先给定}).$$

$\Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right)$  是  $\Gamma$  函数, 若  $m$  求得, 可从  $\Gamma$  函数表求得其函数值。

根据理论分析和实验的结果<sup>[1~3]</sup>, 我们得出了工作电流增大能促使失效因素加剧的结果。可以用工作电流作为应力对激光管进行加速寿命试验。故所作的另一个假设是激光管的特征寿命  $\eta$  与应力  $I$  的关系符合逆幂律, 即

$$\eta = \frac{1}{KI^C} \quad (3)$$

其中  $K$ 、 $C$  是常数, 对 (3) 式取对数

$$\lg \eta = -\lg K - C \lg I \quad (4)$$

(4) 式是直线方程式, 直线斜率的相反数就是常数  $C$ 。寿命试验的加速系数  $\tau = \left(\frac{I_i}{I_0}\right)^C$ ,  $I_i$  是加速电应力,  $I_0$  是激光管常规点燃的放电电流。

综上所述, 进行加速寿命试验的基本原理可归纳为: 1. 以加大激光管的放电电流  $I$  作为加速因子。加大多少是以形状参数  $m$  基本不变为前提, 即管内保持辉光放电; 2. 每个应力选取一定数量的样管进行点燃试验。根据第一个假设应该确定二个以上的失效标准; 3. 作威布尔分布曲线, 若是线性关系证明第一个假设是正确的。对不同应力的激光管组的威布尔曲线不仅要求  $\ln[\ln F(t)]$  与  $\ln I$  成线性关系, 还要求形状参数  $m$  基本不变; 4. 若  $\ln \eta - \ln I$  曲线成线性关系, 则证明第二个假设是正确的, 可以求得加速系数。

## 试验方法和装置

试验可分以下几个步骤:

### 1. 样管的筛选

同一期试验的样管必须从相同设计、同工艺、同一时期的产品中挑选。根据加速寿命试验的要求, 样管的筛选就是要排除可能出现早期失效的管子, 并保证每个应力水平选取的样管  $\geq 4$  支。

### 2. 应力水平的选取方法

根据国家标准在没有获得加速系数的情况下, 必须通过至少 4 个应力的试验, 求得加速系数, 应力间隔应由下式确定:

$$\Delta = \frac{\lg I_e - \lg I_1}{l-1} \quad (5)$$

$I_e$  是试验中允许的最高应力, 根据失效机理的研究, 原定  $I_e$  为 25 mA,  $l$  是应力水平的个数, 本文选用 7 mA、11 mA、15 mA、

20 mA、25 mA 5 个应力作试验。

### 3. 失效标准的确定

激光管的三个失效因素可从输出功率、着火电压的变化中表现出来, 而工作电流的增大是加速了变化的进程。因此: (1) 当激光管输出功率下降到初始功率(最大功率)的二分之一时, 判定该管已失效。(2) 当激光管着火电压上升到 8.5 kV 时, 判定该管已失效。(3) 根据威布尔分布的假设认为激光管在连续点燃过程中, 出现以上两项中的一项失效标准, 即判定管子失效。激光管的连续点燃时间就是该激光管的工作寿命。

### 4. 测试内容和测试周期

为掌握其规律, 每二周测试光电参数一次, 三个月测试气体成份一次。

## 试验结果和处理

寿命试验是一项重要而又繁琐的工作, 第三期试验从 1983 年初开始直到 1988 年初才把 5 个应力水平的试验全部做完。第三期试验的结果见表 1。

数据处理可以用威布尔分布图估计法和最好线性无偏估计法。

### 1. 威布尔分布图估计法

五个应力水平的试验数据在威布尔概率纸上应画成五条直线, 见图 1。由图估计法得到的结果见表 2。从表 2 可以看出, 25 mA 应力水平试验时, 样管的形状参数  $m$  约等于 1, 这属于早期失效, 说明失效机理已经改变,

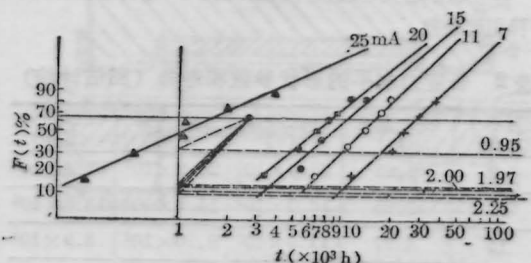


图 1

表 1

试验编号	应力水平 (样品数)	寿命(t) (h)	失效 判据	j	$F(t) = \frac{j}{n+1}$
740=14	7mA (n=5)	11.5 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	1	0.167
740=18		20.9 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	2	0.334
740=33		23.4 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	3	0.500
740=4		28.2 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	4	0.667
740=6		36.0 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	5	0.834
740=36	11mA (n=5)	7.30 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	1	0.167
740=41		11.0 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	2	0.334
740=26		14.1 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	3	0.500
740=43		17.5 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	4	0.637
740=23		20.3 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	5	0.834
740=25	15mA (n=4)	5.70 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	1	0.200
740=5		7.60 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	2	0.400
740=23		8.30 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	3	0.600
740=10		14.0 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	4	0.800
740=17	20mA (n=5)	3.40 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	1	0.167
740=27		5.40 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	2	0.334
740=32		7.30 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	3	0.500
740=11		10.4 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	4	0.667
740=20		12.8 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	5	0.834
740=31	25mA (n=6)	270	W ↓	1	0.143
740=22		540	W ↓	2	0.286
740=21		1.08 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	3	0.429
740=8		1.10 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	4	0.571
740=33		2.00 × 10 <sup>3</sup>	V ↑	5	0.714
740=15		3.74 × 10 <sup>3</sup>	W ↓	6	0.857

V ↑ 表示着火电压上升引起失效, W ↓ 表示输出功率下降引起失效。

表 2 各应力水平的形状参数和寿命 (图估计法)

应力水平 (mA)	形状参数 (m)	特征寿命 $\eta$ (h)	平均寿命 $\mu$ (h)	中位寿命 tE(h)
7	2.25	23.0 × 10 <sup>3</sup>	26.2 × 10 <sup>3</sup>	23.4 × 10 <sup>3</sup>
11	2.25	16.0 × 10 <sup>3</sup>	14.2 × 10 <sup>3</sup>	13.5 × 10 <sup>3</sup>
15	1.97	11.0 × 10 <sup>3</sup>	9.10 × 10 <sup>3</sup>	8.9 × 10 <sup>3</sup>
20	2.00	8.35 × 10 <sup>3</sup>	6.95 × 10 <sup>3</sup>	7.05 × 10 <sup>3</sup>
25	0.95	1.70 × 10 <sup>3</sup>	1.73 × 10 <sup>3</sup>	1.18 × 10 <sup>3</sup>

由威布尔分布转化为指数分布。因此除 25mA 应力水平外, 其余 4 个基本是线性关系, 这就验证了第一个假设是正确的。再用对数制图, 作直线, 见图 2 所示。从图中可以看出 lg  $\eta$  和 lg I 是线性关系, 这就验证了第二个假设也是正确的。由图 2 得到斜率为 -1.14, 则 C 为 1.14, 而加速系数  $\tau_{20-5} = 4^{1.14} = 4.85$ 。

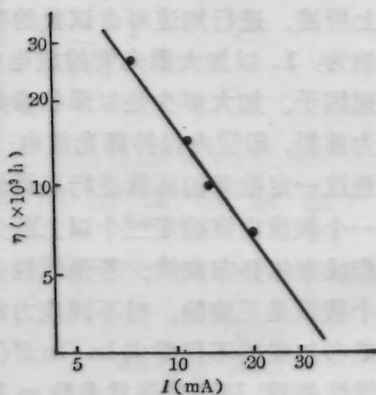


图 2

## 2. 最好线性无偏估计法

由于  $\ln[\ln F(t)] \sim \ln t$ ,  $\lg \eta \sim \lg I$  都是线性关系, 就可以用线性拟合法来处理, 在可靠性设计中称为最好线性无偏估计法。现把用线性无偏估计法求出的各应力水平的形状参数 m 和寿命整理在表 3。利用加权平均求得形状参数的平均值  $\bar{m} = 2.06$ 。用最好线性无偏估计法求得加速系数  $C = 1.14$ ,  $\tau_{20-5} = 4.85$ 。对照两种方法处理的结果基本是一致的。

表 3

应力水平 (mA)	形状参数 m	特征寿命 $\eta$ (h)	平均寿命 $\mu$ (h)	中位寿命 tE(h)
7	2.28	27.8 × 10 <sup>3</sup>	24.6 × 10 <sup>3</sup>	23.6 × 10 <sup>3</sup>
11	2.40	15.3 × 10 <sup>3</sup>	13.6 × 10 <sup>3</sup>	13.2 × 10 <sup>3</sup>
15	1.92	10.5 × 10 <sup>3</sup>	9.30 × 10 <sup>3</sup>	8.60 × 10 <sup>3</sup>
25	2.04	8.50 × 10 <sup>3</sup>	7.53 × 10 <sup>3</sup>	7.11 × 10 <sup>3</sup>
25	0.97	1.71 × 10 <sup>3</sup>	1.71 × 10 <sup>3</sup>	1.17 × 10 <sup>3</sup>

(下转第 441 页)

每次发作 5 分钟, 发作时出现 ST 段下移, 各 QRS 波形态相同, 说明是心内同一兴奋点的异常冲动所引起。每次发射 YAG 激光时都在心内心电图或是胸导联心电图上出现 ST 段改变。在照射能量小于  $20\text{W} \times 5\text{s}$  时, 除心内心电图上偶有 T 波抬高外, 体表心电图上往往看不到变化。

经对照实验, 我们发现在体激光心内照射的损伤面积大于离体心内照射的损伤面积(在同等照射能量下), 在体内激光照射所致组织损伤不象离体心脏激光照射那样与激光辐射能量呈一定的相关性, 同是  $40\text{W} \times 5\text{s}$  的能量, 有时导致心脏穿孔, 有时仅出现心内膜表面大面积暗红色灼伤(可达  $0.5 \times 0.7\text{cm}^2$ ), 这可能是由于不同的折射率、吸收率和血液中的传导特征及心脏的运动所造成。激光照射离体心脏所致心肌损伤程度随照射能量的增加而增加, 但照射时间比照射能量更能决定损伤程度。

对激光损伤组织进行组织学检查可见从心内膜延及心肌几毫米深的出血、细胞变性、间质水肿和凝固坏死等等, 在大体形态上可肉眼观察到隆起的血肿区域或深达心肌的卵圆形气化凹坑并被复一层炭化物, 这些损伤对于打断和破坏折返通路及心律失常起源灶显然是足够的了。

作为初步实验, 我们仅在健康狗体内进行上述激光心内消蚀术实验。经过进一步改进导管和技术, 可望在心动过速的狗体模型上成功实施此术。

### 三、有待改进的问题

1. 通常认为电极导管消蚀术易产生心动过速的原因是电击损伤面积较大、心肌细胞水肿变性, 形成新的异位兴奋灶或折返通路所致。而我们所用的

YAG 激光行心内照射, 功率不大( $\leq 40\text{W}$ ), 照射时间较长, 损伤程度比电极导管消蚀术较为局限, 但仍有一定的心肌组织水肿、变性, 这可能是造成一例阵发性心动过速的原因之一。因此, 有必要使用脉冲式 YAG 激光和氩离子激光进行相同实验, 以便从中筛选出合适的激光。

2. 现有心内膜电生理标测的精确度大于  $1\text{cm}^2$  的范围<sup>[2]</sup>, 而激光照射斑多小于  $0.3\text{cm}^2$ , 这大大降低了激光心内照射的成功率。因此, 熟练掌握心内电生理标测术, 改进此技术, 提高其精确度, 是激光心内消蚀术能否推广应用的一个关键所在。

3. 我们现用的光纤外径均  $\geq 1.0\text{mm}$ , 不能配用 7F 以下的细导管, 这对于心血管系统来说, 相对过粗, 不便临床应用。改进的办法就是制造和使用较细的传输功率大的光导纤维, 尤其在应用脉冲式激光时更需如此。

此外, 不能将离体实验结果照搬到在体实验中, 还需进行大量的在体内激光照射实验, 摸索出一套安全剂量范围及严格的操作方法和经验。

### 参 考 文 献

- 1 Isner J. M. et al., *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20** (12), 1406 (1984)
- 2 Narular O. S. et al., *J. Am. Coll. Cardiol.*, **3**, 537 (1984)
- 3 Oblienus V. et al., *Laser Surg. Med.*, **5**, 469 (1985)
- 4 Saksena S. et al., *PACE*, **9**, 531 (1986)
- 5 Lee B. I. et al., *Circulation*, **71** (13), 579 (1985)
- 6 Lee G. et al., *Am. Heart J.*, **106**, 587 (1983)
- 7 Cumberland D. C. et al., *Lancet*, 8496 (1986)
- 8 Josephson M. E., *Circulation*, **57**, 444 (1978)

(上接第 414 页)

### 结 论

1. 试验证明两个基本假设是正确的, 也就是 He-Ne 激光管寿命是符合威布尔分布, 在形状参数基本不变的前提下, 激光管的特征寿命和应力水平的关系符合逆幂律。

2. 对长寿命激光管可用加速的方法进行可靠性试验。对腔长为 250mm 左右的 He-Ne 激光管加速电流为 20mA, 是常规的 4 倍, 加速系数 4.8 左右, 也就是使试验时间缩短 4、5 倍。如果采用可靠性抽样检验方

法, 试验时间还可缩短。

3. 在进行加速寿命试验时必须注意以下几点: (1) 随机抽取样管; (2) 经过筛选, 剔除早期失效的产品; (3) 建立两个以上的失效标准; (4) 激光电源要稳定, 性能基本一致, 测试仪器要耐用; (5) 测试方法要统一, 判断失效也要有统一标准; (6) 尽量避免人为的试验事故。

### 参 考 文 献

- 1 南开大学 He-Ne 激光组, *物理*, **7**(4), 224 (1978)
- 2 罗宗南 et al., *应用激光联刊*, **3**(6), 28 (1983)
- 3 杨正名, *中国激光*, **11**(5), 317 (1984)