

〈微光技术〉

## 微光像增强器塑料外壳受力分析

唐 钦, 杨 壮, 宋海涛, 叶洪伟, 张新月

(驻重庆地区军事代表局驻昆明地区第二军事代表室, 云南 昆明 650032)

**摘要:** 为摸清微光像增强器塑料外壳受力规律, 掌握质量变化特点, 运用形变理论, 建立硅橡胶形变数学模型, 拟合塑料外壳受力曲线, 据此确定微光像增强器塑料外壳出现开裂的必然性和寿命周期特点。结果表明: 数学模型与试验数据高度吻合, 能够表征塑料外壳受力情况及寿命变化规律。

**关键词:** 微光像增强器; 形变; 可靠性; 塑料外壳; 硅橡胶

**中图分类号:** TN223      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2021)05-0483-07

### Stress Analysis of the Plastic Shells of Image Intensifiers

TANG Qin, YANG Zhuang, SONG Haitao, YE Hongwei, ZHANG Xingyue

(The Second Military Representative Office of Chongqing Regional Military Representative Bureau in Kunming, Kunming 650032, China)

**Abstract:** To determine the law of stress on the plastic shells of image intensifiers and to identify the characteristics of quality change, the deformation theory is used in this study to establish a mathematical model of silicone rubber deformation and to fit the stress curves of plastic shells. Accordingly, the inevitability and life-cycle characteristics of the plastic shells of image intensifiers are determined. The results show that the mathematical model is in good agreement with the experimental data and can characterize the stress conditions and life variations of plastic shells.

**Key words:** image intensifier, deformation, reliability, plastic shell, silicone rubber

## 0 引言

工程塑料制品在加工、使用和贮存过程中, 常因为内外部因素的影响, 出现开裂的现象<sup>[1-2]</sup>。经过可靠性试验后的微光像增强器样品一直存放于库房内, 存放3年以上的出现部分塑料外壳开裂现象, 3年以内的未出现开裂。观察发现, 大部分微光像增强器先从中部区域出现裂纹, 后沿径向向阴阳极两端扩张。本文采用形变理论, 首次对塑料外壳进行定量受力分析: 运用体积模量表征温度应力和吸潮应力, 建立微光像增强器内硅橡胶吸潮膨胀应力数学模型; 用Minitab对微光像增强器外径尺寸与温度进行拟合回归, 确定微光像增强器外径-温度变化方程; 测量了塑料外壳不同年份的抗拉强度, 定量描述了塑料外壳的抗拉强度和总应力发展趋势, 最终分析出塑料外壳受力规律、预计寿命。

## 1 微光像增强器应力研究

### 1.1 微光像增强器形变分析

任何物体受外力作用不能产生位移时, 其形状和尺寸将发生变化, 称之为形变。当形变不超过某一限度, 撤走外力后, 形变能随之消失, 称为弹性形变。当外力超过了某一限度后, 撤走外力形变不能完全恢复原状, 称之为塑性形变。表征物体抵抗弹性变形能力大小的物理量是弹性模量(杨氏模量), 它的定义为正向应力与正向应变的比值<sup>[3-4]</sup>:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $E$ 为弹性模量;  $\sigma$ 为正向应力;  $\varepsilon$ 为正向应变。

由于微光像增强器是将像增强管及高压电源整体灌封在塑料外壳中, 其受力情况与体积变化相关。因此分析时采用弹性模量另一种表达形式——体积模量表示, 它定义为产生单位体积应变时所需的压强<sup>[5-6]</sup>, 即:

收稿日期: 2021-02-06; 修订日期: 2021-03-26。

作者简介: 唐钦(1973-), 男, 四川遂宁人, 高级工程师, 主要从事光电装备质量监督工作。E-mail: 2302289947@qq.com。

$$k = -v \frac{\partial p}{\partial v} \quad (2)$$

式中： $p$ 为压强； $v$ 为体积； $k$ 为体积模量，由于材料受力时体积总是变小的，故 $k$ 值永为正值。

### 1.2 微光像增强器的温度应力

引起温度应力的基本条件是在约束下有温度的变化。产生温度应力的约束条件可分为外部变形的约束，相互变形的约束和内部各区域之间的变形约束<sup>[5]</sup>。

描述物质在热胀冷缩效应作用下，几何特性随温度变化而发生变化的规律性参数是热膨胀系数，可细分为线性热膨胀系数和体积热膨胀系数，本文要研究微光像增强器体积与温度之间的关系，采用体积热膨胀系数<sup>[5]</sup>：

$$\gamma = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dT} \quad (3)$$

式中： $\gamma$ 为体膨胀系数； $v$ 为物体的体积； $dv$ 为温度变化 $dT$ 所导致的体积变化。

微光像增强器由像增强管（含可伐合金、陶瓷、光纤面板、玻璃等组件）、高压电源（含电子元器件、硅橡胶、塑料）、硅橡胶和塑料外壳组成，详见图1。各组成材料的热传导系数差异较大，因此微光像增强器在特定的环境温度条件下，其内部的温度场分布比较复杂，其体积变化很难准确计算。因此本文主要应用体积模量进行应力模型分析，不同温度下由于材料体积热膨胀系数差异导致的应力变化只做定性的描述，不做定量分析。

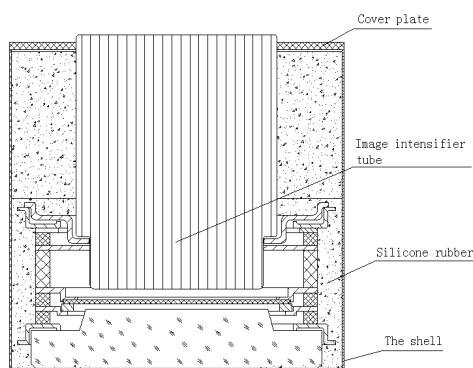


图1 像增强器示意图

Fig.1 Schematic diagram of image intensifier

### 1.3 微光像增强器吸潮分析

吸潮性是指物质在无任何外力作用暴露在大气环境中，会吸收空气中的水分的一种特性<sup>[8]</sup>。大部分物质吸附潮气后，体积会膨胀变大，对束缚其膨胀的物质产生力的作用。少部分物质吸附潮气后，体积虽然保持不变，但密度会相应变大，从而弹性模量也相应增加，也会产生额外的应力作用。

微光像增强器中的硅橡胶吸潮后会出现膨胀变大情况，产生应力，其变化机理可以用体积模量来表征，其他部分如金属、塑料外壳的吸潮性相对硅橡胶要小很多，可以忽略不计。

## 2 微光像增强器外壳受力分析

微光像增强器轴向受电源位置影响，硅橡胶分布较复杂，应力计算模型难于设计，根据观察可知其外壳开裂情况主要集中于径向方向，因此本文主要以径向方向所受应力进行分析。根据微光像增强器结构可知在试验和储存等过程中，在径向方向上，塑料外壳受到的力应为本身固有应力 $F_g$ 、温度应力 $F_t$ 和吸潮应力 $F_w$ 三者的叠加，即 $F = F_g + F_t + F_w$ 。为方便与塑料外壳抗拉强度进行对比，故以单位面积上的应力（压强）来描述受力情况，即 $P = P_g + P_t + P_w$ 。

### 2.1 固有应力计算

固有应力 $P_g$ 是指硅橡胶固化后被束缚在外壳内，发生弹性形变后对外壳的作用力，主要由微光像增强器结构、材料特性决定。计算方法：根据体弹性模量公式(2)可得：

$$\partial P = -k \frac{\partial v}{v} \quad (4)$$

因此若知道受束缚状态下的体积和不受束缚状态下的体积，就可以计算出体积变化率 $\partial v/v$ ，从而可以计算出固有应力的压强值。

方法：找新灌封的微光像增强器，去掉塑料外壳，使其不受外壳束缚，测量外径 $D_2$ ，得出自由状态下的体积为 $\pi D_2^2 h/4$ ，在相同条件下，测量未灌封塑料外壳的内径 $D_1$ ，得出受束缚状态下的体积为 $\pi D_1^2 h/4$ ，详见图2。故体积变化率为：

$$-\frac{\partial v}{v} = \frac{\frac{1}{4} \pi D_2^2 h - \frac{1}{4} \pi D_1^2 h}{\frac{1}{4} \pi D_1^2 h} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1^2}$$

因此固有应力 $P_g$ 为：

$$P_g = -k \frac{\partial v}{v} = k \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1^2} \quad (5)$$

实际计算： $D_1$ 实测值为35.69； $D_2$ 实测值为35.90。由公式(4)计算出固有应力：

$$P_g = k \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1^2} = 1.2 \text{ GPa} \times (35.90^2 - 35.69^2) / 35.69^2 = 14.17 \text{ MPa}$$

式中：硅橡胶的体弹性模量 $k$ 为1 GPa~1.2 GPa，公式中以1.2 GPa计算。

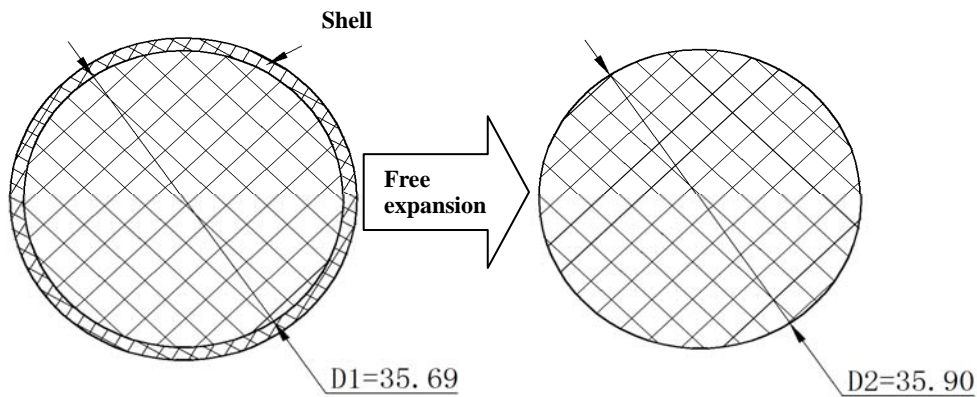


图2 固有应力示意图

Fig.2 Schematic diagram of natural stress

## 2.2 温度应力计算

温度应力  $P_t$  由微光像增强器在生产贮存过程中环境温度的变化大小决定。以常温 (+23℃) 状态下为初始状态, 当环境温度上升时, 微光像增强器内部的金属、陶瓷和硅橡胶会产生热胀作用, 此时外壳会受到硅橡胶的膨胀应力作用; 当环境温度下降时, 微光像增强器内部的金属、陶瓷和硅橡胶会产生冷缩作用, 此时硅橡胶不会对外壳产生应力作用, 相反外壳会对硅橡胶产生应力作用。由于微光像增强器内部成份复杂, 不能简单以某一物质的体积热膨胀系数来计算, 故采用体弹性模量来表征微光像增强器所受温度应力。

选取 2020 年灌封的 1XZ18/18WHS-1LE 像增强器进行温度试验, 测得其在常温状态下的外径均值  $H_c$  为 36.712 mm, 而后将像增强器在不同温度下各保

温 2 h, 测量特定温度状态下的外径  $H_t$ , 测试结果如表 1 所示。

根据测试结果, 假设微光像增强器外径  $H_t$  为因变量, 温度  $t$  为自变量,  $H_t$  和  $t$  的变化规律满足方程:  $H_t=f(t)$ 。运用拟合回归理论, 采用软件 Minitab 进行拟合回归, 结果如图 3。

由图 3 可以看出, 判定系数  $R^2=99.2\%$ , 接近 1;  $P=0.000$ , 远小于 0.05。说明回归方程显著, 即微光像增强器外径随温度变化的规律符合线性方程:

$$H(t)=0.002529t+36.65 \quad (6)$$

$R^2$  取值 [0,1],  $R^2$  越接近 1, 说明回归方程越优;  $P=0.05$  时, 回归方程置信水平为 95%,  $P=0.01$  时, 信水平为 99%,  $P$  值越小于 0.05, 说明回归方程置信水平越高。

表 1 不同温度下像增强器外径测试值

Table 1 External diameters of image intensifiers measured at different temperatures

Temperature/°C	Cathode extreme/mm	Middle region/mm	Anode extreme/mm	Average /mm
-54	36.497	36.487	36.510	36.498
-43	36.533	36.517	36.543	36.531
-32	36.567	36.553	36.573	36.564
-21	36.600	36.600	36.597	36.599
-10	36.633	36.627	36.643	36.634
1	36.657	36.667	36.667	36.663
12	36.683	36.683	36.693	36.687
23	36.717	36.713	36.713	36.712
34	36.733	36.740	36.737	36.737
45	36.760	36.753	36.753	36.756
56	36.783	36.783	36.780	36.782
67	36.810	36.807	36.803	36.807

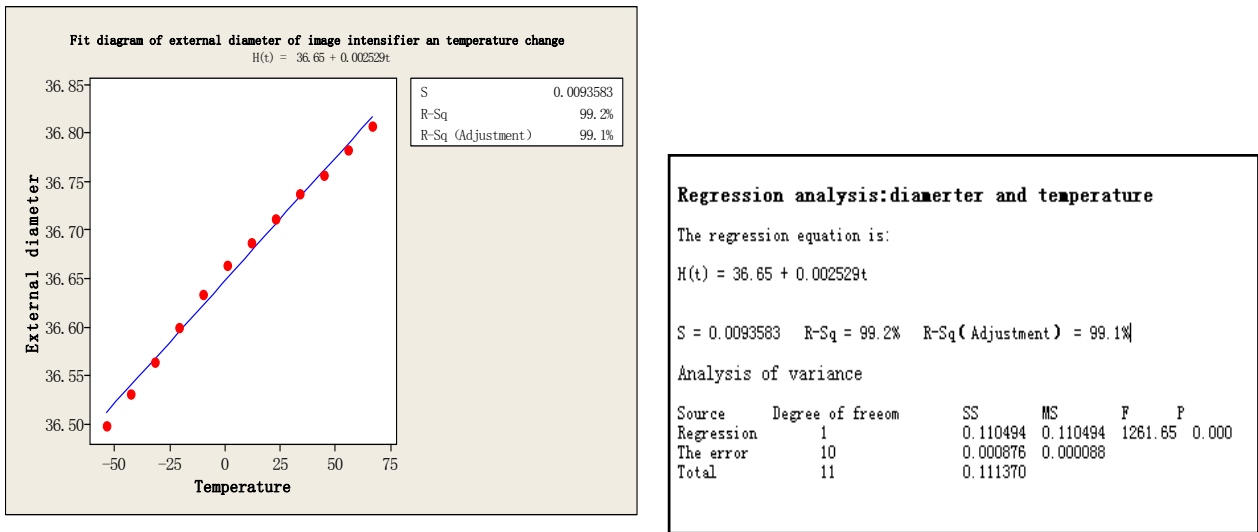


图3 像增强器外径与温度回归分析结果

Fig.3 Regression analysis results of image intensifier outer diameter and temperature

上述是将微光像增强器除塑料外壳后作为一个整体进行温度-体积测量,由于金属、陶瓷膨胀系数很小,相比硅橡胶膨胀系数可以忽略不计,因此可认为像增强器体积变化近似等于硅橡胶的体积变化。

即硅橡胶的体积变化率:

$$-\frac{\partial v}{v} = \frac{\frac{1}{4}\pi H_t^2 h - \frac{1}{4}\pi H_c^2 h}{\frac{1}{4}\pi H_c^2 h} = \frac{H_t^2 - H_c^2}{H_c^2}$$

因此塑料外壳受到来自硅橡胶的温度应力为:

$$P = -k \frac{\partial v}{v} = k \frac{H_t^2 - H_c^2}{H_c^2} \quad (7)$$

微光像增强器储存温度变化范围为 21℃~25℃,即最高温度为 25℃,因此在储存过程中因环境温度变化其最大的外径为:

$$H_t = 0.002529 \times 25 + 36.65 = 36.713$$

塑料外壳在 25℃时受到温度应力:

$$P_t = -k \frac{\partial v}{v} = k \frac{H_t^2 - H_c^2}{H_c^2} =$$

$$1.2 \times 10^9 \times \frac{36.713^2 - 36.712^2}{36.712^2} = 0.08 \text{ MPa}$$

式中:硅橡胶的体弹性模量  $k$  取值为 1.2 GPa;若以微光像增强器所受最高温度 70℃计算,则塑料外壳受到硅橡胶的压强为 7.53 Mpa。

### 2.3 吸潮后应力计算

以塑料外壳作为分析对象,则微光像增强器吸潮应力可看成是硅橡胶膨胀后对塑料外壳产生的力,其它如金属、陶瓷件由于受管壳、硅橡胶保护,潮气影响很小,且其吸水率远远小于硅橡胶,因此其吸潮产生的力可以忽略不计。

计算方法:

假设硅橡胶吸潮后微光像增强器除去外壳壁厚的直径为  $L_1$ ,硅橡胶未吸潮的像增强器除去外壳壁厚的直径为  $L_2$ ,则吸潮后的体积变化率  $\partial v/v$  为:

$$-\frac{\partial v}{v} = \frac{\frac{1}{4}\pi L_1^2 h - \frac{1}{4}\pi L_2^2 h}{\frac{1}{4}\pi L_2^2 h} = \frac{L_1^2 - L_2^2}{L_2^2}$$

代入公式(4)可得吸潮后硅橡胶膨胀对管壳产生的压强  $P_w$ :

$$P_w = -k \frac{\partial v}{v} = k \frac{L_1^2 - L_2^2}{L_2^2} \quad (8)$$

计算过程:

抽取 2013 年~2019 年可靠性试验像增强器作为吸潮的基准数据,2020 年在常温下测量其外径和  $L_1$  值,结果如表 2 所示。

表 2 吸潮微光像增强器外径和  $L_1$  值

Table 2 External diameter and  $L_1$  values of the moisture absorber image intensifier

Year	Diameter/mm	$L_1$ value/mm	Remarks
2013	36.92	35.92	Shell cracking
2014	36.89	35.89	Shell cracking
2015	36.88	35.88	Shell cracking
2016	36.83	35.83	Shell cracking
2017	36.76	35.76	Shell not cracked
2018	36.75	35.75	Shell not cracked
2019	36.72	35.72	Shell not cracked

抽取 2020 年灌封微光像增强器作为未吸潮的基准数据, 在常温下测量外径和  $L_2$  结果如表 3 所示。

表 3 未吸潮微光像增强器外径和  $L_2$  值

Table 3 External diameter and  $L_2$  values of non-moisture image intensifier

Serial number	Diameter/mm	$L_2$ value /mm	Average /mm	Note
1	36.70	35.70		
2	36.71	35.71		
3	36.73	35.73	35.71	The wall Thickness of the shell is 0.50 mm
4	36.70	35.70		
5	36.71	35.71		

根据公式(8)可以计算不同年份微光像增强器硅胶吸潮后外壳受到的应力如表 4 所示。

### 2.4 总应力计算

由总压强为:  $P = P_g + P_t + P_w$  可知, 塑料外壳总应力应为固有应力、温度应力和吸潮应力之和, 因此不同年份塑料外壳受到的总应力如图 4 所示。

由图 4 可知, 由于温度、吸潮等原因, 塑料外壳存储的时间越长, 其受到的总应力越大。

### 3 塑料外壳抗拉强度分析

高分子材料普遍存在老化现象, 在其加工、使用和贮存过程中, 由于内外因素的综合影响, 逐步发生

物理化学性质变化, 物理性能变坏, 以致最后丧失其使用价值<sup>[9-10]</sup>。工程塑料是应用广泛的高分子材料, 其发生老化后, 抗拉强度会有所降低。

为分析不同年份塑料外壳的抗拉强度, 采用试验法选取 2013~2020 年的微光像增强器外壳进行拉力试验, 2017~2020 年的样品从库房随机抽取, 2013~2016 年从开裂产品中抽取, 实验结果见图 5。

由图 5 可知, 塑料外壳抗拉强度的上限值、下限值和均值均随使用年限加长而呈现下降趋势, 其中 2016 年(第 4 年)有较明显的下降趋势。

### 4 塑料外壳强度与应力变化的趋势

根据上述分析情况可知, 塑料外壳受到的总应力逐年上升, 而抗拉强度逐年下降, 为了分析两者的相互关系和趋势, 将塑料外壳受到的总应力和抗拉强度进行了对比, 结果如图 6 示。

由图 6 可见, 微光像增强器存放年限越久, 塑料外壳的抗拉强度越小, 所受总应力越大, 到第 7 年时已趋于相同。说明按其设计, 塑料外壳寿命约为 7 年。但由于受生产过程各种因素影响, 如划伤、腐蚀等, 塑料外壳局部抗拉强度会显著变小, 加之从图 5 可以看出, 从第 4 年开始, 抗拉强度下限值有较大幅度的下降, 就可能出现外壳开裂的情况, 以后随着年限增长, 开裂的比例不断增加, 这也与实际情况相符。

表 4 不同年份像增强器吸潮应力值

Table 4 Moisture absorption stress values of image intensifier in different years

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Natural stress/MPa	14.10	12.12	11.45	8.08	3.37	2.69	0.68	0

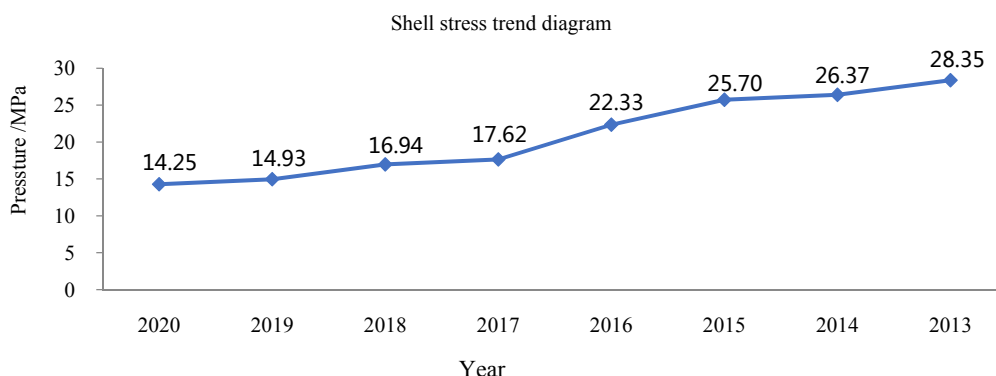


图 4 像增强器外壳受力趋势图

Fig.4 Force trend of image intensifier shell

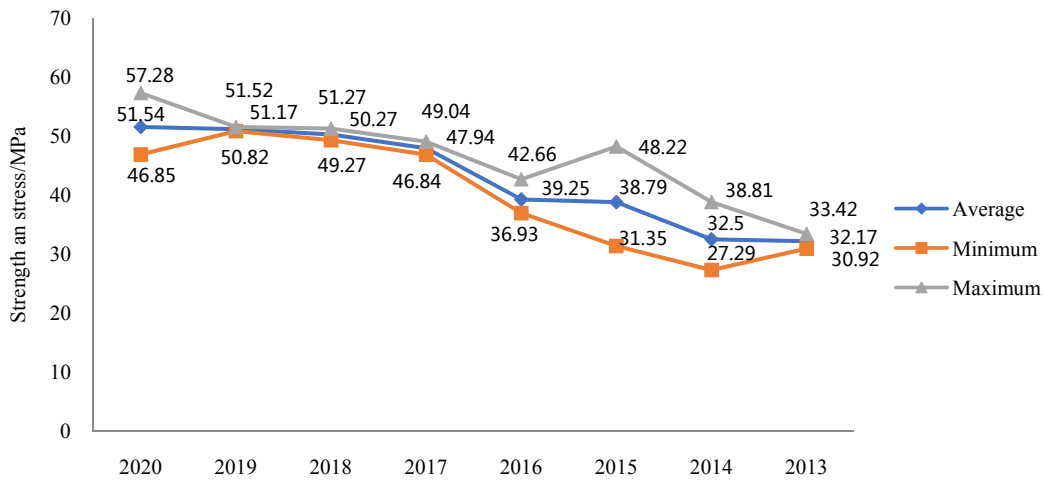


图5 外壳强度趋势示意图  
Fig.5 Tensile strength trend diagram of shell

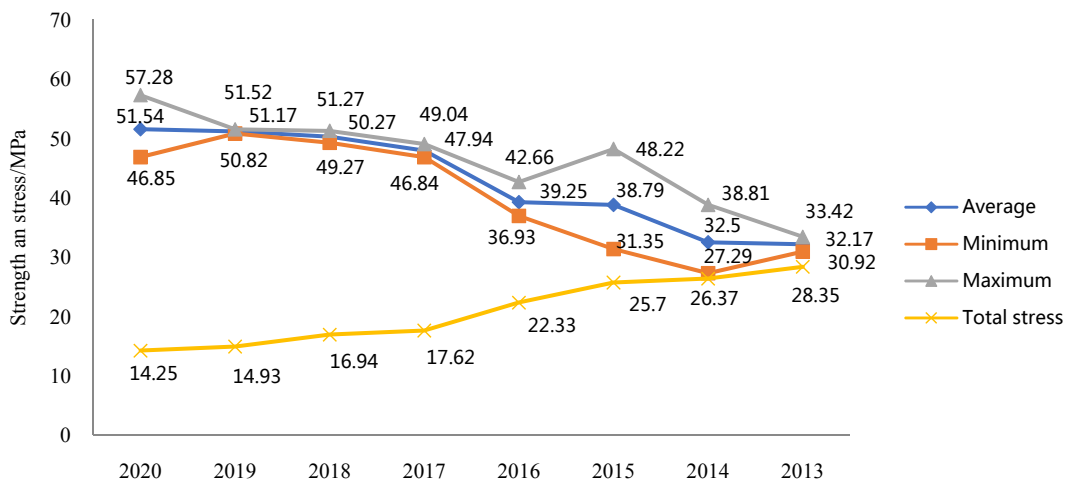


图6 外壳强度与受力趋势图  
Fig.6 Shell tensile strength and stress trend diagram

对像增强器改进设计的建议:

- 1) 加大塑料外壳壁厚尺寸。通过加厚壁厚, 增加外壳的抗拉强度, 可显著提高塑料外壳的寿命。
- 2) 改进塑料外壳材质。选取抗拉强度更高的材料作外壳, 可以提高外壳的寿命。

## 5 结束语

本文分析了微光像增强器的形变、温度应力和吸潮问题, 首次对塑料外壳的受力情况进行了定量分析, 并对不同年份塑料外壳的抗拉强度进行了测量、拟合, 得出其抗拉强度数学模型, 为微光像增强器的设计提供了重要的指导意义。同时, 预计塑料外壳7年寿命也大于微光像增强器3年的质量保证期要求, 加之其在整机产品中一般采用过盈配合, 会受到外力影响, 塑料外壳不会只受内应力作用, 一般不会出现

开裂情况。只有在自由状态下储存时间过长或储存环境不符合要求时, 才可能出现塑料外壳开裂的情况。

## 参考文献:

- [1] 王淑芬. 浅谈塑料制品的应力开裂[J]. 中国科技信息, 2009(12): 182-182.  
WANG Shufen. Discussion on stress cracking of plastic products[J]. *China Science and Technology Information*, 2009(12): 182-182..
- [2] 张庭跃, 胡萍, 陈倩, 等. ABS工程塑料应力开裂现象综合分析及表征[J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38(1): 36-39.  
ZHANG Tingyue, HU Ping, CHEN Qian, et al. Comprehensive analysis and characterization of stress cracking phenomenon of ABS engineering plastics[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2009, 38(1): 36-39.
- [3] 程尧舜. 弹性力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 2009.  
CHEN Yaoshun. *Fundamentals of Elastic Mechanics*[M]. Shanghai: Tong

- ji University Press, 2009.
- [4] 刘鸿文. 简明材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.  
LIU Hongwen. *Concise Materials Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [5] 胡庚祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010.  
HU Gengxiang, CAI Xun, RONG Yonghua. *Fundamentals of Materials Science*[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2010.
- [6] 丁钟生. 电负性与无机材料体积模量研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.  
DING Zhongsheng. *Electronegativity and Volume Modulus of Inorganic Materials*[D]. Dalian: Dalian University of Technology.
- [7] 唐世斌, 唐春安, 朱万成, 等. 热应力作用下的岩石破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2071-2078.  
TANG Shibin, TANG Chunan, ZHU Wangcheng, et al. Analysis of rock failure process under thermal stress[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2071-2078.
- [8] 石明生, 罗静, 张蓓. 高聚物注浆材料吸水特性及温度变化对体积影响试验研究[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 289-291.  
SHI Mingsheng, LUO Jing, ZHANG Bei. Experimental study on water absorption characteristics of polymer grouting material and influence of temperature variation on volume[J]. *Chinese & Foreign Highway*, 2010, 30(3): 289-291.
- [9] 化学工业部合成材料老化研究所. 塑料和橡胶的气候老化[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1980.  
Institute of Synthetic Materials Aging Ministry of Chemical Industry. *Climate Aging of Plastic and Rubber*[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Literature Press, 1980.
- [10] 高伟斌, 张枝苗. 高分子材料老化与防老化的研究[J]. 国外塑料, 2009, 27(11): 40-44.  
GAO Weibin, ZHANG Zhimiao. Study on aging and anti-aging of polymer materials[J]. *Foreign Plastics*, 2009, 27(11): 40-44.