中国激光
第14卷 第4期

# 用威布尔函数研究氦-氖激光管的寿命特性

王喜山 孙振东
(山东师范大学) (烟台大学)

**提要**：将玻璃结构内腔式小型氦-氖激光管的失效机理与威布尔函数的物理模型作了对比，指出这种激光管的工作寿命应服从威布尔函数规律。导出了加速寿命公式，利用该公式，可以快速地判定氦-氖激光管的寿命特征。

# Investigation on lifetime of He-Ne lasers by means of Weibull function

*Wang Xishan*
(Shangdong Teacher's University, Shangdong)
*Sun Zhendong*
(Yantai University, Yantai, Shandong)

**Abstract**: The failure mechanism of He-Ne lasers is compared with the physical model of Weibull function. It follows that the lifetime of He-Ne lasers ought to obey Weibull function. An equation for lifetime shortening is derived, which is used to determine readily the lifetime characteristics of He-Ne lasers.

## 一、用威布尔函数研究氦-氖激光管的寿命规律

威布尔函数已成功地用于研究电子器件的寿命特征[1]。氦-氖激光管也是一种电子器件，它的寿命特征是否服从威布尔函数规律呢？我们已知道，威布尔函数是通过"链环"模型导出的，只要有一个环断裂，整链就断裂。因此，凡是某一局部失效，就使整个功能失效的电子器件，其寿命特征都可用威布尔函数描述。氦-氖激光管的失效机理具有这一特点。例如，激光管的反射镜损伤或铝阴极溅射，都会导致整个激光管功能失效[2]。由此推断，氦-氖激光管的寿命分布规律应服从威布尔函数。

威布尔函数的原始形式为[2]

$$F(S)=\begin{cases}1-e^{-\frac{(S-\gamma)^m}{S_0}}, & \text{当 } S\geqslant\gamma \text{ 时；}\\ 0, & \text{当 } S<\gamma \text{ 时。}\end{cases}\qquad(1)$$

式中 $S$ 是应力，$m$、$\gamma$ 和 $S_0$ 分别称为形状参数、定位参数和比例参数。$F(S)$ 的意义是，在应力 $S$ 的作用下，任一时刻的电器件积累

收稿日期：1986年3月10日。

失效率函数。

使用(1)式时，常令 $\gamma=0$。对于氦-氖激光管，我们选用点燃电流 $I$ (mA) 作为应力，可令

$$I^{m'}=S^m,\ S_0=(\eta')^{m'} \tag{2}$$

代入(1)式，得

$$F(I)=1-e^{-\left(\frac{I}{\eta'}\right)^{m'}} \tag{3}$$

由于 $\gamma=0$ 时电器件的特征寿命 $\eta$ 与应力 $I$ 服从逆幂律方程[2]

$$\eta=\frac{1}{kI^c} \tag{4}$$

式中 $k$ 和 $C$ 为待定常数。

将(4)式代入(3)式，得

$$F(t)=1-e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}=1-e^{-\frac{t^m}{t_0}} \tag{5}$$

式中 $m=m'/C$，$t_0=\eta^m$，$t=1/k(\eta')^c$

由于电器件的特征寿命 $\eta$ 的量纲是时间，由(5)式可见，参量 $t$ 的量纲也是时间。(5)式是以时间 $t$ 为自变量的威布尔分布函数。当 $t=\eta$ 时，由(5)式得

$$F(\eta)=1-e^{-1}=63\% \tag{6}$$

该式意味着，点燃 100 支激光管，经特征寿命 $\eta$ 时间后，将累积失效 63 支。可见，特征寿命 $\eta$ 可以表征这种激光管的寿命特征。

由于 (5) 式中仍有两个未定常数 $m$ 和 $t_0$，因此计算很麻烦。实用中常用威布尔概率纸进行图估法。

将(5)式取两次自然对数，并令

$$Y=\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t)}\right),\ X=\ln t,\ B=\ln t_0 \tag{7}$$

则(5)式变为

$$Y=mX-B \tag{8}$$

以 $X$ 和 $Y$ 分别作为平面直角坐标系的横坐标和纵坐标，即构成威布尔概率纸。若激光管的寿命分布规律服从威布尔函数 (5) 式或(8)式，则其寿命试验结果，应在威布尔概率纸上将是在一条直线上。为验证这一点，我们测试 9 只 ($n_0=9$) 氦-氖激光管，点燃电流 $I_0=5$ mA，测得的失效时间 $t$(小时)列于表 1。

**表1 寿命试验数据表**

| 点燃电流 $I_i$ 投试管数 $n_i$ | 样管编号 | 失效时间 $t$ ($\times10^3$小时) | 积累失效概率 $F(t)$ (%) |
|---|---|---|---|
| $I_0=5$ mA $n_0=9$ | 25# | 3.4 | 10 |
| | 88# | 6.2 | 20 |
| | 55# | 8.03 | 30 |
| | 73# | 10.35 | 40 |
| | 52# | 10.45 | 50 |
| | 67# | 11.76 | 60 |
| | 167# | 12.28 | 70 |
| | 93# | 13.68 | 80 |
| | 36# | 19.59 | 90 |
| $I_1=10$ mA $n_1=5$ | 08# | 3.24 | 16.7 |
| | 48# | 3.55 | 33.3 |
| | 16# | 4.08 | 50 |
| | 00# | 6.42 | 67 |
| | 24# | 未失效 | — |
| $I_2=15$ mA $n_2=5$ | 100# | 2.83 | 16.7 |
| | 23# | 2.91 | 33.3 |
| | 023# | 3.01 | 50 |
| | 02# | 4.02 | 67 |
| | 70# | 未失效 | — |
| $I_3=20$ mA $n_3=9$ | 102# | 1.25 | 10 |
| | 37# | 1.37 | 20 |
| | 25# | 1.50 | 30 |
| | 26# | 1.62 | 40 |
| | 99# | 2.20 | 50 |
| | 72# | 2.31 | 60 |
| | 62 | 2.62 | 70 |
| | 988# | 3.00 | 80 |
| | 15# | 未失效 | — |

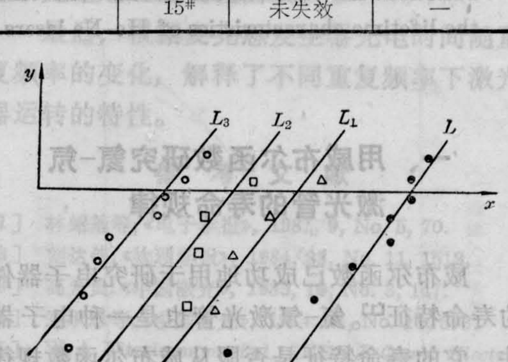


图 1

表中 $F(t)$ 值按下公式计算：[3]

$$F(t)=\frac{j}{n+1} \tag{9}$$

式中 $n$ 是投试样管总数，$j$ 是对应于 $t$ 时的

失效累积管数。

将表1中的数据描绘在威布尔概率纸上，即得图1中的 $L$ 直线。可见，在正常应力 $I_0=5\,\mathrm{mA}$ 的条件下，激光管的寿命规律服从威布尔函数[1]。

## 二、加速寿命试验

如前所述，在正常应力 $I_0=5\,\mathrm{mA}$ 的条件下，氦-氖激光管的寿命规律服从威布尔函数。一般说来，若对电子器件加大电应力，该器件的工作寿命会缩短，当然，氦-氖激光管也不例外。但我们感兴趣的问题是，它们的寿命缩短的规律是什么？在加大电应力后，氦-氖管的寿命规律是否还符合威布尔函数？

为揭示这些规律，我们作了如下试验：点燃电流取 $I_1=10\,\mathrm{mA}$ 时，测试管数 $n_1=5$ 支；$I_2=15\,\mathrm{mA}$ 时，测试管数 $n_2=5$ 支；$I_3=20\,\mathrm{mA}$ 时，测试管数 $n_3=9$ 支。利用这三种电流应力点燃的三批样管，所得的结果也列在表1中。将这些数据仍按已知的方法[1]，描画在威布尔概率纸上，得到三条分布直线 $L_1$、$L_2$ 和 $L_3$。由图可见，用加大的电流点燃同种激光管，其失效时间大为缩短，氦-氖管“加速”损坏，其“加速”的点燃寿命大为缩短。但值得注意的是，加速缩短后的寿命分布仍服从威布尔函数规律，在威布尔概率纸上，都呈现直线分布，而且这些分布直线有大致相同的斜率值 $m$。但应注意，以上的结论是在 $I_i\leqslant 20\,\mathrm{mA}$ 的条件下试验得出的。若点燃的应力电流大于 $20\,\mathrm{mA}$，上述规律不再成立。

## 三、特征寿命的快速测试

按上节所述，在四种电应力条件下，氦-氖管的点燃寿命都服从威布尔函数，且有大致相同的形状参数 $m$ 值。即这些管子在各种应力下，都满足逆幂律方程[2]

$$\eta_i=\frac{1}{kI_i^c} \tag{10}$$

式中 $k$ 和 $C$ 是常数，$i=0,1,2,3$。$\eta_i$ 是与应力电流 $I_i$ 对应的特征寿命。

由(10)式可得到

$$\left.\begin{aligned} C_1=\frac{\lg\eta_0-\lg\eta_1}{\lg I_1-\lg I_0},\quad C_2=\frac{\lg\eta_0-\lg\eta_2}{\lg I_2-\lg I_0},\\ C_3=\frac{\lg\eta_0-\lg\eta_3}{\lg I_3-\lg I_0}\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

将 $L$、$L_1$、$L_2$ 和 $L_3$ 四条直线与 $X$ 轴的交点处引垂线交威布尔概率纸底边的 $t$ 轴，便得到四种应力电流 $I_0=5\,\mathrm{mA}$、$I_1=10\,\mathrm{mA}$、$I_2=15\,\mathrm{mA}$ 和 $I_3=20\,\mathrm{mA}$ 点燃的四批管子的特征寿命分别为[1,3] $\eta_0=12\times10^3$ 小时，$\eta_1=5.8\times10^3$ 小时，$\eta_2=3.7\times10^3$ 小时，$\eta_3=2.3\times10^3$ 小时。将其分别代入(11)式，得到常数分别为 $C_1=1.06$，$C_2=1.06$，$C_3=1.2$。按下式得到常数 $C$ 的加权平均值为

$$\overline{C}=\frac{n_1C_1+n_2C_2+n_3C_3}{n_1+n_2+n_3}=\frac{5\times1.06+5\times1.06+9\times1.2}{5+5+9}\approx1.1。$$

若(10)式中，取 $i=0$ 和 $i=3$ 两值，可得

$$\eta_0=\left(\frac{I_3}{I_0}\right)^c\eta_3 \tag{12}$$

将 $I_0=5\,\mathrm{mA}$、$I_3=20\,\mathrm{mA}$、$C=1.1$ 代入得

$$\eta_0=4.6\eta_3 \tag{13}$$

我们不妨称(13)式为特征寿命的加速测试公式。这是一个很有意义的快速检验寿命质量的公式。例如，我们要求以较短的时间，鉴别某批氦-氖管的寿命质量，便可用 $I_3=20\,\mathrm{mA}$ 的大电流点燃这批管子五支。若测量出其特征寿命[2]为 $\eta_3=2500$ 小时，则可由(13)式推算出，该批管子在正常电流 $I_0=5\,\mathrm{mA}$ 下点燃，其特征寿命应为 $\eta_0=4.6\times2500=11500$ 小时。这意味着，这批氦-氖管，若点燃11500小时，其损坏的累积数可占总数的63%。

## 参考文献


[1] 刘金绶，邹志洁；《中国激光》，1984，**11**，670.

[2] 第四机械工业部；“可靠性基础”，1975年，北京，第五章。

[3] 第四机械工业部标准；“寿命试验和加速寿命试验方法”，SJ1432～1435—78，1979年，北京，p. 5.