

# 椭圆封头大开孔补强有限元分析及试验研究

## FEM analysis and experimental research on large opening ellipsoidal head

赵 宁 董金善 杨云雨

ZHAO Ning DONG Jin-shan YANG Yun-yu

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800)

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211800, China)

**摘要:**进行标准椭圆封头大开孔平齐接管结构的三维有限元模型计算,分析应力分布规律,给出了标准椭圆封头大开孔平齐接管结构的分析法补强设计方法。通过等效应力系数计算,实现分析法补强设计。对标准椭圆封头大开孔平齐接管结构进行了试验应力分析,通过对试验结果和本研究分析法理论计算结果的对比,两者误差不超过 10%,符合工程设计要求,验证了本研究标准椭圆封头大开孔补强分析法计算的正确性。

**关键词:**椭圆封头;大开孔;有限元法;分析法;试验研究

**Abstract:** Three-dimensional finite element models of standard ellipsoidal heads with large opening nozzle structure are built for calculation, and the stress distribution is analyzed. An analysis reinforcement method of standard ellipsoidal heads with large opening is proposed, which can be realized through equivalent stress coefficient computation. Experimental stress analysis on typical structure with large opening is conducted by resistance strain measurement. The experimental results show good agreement with finite element calculations, relative error being less than 10% which meets the requirements of engineering design. Then the accuracy of analysis reinforcement method of standard ellipsoidal heads with large opening given in this paper is verified.

**Keywords:** ellipsoidal head; large opening; finite element method; analysis method; experiment research

目前压力技术设备在食品工业中应用广泛,例如超高压灭菌技术,就是利用超高压使食品在极高的压力下产生酶失活、蛋白质变性、淀粉糊化和微生物灭活等物理化学及生物反应,从而达到灭菌和改性的物理过程<sup>[1]</sup>。在工作压力不同的工况下,应力分布对整个容器结构的稳定性和安全性起决定性作用<sup>[2-3]</sup>。椭圆形封头是目前压力容器设计中最常用的封头形式。而在椭圆封头上开孔也是不可避免的,特别

是椭圆封头的大开孔结构,但是这种开孔接管破坏了封头几何的连续性,削弱了封头的强度<sup>[4]</sup>。其理论分析具有相当大的难度,目前对于椭圆封头大开孔结构还没有很好的分析设计方法<sup>[5]</sup>。郭崇志等<sup>[6]</sup>利用薄壳理论对椭圆封头容器大开孔平齐接管的边界效应进行了分析,取得了一定的成功,并做了一些试验进行了验证。黄战略<sup>[7]51-62</sup>对椭圆封头容器大开孔平齐接管进行了应力分析和试验研究,通过将三维问题转化为二维问题来研究,并取得了一些有价值的结果。但目前有关椭圆封头大开孔问题的研究仍停留在初级阶段,不管是模型还是试验,都只是对一些具体的数据进行了分析,没有寻求其内部的规律性,在理论解析解还没有取得重大突破的时候,一些研究还只能停留在试验阶段<sup>[8]</sup>。本研究给出的椭圆封头大开孔补强设计方法主要参考 GB 150.3—2011 中的“圆柱壳径向开孔补强设计的分析法”。借助 ANSYS 有限元模拟,较真实客观地反应开孔区域的应力状况,并对其计算结果进行了电测试验验证。由于理论计算模型与试验模型、数值仿真模型之间存在一定差别,主要是连接区焊缝以及封头连接的接管,筒壁厚度对于平均值也有偏离,因此本研究均按照标准椭圆封头进行计算和数据处理<sup>[7]38-50</sup>。

## 1 椭圆封头大开孔补强有限元分析

### 1.1 开孔补强设计分析法的理论基础

该分析法的理论基础是圆柱壳大开孔接管的薄壳理论解,是由清华大学研究组经过 20 多年研究得出的。分析法的模型假定接管和壳体是连续的整体结构,因此在使用分析法时,应保证焊接接头的整体焊接性和质量。分析法的设计准则是基于塑性极限与安定分析得出的,通过保证一次加载时有足够的塑性承载能力和反复加载的安定要求来保证开孔安全。分析法的设计准则与等面积法和弹性名义应力分类法均有所区别。该分析法与等面积法一样,不能用于疲劳设计<sup>[9]</sup>。

### 1.2 等效应力校核方法

(1) 由式(1)和式(2)计算椭圆封头与接管的中面直径。

**作者简介:**赵宁(1989—),男,南京工业大学在读硕士研究生。

E-mail:329016626@qq.com

**收稿日期:**2015-12-21

$$D = d_i + \delta_e, \quad (1)$$

$$d = d_o - \delta_e. \quad (2)$$

(2) 令开孔参数  $\lambda = \rho \sqrt{D/\delta_e} = d/\sqrt{D\delta_e}$ , 计算  $\rho, \lambda, \delta_e/\delta_e$ 。

(3) 由  $\rho, \lambda, \delta_e/\delta_e$  曲线得等效薄膜应力集中系数  $K_m$  和等效总应力集中系数  $K$ 。

(4) 按式(3)和式(4)计算等效薄膜应力  $S_{II}$  和等效总应力  $S_{IV}$ 。

$$S_{II} = K_m \frac{pD}{2\delta_e}, \quad (3)$$

$$S_{IV} = K \frac{pD}{2\delta_e}. \quad (4)$$

(5) 对等效薄膜应力  $S_{II}$  和等效总应力  $S_{IV}$  校核。按式(5)和式(6)计算:

$$S_{II} \leq n_{II} [\sigma]^t, \quad (5)$$

$$S_{IV} \leq n_{IV} [\sigma]^t, \quad (6)$$

式中:

$\rho$  —— 开孔率;

$\lambda$  —— 开孔参数;

$\delta_e/\delta_e$  —— 壁厚比;

$n_{II}$  —— 等效薄膜应力校核系数(对于特殊要求的压力容器,可取 1.5~2.2),本试验取 2.2;

$n_{IV}$  —— 等效总应力校核系数,本试验取 2.6;

$[\sigma]^t$  —— 设计温度下材料许用应力,MPa,封头、接管和补强件的材料不同时,取其中较小值。

## 2 开孔率 0.6 椭圆封头大开孔平齐接管结构应力曲线绘制

### 2.1 $\lambda = 12, \delta_e/\delta_e = 0.6$ 下等效应力系数计算

(1) 主要力学性能:弹性模量  $E=2.01 \times 10^5$  MPa,泊松比  $\mu=0.3$ ,工作载荷  $p=0.1$  MPa,设计温度为常温。

(2) 模型几何参数:椭圆封头长轴内径  $d_i=800$  mm,椭圆封头厚度  $\delta_e=2.01$  mm。

(3) 模型有限元模型及加载:在模型内表面施加内压,在封头接管端部施加轴向平衡载荷,在对称面施加对称约束,在筒体的端部施加全约束,见图 1。

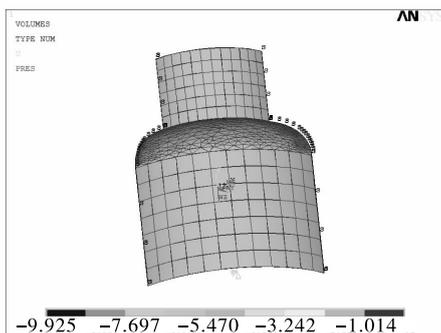


图1 标准椭圆封头大开孔结构有限元计算模型  
Figure 1 Boundary conditions of large opening ellipsoidal head

(4) 有限元计算结果:由图 2 可知,最大应力点出现在模型内部,椭圆封头与接管的边界上,由于接管较筒体薄,最大应力点偏向于接管侧。

(5) 有限元数据后处理:沿图 3 路径线性化,得  $S_{II} = 165.4$  MPa,  $S_{IV} = 264.7$  MPa。

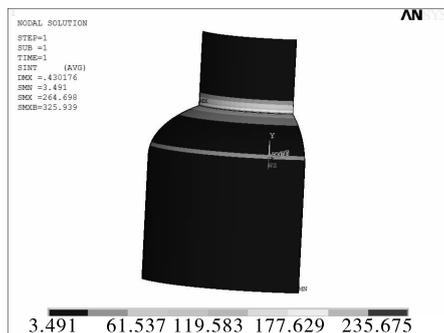


图2 标准椭圆封头大开孔结构应力云图  
Figure 2 The stress intensity contour of large opening ellipsoidal head

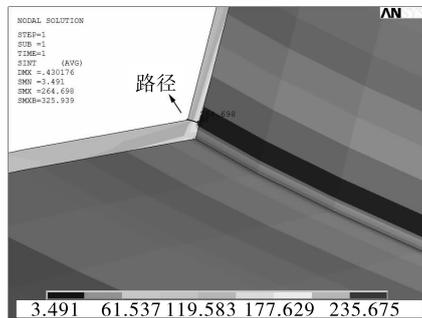


图3 标准椭圆封头大开孔平齐接管结构路径图  
Figure 3 The path of large opening ellipsoidal head

(6) 椭圆封头中面直径与其厚度比值的计算:

$$D/\delta_e = (\lambda/\rho)^2 = (12/0.6)^2 = 400.$$

(7) 等效薄膜应力集中系数  $K_m$  和等效总应力集中系数  $K$  的计算:

$$K_m = \frac{2S_{II}}{p(D/\delta_e)} = \frac{2 \times 165.4 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa} \times 400} = 8.270,$$

$$K = \frac{2S_{IV}}{p(D/\delta_e)} = \frac{2 \times 264.7 \text{ MPa}}{0.1 \text{ MPa} \times 400} = 13.24.$$

### 2.2 $\lambda = 4 \sim 12, \delta_e/\delta_e = 0.6 \sim 2.0$ 下的 $K_m$ 和 $K$ 曲线图

按 2.1 计算出各参数下的  $K_m$  和  $K$ ,即可拟合出开孔率 0.6 的椭圆封头大开孔平齐接管结构  $K_m$  和  $K$  应力曲线。见图 4、5。

由图 4、5 可知,当计算不同的开孔参数、开孔率下的标准椭圆封头大开孔结构的等效薄膜应力及等效总体应力时,等效薄膜应力集中系数  $K_m$  和等效总应力集中系数  $K$  可查询图 4 和图 5 的曲线图组。

## 3 椭圆封头大开孔结构试验

### 3.1 试验装置

静态应力测试装置见图 6。

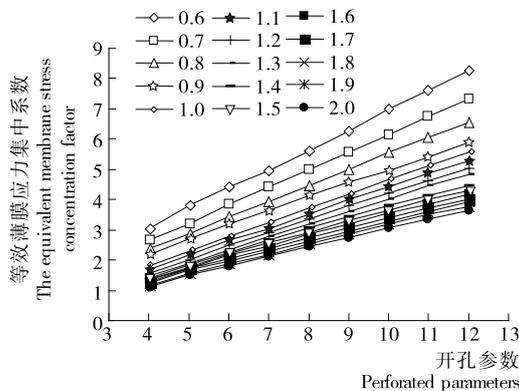


图 4 标准椭圆封头大开孔结构  $K_m$  曲线图

Figure 4  $K_m$  curve of large opening ellipsoidal head

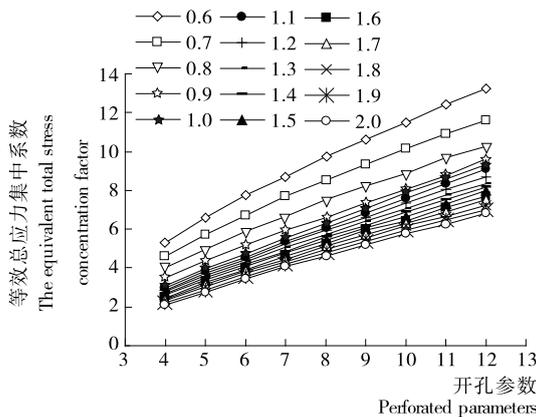
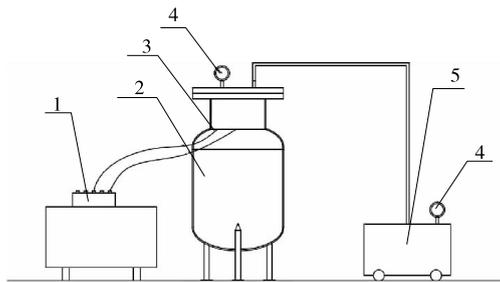


图 5 标准椭圆封头大开孔结构  $K$  曲线图

Figure 5  $K$  curve of large opening ellipsoidal head



1. HPJY16C 静态电阻应变仪 2. 试验件 3. 测点引出装置  
4. 压力表 5. 液压自控泵

图 6 静态应力测试装置示意图

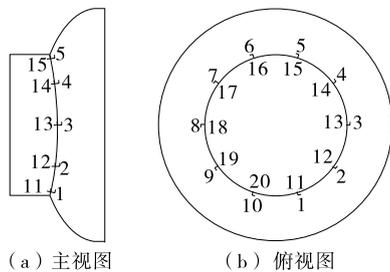
Figure 6 Diagram of static stress test device

3.2 试验件及应力测点布置方案

由于最大应力一定会出现在焊缝周围,但是焊缝上不利于粘贴应变片,所以选择靠近焊缝的椭圆封头和接管上分别均布 10 个测点,共 20 个测点,每个测点贴有两个应变方向的  $90^\circ$ 应变片。测点布置见图 8。

3.3 试验结果与分析

对试验压力 0.2,0.4,0.6 MPa 下的测点 1~10,11~20 中较大的一组的应力求算术平均值,得到试验压力下椭圆封头与接管连接区域的最大主应力的径向应力  $\sigma_r$  和环向应力  $\sigma_\theta$ ,将椭圆封头与接管连接区域各压力下的最大应力点的测试结果与有限元计算结果进行对比(见表 1)。



(a) 主视图 (b) 俯视图

图 7 试验件表面测点布置图

Figure 8 Layout of measuring points on the surface of the test

表 1 各压力下最大应力点的测试结果与有限元计算结果对比

Table 1 The test results comparing with the results of finite element calculation

试验压力/ MPa	计算最大主 应力/MPa	试验最大主 应力/MPa	误差/%
0.2	14.40	13.27	7.8
0.4	29.89	28.77	3.7
0.6	45.37	42.20	7.0

由于试验压力较小,椭圆封头与接管连接区域各压力下的最大应力点的分析法计算值与试验值较小,计算值均高于试验值,两者误差不超过 10%。分析数据可以发现,试验测得的最大应力点均落在分析法计算的高应力区内,分析法补强设计方法的计算值与同一试验值基本处于同一数量级上,验证了分析法补强设计方法的正确性。

4 结论

(1) 标准椭圆封头大开孔平齐接管结构上最大应力点出现在模型内部,椭圆封头与接管的边界上,当接管较筒体厚时,最大应力点偏向于筒体侧,接管较筒体薄时,最大应力点偏向于接管侧。

(2) 通过计算开孔率 0.6 的模型 135 个,绘制了开孔率 0.6 的标准椭圆封头大开孔平齐接管结构的等效力系数曲线图 2 张,等效力系数曲线图基本呈线性。

(3) 电阻应变计测试法对某一标准椭圆封头大开孔平齐接管结构进行了应力测试试验,将试验结果与分析法计算结果进行了比较分析和误差分析,分析结果充分证明了分析法计算结果的正确性和补强设计分析方法的可行性。

参考文献

[1] 陈杨易, 谢晶, 钟晓凡, 等. 超高压处理技术在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 266-270.  
 [2] 邱放. 基于 ANSYS 的压力容器爆炸事故原因及避免措施分析[J]. 食品与机械, 2009, 25(5): 93-95.  
 [3] 张珍, 谢晶, 李杰. 计算流体力学在制冷设备研发中的应用[J]. 食品与机械, 2008, 24(2): 146-150.  
 [4] 符倩, 董俊华, 李伟斌, 等. 杀菌釜椭圆封头偏心矩形大开孔接管的分析设计[J]. 机械强度, 2012(6): 849-853.

(下转第 206 页)

表5 梗末裂解产物含量对比分析

Table 5 Comparison of classification and content of pyrolysis products

分类	对照组		试验组	
	含量/%	种类	含量/%	种类
烷烃和烯烃类	1.43±0.09	9	1.73±0.13	6
杂环类	5.39±0.15	13	6.09±0.09	13
醛酮类	19.51±0.11	21	19.11±0.90	20
羧酸类	1.12±0.02	1	0.00±0.00	0
酯和内酯类	1.47±0.06	2	1.62±0.06	1
醇类	1.81±0.18	3	0.47±0.13	2
酚类	3.00±0.16	10	2.46±0.11	9

表6 样品果胶酶解前后单糖的组成

Table 6 The composition of monosaccharide (n=2)

单糖	酶解前梗末/%	酶解后梗末/%
阿拉伯糖	1.83±0.02	2.79±0.01
鼠李糖	1.73±0.01	8.81±0.03
木糖	0.64±0.00	8.89±0.01
半乳糖	5.43±0.01	17.65±0.02
葡萄糖	44.52±0.03	22.03±0.02
甘露糖	5.95±0.00	20.13±0.01
半乳糖醛酸	39.89±0.02	19.71±0.00

2.4 试验卷烟的感官品质

由表7可知,将酶解后的梗末样品添加于卷烟后,卷烟的香气质有所提升,烟气细腻性增加,透发性也得到提高,刺激性减轻,甜润感增加,余味纯净舒适,感官品质提升。但与对照组和对照组相比,劲头稍有不足。

表7 试验卷烟感官质量评价结果

Table 7 Sensory evaluation results

卷烟样品	评析结果
对照组	烟气细腻稍欠柔和,烟气成团性较好,透发性一般,甜润度适中,刺激性较大,余味较纯净,劲头足
试验组	烟气细腻柔和,香气质提高,烟气成团性提高,透发性较好,甜润度适中,刺激性较小,余味更加纯净,木质气减少,但劲头略显不足

3 结论

通过正交试验得到了造纸法再造烟叶工艺生产线挤干机出口梗末混合物的最佳酶解反应条件,分析了果胶酶酶解后梗末裂解产物及单糖含量发生变化情况,最后研究了添加酶解后梗末对卷烟香气质的影响。试验说明果胶酶用于规模发酵和在卷烟工业中应用,可以在节约成本的条件下提高卷烟品质,继续向着“高香气、低危害”的发展方向发展中式卷烟。但对于果胶酶在再造烟叶工艺生产线上的在线应用方面还需进一步研究。

参考文献

[1] 缪应菊,刘维娟,刘刚,等.烟草薄片制备工艺的现状[J].中国造纸,2009,28(7):55-60.

[2] 许曰鹏,苏文强,段继生.烟草薄片的开发与应用[J].上海造纸,2008,39(5):46-49.

[3] 刘耀飞,常纪恒,于川芳.烟梗中果胶的酶法降解[J].烟草科技,2013(8):40-44.

[4] 王月侠,葛善礼,贾涛.烟梗化学组成的分析[J].烟草科技,1996(3):16-17.

[5] 周正红,高孔荣,张水华.烟草中化学成分对卷烟色香味品质的影响及其研究进展[J].烟草科技,1997(2):22-25.

[6] 王龙英,费笛波,皮雄娥.纺织用纤维素酶、果胶酶高产菌株选育与固态发酵及其应用[J].浙江农业学报,2006,18(4):260-263.

[7] 邓国宾,李雪梅,李成斌,等.降果胶菌改善烟叶品质研究[J].烟草科技,2003(11):17-18.

[8] 张军,曹茜,李新生,等.再造烟叶原料烟梗中果胶的去除[J].烟草科技,2011(9):5-11.

[9] 郝辉,孙斯文,宋金勇,等.响应面法优化黑曲霉(*Aspergillus niger*)SW06产果胶酶发酵培养基条件[J].广西农业科学,2015,42(14):83-89.

[10] 王天龙,仇宏伟,陈海华,等.3,5-二硝基水杨酸法测定果胶酶活力的条件研究[J].食品与机械,2008(5):96-99.

[11] 杨海健,丁红营,于国东,等.咪唑比色法测定造纸法再造烟叶中的果胶含量[J].分析试验室,2012,31(6):100-102.

[12] Zimmermann R, Dorfner R, Ketrup A. Direct analysis of products from plant material pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1999, 49(1/2): 257-266.

[13] 贺磊,欧阳春,刘攀,等.国产与进口烟草薄片的对比分析[J].中国造纸,2012,31(2):28-30.

[14] 周顺,徐迎波,王程辉,等.比较研究纤维素、果胶和淀粉的燃烧行为和机理[J].中国烟草学报,2011,17(5):1-9.

[15] 舒俊生,田振峰,陈开波,等.烟叶中多糖的分离及单糖组成[J].食品与机械,2013,29(3):34-36.

[16] 张颖,曾艳,张丽娟,等.蝇虫草菌糠多糖的分离纯化及结构组成分析[J].食品科学,2014,35(13):54-58.

[17] Schmeltz I, Hoffmann D. Nitrogen-containing compounds in tobacco and tobacco smoke[J]. Chemical Reviews, 1977, 77(3):295-311.

(上接第105页)

[5] 郭崇志,郭亚芳.受到焊缝加强的椭圆封头大开孔接管边界效应模型研究[J].化工机械,2011(3):287-291.

[6] 郭崇志,张造雄.带平齐接管的大开孔椭圆壳应力分析及强度设计[C]//第四届全国压力容器学术会议论文集.安徽:中国机械工程学会压力容器分会,1997:260-268.

[7] 黄战略.椭圆封头大开孔结构应力分析与实验研究[D].广州:华南理工大学,2001.

[8] 梁庆海,王巍.椭圆封头开孔接管局部应力分析[J].石油和化工设备,2011(1):2-5.

[9] 薛明德,陈伟,邓勇,等.圆柱壳大开孔的薄壳理论解[J].力学学报,1995,27(4):482-488.