

米字型刻痕不锈钢膜片剩余厚度对破裂压力的影响研究

郑成斌 马瑞利 许 璠

(西安航天发动机有限公司, 西安 710000)



大于 $4\mu\text{m}$ 。

关键词: 米字型刻痕膜片; 剩余厚度; 破裂压力

中图分类号: TH162+.2 **文献标识码:** A

Study on the Influence of Residual Thickness of Stainless Steel Diaphragm with ‘UK-flag Shape’ Notched on Rupture Pressure

Zheng Chengbin Ma Ruili Xu Fan

(Xi'an Aerospace Engine Company Limited, Xi'an 710100)

Abstract: Diaphragm rupture pressure is one of the key performance parameters of ramjet igniter. The reliability of rupture pressure directly affects the success of engine ignition, and its main influencing factors are material, structure and residual thickness of notch. In order to determine the residual thickness of stainless steel ‘UK-flag shape’ notched diaphragm in the range of rated rupture pressure, theoretical calculation, simulation analysis, and diaphragm burst test to study the relationship between diaphragm rupture pressure and residual thickness. The reference residual thickness are used ($0.050\sim 0.067\text{mm}$) of the diaphragm in the required rupture pressure range ($3.0\sim 5.0\text{MPa}$) is obtained. However, in the actual production, the residual thickness of the diaphragm notch cannot be completely uniform. In order to ensure the stability and reliability of the diaphragm rupture pressure, the residual thickness range of the notch is finally determined as $0.055\sim 0.063\text{mm}$, and the dispersion is less than $4\mu\text{m}$.

Key words: ‘UK-flag Shape’ notched diaphragm; residual thickness; rupture pressure

1 引言

液体冲压发动机的点火是其工作过程中的重要环节,直接影响到液体冲压发动机的工作性能、可靠性和安全性^[1, 2]。膜片作为点火器的关键零件,发动机启

动时,膜片在一定压力下破裂,使发动机点火。其稳定可靠的破裂压力对发动机顺利点火起至关重要的作用。目前采用的方法主要是在膜片上预刻制一定形状的刻痕,以保证膜片的破裂压力。影响膜片破裂压力的因素有很多,如膜片原材料、刻痕形状及位置、刻

作者简介:郑成斌(1992),工程师,航空宇航科学与技术专业;研究方向:液体火箭发动机制造技术。

收稿日期:2021-07-30

痕剩余厚度等。宁建华^[3]对光刻技术在膜片加工中的应用进行了研究,通过细化工艺流程,提高了破裂压力的稳定性。白少卿^[4]基于纯剪切破坏原理对C型刻痕膜片进行了破裂压力稳定性研究,提出通过控制材料抗拉强度、刻痕剩余厚度和试验系统状态以达到控制膜片破裂压力的目的。邓康清^[5]等基于平板脆性断裂模型,分析了金属膜片裂纹深度与临界应力强度因子的关系。可以看出,尚无对米字型刻痕不锈钢膜片剩余厚度对破裂压力的影响研究。针对某米字型刻痕不锈钢材料膜片的剩余厚度进行研究,通过理论分析、仿真计算和试验验证相结合的方法分析破裂压力与膜片剩余厚度之间的关系,获得额定破裂压力下的剩余厚度加工范围,为膜片生产研制提供技术支持。

2 膜片技术状态

材料选用 022Cr19Ni10, 厚度 0.13mm, 固溶状态的不锈钢带材, 化学成分及力学性能见表 1、表 2。

表 1 022Cr19Ni10 化学成分 %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
0.03	0.75	2.00	0.045	0.03	8.00~12.00	17.50~19.50	0.1

表 2 022Cr19Ni10 力学性能 (固溶状态)

规定塑性 延伸强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长 率 $A/\%$	硬度值	硬度值	硬度值
			HBW	HRB	HV
≥ 180	≥ 485	≥ 40	201	92	210

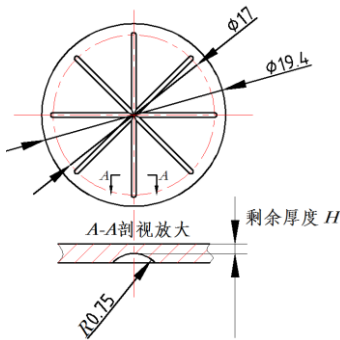


图 1 膜片结构

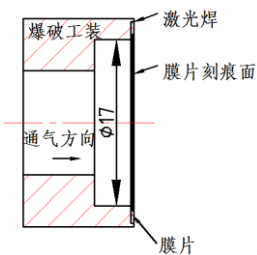


图 2 破裂试验示意图

为确保膜片破裂压力不受原材料性能波动影响,对膜片用 022Cr19Ni10 原材料提出了更加严格的要求,要求其抗拉强度为 580~650MPa,且不同位置抗拉强度散差不大于 40MPa,膜片结构如图 1 所示,该膜片为米字形刻痕膜片,刻痕位置位于膜片中心,膜片大小为 $\Phi 19.4\text{mm}$,刻痕长度为 17mm,刻痕底部为 R0.75

圆弧。发动机点火时,由火药燃烧引起的高压燃气由无刻痕面冲破膜片,从而使发动机顺利点火启动,据此进行的膜片破裂试验如图 2 所示,与产品装配过程的爆破工装上,并从图示方向通入高压气体,根据设计要求,合格膜片的破裂压力应为 3.0~5.0MPa。

3 破裂压力与剩余厚度分析

金属膜片的破裂压力与膜片的结构尺寸有密切关系。在原材料力学性能稳定,刻痕形状与位置一定的条件下,主要与刻制后膜片刻痕处剩余厚度 δ 有关^[5]。由于膜片在加压破裂过程中会受压向非加压侧鼓起变形,受力比较复杂,理论计算时以纯剪切破坏原理简化计算^[4]。膜片破裂时结构最薄弱处(即刻痕位置)发生屈服并撕裂。故膜片刻痕所在 $\Phi 17\text{mm}$ 圆周范围内所受压力等于破裂时各刻痕位置切应力。

$$p \times \frac{1}{4} \pi d^2 = 4d\delta\tau \quad (1)$$

其中, δ 为膜片剩余厚度, mm; τ 为材料剪切强度, MPa; d 为刻痕长度, mm; p 为膜片破裂压力, MPa。

对于塑性材料一般取剪切强度^[4] $\tau = k\sigma_b$, $k=0.5 \sim 0.6$, σ_b 为材料的抗拉强度。可根据膜片材料与实际破裂压力修正系数。所用 022Cr19Ni10 不锈钢带材经复验,首、尾部分抗拉强度 σ_b 分别为 594MPa、612MPa,符合要求,由此计算初步得出参考的剩余壁厚。可得:

$$\delta = \frac{p\pi d}{16k\sigma_b} = (0.031 \sim 0.061)\text{mm} \quad (2)$$

4 破裂压力仿真分析

4.1 仿真模型建立

根据膜片结构及爆破试验时的加压条件在 ANSYS Workbench 平台中建立相应的瞬态分析模型,膜片背面所受压力以 1MPa/s 的速度从 0MPa 升至 5MPa,分析膜片受压时的应力分布情况,和膜片爆破过程中,膜片应力的动态变化,从而得到不同厚度膜片爆破时的压力值。

膜片预刻制的米字型刻痕可以看成圆薄板上张开的狭长表面裂纹^[6~8],膜片受压变形较大,经历从平面到鼓起成半球状的弹塑性变形过程,所以在模拟过程中必须考虑塑性变形^[9~12],根据膜片原材料拉伸试验

结果, 仿真时材料参数中抗拉强度 σ_b 取 600MPa, 屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 取 240MPa, 断后伸长率 65%。弹性模量 209GPa, 泊松比 0.3^[13]。使用非线性求解器求解。

4.2 仿真结果分析

膜片等效应力、等效应变及变形分布见图3~图5, 仿真计算结果表明, 膜片变形最大处位于膜片靠近中

心位置; 膜片最大应力位于刻痕靠近膜片中心处, 这是由于刻痕处产生应力集中且膜片在受压变形过程中越靠近中心处应变越大所导致。为获得膜片发生破裂时对应的压力值, 分析计算结果: 由于加压速率为 1MPa/s, 故可根据膜片最大等效应力值超过其抗拉强度的时刻推算当时的破裂压力。

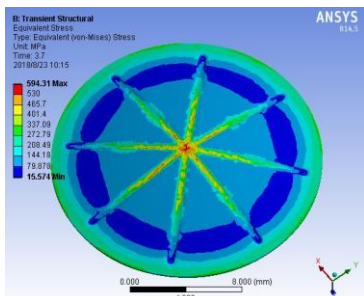


图3 等效应力

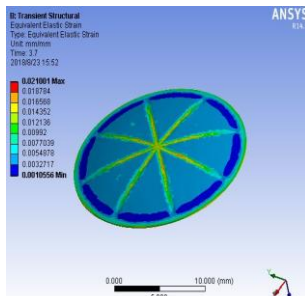


图4 等效应变

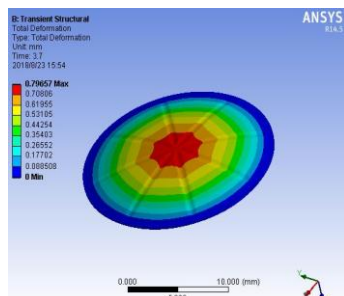


图5 变形

计算结果还表明, 随着时间变化、压力升高, 膜片最大应力即刻痕处应力值呈上升趋势, 上升的速率逐渐减小, 最小应力值则变化不大, 如图6所示。

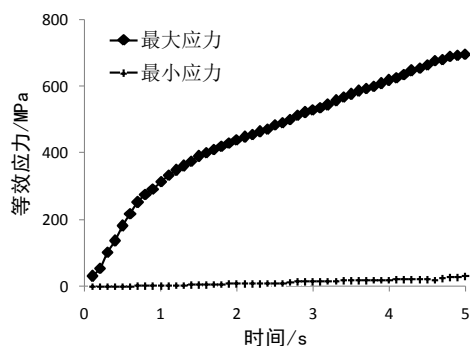


图6 应力变化趋势

度 $R^2=0.96$ 。

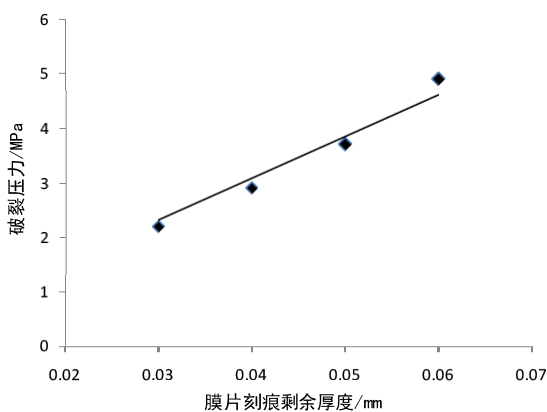


图7 破裂压力变化趋势

4.3 剩余厚度与破裂压力关系

表3 剩余厚度与破裂压力关系

序号	剩余厚度/mm	破裂压力/MPa
1	0.030	2.2
2	0.040	2.9
3	0.050	3.7
4	0.060	4.9

不同剩余厚度的膜片的破裂压力见表3。以膜片剩余厚度为 X 轴, 破裂压力为 Y 轴, 二者关系见图7。拟合膜片剩余厚度与破裂压力之间的关系, 得到膜片剩余厚度与破裂压力之间的关系为式(3)。

$$p=76.86\delta \quad (3)$$

其中: p 的单位为 MPa; δ 的单位为 mm; 拟合优

度 $R^2=0.96$ 。根据此式可修正前文中纯剪切破坏模型中的系数 k 为 0.48, 并不在前文所提出的 0.5~0.6 范围内, 说明以纯剪切模型中的线性关系描述破裂压力与刻痕剩余厚度的关系是不精确的。

5 膜片破裂压力试验与分析

5.1 膜片破裂试验

根据 3.0~5.0MPa 破裂压力范围要求, 按照式(3)计算出的膜片剩余厚度范围为 0.039~0.066mm, 在该范围内刻制膜片共 26 件, 采用激光焊接工艺将膜片焊于爆破工装上, 焊后按 QJ1842A—2011《结构钢、不锈钢熔焊技术要求》中 I 级焊缝要求检查并采用背压法氦质谱检漏, 要求等效漏率不大于 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa m}^3/\text{s}$,

检查合格后的膜片在气密试验台上以 1MPa/s 的速率升压进行膜片破裂试验，破裂前后部分膜片形貌如图 8、图 9 所示。膜片剩余厚度及破裂压力数据见表 4。



图 8 破裂前膜片



图 9 破裂后膜片

表 4 膜片爆破试验数据

序号	剩余厚度/mm	平均厚度/mm	散差/ μm	破裂压力/MPa
1	0.044~0.046	0.045	2	2.4
2	0.049~0.052	0.049	3	2.9
3	0.049~0.052	0.05	3	3
4	0.048~0.050	0.05	2	2.9
5	0.050~0.052	0.052	2	3.1
6	0.053~0.056	0.054	3	3.8
7	0.053~0.055	0.055	2	3.4
8	0.055~0.057	0.055	2	3.3
9	0.055~0.058	0.056	3	3.9
10	0.053~0.057	0.056	4	3.4
11	0.056~0.058	0.057	2	3.8
12	0.055~0.058	0.057	3	4
13	0.056~0.058	0.057	2	3.8
14	0.056~0.058	0.057	2	3.9
15	0.057~0.058	0.058	1	3.7
16	0.056~0.058	0.058	2	3.5
17	0.055~0.058	0.058	3	3.7
18	0.058~0.060	0.059	2	4.1
19	0.059~0.061	0.06	2	4.1
20	0.058~0.061	0.06	3	3.9
21	0.060~0.063	0.06	3	4.2
22	0.059~0.062	0.06	3	4.2
23	0.061~0.063	0.062	2	4.3
24	0.061~0.063	0.062	2	4.3
25	0.063~0.065	0.065	2	4.5
26	0.064~0.066	0.065	2	4.7

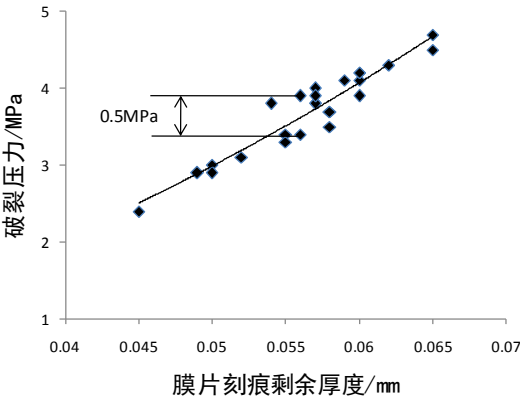


图 10 膜片破裂试验结果

以试验中不同膜片刻痕平均剩余厚度为 X 轴，破裂压力为 Y 轴绘制散点图，分析刻痕剩余厚度与膜片破裂压力之间的关系，如图 10 所示。

根据试验数据，以线性函数拟合膜片破裂压力与剩余厚度的关系为： $p=65.837\delta$ ，拟合优度 R^2 为 0.75，再次印证了实际膜片的破裂压力与剩余厚度的关系无法以纯剪切破坏理论中的线性函数精确描述，可能是由于在实际膜片刻制后刻痕处残余应力、破裂过程中实际为剪切拉伸综合作用、以及刻后膜片有轻微变形等因素综合作用而导致的，故改用二次多项式对破裂压力与剩余壁厚关系进行拟合，得到二者关系为：

$$p=805.33\delta^2+19.484\delta \tag{4}$$

其中： p 的单位为 MPa； δ 的单位为 mm；拟合优度 $R^2=0.9$ ，说明以该关系描述膜片破裂压力与刻痕处剩余厚度之间的关系是较准确的。

5.2 差异原因分析

根据破裂压力 3.0~5.0MPa 的要求范围，可筛选出的膜片剩余厚度为 0.050~0.067mm。理论计算、仿真及试验结果存在差异的主要原因为以下三方面：

a. 理论计算采用简化的纯剪切模型，仅考虑了膜片变形过程中切应力，而未考虑拉应力的影响，无法对膜片加压至破裂过程的受力过程及状态进行精准的分析。由于未考虑拉应力的影响，故理论计算所得膜片参考剩余厚度最低。

b. 仿真计算虽考虑了膜片加压过程的弹塑性变形以及拉应力、切应力的综合影响，但仿真模型中膜片刻痕剩余厚度为理想的均匀等厚状态，且未考虑实际加工时膜片的变形、残余应力及刻痕剩余厚度的不均匀造成的影响。计算所得结果较实际加工后通过破裂压力试验获得的膜片参考剩余厚度低。

c. 实际膜片刻制时采用高速铣工艺，铣削过程中存在一定的残余应力，且刻痕剩余厚度存在散差，并非完全均匀一致。此外，由于膜片刻痕处剩余厚度采用数显千分表测量，在测量过程中存在 1~2 μm 的测量误差。故与理论分析和仿真计算结果对比，在同样的破裂压力要求下，所需的剩余厚度值最高。

分析试验数据还发现，对于剩余厚度相同的膜片，在刻痕剩余厚度散差不同时，其破裂压力的极差为 0.5MPa。在膜片生产研制过程中，为了保证其破裂压力稍远离边界值以减少因上述原因而产生的不合格品数量，保证产品破裂压力稳定可靠，在刻制时根据破裂压力为 3.5~4.5MPa 适当减小选用的剩余厚度范围为 0.055~0.063mm。

综上,在膜片生产研制时,在保证剩余厚度在 $0.055\sim 0.063\text{mm}$ 范围内,同时保证膜片刻痕处剩余厚度散差不大于 $4\mu\text{m}$,可满足膜片破裂压力在 $3.0\sim 5.0\text{MPa}$ 范围内的要求。

6 结束语

通过理论计算、仿真分析与试验相结合的方法，主要分析了米字型刻痕膜片剩余厚度对破裂压力的影响，认为试验结果与理论分析、仿真计算结果差异的原因是实际破裂过程为拉伸剪切综合作用，以及残余应力、刻痕剩余厚度散差和人工测量误差共同影响的结果。采用二次多项式拟合得到了膜片破裂压力与刻痕处剩余厚度的关系为： $p=805.33\delta^2+19.484\delta$ 。最后，根据膜片使用条件下的破裂压力确定了刻痕剩余厚度的区间范围为0.055~0.063mm，刻痕剩余厚度散差应不大于4 μm 时，可有效保证膜片破裂压力满足3.0~5.0MPa的要求。

[illegible]

(上接第 56 页)

锡合金组织，金脆风险较高；激光搪锡后，金元素在

表4 手工、激光两次搪锡效果对比表

搪锡方式	合金层平均厚度/mm	微观组织	焊料内金含量/wt%	合金层金含量/wt%
手工	750	组织分布较均匀,未发现大块金锡化合物组织。	2.62	0
激光	678	组织分布较均匀,未发现大块金锡化合物组织。	0	0

手工两次搪锡焊锡与焊杯间合金层平均厚度750nm。未发现大块金锡化合物组织。焊料中检测出金元素含量2.62wt%。

激光两次搪锡合金层平均厚度678nm,焊料与合金层内均未检测出金元素。

与手工两次搪锡相比,激光两次搪锡时间更短,焊料与焊杯间形成的合金层更薄,平均厚度相差 72nm。手工两次搪锡后,焊料中金含量降低到 2.62wt%,合金层内未检测出金元素。激光两次搪锡后焊料及合金层内均未检测出金元素,除金更加彻底^[4, 5]。

5 结束语

通过对比手工搪锡除金工艺与激光两次搪锡除金工艺结果,两种方式金元素质量分数虽均满足要求,但激光搪锡工艺得到的金相组织更为细腻,合金层厚

参考文献

- 1 袁一超. 液体冲压发动机点火特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016
- 2 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994
- 3 宁建华. 光刻膜片在膜片阀中的应用[J]. 火箭推进, 2005(1): 33~34
- 4 白少卿. 膜片阀破裂压力稳定性研究[J]. 火箭推进, 2015(6): 46~50
- 5 邓康清, 郭翔, 余小波, 等. 隔舱式脉冲发动机金属膜片破裂仿真研究[J]. 固体火箭技术, 2020(2): 192~198
- 6 鲍福廷, 侯晓. 固体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2016
- 7 王元有. 固体火箭发动机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- 8 程新, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- 9 龚志钰, 李政章. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006
- 10 黄韬, 陈静静. 厚度梯度对钛制椭球形膜片翻转性能的影响分析[J]. 航天制造技术, 2018(3): 42~45, 55
- 11 王刚, 于波. 基于 ABAQUS 的贮箱金属膜的优化设计[J]. 中国科技信息, 2011(2): 142~143, 155
- 12 张旭虎, 唐斌, 李金山, 等. 航天器贮箱用钛制隔膜变形过程的数值模拟[J]. 宇航学报, 2010(9): 2184~2188
- 13 吴宗泽. 机械设计实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999

焊料中均匀分布, 含金组织细小, 未见粗大的脆性金锡化合物。手工两次搪锡与激光两次搪锡对比见表4。

参考文献

- 1 齐林, 杨京伟, 杜爽, 等. QFN元器件去金搪锡工艺技术研究[J]. 航天制造技术, 2018(1): 44~47
- 2 张玲芸. 手工焊接的质量控制[J]. 电子工艺技术, 2010(4): 219~222
- 3 Yuan Haiyu. Influence of ENIG coating quality on the reliability of soldered joint[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2017(zl): 108~113
- 4 Sun Xiaowei, Cheng Mingsheng, Chen Gaiqing. Review of research progress on gold embrittlement failure behavior of Sn-Pb solder joints[J]. Electronics Process Technology, 2017(6): 315~318
- 5 Cheng Gang. Problem and measure of degolding in components soldering[J]. Aerospace Materials & Technology, 2012(5): 84~87