

EAST 外杜瓦系统泄放装置的设计与实验研究

盛道林¹, 武松涛¹, 朱银锋²

(1. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽建筑工业学院 机械与电气工程学院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 为保护过压状态下 EAST 装置的外杜瓦系统, 在外杜瓦系统上设计了爆破片过压泄放装置, 经 ANSYS 结构分析确定了爆破片的型式和参数, 基于分析结果试制了 316LN 的爆破片装置, 并通过实验进一步验证了设计方案的可行性与可靠性。实验结果表明, 设计方案合理, 能为同类装置的过压安全保护和研发提供借鉴。

关键词: 外杜瓦; 爆破片; 过压泄放装置

中图分类号: TL63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2010)07-0883-04

Design and Experimental Research on Venting Device for Cryostat System of EAST

SHENG Dao-lin¹, WU Song-tao¹, ZHU Yin-feng²

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230022, China)

Abstract: In order to protect the cryostat system of EAST under overpressure condition, the overpressure venting device with bursting disc was designed on the cryostat system, then its type and the parameters were decided based on the ANSYS structure analysis. Furthermore, the 316LN bursting disc device was trial-manufactured based on the analytic results, and the feasibility and reliability of the design were verified through experiments. The experimental results indicate that the design is reasonable and can provide a valuable reference for the protection and research of the similar overpressure venting devices.

Key words: cryostat; bursting disc; overpressure venting device

EAST 装置是一具有非圆截面的大型全超导托卡马克核聚变实验装置^[1]。外杜瓦系统是 EAST 装置的重要组成部分, 它为内部部件提供了高真空环境, 减小外界热源对冷屏和磁体的热负荷。EAST 装置主机主要由超导纵向系统、超导极向系统、内外冷屏、外杜瓦及内部部件等

5 大部分组成^[2-3]。

1 外杜瓦系统泄放装置的设计与分析

1.1 泄放装置介绍

EAST 外杜瓦系统泄放装置示于图 1。

当 EAST 装置内部的低温管路存在氦泄

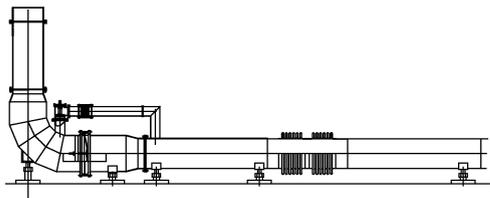


图1 外杜瓦泄放装置

Fig. 1 Venting device of cryostat

漏的状况下,外杜瓦内部的压力将急剧升高,可能会导致外杜瓦及其内部部件的损坏,因此,必须设置过压泄放装置加以保护。

常用的过压泄放装置有安全阀和爆破片。因爆破片结构简单、反应灵敏、密封性能好、可靠性高、维修和更换方便,被用于外杜瓦的过压保护。当 EAST 装置正常运行时,爆破片处于密闭状态;当外杜瓦内部过压时,工控机根据设置在氦气泄放通道内的传感器采集到的压力信号驱动报警器工作,在压力达到爆破片的标定爆破压力时,膜片即自行爆破,过压的氦气迅速泄放,通过液氮制冷机附近的氦气回收柜进行回收再利用,从而保证外杜瓦及内部部件的安全。

1.2 爆破片结构设计

EAST 外杜瓦系统泄放装置的爆破片采用正拱开缝型(图2),它由3层膜片叠合在一起构成。其中,上面1层是开有贯穿孔、槽,用以承受压力的强度膜,其材料采用无磁、低出气率的316LN,其机械强度列于表1;中间1层是起密封、传递压力的聚四氟乙烯密封膜;下面1层是开有贯穿孔、槽,用以增加刚度和承受背压的金属托架,在正向爆破时不承受压力,爆破压力主要由强度膜和密封膜承担^[4]。

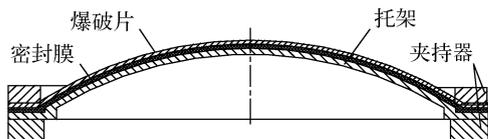


图2 正拱型爆破片

Fig. 2 Layout of domed bursting disc

1.3 爆破片泄放面积计算

EAST 外杜瓦泄放装置爆破片的泄放面积^[5]为:

$$A_E \geq \frac{0.1G_v}{CK_F P} \sqrt{\frac{ZT_1}{M}} \quad (1)$$

表1 316LN的机械强度

Table 1 Mechanical strength of 316LN

温度/K	机械强度/MPa		
	屈服强度	断裂强度	许用强度
80	820	1 360	453
300	310	620	207

式中: A_E 为爆破片的泄放面积, cm^2 ; G_v 为气体最大泄放量, kg/h ; K_F 为流量系数, 取 0.87; P 为设计爆破压力, MPa ; M 为气体分子量; Z 为气体的压缩系数; T_1 为外杜瓦内气体的绝对温度, K ; C 为气体特性系数。

由式(1) 计算得 $A_E \geq 0.2 \text{ m}^2$ 。

1.4 爆破片爆破压力理论分析

普通正拱型爆破片爆破压力^[6]为:

$$P_B = K\sigma_b S/D \quad (2)$$

式中: σ_b 为材料的强度极限; S 为爆破片的初始厚度; K 为与材料应变硬化程度有关的系数; D 为爆破片的泄放口径。

由式(2)可知,影响爆破压力的因素除材料本身强度以外,还与爆破片厚度、泄放口径有关,在其他条件相同的情况下,膜片越厚、泄放口径越小则爆破压力越大。

1.5 正拱径向开缝型爆破片分析

正拱径向开缝型爆破片透缝数为6条,呈均匀对称分布,透缝端部加工有终止小圆孔(直径3 mm),其结构如图3所示。通过调整内圈相邻终止小孔间桥长的大小,可获得结构所需的破裂压力,经计算,在设计中取桥长为20 mm。由于壳面已有贯穿的透缝,介质的密封通过在凹面受压侧加设厚度约为0.05 mm聚四氟乙烯薄膜来实现。



图3 正拱径向开缝型爆破片剖面图(a)和俯视图(b)
Fig. 3 Cross-sectional view (a) and vertical view (b) of domed radial-slotted bursting disc

假定过压在短时间内发生,且过压后氦为气体状态,定义爆破片材料的属性:弹性模量,

192 GPa;泊松比,0.28;密度,7 900 kg/m³。对爆破片模型的边缘施加全约束,对凹面施加1.2个大气压,对凸面施加1个大气压,同时再施加重力。使用 ANSYS 的 Shell181 单元对正拱径向开缝型爆破片进行单元的划分,计算结果示于图 4,爆破片的最大变形约为 22 mm,最大应力

约为 3 430 MPa,计算结果表明爆破片被破坏。

1.6 正拱环向开缝型爆破片分析

正拱环向开缝型爆破片除透缝呈环向分布,其余结构与正拱径向开缝型爆破片相似,其结构如图 5 所示^[7]。通过调整桥长的大小,也可获得结构所需的破裂压力。

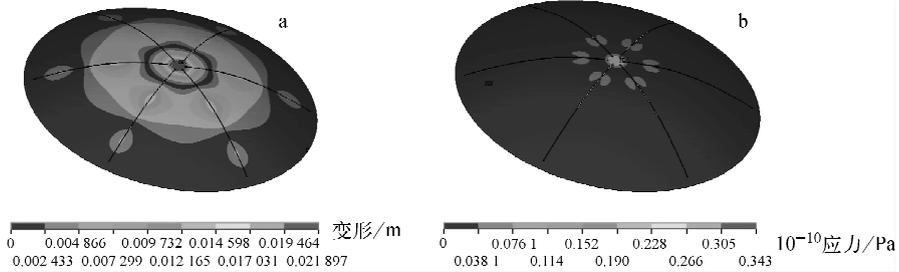


图 4 正拱径向开缝型爆破片有限元计算结果

Fig. 4 Finite element analysis results of domed radial-slotted bursting disc

a——变形云图;b——应力云图

正拱环向开缝型爆破片的载荷施加和约束与正拱径向开缝型爆破片相同,基于有限元技术的计算结果示于图 6,当外杜瓦内部的压力达到 1.2 个大气压,爆破片的最大变形约为 9 mm,最大应力约为 3 400 MPa,爆破片在爆破前透缝变形相对较小。考虑到爆破片加工较难,EAST 外杜瓦系统采用正拱环向开缝型爆破片泄荷装置。

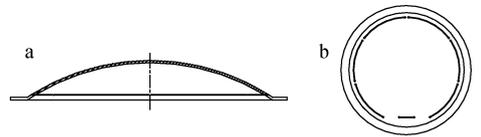


图 5 正拱环向开缝型爆破片剖面图(a)和俯视图(b)

Fig. 5 Cross-sectional (a) and vertical view (b) of domed annular-slotted bursting disc

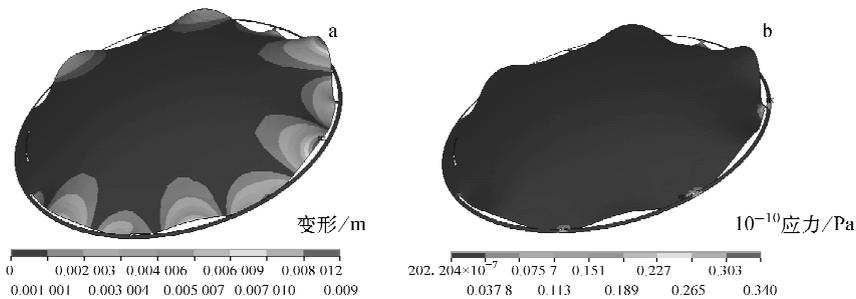


图 6 正拱环向开缝型爆破片有限元计算结果

Fig. 6 Finite element analysis results of domed annular-slotted bursting disc

a——变形云图;b——应力云图

为确定爆破片的危险工作频率,在 10⁴ Hz 内对爆破片进行模态分析。由于低阶模态对爆破片影响较大,因此,仅计算了前 5 阶模态,结果为:1 阶,94.37 Hz;2 阶,114.91 Hz;3 阶,

150.85 Hz;4 阶,151.73 Hz;5 阶,164.74 Hz。

根据计算结果可知,爆破片在 10⁴ Hz 内前 5 阶模态的危险工作频率在 90~170 Hz 之间,应避免爆破片在此频率范围内工作。爆破片的

1 阶模态分析结果示于图 7。

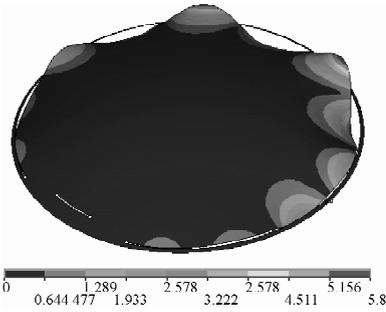


图 7 爆破片的 1 阶模态分析结果

Fig. 7 Finite element analysis result of the first mode for bursting disc

2 实验验证

为验证设计和分析结果的合理性与正确性,试制了 316LN 的爆破片泄荷装置并进行联机实验,实验结果如图 8 所示。实验结果表明,在外杜瓦内部压力达到 1.2 个大气压时爆破片迅速爆破,说明借助于 ANSYS 有限元软件进行分析得到的结果可满足工程应用的需要。

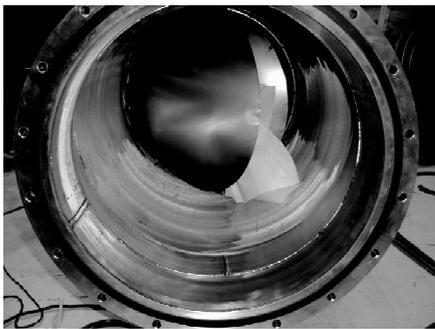


图 8 正拱环向开缝型爆破片实验照片

Fig. 8 Experimental photo of domed annular-slotted bursting disc

3 结论

1) 正拱环向开缝型爆破片的破坏机理为强度膜孔桥截面上的单向拉伸破坏;2) 实验结果表明,分析计算值与实验值的误差较小,满足工程应用的要求;3) 爆破片式泄荷装置可满足 EAST 外杜瓦系统对过压泄放的快速要求,可为同类装置的安全保护提供设计依据;4) 有限元分析和实验相结合可进一步提高过压泄放装置设计的可靠性。

对本工作中涉及的通过调整不同桥长长度和泄放口径来计算泄放压力、以及通过计算获得一定范围内的泄放压力所对应的桥长长短、泄放口径大小的数据,还需进行更进一步的深入研究,可为将来设计同类泄放装置和实验提供更丰富的参考数据。

参考文献:

- [1] 陈先忠,武松涛. HT-7U 超导托卡马克冷质部件支撑结构分析[J]. 核科学与工程,2003,23(2): 161-164.
CHEN Xianzhong, WU Songtao. Analysis of cryogenic support system for HT-7U superconducting Tokamak [J]. Chin J Nucl Sci Eng, 2003, 23(2): 161-164(in Chinese).
- [2] SONG Y T, YAO D M, WU S T, et al. Temperature field and thermal stress analysis of HT-7U vacuum vessel[J]. Plasma Physics and Technology, 2000, 2(5): 443-448.
- [3] 宋云涛,姚达毛,武松涛,等. HT-7U 超导托卡马克装置真空室结构数值分析[J]. 机械工程学报, 2003,39(7):68-69.
SONG Yuntao, YAO Damao, WU Songtao, et al. Numerical structure analysis for the vacuum vessel of HT-7U superconducting Tokamak device[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 68-69(in Chinese).
- [4] 顾雪铭,杨秀霞. 密封膜对正拱开缝型爆破片爆破压力的影响[J]. 化工装备技术,2000,21(5):34-35.
- [5] 张宁夏. 爆破片的安装设计[J]. 化工设计,2004, 14(6):19-22,44.
ZHANG Ningxia. Erection design of rupture disk [J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(6): 19-22, 44(in Chinese).
- [6] 王东方. 爆破片爆破压力可靠性研究[J]. 导弹与航天运载技术,2007(3):43-45.
WANG Dongfang. Research on bursting pressure reliability of bursting disc [J]. Missiles and Space Vehicles, 2007(3): 43-45(in Chinese).
- [7] 顾雪铭,吴全龙,杨秀霞. 正拱环向开缝型爆破片的爆破性能[J]. 华东理工大学学报,2004, 30(1):99-102.
GU Xueming, WU Quanlong, YANG Xiuxia. Bursting mechanism of domed annular-slotted bursting discs [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2004, 30(1): 99-102(in Chinese).