

核电厂柴油机双联橡胶膨胀节法兰密封面破损原因分析

李明超, 闫兵兵, 梁广学

(广西防城港核电有限公司, 广西 防城港 538000)

摘要:针对某核电厂应急柴油机冷却水系统双联橡胶膨胀节发生的法兰密封面破损问题,采用宏观与微观检查、力学性能测试、电镜微观分析、介质浸泡试验等技术手段,探究了其破损原因。结果表明,膨胀节法兰密封面出现多处破损、开裂的主要原因为双膨胀节串联安装的设计不够合理,在柴油机运行时易产生较大的振动,且使用的聚四氟乙烯垫片厚度有限,在高温水以及应力作用下发生了永久变形,在柴油机运行的振动下导致膨胀节法兰密封面出现了磨损、挤压以及皴裂的情况。

关键词: 应急柴油机; 橡胶膨胀节; 法兰密封面; 失效分析

中图分类号: TQ330.7

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)07-0041-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.07.009

0 引言

核电厂通常采用大型柴油发电机作为应急电源,以保障事故状态下的核安全。为保证大型柴油机正常工作,需要设置众多的辅助系统,如燃油供给系统、冷却水系统、启用压空系统等。在这些系统中,设计安装了众多的橡胶膨胀节,用于实现管道系统的减震隔振、降低噪音和位移补偿^[1]。

橡胶膨胀节是一种弹性连接元件,耐腐蚀性良好,位移性能好,重量轻^[2],弹性优异,内部致密度高,能够承受较高的压力。在刚性管道系统中使用橡胶膨胀节可为管道提供必要的柔性^[3]。然而,橡胶膨胀节通常具有一定的使用寿命,当使用时间过久,就会出现老化现象^[4]。橡胶作为膨胀节的主要材料,其一旦发生老化、降级,可能会变硬、变脆和开裂,从而导致膨胀节在长期运行和使用后可能出现各种故障,如表面裂纹、鼓包、渗水和介质泄漏等,严重时甚至可使应急柴油机无法正常工作,存在严重的安全隐患^[3]。此外,安装方式的不当也容易导致膨胀节产生变形过度、局部应力过大等问题^[5],进而引发破损、开裂等现象。

针对橡胶膨胀节在使用过程中出现的问题,有必要对其进行研究分析并提出改进建议^[6],以更好地提高核电厂应急柴油机运行的安全性和可靠性。本文以某核电厂应急柴油机冷却水系统橡胶膨胀节法兰密封面破损事件为例,通过宏观与微观检查、力学性能测

试、电镜微观分析、介质浸泡试验等技术手段,探究其破损原因,并制定相应的改进建议。

1 失效背景信息

某核电厂在一次大修期间开展应急柴油机膨胀节现场排查,发现冷却水系统中有两个双联膨胀节(编号为1#、2#)存在法兰密封面橡胶破损的现象,膨胀节其他部位无异常。膨胀节的现场安装方式及拆卸检查情况如图1所示。

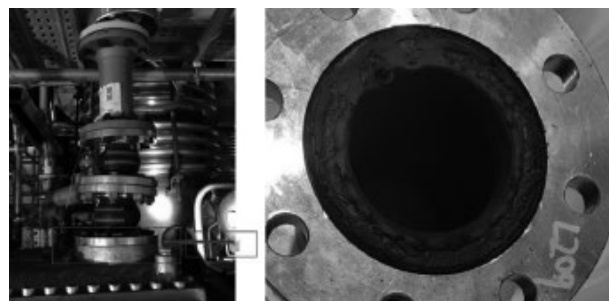


图1 破损膨胀节现场安装方式及拆卸检查情况

1#、2#膨胀节以及作为对照的新样品膨胀节(编号为0#)的基本信息如表1所示。0#~2#膨胀节均由同一厂家生产,膨胀节内外层均为EPDM橡胶,中间采用尼龙编织层加强,膨胀节最高使用温度为130℃。

作者简介: 李明超(1992-),男,本科,工程师,防腐主管工程师,主要从事材料科学、核电厂腐蚀与防腐及电厂老化管理工作。

表 1 膨胀节基本信息

样品编号	规格	内部介质	服役压力 /bar	服役温度 /℃
0 [#]	DN80×160	/	/	/
1 [#]	DN80×160	乙二醇冷却液	2.5~3.0	60~90
2 [#]	DN100×130	乙二醇冷却液	5.5~6.0	35~50

双膨胀节之间以及膨胀节与管道、设备的法兰间均使用了聚四氟乙烯垫片，厚度为 2 mm。拆检 1[#]、2[#] 膨胀节法兰密封面的聚四氟乙烯垫片，发现均存在明显的变形现象，如图 2 所示。

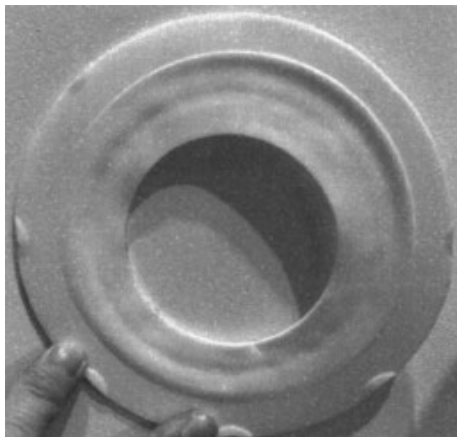


图 2 膨胀节聚四氟乙烯垫片的变形问题

电厂初步分析，1[#]、2[#] 膨胀节密封面破损可能是因为安装期间接触了油脂类化学品或受到了锐物挤压，并在服役后不断扩展而成。在膨胀节金属法兰等区域可以发现挤压伤，且缺陷相对规则，如图 3 所示。

其次聚四氟乙烯垫片由于厚度较小（仅 2 mm）且质地较软，在安装期间易发生变形，在现场柴油机

运行的振动下，可能会导致密封面发生磨损。

2 试验部分

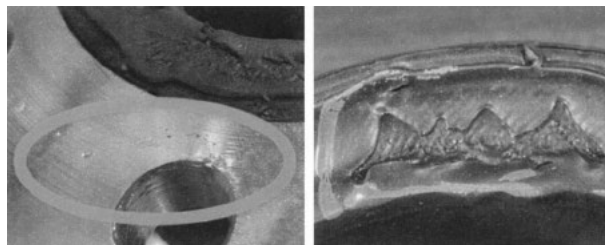


图 3 膨胀节法兰处疑似锐物伤痕

2.1 试验内容与方法

为探究膨胀节法兰密封面的破损原因，主要开展了以下几个方面的试验分析工作：

通过外观检查、扫描电镜分析对膨胀节密封面缺陷的宏 / 微观形貌进行分析；通过黏合强度测试、拉伸性能测试判断膨胀节是否发生了老化；通过介质浸泡试验判断介质接触对膨胀节相关性能的影响。

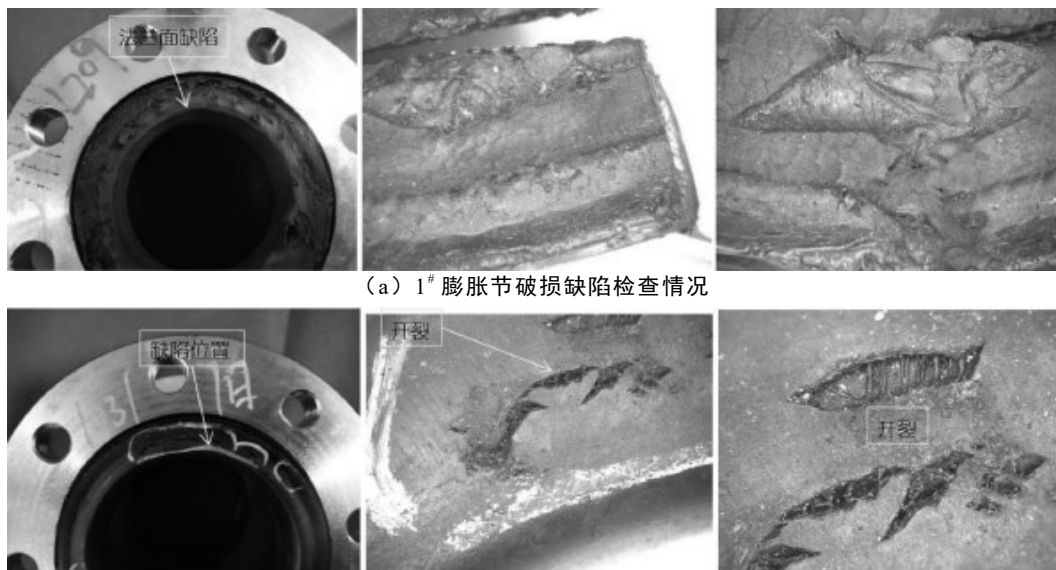
2.2 试验设备

试验分析工作使用的设备包括工业显微镜：A0-AF516C；电子自动测厚仪（台式）：MZ-4030B；数显卡尺：SATA 91513；多功能一体化橡塑材料硬度计：Digi test II；电子万能试验机：WDW-10 等。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 外观检查

对 1[#]、2[#] 橡胶膨胀节破损缺陷进行宏观检查和显微镜观察，检查结果如图 4 所示。



(a) 1[#] 膨胀节破损缺陷检查情况

(b) 2[#] 膨胀节破损缺陷检查情况

图 4 膨胀节破损缺陷检查情况

通过宏观检查与显微镜观察发现，1# 膨胀节密封面破损较为严重，存在大量凹陷坑状缺陷；2# 膨胀节密封面存在多处开裂缺陷。

2.3.2 黏合强度测试

对 0#~2# 膨胀节内层橡胶与织物间的黏合强度进行测试，以判断膨胀节在服役后是否存在老化现象。测试结果见表 2，0#~2# 膨胀节黏合强度测试结果均满足相关标准要求。1# 膨胀节内层橡胶与织物间的黏合强度相比 0# 膨胀节约有 9.39% 的下降，2# 膨胀节内层橡胶与织物间的黏合强度相比 0# 膨胀节约有 1.02% 的下降，说明二者的内层橡胶在服役后均发生了轻微的老化。

表 2 膨胀节内层橡胶与织物间黏合强度测试结果

样品编号	黏合强度 / (N·mm ⁻¹)	剥离类型
0#	3.94	RA/AT
1#	3.57	RA/AT
2#	3.90	RA/AT
GB/T 26121—2010 标准要求	≥ 2	RA/AT

注：RA 表示剥离发生胶层与胶黏剂之间；AT 表示剥离发生在胶黏剂与织物之间。

2.3.3 拉伸性能测试

对膨胀节内层橡胶的拉伸性能进行测试，取样位置为拱形区域，试样为 II 型哑铃试样，结果见表 3。拉伸强度和断裂伸长率是表征材料机械性能的指标，拉伸强度表征材料在受力情况下的抗破坏能力，断裂伸长率是表征材料在受力情况下的韧性指标，且拉伸强度和断裂伸长率与材料的老化程度呈反比例关系，材料老化程度越大，其拉伸强度和断裂伸长率值越小。

由表 3 可见，0# 样品内层橡胶的拉伸强度和断裂伸长率均满足标准要求，1#、2# 样品内层橡胶均存在拉伸强度或断裂伸长率较标准值偏小的现象，进一步证明了膨胀节在使用过程中确实发生了一定程度的老化，但总体仍在可接受的范围内。

表 3 膨胀节内层橡胶拉伸性能测试结果

样品编号	拉伸强度 / MPa	断裂伸长率 / %
0#	10.06	401.92
1#	8.87	352.36
2#	13.85	285.56
GB/T 26121—2010 标准要求	≥ 10	≥ 400

2.3.4 扫描电镜分析

对 1#、2# 膨胀节密封面缺陷位置进行喷金处理，并进行扫描电镜（SEM）观察，通过微观检查结果分析样品裂纹特征，取样位置及观察结果见图 5。通过微观形貌观察发现：

（1）1# 膨胀节法兰密封面呈现应力状态下，存在显著的磨损、挤压以及皴裂的情况。

（2）2# 膨胀节法兰密封面长期受力，导致表面有大量白色填料析出，而填料析出会导致橡胶材料的性能下降，使其在使用过程中更容易发生开裂。

2.3.5 介质浸泡试验

对 0# 新膨胀节开展乙二醇冷却液浸泡试验，试验温度 100℃，时间 168 h（7 天），由于橡胶膨胀节仅内部接触介质，故只开展内层橡胶试验，测试浸泡试验前后内层橡胶硬度及拉伸性能的变化情况，测试结果见表 4。浸泡试验后膨胀节内层橡胶的硬度、拉伸强度、断裂伸长率分别下降 2.63%、8.25%、3.36%，参考相关标准，其下降幅度均在可接受范围内。内层橡胶耐液体试验满足指标要求，说明橡胶材料耐介质老化性能良好。

表 4 浸泡试验前后膨胀节内层橡胶性能测试结果

性能	试验前	试验后
硬度 / Shore A	45.7	44.5
拉伸强度 / MPa	10.06	9.23
断裂伸长率 / %	401.92	388.42

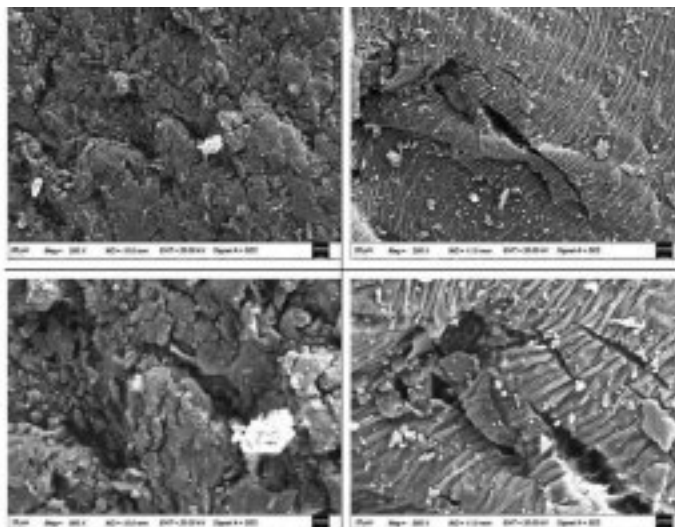
注：GB/T 26121—2010 标准中胶料热空气老化条件（110℃×48 h），拉伸强度降低率指标为 ≤ 25%，断裂伸长率降低率指标为 ≤ 30%。

3 分析与讨论

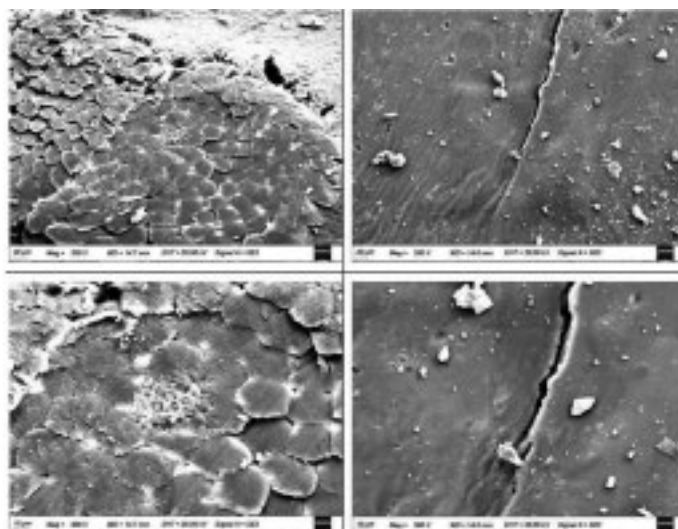
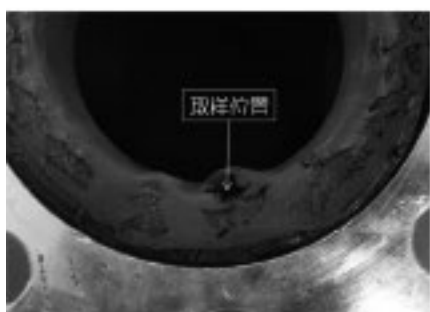
综合背景信息调研和试验检测结果，1#、2# 膨胀节虽然发生了一定程度的老化，但仍属于正常服役形成的，且耐介质性能良好，说明老化不是导致膨胀节破损的主要原因。根据橡胶膨胀节法兰密封面出现的较大范围破损情况来看，安装导致的锐物损伤的可能性也相对有限。推测 1#、2# 膨胀节法兰密封面出现多处破损、开裂的主要原因为双膨胀节串联安装的设计不够合理，在柴油机运行时易产生较大的振动，且使用的聚四氟乙烯垫片厚度有限，在高温水以及应力作用下发生了永久变形，在柴油机运行的振动下导致膨胀节法兰密封面出现了磨损、挤压以及皴裂的情况。

4 结语

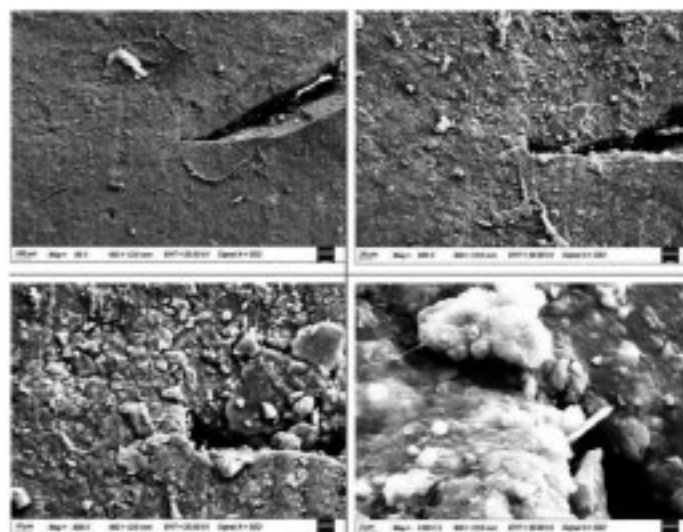
根据试验分析结果，建议电厂对膨胀节间隔环垫片进行重新设计，并核实橡胶膨胀节法兰紧固力矩、现场振动数据是否具备优化调整的空间。此外，建议采用双球型橡胶膨胀节或其他设计代替双膨胀节串联安装的设计，以减少管线中出现较大的集中质量。



(a) 1[#] 膨胀节法兰密封面缺陷微观形貌



(b) 1[#] 膨胀节密封面靠内侧缺陷微观形貌



(c) 2[#] 膨胀节法兰密封面缺陷微观形貌

图 5 膨胀节缺陷位置微观形貌观察结果

参考文献：

[1] 邵家泉, 董玉领, 钟俊良, 等. 柴油机橡胶膨胀节破裂失效分析 [J]. 产业与科技论坛, 2022, 21(19):44–46.

[2] 纪志远. 浅谈橡胶膨胀节 [J]. 石油和化工设备, 2017, 20(11): 52–55.

[3] 苗学良, 张福海, 王欣, 等. 核电厂用橡胶膨胀节老化开裂的原因 [J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(9):102–105.

[4] 孔佩佩, 符刘旭, 徐刚, 等. 抽出油活化废胶粉改性沥青老化性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2024, 44(2):22–33.

[5] 王启峰, 邱波. 核电厂凝汽器橡胶膨胀节维修工艺改进分析 [J]. 电工技术, 2018, 13:123–124+127.

[6] 龚燎原, 揭阳, 卞五洲. 700 MW 水内冷发电机纯水系统橡胶膨胀节的研究与应用 [J]. 水电站机电技术, 2022, 45(7):96–98.

Analysis of the causes of damage to the sealing surface of the double rubber expansion joint flange of diesel engines in nuclear power plants

Li Mingchao, Yan Bingbing, Liang Guangxue

(Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co. LTD., Fangchenggang 538000, Guangxi)

Abstract: In response to the flange sealing surface damage problem of the double rubber expansion joint in the emergency diesel engine cooling water system of a nuclear power plant, this study used macroscopic and microscopic inspections, mechanical performance testing, scanning electron microscopy microscopic analysis, and medium immersion tests to investigate the cause of the damage in depth. The research results indicate that the main reason for the multiple damages and cracks on the sealing surface of the expansion joint flange is the unreasonable design of the double expansion joint series installation. During the operation of the diesel engine, this design is prone to generate significant vibrations, and coupled with the limited thickness of the PTFE gasket used, permanent deformation occurs under the combined action of high temperature water and stress. Finally, under the continuous vibration of the diesel engine, the sealing surface of the expansion joint flange showed wear, compression, and cracking.

Key words: emergency diesel engine; rubber expansion joint; flange sealing surface; failure analysis

(R-03)

延长 5 年！反倾销税审查完成
Extend for 5 years! Anti dumping duty review completed

近日，墨西哥政府完成了对原产于美国、韩国和日本的丁苯橡胶（SBR）反倾销税适用期限延长的审查，该反倾销税自 2024 年 1 月起生效，本次墨西哥决定继续实施现行的反倾销税 5 年。

据介绍，墨西哥对原产于美国、韩国和日本的 SBR 征收的反倾销税，原定于 2019 年 1 月 28 日起生效，至 2024 年 1 月 28 日结束。

根据 WTO 反倾销协定和墨西哥贸易法的规定，2023 年 12 月，该国唯一合成橡胶生产商 Negromex 公司就延长反倾销税的适用提出复审申请，复审于 2024 年 1 月 25 日启动。

墨西哥经济部表示，考虑到目标生产国的丁苯橡胶产能和出口能力，以及即使在反倾销税下，从 3 个目标国的进口量仍有所增加，担心取消反倾销税会进一步增加进口，对国内市场造成负面影响，因此决定征收反倾销税。

在复审中，墨西哥经济部为希望取消反倾销税的出口商、进口商等利害关系方设立了提供相关信息的机会，但尚未有任何利害关系方作出回应。

因此，墨西哥经济部依据世贸组织《反倾销协定》第 6.8 条，基于“现有事实”作出决定，并全面采纳了生产商 Negromex 的诉求，决定延长该期限。

摘编自“中国轮胎商务网”

(R-03)