

# LNG 独立液舱裂纹扩展寿命评估效率 改进方法研究

孙强<sup>1</sup>, 李柏锐<sup>2</sup>, 潘帅<sup>1</sup>, 彭东升<sup>1</sup>, 郭强<sup>1</sup>, 陈景杰<sup>2\*</sup>, 黄一<sup>2</sup>

(1.大连船舶重工集团有限公司, 辽宁 大连 116000; 2.大连理工大学, 辽宁 大连 116000)

**摘要:** 目的 对考虑超低温液体存储环境因素影响的 LNG 独立液舱裂纹扩展寿命和泄漏量评估方法进行改进。方法 以 LNG 独立液舱易萌生裂纹损伤区域为研究对象, 采用裂纹尖端应力强度因子经验公式和裂纹扩展速率公式, 分析具有  $10^8$  次循环的疲劳载荷在不同的排序方式下对裂纹扩展寿命的影响, 找出影响计算精度和效率的主要因素。结果 裂纹扩展程序计算效率低下及应用条件受限是因为载荷循环次数过于庞大, 对此提出了 2 种简化的裂纹扩展模拟方法, 使裂纹扩展程序循环次数降低了 5 个量级。结论 这 2 种方法不仅极大地提高了计算效率以及降低了程序的使用要求, 而且均可以达到较高的计算精度, 为 LNG 独立液舱裂纹扩展寿命评估程序推广应用奠定了基础。

**关键词:** LNG 独立液舱; 裂纹扩展; 应力强度因子; 疲劳载荷; 计算效率; 寿命评估

中图分类号: U661.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)11-0110-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.014

## Improving Efficiency of Crack Propagation Life Assessment for LNG Independent Tank

SUN Qiang<sup>1</sup>, LI Bairui<sup>2</sup>, PAN Shuai<sup>1</sup>, PENG Dongsheng<sup>1</sup>, GUO Qiang<sup>1</sup>, CHEN Jingjie<sup>2\*</sup>, HUANG Yi<sup>2</sup>

(1. Dalian Shipbuilding Industry Co., Ltd., Liaoning Dalian 116000, China;

2. Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the evaluation method of crack propagation life and leakage of LNG independent tanks considering the influence of ultra-low temperature liquid storage environments. Taking the crack propagation area of LNG independent tanks as the research object, the empirical formula of crack tip stress intensity factors and the crack propagation rate formula were used to analyze the effect of fatigue load with  $10^8$  cycles on crack growth life under different sequencing modes, and the main factors affecting the calculation accuracy and efficiency were found out. The calculation efficiency of the crack propagation program was low and the application condition was limited because the load cycle number was too large. In this paper, two simplified crack propagation simulation methods were proposed, which could reduce the cycle number of the crack propagation program by 5 orders of magnitude. These two methods not only greatly improve the calculation efficiency and reduce the application requirements of the program, but also achieve high calculation accuracy, which lays a foundation for the popularization and application of the crack growth life evaluation program of LNG independent tanks.

收稿日期: 2024-07-26; 修订日期: 2024-09-08

Received: 2024-07-26; Revised: 2024-09-08

引文格式: 孙强, 李柏锐, 潘帅, 等. LNG 独立液舱裂纹扩展寿命评估效率改进方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 110-117.

SUN Qiang, LI Bairui, PAN Shuai, et al. Improving Efficiency of Crack Propagation Life Assessment for LNG Independent Tank[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 110-117.

\*通信作者 (Corresponding author)

**KEY WORDS:** LNG independent tank; crack propagation; stress intensity factor; fatigue load; computational efficiency; life assessment

目前 LNG 作为绿色能源在船舶行业中逐渐推广开来, 液化天然气运输船 (简称“LNG 船”) 是现在运输天然气的主要手段<sup>[1-4]</sup>, 其核心是它的液货围护系统, 按照类型大致可分为球罐型、薄膜型和独立型。球罐型液货舱是由挪威的 MOSS ROSENBERG 公司设计的, 其液货舱与船舶主体分开建造, 球罐由所具有独特结构的支撑裙座与主船体连接, 货物载荷全部由裙座吸收, 不会传到船舶主体。球罐材料一般选用铝合金或 9%镍钢, 绝热材料覆盖在球壳外部。其设置的次屏壁在球罐底部, 以防止泄漏液外溢。球罐型液货舱没有晃荡载荷问题, 所以对装载率没有要求。同时, 由于其结构的对称性, 可以进行相对精确的结构分析<sup>[5-13]</sup>。薄膜式液货舱常见的形式有 NO96 薄膜型、MK-I 薄膜型和 CS-1 薄膜型<sup>[14-16]</sup>, 国内外已有较多的实船项目, 其相关研究也较为深入。此外, Kim 等<sup>[17]</sup>在考虑了晃荡载荷的冲击影响后, 针对薄膜型液舱围护系统开展了一系列疲劳试验, 以对其疲劳性能进行全面评估。程成等<sup>[18]</sup>以薄膜型 LNG 船整船为研究对象, 根据 CCS 规范中的要求, 考虑均匀满载和正常压载工况, 采用谱分析法对 LNG 船疲劳关键位置进行了评估, 并提出开发满足薄膜型 LNG 船整船的疲劳谱分析系统。王佳颖等<sup>[19]</sup>根据 ABS 规范要求, 采用谱分析方法对典型装载工况下薄膜型 LNG 全船关键节点区域的疲劳寿命进行了分析, 并对疲劳校核典型区域进行了优化设计, 提高了其疲劳寿命。

独立液舱作为存储液化天然气的重要部件, 由于液舱内低温环境的影响, 采用了支撑与层压木结构, 使液舱与舱体分离。由于焊接工艺与材料本身的缺陷, 液舱焊趾处容易萌生初始裂纹, 在风、浪、流等多种载荷作用下, 初始裂纹会发生扩展, 直至穿透液货舱壁发生泄漏。若舱内低温 LNG 发生泄漏, 将会对船体结构造成极大的安全风险, 因此需要能够准确地评估 LNG 液舱裂纹扩展寿命。

构建疲劳载荷谱是裂纹扩展分析中重要的一个步骤, 根据各大主要船级社的规定, 载荷谱符合两参数的 Weibull 分布, 许多学者对载荷谱的构建进行了研究。Tomita 等<sup>[20]</sup>对北大西洋航行的船舶进行了深入分析, 研究指出, 船舶在航行过程中所受的交变应力分布可以通过 Weibull 分布函数进行有效计算。同时, 根据船舶运行时的海况特点, 将其分为平静海况和风暴海况 2 种情形, 并据此提出了相应的风暴模型。Prasaty 等<sup>[21]</sup>建立了基于风暴模型的荷载历史生成方法。发现风暴模型在以下特性上满足所有要求: 有效波高和平均周期的长期联合概率, 风暴持续时间概率分布, 风暴等级的发生概率和风暴中有效波高变

化率。Moan 等<sup>[22]</sup>考虑到温带地区波浪条件具有季节性变化, 这对海洋结构的波浪引起的极端响应和疲劳损伤的可变性测量非常重要, 利用北海北部不同时间段的散点图, 分析了 FPSO 和半潜式生产储油船的波浪诱导响应。采用混合模型对波浪的参数进行了建模分析, 并发现年分布变化较大。同时, 也研究了疲劳响应与有效波高的相关性。李珊珊等<sup>[23]</sup>提出一种统一的海洋结构疲劳寿命预测方法。为应用此方法于新设计结构, 需制定标准化载荷-时间历程, 如 TWIST 和 FALSTAFF 序列。提出基于短期载荷样本生成海洋结构载荷时间历史的程序, 并展示如何基于疲劳寿命预测方法, 将载荷时间历史应用于海上平台典型管状 T 形接头。然而这些研究对疲劳载荷谱的构建都取了较好成效, 但没有考虑使用这些载荷谱进行疲劳寿命及裂纹扩展寿命分析时的效率问题。因此, 本文将研究疲劳载荷谱的排序对裂纹扩展寿命的影响, 分析不同压缩循环次数下裂纹扩展分析的准确性及效率, 以期提出一种保证准确性的压缩循环次数的高效裂纹扩展寿命评估方法。

## 1 裂纹扩展分析的理论公式

### 1.1 疲劳裂纹扩展速率公式

本研究需要计算半椭圆表面裂纹在单次载荷循环下的裂纹扩展率, 参考相关规范<sup>[24]</sup>与实际的计算需求, 使用 Paris 公式来计算裂纹扩展速率。目前 Paris 公式是实际工程中使用最广泛的经验公式, 它考虑了应力强度因子范围与裂纹扩展速率的直接关系, 已经被验证为一种有效且可靠的方法, 其表达式如公式 (1) 和公式 (2) 所示。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_a)^m \quad (1)$$

$$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_c)^m \quad (2)$$

式中:  $a$  为半椭圆表面裂纹的深度, mm;  $c$  为半椭圆表面裂纹的半长, mm;  $N$  为应力循环次数;  $C$  为裂纹扩展系数;  $m$  为裂纹扩展指数;  $\Delta K_a$  和  $\Delta K_c$  为应力强度因子范围。

### 1.1 裂纹应力强度因子的计算公式

通过 B 型舱的疲劳分析发现, 裂纹萌生位置位于 LNG 液货舱的舱底, 在舱底板、强框架和支撑结构的交点处 (如图 1a 所示)。该区域为多个结构的交接处, 往往会发生应力集中现象, 比起平板结构应力强度因子数值会发生较大变化。因此, 计算此位置的应

力强度因子时,需要在确定平板结构应力强度因子的基础上引入了一个修正系数,即首先计算相同结构尺寸下平板应力强度因子,然后乘以修正系数。目前平板应力强度因子的计算采用 Newman-Raju 公式<sup>[25]</sup>,其表达式如公式(3)所示。

$$K_I = (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \phi\right) \quad (3)$$

修正系数的计算参考规范 BS7910<sup>[26]</sup>中的 Bowness 公式,该公式忽略了焊趾角度的影响,取其确定值 45°。公式(4)和公式(5)给出了均匀拉伸和纯弯曲载荷作用下裂纹最深点位置的修正系数,公式(6)和公式(7)给出裂纹表面点位置的修正系数。

$$M_{km} = f_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{t}\right) + f_3\left(\frac{a}{L}, \frac{L}{c}\right) \quad (4)$$

$$M_{kb} = f_4\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_5\left(\frac{a}{t}\right) + f_6\left(\frac{a}{L}, \frac{L}{c}\right) \quad (5)$$

$$M_{km} = f_7\left(\frac{a}{t}, \frac{c}{a}, \frac{L}{t}\right) + f_8\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_9\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{L}{t}\right) \quad (6)$$

$$M_{kb} = f_{10}\left(\frac{a}{t}, \frac{c}{a}, \frac{L}{t}\right) + f_{11}\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_{12}\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{L}{t}\right) \quad (7)$$

## 2 载荷谱的排序方式对结果的影响

由于 B 型舱裂纹扩展循环载荷的循环次数为 10<sup>8</sup>,为了提高裂纹扩展寿命评估效率,循环中的载荷排布便不可能完全进行随机排序。不同的载荷计算得到的应力强度因子不同,基于 Paris 公式得到的裂纹扩展长度不同,影响下一次循环中的应力强度因子与裂纹扩展长度,进而影响整个扩展过程中各阶段的裂纹尺寸。因此,本研究将分析不同载荷谱的排序方式对裂纹扩展寿命的影响。以含半椭圆形裂纹损伤平板模型为研究对象(如图 1b 和表 1 所示),分析不同排序的载荷谱对裂纹扩展寿命影响。

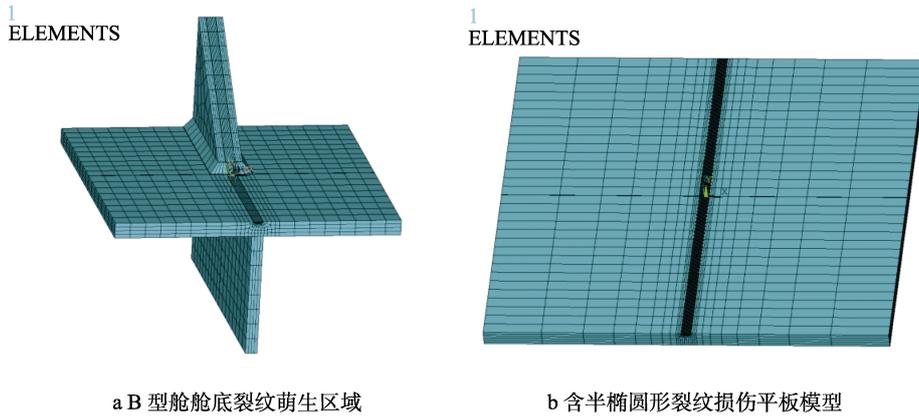


图 1 关键区域及平板有限元模型

Fig.1 Critical region and finite element model of plate: a) crack initiation area at the bottom of type-B tank; b) model of plate with semi-elliptical crack damage

表 1 裂纹扩展分析参数

Tab.1 Crack propagation analysis parameters

板厚 <i>t</i> /mm	半宽 <i>w</i> /mm	裂纹半长 <i>c</i> /mm	裂纹深度 <i>a</i> /mm	膜应力范围/MPa	弯曲应力范围/MPa
16	200	2.5	0.5	60	60

### 2.1 载荷谱的排序方式

基于规范可知,在裂纹扩展分析中,所应用的动载荷谱是基于船舶在其设计寿命内北大西洋海浪谱的长期分布特性来设定的,考虑了载荷超越概率水平达到 10<sup>-8</sup>的情况。用于疲劳裂纹扩展分析的应力长期分布服从双参数的 Weibull 分布,其形状参数为 1.0。20 a (载荷循环次数为 10<sup>8</sup>) 应力范围分布采用简化的线性载荷谱,如图 2 所示。

经过对各个应力范围与对应循环次数的计算后,将 30 个不同应力范围 10<sup>8</sup> 次循环次数按照不同方式进行排序。文中采用了载荷块升序、载荷块降序、载

荷块随机排序和完全随机排序 4 种不同形式构建出相应的载荷谱,如图 3 所示,其中图 3d 仅显示了 10<sup>8</sup> 次循环中前 2 000 次循环数据。

### 2.2 计算结果分析

通过计算得到了总数为 10<sup>8</sup> 循环次数载荷在不同排序下裂纹尺寸扩展的最终结果,如表 2 所示。不同排序下裂纹尺寸扩展过程曲线如图 4 所示。

根据表 2 和图 4 中的结果可以发现,载荷谱的排序方式对裂纹扩展的中间过程产生了较大影响,但对最终裂纹扩展长度结果影响很小。如果输入的应力幅值的数值较大,在小于 10<sup>8</sup> 次循环载荷中,裂纹扩展

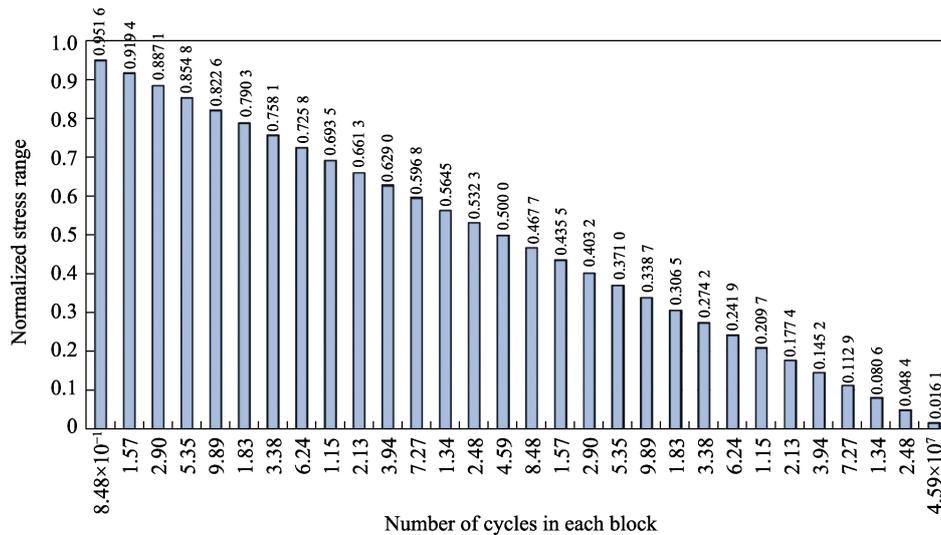


图 2 长期波浪应力范围谱  
Fig.2 Long term wave-induced stress range spectrum

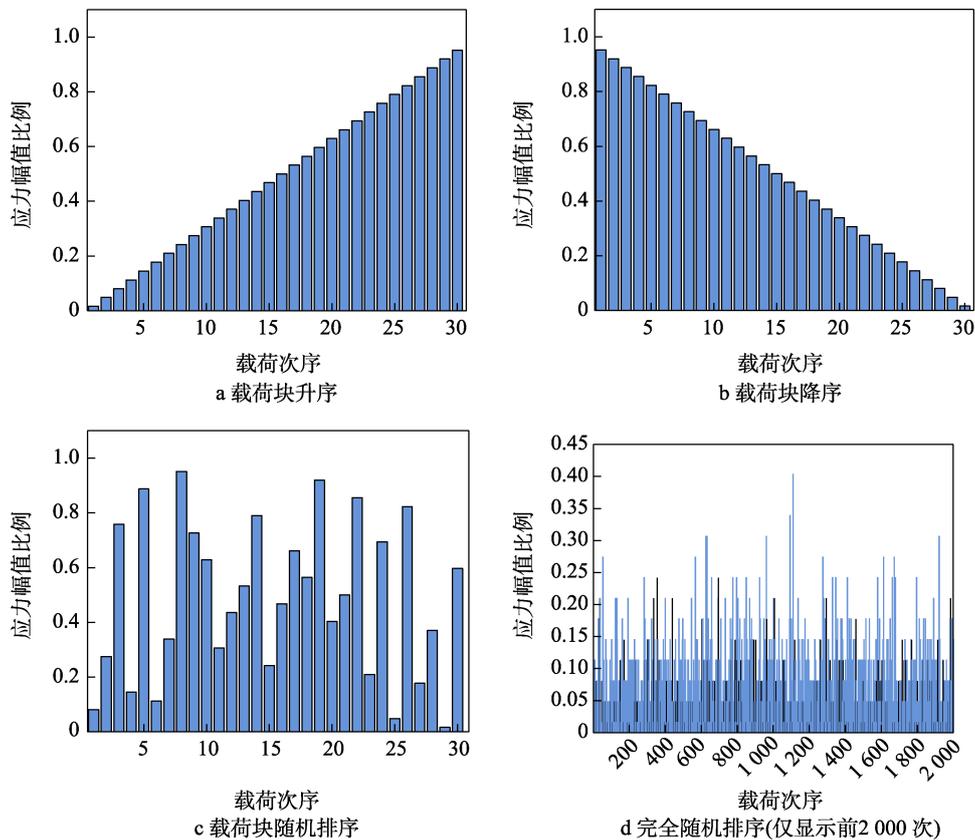


图 3 不同载荷谱的排序方式  
Fig.3 Load spectrum descending: a) load block with ascending order; b) load block with descending order; c) load block with random order; d) random loads (the first 2000 times)

表 2 裂纹扩展计算结果  
Tab.2 Crack propagation calculations

排序方式	裂纹半长 $c/mm$	裂纹深度 $a/mm$
随机载荷谱	14.922	9.271
升序	14.919	9.270
降序	14.924	9.272
载荷块随机	14.924	9.272

深度便超过了板厚,那么不同的载荷次序会对扩展寿命产生较大的影响。与完全随机排序相比,升序的寿命数值更大,降序的寿命数值更小,此时采用与实际情况相符的完全随机排序更合理。如果输入的应力幅值较小,  $10^8$  循环结束后不会穿透板厚,则不需要分析裂纹扩展过程的数值,载荷谱可以采用任意排序方式。因为在裂纹扩展寿命预测中没法提前知道属于哪

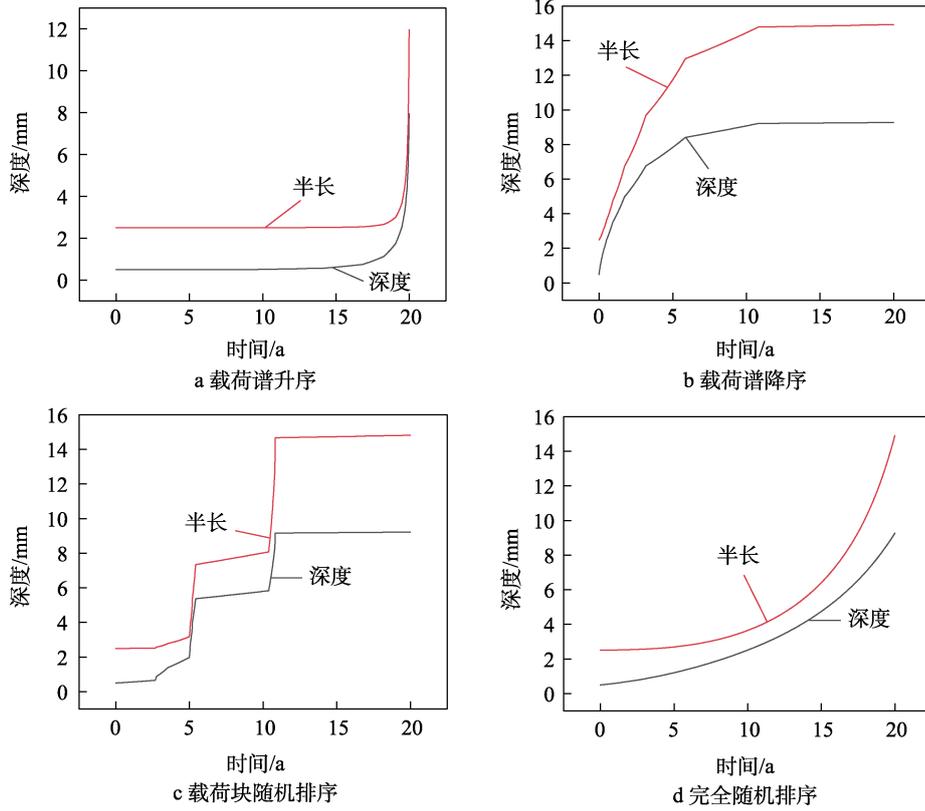


图4 不同载荷谱排序下裂纹扩展长度的计算结果

Fig.4 Results of crack propagation length under different load spectrums: a) load block with ascending order; b) load block with descending order; c) load block with random order; d) random loads

种情况，所以通常采用完全随机排序方式进行载荷的输入。

### 3 裂纹扩展模拟方法研究及准确性分析

在程序设计中，需要输入总次数为  $10^8$  的循环载荷，每次循环载荷确定的裂纹长度增量是下次循环载荷新裂纹尺寸的基础。由于循环次数巨大，使裂纹长度模拟运行时间高达数十分钟，占用了超过 5GB 的内存，严重影响计算效率，甚至低配计算机难以运行程序。如果循环次数提高到更高的数量级，以完整的载荷谱进行的循环计算将难以进行。

出于计算速度和节省内存等需求，结合  $10^8$  的循环载荷的特点，本文提出了 2 种简化的裂纹扩展模拟方法，极大提高了计算效率。2 种方法均设置了一个新的变量：压缩循环次数  $N$ ，它的意义是降低更新初始新裂纹的次数，使原来需要更新  $10^8$  初始新裂纹减少到  $N$  次。方法一中总循环次数就是压缩循环次数，方法二中总循环次数为压缩循环次数乘以载荷块数。

#### 3.1 方法一

首先读取如图 2 所示的 30 项应力幅值与对应的循环次数，计算每项应力幅值对应的当前裂纹尺寸下

应力强度因子幅值，结合式 (1) 和式 (2) 计算裂纹扩展值。然后将每项的扩展值与对应的循环次数相乘，获得每个载荷块的裂纹扩展值。最后将 30 个载荷块扩展值相加确定总扩展值后除以压缩循环次数  $N$ ，获得在  $N$  次循环中每次循环裂纹扩展值，如式 (8) 所示。

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^M f(i)n(i)}{N} \tag{8}$$

式中： $N$  为设定的压缩循环次数； $\Delta$  为  $N$  次循环中每次循环的平均裂纹长度增量，它是下次循环中裂纹尺寸参数的基础； $f(i)$  为第  $i$  项应力幅计算的扩展值，它随着裂纹尺寸的变化而变化； $n(i)$  为第  $i$  项应力幅对应的循环次数； $M$  为载荷块个数，文中  $M=30$ 。

设定不同的压缩循环次数时，裂纹扩展的变化曲线如图 5 所示。可以看出，当设定的循环次数较少时，计算结果精度不满足要求。随着循环次数的增加，结果逐渐趋近准确值 ( $c=14.922$  mm 和  $a=9.271$  mm)。在压缩循环次数为 1 000 次时，结果就达到了一个非常高的精准度。

#### 3.2 方法二

首先采用方法一相同的方式获得每个载荷块的裂纹扩展值。然后将第一个载荷块的扩展量除以压缩循环次数  $N$ ，获得  $N$  次循环中每次循环裂纹扩展值的

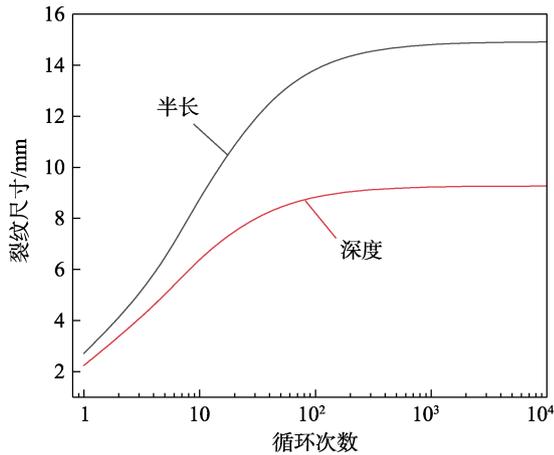


图 5 方法一计算结果  
Fig.5 Results of method 1

平均值, 如公式 (9) 所示。最后按照载荷块的顺序 (如图 3a~c 所示), 计算相应的裂纹扩展值, 得到裂纹最终模拟结果。

$$\Delta = \frac{f(i)n(i)}{N} \quad (9)$$

不同压缩循环次数下, 裂纹扩展长度的变化曲线如图 6 所示。可以看出, 随着循环次数的增加, 结果逐渐趋近准确值。计算中每个载荷块的压缩循环次数为 100 次, 在经历所有的 30 个载荷块循环之后, 即总循环次数达到 3 000 次时, 结果便达到了很高的精度。

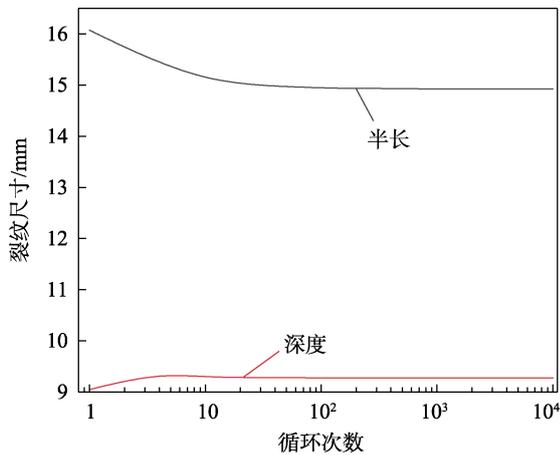


图 6 方法二计算结果  
Fig.6 Results of method 2

### 3.3 计算方法对比分析

将 2 种方法的计算结果与完整的随机排序计算结果相比较进行对比, 不同压缩循环次数下它们的相对误差如表 3 所示。

对比 2 种方法和随机排序的计算结果, 在程序的循环次数设置到一个足够大的数值后, 使用 2 种方法

都有非常高的精度。在 2 种计算方法设定的压缩循环次数使结果达到较高的精度时, 即方法一的压缩循环次数为 1 000 时, 方法二的压缩循环次数为 10 (实际循环次数为 300) 时, 这两种方法的运行时间均小于 1 s, 证明这 2 种方法均有一定的实用价值。

表 3 计算误差对比  
Tab.3 Comparison of calculation errors

压缩循环次数	%			
	方法一		方法二	
	半长 误差	深度 误差	半长 误差	深度 误差
1	-81.80	-75.86	7.71	-2.44
5	-56.60	-45.84	2.98	0.50
10	-41.32	-31.21	1.57	0.31
50	-13.47	-9.03	0.33	0.08
100	-7.35	-4.81	0.17	0.04
500	-1.59	-1.02	0.04	0.01
1 000	-0.80	-0.51	0.03	0.01
5 000	-0.16	-0.10	0.01	0.01
10 000	-0.08	-0.05	0.01	0.01

这 2 种模拟的裂纹扩展方法, 相当于对输入的载荷次序进行了不同的排序方式。方法一相当于对载荷进行了随机排序, 压缩后的载荷谱等同于大小不同的应力范围均匀分布在整个谱之上; 方法二相当于顺序排序, 各载荷块是按顺序进行计算的。对于总循环次数为  $10^8$  载荷, 无论是随机排序还是顺序排序都需要 10 min 以上的计算时间, 这 2 种方法处理同样载荷仅需要 1 s 即可, 刚好解决了占用内存大, 对更多循环次数难以运行的问题, 极大提高了计算效率。在实际使用中, 针对不同的计算需求, 可以选择对应方法进行计算。

## 4 结论

本文针对开发 LNG 独立液舱裂纹扩展寿命分析程序中遇到的由于疲劳载荷循环次数巨大, 导致程序的计算效率较低且对其应用的计算机性能要求较高这一问题, 开展了不同疲劳载荷排序对裂纹扩展尺寸计算的影响及提高裂纹扩展尺寸计算效率的方法研究, 具体的结论如下:

1) 探讨了载荷谱的排序方式对裂纹扩展结果的影响, 通过设置不同的排序方式, 包括升序、降序、载荷块随机排序和完全随机排序, 对裂纹扩展的中间过程和最终结果进行了对比分析。当应力幅值较小, 且循环不会穿透板厚或达到失稳点时, 载荷谱的排序方式对最终结果的影响较小。然而, 在应力幅值较大, 裂纹可能在循环过程中穿透板厚或达到失稳点的情

况下, 载荷谱的排序方式对扩展寿命具有较大影响。

2) 提出了 2 种降低计算时间和内存消耗的裂纹扩展方法, 通过与完全随机排序计算结果相比较, 很好地证明这 2 种方法不仅能显著减少计算时间和内存占用, 而且均达到较高的计算精度。

#### 参考文献:

- [1] 顾安忠. 迎向“十二五”中国 LNG 的新发展[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 1-11.  
GU A Z. Outlook of LNG Development in the Twelfth “Five-Year” Plan of China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 1-11.
- [2] 甘少炜. 新能源和替代燃料船舶发展现状与展望[J]. 交通运输部管理干部学院学报, 2023, 33(4): 32-35.  
GAN S W. Development and Prospect of New Energy and Alternative Fuel Vessels[J]. Journal of Transport Management Institute Ministry of Transport, 2023, 33(4): 32-35.
- [3] 丁玲. 中小型 LNG 船 C 型独立液罐设计关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
DING L. Research on Key Technology Of C-Type Independent Liquid Tank Design for Small and Medium-Sized LNG Carriers[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [4] 钟应华. 14.7 万 m<sup>3</sup> 球罐型 LNG 船设计和建造初步研究[J]. 船舶工程, 2005, 27(S1): 99-105.  
ZHONG Y H. The Preliminary Study of Design and Construction of 147, 000 m<sup>3</sup> MOSS LNG Carrier[J]. Ship Engineering, 2005, 27(S1): 99-105.
- [5] 唐建鹏. 薄膜型 LNG 船疲劳强度分析与评估方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
TANG J P. Study on Fatigue Strength Analysis and Evaluation Method of Thin-Film LNG Carrier[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [6] 梁桂芳. LNG 运输船用铝合金储罐的制造工艺[J]. 造船技术, 1987, 15(8): 31-34.  
LIANG G F. Manufacturing Technology of Aluminum Alloy Storage Tank for LNG Carrier[J]. Journal of Marine Technology, 1987, 15(8): 31-34.
- [7] 张则松. LNG 运输船总体设计与型线优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.  
ZHANG Z S. Study on Overall Design and Profile Optimization of LNG Carrier[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [8] 宋吉卫. 大型 LNG 船船型设计研究[J]. 中国造船, 2012, 53(4): 164-170.  
SONG J W. Ship Form Research and Design for Large LNG Carrier[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(4): 164-170.
- [9] 裴召华. 大型球罐支撑结构有限元分析及研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.  
PEI Z H. Finite Element Analysis and Research on Supporting Structure of Large Spherical Tank[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [10] 刘梦. 国内现有液化气船的稳性分析[J]. 中国水运(学术版), 2006, 6(1): 89-90.  
LIU M. Stability Analysis of Existing Domestic Liquefied Gas Carriers[J]. China Water Transportation (Academic Edition), 2006, 6(1): 89-90.
- [11] 付海泉, 屈晟, 尹丹霓. 利用中小型船舶运输 LNG 的可行性[J]. 油气储运, 2012, 31(11): 845-849.  
FU H Q, QU S, YIN D N. Feasibility of LNG Shipping by Small or Medium-Sized Ships[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(11): 845-849.
- [12] 耿元伟, 韩松标, 张汇平, 等. B 型 LNG 独立舱结构的计算分析[J]. 船海工程, 2018, 47(3): 52-55.  
GENG Y W, HAN S B, ZHANG H P, et al. Strength Analysis for Independent Type-B LNG Tank[J]. Ship & Ocean Engineering, 2018, 47(3): 52-55.
- [13] 阎晓艳, 林莉, 王刚, 等. LNG 船的疲劳强度计算与分析[J]. 船舶, 2003, 14(6): 19-23.  
YAN X Y, LIN L, WANG G, et al. Calculation and Analysis of LNG Ship Fatigue Strength[J]. Ship & Boat, 2003, 14(6): 19-23.
- [14] 章泽华, 张奕, 艾绍平. 薄膜型 LNG 储罐[J]. 石油工程建设, 2013, 39(3): 1-3.  
ZHANG Z H, ZHANG Y, AI S P. Membrane-Type Storage Tank: A New Type of LNG Tank[J]. Petroleum Engineering Construction, 2013, 39(3): 1-3.
- [15] 王捷. 大型液化天然气运输船面临的船型设计挑战[J]. 造船技术, 2006, 34(6): 1-3.  
WANG J. The Challenge Faced by Ship Form Design for the LNG Carrier[J]. Marine Technology, 2006, 34(6): 1-3.
- [16] 王永伟, 王晶. SPB 储罐系统设计及特点[J]. 船舶物资与市场, 2007, 15(6): 18-20.  
WANG Y W, WANG J. Design and Characteristics of SPB Storage Tank System[J]. Marine Equipment/ Materials & Marketing, 2007, 15(6): 18-20.
- [17] KIM M H, LEE S M, LEE J M, et al. Fatigue Strength Assessment of MARK-III Type LNG Cargo Containment System[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(14/15): 1243-1252.
- [18] 程成, 赵吉, 韦喜忠, 等. 基于谱分析的薄膜型 LNG 船整船疲劳强度评估[J]. 船海工程, 2021, 50(6): 1-5.  
CHENG C, ZHAO J, WEI X Z, et al. Fatigue Strength Assessment of the Whole Membrane LNG Carrier Based on Spectrum Analysis[J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50(6): 1-5.
- [19] 王佳颖, 金燕子, 杨仁记, 等. 薄膜型 LNG 船全船结构屈服和疲劳强度分析[J]. 船舶与海洋工程, 2017, 33(2): 1-9.  
WANG J Y, JIN Y Z, YANG R J, et al. Analysis on the Yield Strength and Structure Fatigue of a Membrane LNG Carrier with Global Finite Element Method[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2017, 33(2): 1-9.
- [20] TOMITA Y, MATOBA T M, KAWABEL H. Fatigue Crack Growth Behavior under Random Loading Model Simulating Real Encountered Wave Condition[J]. Marine

- Structures, 1995, 8(4): 407-422.
- [21] PRASETYO F A, OSAWA N, KOBAYASHI T. Study on Preciseness of Load History Generation Based on Storm Model for Fatigue Assessment of Ship Structure Members[C]//Proceedings of the Twenty-Second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes: [s. n.], 2012.
- [22] MOAN T, GAO Z, AYALA-URAGA E. Uncertainty of Wave-Induced Response of Marine Structures Due to Long-Term Variation of Extratropical Wave Conditions[J]. Marine Structures, 2005, 18(4): 359-382.
- [23] LI S S, CUI W C. Generation and Application of a Standardized Load-Time History to Tubular T-Joints in Offshore Platforms[J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(5): 633-648.
- [24] 中国船级社. 散装运输液化气体船舶构造与设备规范[S]. 北京: 中国船级社, 2022.
- ChinaClassification Society. Standards for the Structural Design and Equipment of Bulk Carriers for Liquefied Gases[S]. Beijing: ChinaClassification Society, 2022.
- [25] NEWMAN J C, RAJU I S. An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15(1/2): 185-192.
- [26] Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures (British Standard): BS 7910: 2019[S]. BSI Standards Publication, 2019.