屏蔽电机主泵双金属飞轮飞射物对承压 边界完整性破坏作用

唐旭,张继革,王德忠

(上海交通大学,上海 200240)

摘要:目的 掌握反应堆冷却剂泵双金属飞轮飞射物对承压边界完整性的影响规律。方法 基于 ANSYS/LS-DYNA 对飞轮保持环失效后钨合金块与承压边界的碰撞过程进行分析,模拟承压边界在重要因 素(电机壳厚度、钨合金块数)的影响下对飞轮飞射物的包容过程。结果 在保持飞射物入射初速度不变的 情况下,当电机壳厚度小于118 mm 时,发生非包容性失效。改变钨合金块数(4、8、12、16块),可以发 现钨合金块数越多,飞射物对承压边界施加的破坏能量就越小。结论 增加电机壳厚度、钨合金块数有利于 承压边界能够很好地包容住所有飞射物。该研究成果对屏蔽电机主泵情转飞轮的可靠性设计具有重要意义。 关键词:屏蔽电机主泵;双金属飞轮;包容性分析;承压边界完整性 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.004 中图分类号:TL327 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2019)02-0016-06

Destructive Effect on Integrity of Pressure-retaining Boundary Imposed by Bimetal Flywheel Missiles in the Canned Motor Pump

TANG Xu, ZHANG Ji-ge, WANG De-zhong (Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: Objective To grasp the influencing rule of the destructive effect on integrity of pressure-retaining boundary imposed by bimetal flywheel missiles in the reactor coolant pump. **Method** This paper analyzed the impact between tungsten alloy block and pressure-retaining boundary (motor casing) after the failure of the flywheel retaining ring by ANSYS/LS-DYNA, and simulated the process that the boundary contains the flywheel missiles under different conditions (the thickness of motor casing, the number of tungsten alloy blocks). **Results** The uncontained accidents occur when the thickness of the motor casing was less than 118 mm, with incident velocity being constant. The more number of tungsten alloy blocks (4,8,12,16). **Conclusion** Increasing the thickness of motor casing and number of tungsten alloy blocks could help the pressure-retaining boundary contain the missiles successfully. The results of this research are of great significance to the reliability design of the canned motor pump inert flywheel.

KEY WORDS: canned motor pump; bimetal flywheel; containment analysis; integrity of pressure-retaining boundary

反应堆一回路中,核主泵作为关键部件,推动冷

却剂源源不断地流入堆芯,完成在堆芯、冷却剂环路

收稿日期: 2018-12-03; 修订日期: 2018-12-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB057306)

作者简介:唐旭(1991—),男,湖南人,硕士研究生,主要研究方向为核电装备力学分析。

通讯作者:张继革(1968-),男,黑龙江人,副研究员,主要研究方向为核电装备力学分析。

和蒸汽发生器之间的循环。为确保主泵具有足够的转动惯量,设计有大惯量飞轮,飞轮结构如图1所示。 飞轮内部由12块高密度钨合金块组成,在钨合金扇 形块外热套一定壁厚且具有高强度的马氏体时效钢 保持环,并具有足够的过盈量,使得高速旋转状态下 钨合金块产生的离心力完全由保持环承受。倘若保持 环发生断裂,将会产生具有较大能量的飞射物碎片, 对主泵的承压边界(如电机壳)产生重大冲击。如果 承压边界对飞射物碎片不能很好地包容,会造成严重 的辐射泄漏等重大核事故^[1]。



图 1 飞轮结构

从研究对象和过程看,飞轮飞射物包容问题与航空发动机机匣包容问题具有很大的相似性。针对转子碎片包容问题,在航空机匣包容领域已经有了很深的积累,并且有了系统的评定准则^[2-5],但针对大型屏蔽电机主泵双金属飞轮破损后飞射物与承压边界的碰撞问题,国内外未见相关文献报道。美国核管会管理导则 RG 1.14—1975 规定,当承压边界任意一点发生侵彻穿透时,即认为发生了非包容性失效。为了充分认识反应堆冷却剂泵双金属飞轮飞射物对承压边界完整性的影响规律,文中基于 ANSYS/LS-

DYNA^[6-8]对飞轮保持环失效后钨合金块与承压边 界的碰撞过程进行分析,模拟了承压边界在重要因素 (电机壳厚度、钨合金块数)的影响下对飞轮飞射物 的包容过程。

1 材料模型

由于飞轮保持环破碎后,钨合金块与包容边界的相互作用为高应变率、大变形、温度急剧升高的冲击过程,因此选用 Johnson-Cook 材料模型^[9],应 力方程为:

$$\sigma_{\rm e} = [A + B(\varepsilon_{\rm e}^{\,p})^{n}][1 + C\ln\dot{\varepsilon}^{*}][1 - T^{*m}] \tag{1}$$

式中: σ_{e} 为 von Mises 流动应力; ε_{e}^{p} 为等效塑

性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_e^p / \dot{\epsilon}_0$ 为无量纲化等效塑性应变率, 取 参考应变率 $\dot{\epsilon}_0 = 1$ s⁻¹; T^* 为无量纲温度, $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ (T_m 为材料熔点, T_r 为室温); A为 初始屈服强度; B为硬化常数; n为硬化指数; C为 应变率常数; m为温度软化指数。方程右边三项分别 代表等效塑性应变效应、应变率效应、温度效应。

断裂应变方程为:

 $\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*][1 + D_5 T^*]$ (2)

式中: σ^* 为应力三轴度, $\sigma^* = \sigma_H / \sigma_e$, 定义为 平均应力与 von Mises 等效应力的比值; $D_1 \, , D_2 \, , D_3 \, , D_4 \, , D_5$ 为材料性能试验得到的参数。损伤参数为:

$$D = \int (1/\varepsilon_f) \mathrm{d}\varepsilon_e^p \tag{3}$$

初始D=0,当D=1时,材料断裂失效,删除材 料单元。后续涉及到的1006 钢和 45[#]钢 Johnson-Cook 材料模型参数^[10-12]见表 1。

表 1 Johnson-Cook 材料模型参数

材料	A/MPa	<i>B</i> /MPa	n	С	т	$T_{\rm m}/{ m K}$	$T_{\rm r}/{ m K}$	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
45 [#] 钢	506	320	0.28	0.064	1.06	1795	300	0.1	0.76	1.57	0.0050	-0.84
1006 钢	350	275	0.36	0.022	1.00	1811	300	-0.8	2.1	-0.5	0.0002	0.61

2 数值计算可靠性验证

参照文献[10]中三次圆盘碎片撞击圆筒体试验结 果,对文中计算方法的可靠性进行验证。圆盘碎片和 圆筒体的材料都是 45[#]钢,将圆盘碎片设置为刚体, 圆筒体输入 45[#]钢 Johnson-Cook 材料模型参数,得到 三次仿真结果与试验结果的对比,如图 2 所示。数值 计算结果显示,壁厚 4 mm 的圆筒壁发生穿透失效, 壁厚 8 mm 的圆筒体能完好地包容住圆盘碎片,与试 验结果基本相同。由于壁厚 6 mm 的圆筒壁处于临界 包容状态,故数值计算结果与试验结果有差异。由于 数值计算结果与文献中试验结果基本一致,所以文中 所采用的数值计算方法是可靠的。

3 有限元模型

在屏蔽式电机主泵飞轮中,保持环将 12 个钨合 金块固定在内轮毂上。当飞轮保持环破碎时,假设钨 合金外侧已经没有保持环包围,忽略保持环破碎所产 生的碎片,该计算结果更为保守。采用六面体八节点 单元进行网格划分,12 块钨合金块包含 9792 个单元, 电机壳包含 200 000 个单元,有限元模型如图 3 所示。

钨合金块内径为 293 mm, 外径为 430 mm, 轴向 高度为 408 mm, 设置为刚体。参数选取:密度为 18 500 kg/m³,弹性模量为 3.65×10¹¹ Pa, 泊松比为 0.285,



a 壁厚 4 mm



b 壁厚 6 mm



c 壁厚 6 mm 图 2 仿真结果与试验结果对比



图 3 有限元模型

屈服应力为 1.3×10⁹ Pa。电机壳内径为 970 mm,材 料模型取 Johnson-Cook 模型。为了便于从公开文献 中获得仿真所需的 Johnson-Cook 模型的材料参数, 选用 1006 钢作为电机壳材料。钨合金块与电机壳的 静摩擦系数取 0.15,动摩擦系数取 0.1。

文献[13]指出,在超速事故工况下,获得飞轮发 生非延性断裂转速为 6600 r/min。该转速将作为飞轮 破碎后的初速度,则每个钨合金块以初速度 249.85 m/s 沿着切线方向碰撞电机壳。

4 计算结果与分析

4.1 不同电机壳厚度对碰撞的影响

在 Workbench 中完成建模、网格划分前处理工作 后,输出 K 文件,导入到 LS-DYNA 进行求解,在后 处理器 LS-PREPOST 中读入计算文件。12 个钨合金 块与电机壳的碰撞过程及等效应力分布如图 4 所示。 可以看到,当电机壳厚度为 100 mm 和 111 mm 时,



a 壁厚 100 mm

b 壁厚 111 mm



 c 壁厚 118 mm
 d 壁厚 125 mm

 图 4 不同电机壳壁厚仿真结果(von Mises 应力单位: kPa)

钨合金块与电机壳碰撞后,电机壳发较大生塑性变 形,最终被钨合金块击穿,发生非包容性失效。当电 机壳厚度为118 mm时,电机壳处于临界包容状态, 虽然部分被撕裂,但钨合金块被成功包容在电机壳 内。当电机壳厚度为125 mm时,电机壳未被完全破 坏,且成功包容住钨合金块。因此增加电机壳厚度, 可以提高电机壳对钨合金块的包容能力。

4.2 不同钨合金块数对碰撞的影响

为了研究不同钨合金块数的飞轮破碎后,钨合金 块对承压边界的破坏作用,进一步为飞轮的优化设计 提供依据,研究了在相同的破裂转速(6600 r/min) 情况下,计算了4、8、16 块钨合金的飞轮破碎后, 产生的钨合金块与电机壳的碰撞情况。4 块钨合金块 可以直接击穿200 mm厚的电机壳,250 mm厚的电 机壳才能完全包容住钨合金块,如图5 所示;8 块钨 合金块可以彻底撕裂125 mm厚的电机壳,150 mm 厚的电机壳可以包容住所有钨合金块,如图6 所示; 16块钨合金块被完全包容在厚度为105 mm的电机壳 内,尽管此时电机壳部分被撕裂,处于临界包容状 态,而 110 mm 厚的电机壳可以完好无损地包容住钨 合金块,如图 7 所示。由此可得,随着钨合金块数 的增多,电机壳所需包容住钨合金块的临界厚度也 随之减小。

4.3 综合分析

综合考虑电机壳厚度、钨合金块数量两个因素, 将上述仿真结果反映到图 8 中。由图 8 可以看到,随 着钨合金块数量的增加,电机壳所能包容钨合金块所 需的临界厚度也随之减小。同时增加电机壳厚度,可 以有效增加电机壳对钨合金块的包容能力。

5 结论

文中应用 ANSYS/LS-DYNA 对飞轮保持环失效 后钨合金块与承压边界的碰撞过程进行分析,模拟了 承压边界在重要因素(电机壳厚度、钨合金块数)的 影响下对飞轮飞射物的包容过程,获取了在不同电机 壳厚度、钨合金块数下,电机壳对飞轮飞射物的包容 结果。

1)在保持飞射物入射初速度不变的情况下,增



a 电机壳厚度 200 mm

b 电机壳厚度 250 mm





a 电机壳厚度 125 mm

b 电机壳厚度 150 mm

图 6 8块钨合金块与电机壳碰撞情况(von Mises 应力单位: kPa)



a 电机壳厚度 105 mm

b 电机壳厚度 110 mm



加电机壳厚度可以提高承压边界对飞轮飞射物的包容能力。当飞轮设计为 12 块钨合金块,破裂转速为 6600 r/min (飞射初速度为 249.85 m/s)时,电机壳包容临界厚度为 118 mm;当电机壳厚度为 111 mm 时,则发生非包容性失效。

2)飞轮钨合金块的数量越多,则飞轮破碎后所 产生的飞射物对承压边界施加的破坏能量就越小,即 电机壳的临界厚度越小。当飞轮设计为 16 块钨合金 块,破裂转速为 6600 r/min(飞射初速度为 249.85 m/s) 时,电机壳包容临界厚度为 105 mm,比包容 12 块钨 合金块飞轮的电机壳临界厚度薄 13 mm。



参考文献:

- [1] 崔海燕,李天斌.核主泵飞轮结构及设计要求探讨[J].
 通用机械, 2015(9): 79-82.
- [2] 宣海军,洪伟荣,吴荣仁. 航空发动机涡轮叶片包容试 验及数值模拟[J]. 航空动力学报,2005,20(5):762-767.
- [3] 张晓峰, 宣海军, 吴荣仁. 航空发动机叶片包容模拟试验与数值仿真研究[[J]. 航空发动机, 2005, 31(4):39-42.

- [4] HAGG A C, SANKEY G O. The Containment of Disk Burst Fragments by Cylindrical Shells[J]. Journal of Engineering for Power, Transaction of the ASME, 1974, 96: 114-123.
- [5] 何庆, 宣海军, 廖连芳, 等. 平板条叶片撞击靶板的数 值仿真研究[[J]. 航空发动机, 2009, 35(3): 26-29.
- [6] ERIC S, STEVEN H. The Use of LS-DYNA Models to Predict contaInment of Disk Burst Fragments[C]// 10th International LS-DYNA User Conference. [s. 1.]: [s. n.], 2008.
- [7] 唐长刚. LS-DYNA 有限元分析及仿真[M]. 北京: 电子 工业出版社, 2013.
- [8] 张红松, 胡仁喜, 康士廷. ANSYS14. 5/LS-DYNA 非线 性有限元分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业版社, 2013.
- [9] 范亚夫,段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测 定[J]. 力学与实践, 2003(5): 40-43.
- [10] 李娟娟. 圆环/轮盘包容问题的数值评定方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
- [11] VIDOSAV M, ZIVANA J. Hydro-multipoint Forming, a Challenge in Sheet Metal Forming[C]// Proceedings of 5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies: NEWTECH 2017. [s. l.]: [s. n.], 2017.
- [12] 熊令芳, 胡凡金. 非线性动力分析方法与工程应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [13] 李斌. 大型屏蔽电机主泵双金属飞轮飞射物包容及其 结构优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.