

DOI: 10.3901/JME.2019.12.091

# 基于正交试验的玻璃壳热应力影响因素分析\*

钱小辉<sup>1,2,3</sup> 马骁妍<sup>1,2</sup> 秦中华<sup>1,2</sup> 侯少静<sup>1,2</sup> 徐美杭<sup>1,2</sup>  
张鹏<sup>2,3</sup> 朱自安<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院大学核探测与核电子学国家重点实验室 北京 100049;
2. 中国科学院高能物理研究所 北京 100049;
3. 中国科学院大学核技术及应用学院 北京 100049)

**摘要:** 为研究江门中微子试验(JUNO)光电倍增管(PMT)玻璃壳在温度载荷下的应力分布,以避免玻璃壳发生脆性破坏,对不同灌封胶材料下的玻璃壳热应力进行有限元模拟分析。采用正交试验方法,选取灌封胶材料属性参数中的弹性模量、泊松比和热膨胀系数作为研究因素,建立  $L_{25}(5^3)$  正交表并得到 25 组数值模拟方案。对数值计算结果进行极差和方差分析,结果显示影响设计指标的主要因素为弹性模量和热膨胀系数,次要因素为泊松比。弹性模量对玻璃壳热应力有显著影响,热膨胀系数对玻璃壳热应力有一定影响,泊松比对玻璃壳热应力无显著影响。对各因素水平的算术平均值进行曲线拟合,提出基于拟合函数解析解的灵敏度分析方法得到设计指标对各因素的敏感程度。结果表明,玻璃壳热应力对不同灌封胶材料的各参数敏感度不同。实际工程可针对最大敏感度参数进行材料的改性工作,从而使得灌封胶材料的选用和改性更具有针对性和方向性,研究结果对实际工程具有极强的指导意义和参考价值。

**关键词:** 热应力; 正交试验; 方差分析; 曲线拟合; 灵敏度分析

**中图分类号:** TG156

## Analysis of Glass Shell's Thermal Stress Based on Orthogonal Experiment

QIAN Xiaohui<sup>1,2,3</sup> MA Xiaoyan<sup>1,2</sup> QIN Zhonghua<sup>1,2</sup> HOU Shaojing<sup>1,2</sup>  
XU Meihang<sup>1,2</sup> ZHANG Peng<sup>2,3</sup> ZHU Zian<sup>1,2,3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;
3. School of Nuclear Technology and Applications, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049)

**Abstract:** In order to understand the glass shell's stress of PMT applied in the Jiangmen Underground Neutrino Observation (JUNO) under temperature load to avoid glass shell breakage, the effect of different potting adhesives on the glass's thermal stress is simulated. In the orthogonal test, the material's elastic modulus, Poisson ratio and thermal expansion coefficient are selected as the research factors. The  $L_{25}(5^3)$  orthogonal array is established and there are total 25 sets of numerical simulation schemes. According to the results of range analysis and variance analysis, the primary factor affecting glass's thermal stress is modulus and thermal expansion coefficient. The secondary factor is the Poisson ratio. The elastic modulus has a significant effect on the thermal stress of glass shell. The thermal expansion coefficient has a certain effect on the thermal stress of glass shell. And Poisson's ratio has no significant effect on the thermal stress of glass shell. Curve fitting for the arithmetic mean of each factor level is done and a sensitivity analysis method based on the analytic solution of fitting function is proposed to obtain the sensitive of the design index to each factor. The material modification can be carried out according to the maximum sensitivity parameter. So the selection and modification of the potting material is more pertinence and directivity The research results have great guiding significance and reference value for the practical project.

**Key words:** thermal stress; orthogonal test; variance analysis; curve fitting; sensitivity analysis

\* 中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(XDA10011100)。  
20180531 收到初稿, 20190221 收到修改稿

## 0 前言

江门中微子试验(JUNO)<sup>[1-2]</sup>主要对反应堆中产生的中微子进行探测。其原理为中微子通过与靶物质反应而发光,光电倍增管(Photomultiplier tube, PMT)能够收集反应得到的微弱信号,从而探测中微子各种物理性质<sup>[3]</sup>。本文所涉及的 508 mm(20 in)光电倍增管<sup>[4-6]</sup>长期放置在温度为 20 °C 深 40 m 的水下,因此需要对光电倍增管后端的电子学进行封装,图 1 为一种被称为 MCP-PMT 的 508 mm(20 in)光电倍增管。由于 MCP-PMT 为国内首创,和日本 hamamatsu 508 mm(20 in) PMT<sup>[7]</sup>结构有很大区别,因此需要对国产 MCP-PMT 进行不同于 hamamatsu PMT 的封装结构设计。MCP-PMT 在工厂封装完成后,运输至现场进行安装。根据项目进度计划,从封装、运输到最终安装将会持续大概 1 年左右,因此运输及安装过程中存在温度载荷导致光电倍增管灌封区域的玻璃壳产生额外热应力,当应力过大时使得光电倍增管玻璃壳发生破坏失效。为最大限度地涵盖所有可能面临的环境所造成的温度变化,数值计算考虑±20 °C 的温度载荷对光电倍增管热应力的影响。

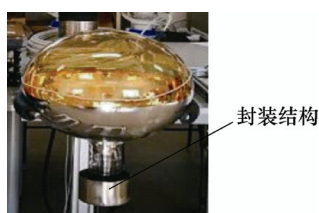


图 1 20in MCP-PMT

当前光电倍增管后端密封结构已经基本确定,如图 2 所示,光电倍增管后端的玻璃过渡节和可阀的连接部位是薄弱点,在温度等载荷作用下极易从该处破裂,图 3 为光电倍增管玻璃壳和可阀连接部位开裂情况。因此,灌封胶的使用和选取将至关重要,首先要对连接薄弱点起到一定的保护作用,避免过大的水压将其压坏;其次要起到密封作用,防

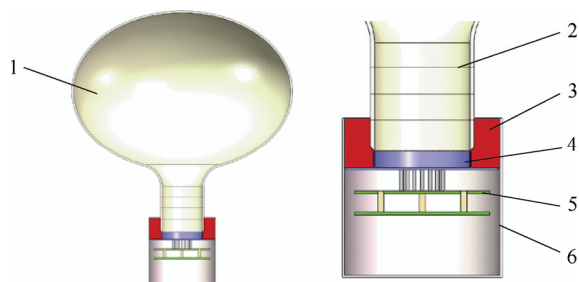


图 2 光电倍增管结构

1. 光电倍增管球壳 2. 光电倍增管过渡节 3. 灌封胶  
4. 可阀 5. 电子学板 6. 不锈钢薄壳

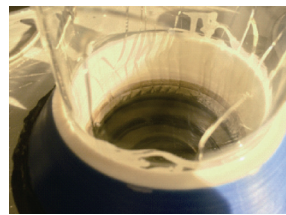


图 3 光电倍增管可阀和玻璃过渡节连接部位开裂

止水进入灌封腔体内造成电子学的短路;最后,需要防止光电倍增管在运输和安装过程中温度载荷作用下灌封胶对玻璃连接部位额外引入过大的应力造成玻璃连接处破坏。本文将对最后一项内容进行研究。

灌封胶材料可选取的种类较多,根据不同的性能特点可分为环氧树脂灌封胶、有机硅灌封胶、无机类灌封胶和聚氨酯灌封胶,并且可进行一定配方的配比来改变材料的属性<sup>[8]</sup>,本文将针对不同灌封胶材料进行属性的抽象化研究。根据热应力物理方程,影响结构热应力的因素主要为材料的弹性模量、泊松比和热膨胀系数,本文将通过正交试验分析方法<sup>[9-10]</sup>探索该三种因素对玻璃壳热应力的影响规律。为提高对玻璃壳热应力的分析精度,建立  $L_{25}(5^3)$  正交表并得到 25 组数值模拟方案。对数值模拟结果进行全局的极差分析和方差分析,得到影响结构热应力的主要因素和次要因素。同时对各因素水平算术平均值进行曲线拟合,根据拟合得到的规律函数提出基于拟合函数解析解的敏度分析方法来判断玻璃壳热应力对各因素的敏感程度,从而使得在实际操作中对灌封胶的选取和材料配方调整更具有针对性和方向性。

## 1 有限元数值模拟和正交试验

灌封胶主要表现为弹塑性行为,图 4a 为环氧树脂灌封胶的加载曲线,其材料本构模型更加接近理想弹塑性模型<sup>[11-12]</sup>。但在实际的载荷工况下,灌封胶均未达到塑性屈服阶段。为了便于研究材料属性对玻璃壳的热应力影响,本文对灌封胶的材料属性进行线性抽象化,即不针对某一具体灌封胶材料,

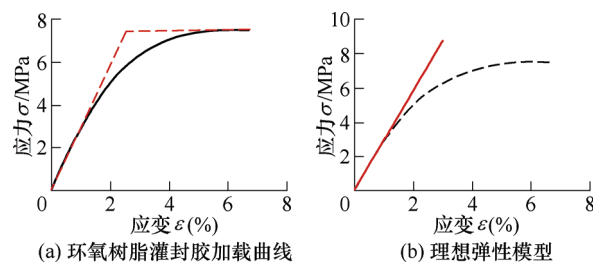


图 4 灌封胶本构模型曲线

同时胶的本构模型使用理想线弹性模型而不考虑材料的塑性阶段,如图3b所示。

### 1.1 弹性热应力问题的有限元方程

当物体内部存在温度差  $\Delta T$  时,这个温度差将引起物体的热膨胀而产生应变。该物体的应力应变物理方程由于增加了热膨胀应变而变为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \mu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})] + \alpha \Delta T \\ \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \mu(\sigma_{yy} + \sigma_{xx})] + \alpha \Delta T \\ \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}, \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}, \gamma_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为热膨胀系数,  $E$  为材料弹性模量;  $\mu$  为材料的泊松比;  $G$  为材料的切变模量,  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ 。

将式(1)写成张量形式

$$\varepsilon = D^{-1} \sigma + \varepsilon_0 \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_0$  为由于热变形产生的初始应变。

弹性问题虚功原理<sup>[13]</sup>的一般表达式为  $\delta U - \delta W = 0$ , 即

$$\int_{\Omega} (\delta \varepsilon^T \sigma - \delta u^T f) d\Omega - \int_{\Gamma_{\sigma}} \delta u^T \bar{T} d\Gamma = 0 \quad (3)$$

将热应力物理方程式(2)代入式(3)中,可得到包括温度应变在内的用以求解热应力问题的最小位能原理,其泛函表达式如下

$$\Pi_p(u) = \int_{\Omega} \left( \frac{1}{2} \varepsilon^T D \varepsilon - \varepsilon^T D \varepsilon_0 - u^T f \right) d\Omega - \int_{\Gamma_{\sigma}} \delta u^T \bar{T} d\Gamma \quad (4)$$

将求解域  $\Omega$  进行有限元离散,得到有限元求解方程

$$Ku = P_f + P_T + P_{\varepsilon_0} \quad (5)$$

式中,  $P_f$ 、 $P_T$  分别是体积载荷和表面载荷引起的载荷项,  $P_{\varepsilon_0}$  是温度引起的载荷项。

与一般弹性问题相比,热应力有限元方程的载荷端增加了温度等效载荷  $P_{\varepsilon_0}$ 。

### 1.2 有限元模型

江门中微子试验中所用的光电倍增管结构如图2所示。光电倍增管上部为椭球形玻璃壳,厚度为4 mm,由于玻璃壳和下端可阀热膨胀系数不一致,因此需要通过一段过渡节将两者固接在一起。过渡节厚度为2 mm,可阀厚度为1 mm。可阀后端连接电子学引板,需用灌封胶将其密封在不锈钢薄壳内部。

光电倍增管有限元模型如图5所示。在有限元模型中,由于玻璃壳、过渡节、可阀和不锈钢薄壳

的壁厚相对于自身几何尺寸较小,因此均可采用 S4R 壳单元,其中不锈钢薄壳厚度为3 mm。灌封胶使用 C3D8R 实体单元,结构与灌封胶接触面处,网格节点约束位移大小相等和方向相同。

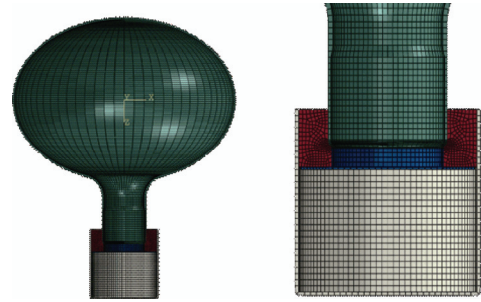


图5 光电倍增管有限元模型

除了灌封胶外,各部件的材料属性如表1所示。其中玻璃壳过渡节的热膨胀系数从  $3.3 \times 10^{-6} \sim 4.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

表1 材料属性表

因素	密度 $\rho /$ ( $\text{kg/m}^3$ )	弹性模量 $E /$ GPa	泊松比 $\mu$	热膨胀系数 $\alpha /$ ( $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
玻璃壳	2 230	67	0.2	3.3
玻璃壳过渡节	2 230	67	0.2	3.3~4.7
可阀	7 800	138	0.3	4.7
不锈钢薄壳	7 800	200	0.3	15

本文主要研究温度载荷作用下灌封胶对玻璃壳应力的影响,因此选取玻璃壳上端椭圆面作为固定面,远离灌封区域从而避免约束边界对关注区域的影响。

### 1.3 正交试验因素水平表

由于灌封胶有不同的材料可供挑选,且可进行一定配方的配比合成。根据式(1),影响物体的热应力主要控制参数为材料的弹性模量( $E$ )、泊松比( $\mu$ )和热膨胀系数( $\alpha$ ),因此将其作为正交试验的水平因素。根据前期调研的结果,可知灌封胶材料的弹性模量、泊松比和热膨胀系数取值范围,并制作如表2所示的正交试验因素水平表。为了在后续的函数拟合中能够得到更精确的拟合曲线,此处水平数选为5。

表2 因素水平表

水平	因素		
	弹性模量 $E /$ MPa	泊松比 $\mu$	热膨胀系数 $\alpha /$ ( $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )
1	50	0.3	40
2	100	0.34	60
3	200	0.38	80
4	300	0.42	100
5	400	0.46	120

## 2 数值模拟正交试验结果和分析

### 2.1 正交试验数值模拟结果

根据因素水平表,制作如表 3 所示的 5 水平正交试验表,总共 25 组参数。通过有限元稳态热应力数值计算<sup>[12,14]</sup>方法,得到各组参数下的玻璃壳 Mises 应力、升温 20 °C 时最大主应力和降温 20 °C 时最大主应力,由于升温 and 降温过程中, Mises 应力最大值不变,因此表格中不再区分 Mises 应力升温 and 降温工况。

表 3 5 水平正交试验表

试验 序号	因素			设计指标		
	$E$	$\mu$	$\alpha$	Mises 应力	升温 主应力	降温 主应力
1	1	1	1	2.09	1.83	1.28
2	1	2	2	4.40	3.69	2.97
3	1	3	3	7.77	6.38	5.42
4	1	4	4	13.10	10.65	9.28
5	1	5	5	22.78	18.40	16.24
6	2	1	2	6.75	5.84	4.19
7	2	2	3	11.41	9.59	7.51
8	2	3	4	18.01	14.89	12.21
9	2	4	5	28.06	22.96	19.33
10	2	5	1	9.21	7.78	5.84
11	3	1	3	17.25	15.00	10.40
12	3	2	4	26.14	22.24	16.46
13	3	3	5	38.36	32.18	24.79
14	3	4	1	11.47	10.20	6.44
15	3	5	2	26.46	22.41	16.59
16	4	1	4	31.04	27.12	18.21
17	4	2	5	44.11	37.90	26.77
18	4	3	1	12.64	11.73	6.26
19	4	4	2	27.21	23.79	15.77
20	4	5	3	49.57	42.25	30.32
21	5	1	5	47.67	41.89	27.18
22	5	2	1	13.36	12.85	6.46
23	5	3	2	27.58	24.83	14.75
24	5	4	3	47.54	41.54	27.27
25	5	5	4	77.32	66.42	45.89

可以发现,在试验 1 参数下,玻璃壳约束面处应力较大,如图 6 所示,可知此处应力受约束面影响较大,计算结果为不真实状态。但在远离约束面的灌封胶区域能够真实反映由于温度载荷所引起的应力水平,此处玻璃壳 Mises 应力大小为 2.09 MPa,升温 20 °C 时第一主应力大小为 1.83 MPa。由于胶在温度载荷作用下发生膨胀,挤压玻璃壳和可阀。同时,玻璃壳和可阀自身受到温度载荷的作用,而两者的结构刚度又不一致,因此玻璃壳在连接处会

产生较大应力。另外,玻璃壳过渡节出现应力环状分布,主要是由于过渡节中各段玻璃材料的膨胀系数不一致所导致。在试验 25 参数下,灌封胶 Mises 应力最大值为 3.35 MPa,根据图 4a 理想弹塑性线性强化模型,虽然该值接近了图 4a 的拐点,但是同时也应该注意,如果采用试验 25 的参数材料,其本构的拐点应力值也会有所提高,因此灌封胶材料仍处于弹性阶段。玻璃壳最大主应力达到最大值,为 66.42 MPa。由于玻璃为脆性材料,光电倍增管所使用的 G.G-17 玻璃抗拉强度为 40~120 MPa,其破坏强度受缺陷影响很大。因此,在灌封区域的玻璃壳在试验 25 参数下很可能已经发生破坏失效。但为了研究灌封胶各参数属性对玻璃壳应力的影响,仍将其作为有效数据,以便完整地统计设计参数和设计指标之间的关系。

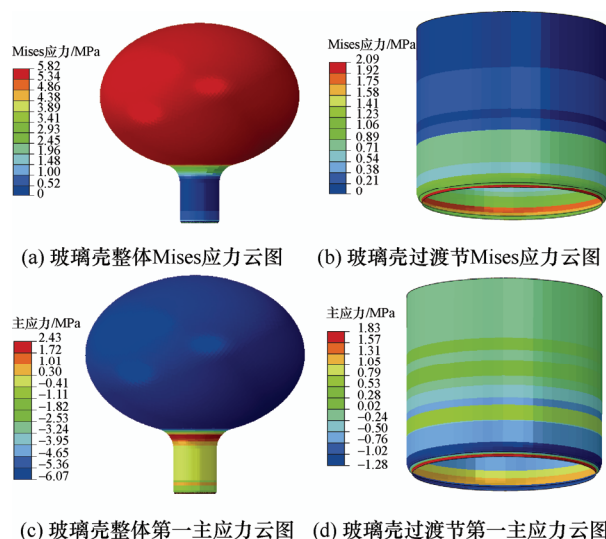


图 6 试验 1 参数下升温 20 °C 玻璃壳热应力云图

### 2.2 各因素对玻璃壳热应力的影响关系

根据表 3 中的数值计算结果,分别求出  $E$ 、 $\mu$ 、 $\alpha$  三个因素在 5 个水平下的 Mises 应力、升温主应力和降温主应力的算术平均值,分别记为  $M-i$ 、 $Z1-i$  和  $Z2-i$ ,如表 4 所示。根据各因素水平的算术平均值计算极差  $R_M$ 、 $R_{Z1}$  和  $R_{Z2}$ 。

将表 4 各因素算术平均值绘制成图 7~9 所示的各因素对玻璃壳热应力关系图。通过图 7~9 可以发现, Mises 应力、升温主应力和降温主应力与各因素的关系基本一致。材料的弹性模量和热膨胀系数对玻璃壳应力的影响表现为正相关关系,材料弹性模量、热膨胀系数越小,玻璃壳的热应力也越小。而泊松比在起初阶段对应力影响表现较为平缓,在大于 0.37 后开始急速上升,基本呈现正相关关系。



表 4 各设计指标算数均值和极差 MPa

算数均值	Mises 应力	升温主应力	降温主应力
M-1	10.03	20.96	9.75
M-2	14.69	19.88	18.48
M-3	23.94	20.87	26.71
M-4	32.91	25.48	33.12
M-5	42.69	37.07	36.20
$R_M$	32.66	17.19	26.45
Z1-1	8.19	18.34	8.88
Z1-2	12.21	17.25	16.11
Z1-3	20.41	18.00	22.95
Z1-4	28.56	21.83	28.26
Z1-5	37.51	31.45	30.67
$R_{Z1}$	29.32	14.20	21.79
Z2-1	7.04	12.25	5.26
Z2-2	9.82	12.03	10.85
Z2-3	14.94	12.69	16.18
Z2-4	19.46	15.61	20.41
Z2-5	24.31	22.98	22.86
$R_{Z2}$	17.27	10.95	17.60

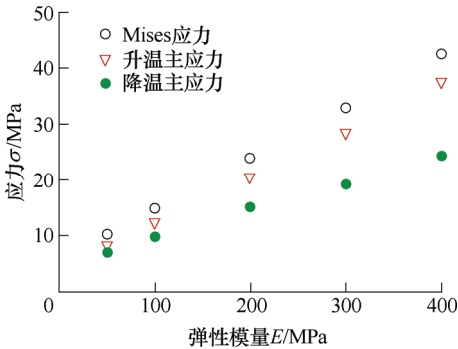


图 7 弹性模量对玻璃壳应力影响

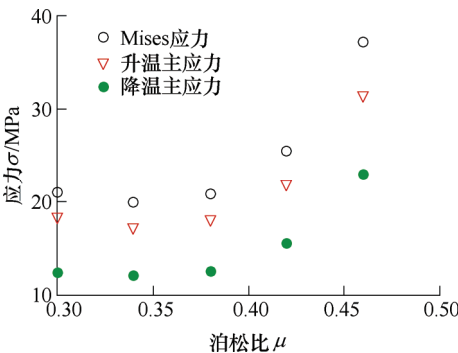


图 8 泊松比对玻璃壳应力影响

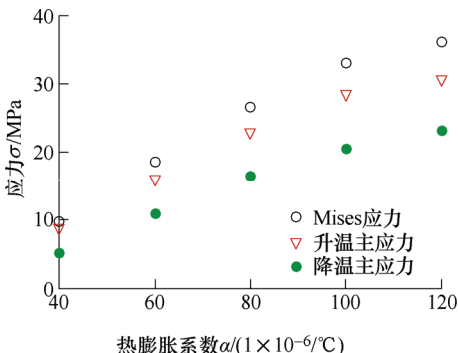


图 9 热膨胀系数对玻璃壳应力影响

通过表 4 的极差  $R$  计算可以看出，指标 Mises 应力弹性模量因素的极差值最大，为 32.66，表明材料的弹性模量对玻璃壳的热应力影响最大；泊松比因素的极差值最小，为 17.19，表明该因素对玻璃壳的热应力影响相对较小。材料的热膨胀系数因素极差值略小于弹性模量因素极差值，因此影响玻璃壳 Mises 应力的主要因素为灌封胶的弹性模量和热膨胀系数，泊松比是影响玻璃壳热应力的次要因素。各因素对玻璃壳应力影响的重要性从大到小分别为热膨胀系数、弹性模量和泊松比。同理对升温 and 降温的主应力指标进行分析时，也可得出影响主应力的主要因素是弹性模量和热膨胀系数，次要因素为泊松比。

通过图 7~9 表明，各应力指标具有相似的变化趋势。因此在此进行方差分析时，主要针对 Mises 应力指标下各因素方差分析，方差分析见表 4。

由表 5 的 Mises 应力方差分析表明，材料的弹性模量对玻璃壳 Mises 应力有显著影响，热膨胀系数对玻璃壳 Mises 应力有一定影响，而泊松比对玻璃壳应力无显著影响。方差分析结果和极差分析结果一致。

表 5 Mises 应力各因素方差分析

变异来源	SS	df	MS	F	F0.1(4,12)
弹性模量 $E$	3 534.1	4	883.53	4.41*	2.48
泊松比 $\mu$	1 026.0	4	256.50	1.28	F0.05(4,12)
热膨胀系数 $\alpha$	2 344.9	4	586.23	2.93 <sup>0</sup>	3.26
误差	801.5	12	66.79		F0.01(4,12)
总变异	7 706.5	24			5.41

通过极差分析和方差分析，灌封胶应主要选用较低的弹性模量和热膨胀系数材料，才能达到最佳的降低玻璃壳热应力效果。

2.3 材料因素敏度分析

通过极差分析和方差分析，可以得到各因素对玻璃壳应力影响关系的重要程度和显著性影响判断，但是该指标主要表现为各因素所选取的全局区域对设计指标影响的作用大小，然后通过规律曲线选取最优的各因素参数配比。在实际情况下，灌封胶的三个参数无法同时都达到所选取的最优参数。当已经确定一种灌封胶材料后，就需要知道通过配方改变其中哪一种属性参数才能够最有效地降低玻璃壳应力。

本文根据表 4 的玻璃壳 Mises 应力指标的各因素下的 5 个水平算术平均值分别进行曲线拟合。从图 7~9 可以发现，弹性模量和 Mises 应力主要表现为一次线性关系，而泊松比和热膨胀系数表现为较强的非线性。由于三个因素取值范围存在数量级的

差别,为了更好地比较三者是相当变化率下对应力的影响,本文对各因素的 5 个水平值进行均值处理,分别计算各因素水平均值  $A_E$ 、 $A_\mu$  和  $A_\alpha$ ,而后用各因素水平值分别除以相应因素水平均值,最终得到图 10~12 所示各因素对玻璃壳应力影响拟合曲线。

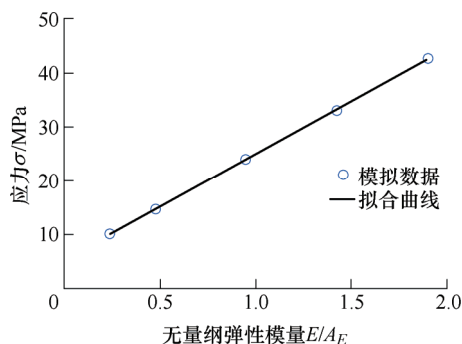


图 10 弹性模量和 Mises 应力拟合曲线

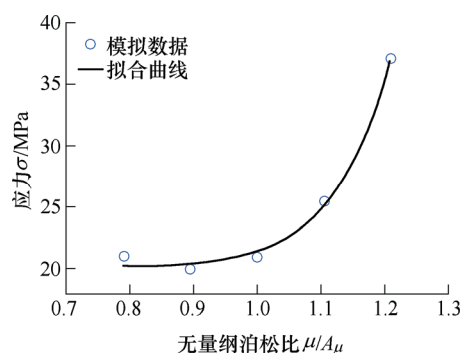


图 11 泊松比和 Mises 应力拟合曲线

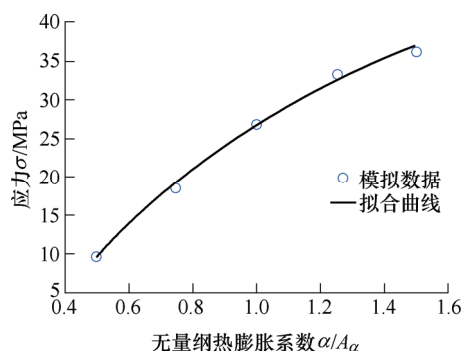


图 12 热膨胀系数和 Mises 应力拟合曲线

各因素的拟合函数表达式如下,并进行一阶求导,即得到了玻璃壳应力对各参数的敏感度。

弹性模量和 Mises 应力拟合函数如下

$$\sigma = 19.50E / A_E \quad (6)$$

式中,  $A_E = 210 \text{ MPa}$ , 拟合相关系数为 0.999 8, 拟合函数一阶求导得到

$$\sigma' = 19.50 \quad (7)$$

泊松比和 Mises 应力拟合函数如下

$$\sigma = 1.29(\mu / A_\mu)^{13.48} + 20.13 \quad (8)$$

式中,  $\bar{\mu} = 0.38$ , 拟合相关系数为 0.993 5, 拟合函

数一阶求导得到

$$\sigma' = 17.39(\mu / A_\mu)^{12.48} \quad (9)$$

热膨胀系数和 Mises 应力拟合函数如下

$$\sigma = 326.70(\alpha / A_\alpha)^{0.08} + 300.20 \quad (10)$$

式中,  $A_\alpha = 8 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , 拟合相关系数为 0.995 3,

拟合函数一阶求导得到

$$\sigma' = 25.16(\alpha / A_\alpha)^{-0.92} \quad (11)$$

Mises 应力对各因素的敏感度曲线如图 13~15 所示, Mises 应力对弹性模量的敏感度为一常数,而随着材料的泊松比逐渐增大,玻璃壳热应力对其敏感度也越大,且敏感度也在不断增强。而玻璃壳热应力对热膨胀系数的敏感趋势则相反,随着灌密封胶材料热膨胀系数的增加,玻璃壳热应力的敏感度在逐渐减弱。通过玻璃壳热应力的敏感度分析可以知道,玻璃壳热应力对泊松比和热膨胀系数的敏感度呈现较

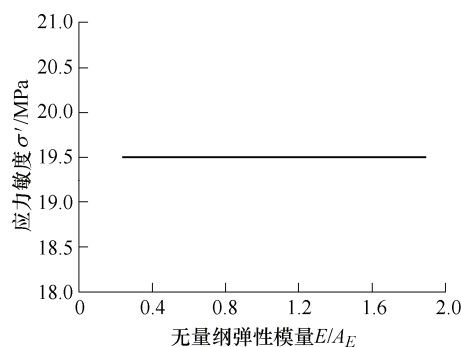


图 13 Mises 应力对弹性模量敏感度

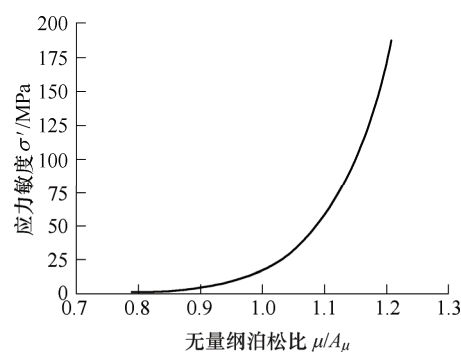


图 14 Mises 应力对泊松比敏感度

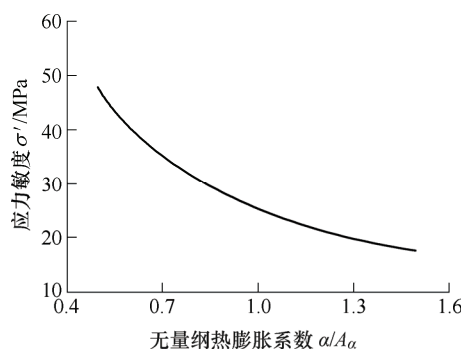


图 15 Mises 应力对热膨胀系数敏感度

强的非线性。在实际应用中,针对某一灌封胶材料的参数,可通过调整配方重点改善其中的一个或两个主要敏感参数,而忽略次要敏感参数。

表 6 列举了五种灌封胶材料状态下,玻璃壳热应力对各参数的敏度分析。当材料状态 1 时,弹性模量和热膨胀系数敏度值比较大,因此灌封胶改性方法应主要针对材料的弹性模量和热膨胀系数进行调整;当材料状态 5 时,泊松比敏度最大,因此灌封胶改性方法应主要针对材料的泊松比进行调整。通过敏度分析,使得对灌封胶的改性更具有针对性和方向性。

表 6 材料状态对玻璃壳热应力影响敏度分析表

材料 状态	弹性模量 $E$ / MPa		泊松比 $\mu$		热膨胀系数 $\alpha$ / ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	
	参数	敏度	参数	敏度	参数	敏度
1	50	19.50	0.30	0.91	40	47.75
2	100	19.50	0.34	4.35	60	32.84
3	200	19.50	0.38	17.43	80	25.19
4	300	19.50	0.42	60.78	100	20.50
5	400	19.50	0.46	189.15	120	17.32

### 3 结论

(1) 通过对玻璃壳热应力模拟数据的极差分析表明,影响玻璃壳热应力的主要因素为弹性模量和热膨胀系数,次要因素为泊松比。

(2) 通过方差分析 F 检验表明,弹性模量对玻璃壳热应力有显著影响,热膨胀系数对玻璃壳热应力有一定影响,泊松比对玻璃壳热应力无显著影响。

(3) 玻璃壳热应力对泊松比和热膨胀系数的敏感度呈现较强的非线性关系。灌封胶材料不同,玻璃壳热应力对材料各参数的敏度也不一样。

(4) 提出拟合函数解析解的敏度分析方法和正交试验相结合来指导实际的工程研究工作。对灌封胶材料的选用和改性更具有针对性和方向性,研究结果对实际工程具有极强的指导意义和参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] LU Haoqi. Status of the JUNO reactor anti-neutrino experiment[J]. Nuclear and Particle Physics Proceedings, 2017, 287: 143-146.
- [2] WANG Yuanqing, ZONG Liang, HENG Yuekun, et al. Application of acrylic vessel supported by stainless steel truss for JUNO central detector[J]. China Science Technology Science, 2014, 57(12): 2523-2529
- [3] VANNUCCI F. Interactions of neutrinos with matter[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2017, 95: 1-47.
- [4] CHANG Yaping, HUANG Guorui, HENG Yuekun, et al. The R&D of the 20 in MCP-PMTs for JUNO[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2016, 824: 143-144.
- [5] LUO Fengjiao, HENG Yuekun, WANG Zhimin, et al. PMT overshoot study for the JUNO prototype detector[J]. Chinese Physics C, 2016 (9): 89-94.
- [6] WANG Yifang, QIAN Sen, ZHAO Tianchi, et al. A new design of large area MCP-PMT for the next generation neutrino experiment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 695: 113-117.
- [7] YANG Anbo, WANG Zhimin, QIN Zhonghua, et al. The study of linearity and detection efficiency for 20 " photomultiplier tube[J]. Radiat Detect Technol Methods, 2019: 3-11.
- [8] 李坚辉, 张绪刚, 张斌, 等. 改性剂对环氧灌封胶性能的影响[J]. 化学与黏合, 2012, 34(5): 33-39.
- LI Jianhui, ZHANG Xugang, ZHANG Bin, et al. The effect of modifier on the properties of epoxy encapsulants[J]. Chemistry and Adhesion, 2012, 34(5): 33-39.
- [9] 徐仲安, 王天保, 李常英, 等. 正交试验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济, 2002, 12(5): 148-150.
- XU Zhongan, WANG Tianbao, LI Changying, et al. Brief introduction to the orthogonal test design[J]. Tech Information Development & Economy, 2002, 12(5): 148-150.
- [10] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
- LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [11] 王仲仁, 苑世剑, 胡连喜, 等. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
- WANG Zhongren, YUAN Shijian, HU Lianxi, et al. Harbin: Fundamentals of elasticity and plasticity mechanics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [12] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- WANG Xucheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [13] 梅凤翔, 周际平, 水小平. 工程力学[M]. 北京: 高等

教育出版社, 2003.

MEI Fengxiang, ZHOU Jiping, SHUI Xiaoping. Engineering mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.

- [14] 龙凯, 左正兴. 热结构稳态相应下的敏度分析方法和形状优化[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 72-76.

LONG Kai, ZUO Zhengxing. Sensitivity analysis method and shape optimization of thermo-structural steady response[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,

2007, 43(8): 72-76.

---

作者简介: 钱小辉, 男, 1987 年出生, 博士研究生。主要研究方向为精密机械工程。

E-mail: qianxh@ihep.ac.cn

马晓妍, 女, 1974 年出生, 硕士, 高级工程师, 硕士研究生导师。主要研究方向为机械工程, 中微子探测器设计。

E-mail: Maxy@ihep.ac.cn

朱自安(通信作者), 男, 1966 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为低温超导技术、精密机械工程。

E-mail: Zhuza@ihep.ac.cn