



# 高温气冷堆反应堆压力容器在几种典型瞬态 条件下的概率断裂力学分析

汇报人：李博文

作者：李博文，王海涛，彭磊

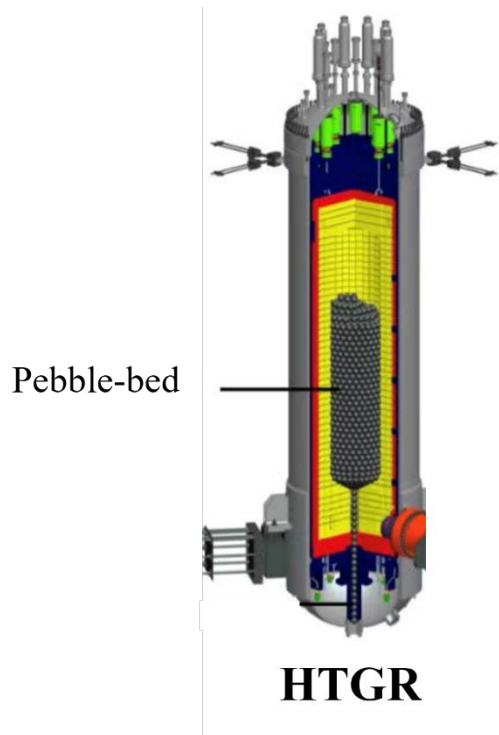
学科：核科学与技术

导师：王海涛教授

2025/5/18

# 高温气冷堆反应堆压力容器

## 高温气冷堆High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR)

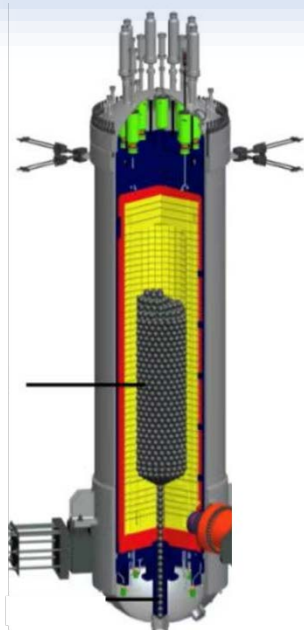


- 第四代反应堆之一，使用氦作为冷却剂，石墨作为慢化剂和反射层，具有固有安全性。
- 衰变热的导出可以仅依赖于固体材料的热传导和热辐射。
- 即使在所有冷却剂损失的极端情况下，只要保持反应堆堆芯的几何形状，衰变热也可以以自然的方式安全排出。
- 我国高温气冷堆核电站示范工程HTR-PM的安全试验证明了其固有安全性<sup>[1]</sup>。

1. Z.Y. Zhang, Y.J Dong, F.Li, et al. Loss-of-cooling Tests to Verify Inherent Safety Feature in the World's First HTR-PM Nuclear Power Plant[J]. Joule, 2024, 8(7), 2146-2159.

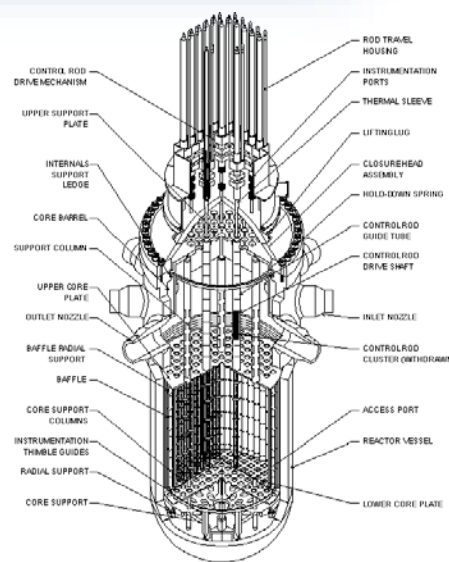
# 高温气冷堆反应堆压力容器

高温气冷堆和水堆的RPV服役环境不同，承担安全功能的重要性也不同



HTGR

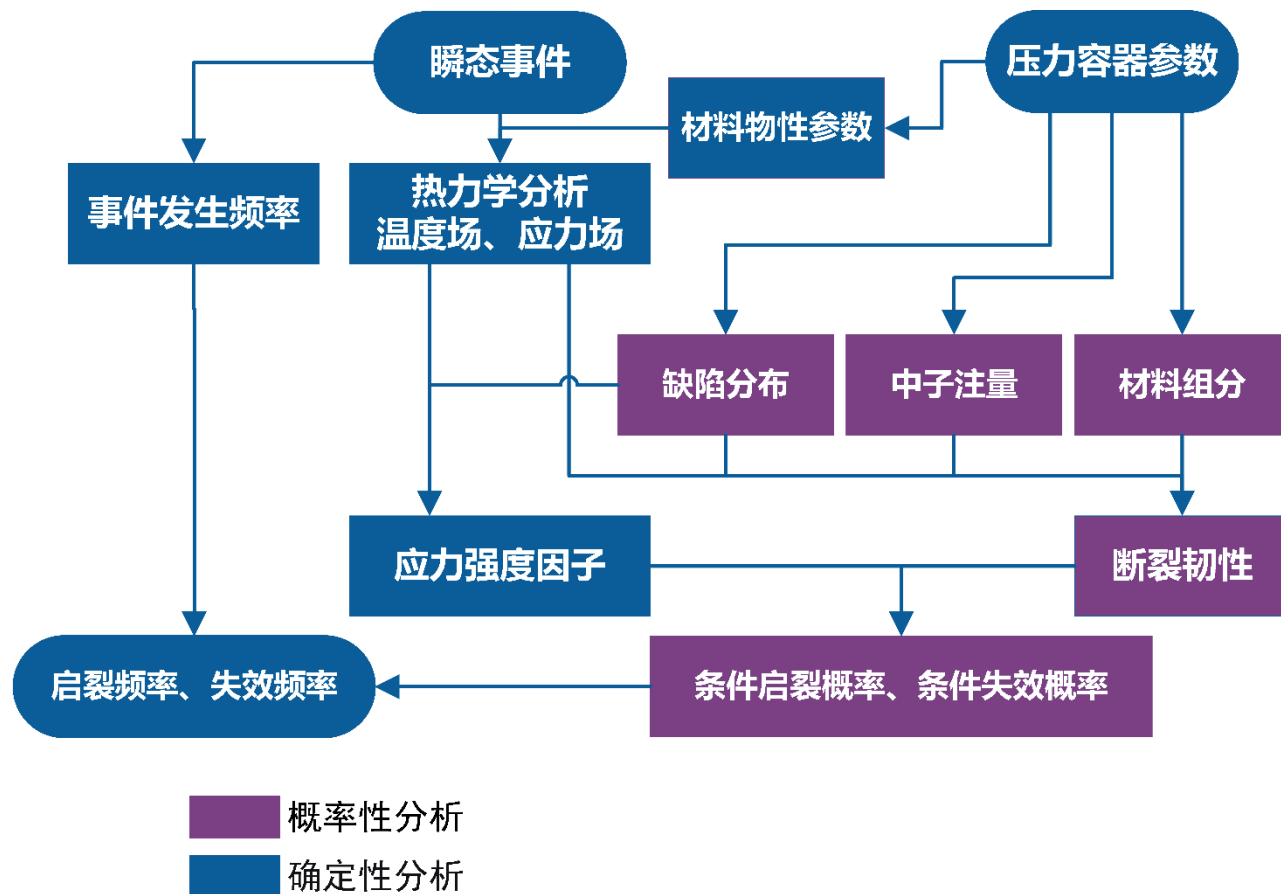
- 沿HTGR-RPV壁厚的温度瞬态通常是缓慢的，且衰变热可以依赖导热和辐射自然排出。
- 由于石墨反射层的存在，高温气冷堆RPV所受的快中子辐照水平显著低于典型的1000MWe压水堆的RPV。
- 在安全要求方面，与压水堆要求其RPV保持足够的冷却剂装量不同，高温气冷堆仅要求其RPV保持堆芯的几何形状即可。



PWR

有可能优化高温气冷堆在役检查策略，并采用不同于安全1级承压容器的制造规范

# 概率断裂力学



## 确定性断裂力学

### Deterministic Fracture Mechanics(DFM)

对缺陷分布、温度与载荷、断裂韧性等参数做出偏于安全的假设，对各个参数选取确定值进行评定。

## 概率断裂力学

### Probabilistic Fracture Mechanics(PFM)

反应堆压力容器的概率断裂力学分析是在确定性断裂力学的基础上，应用概率统计理论**考虑相关参数的统计分布特性**，结合**可靠性概率风险评价**，利用**蒙特卡洛**分析方法进行压力容器的结构完整性**概率评估**<sup>[1-2]</sup>。

1. R.A. Smith (Ed.). Fracture mechanics: Current status, future prospects[M]. Cambridge: Pergamon Press, 1979.
2. G.O. Johnston. A review of probabilistic fracture mechanics literature[J]. Reliability Engineering, 1982, 3(6): 423-448.

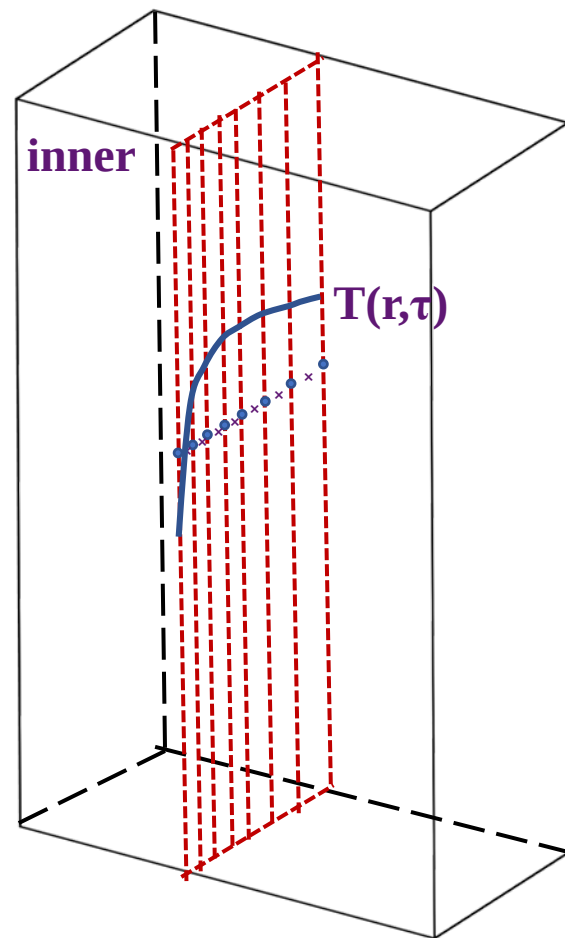
# 反应堆压力容器温度场与应力场计算

沿壁厚方向的温度分布 $T(r, \tau)$ 可由二阶抛物型偏微分方程求解。

采用一维轴对称结构，建立筒体的极坐标 $(r, \theta, z)$ 。对容器堆芯区进行热力学计算。

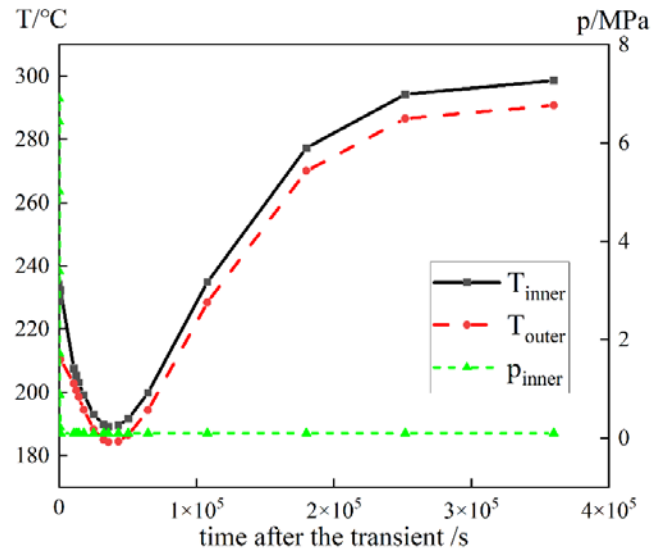
应力场：对于一维轴对称模型， $(r, \theta, z)$ 为主方向。联立物理方程、平衡方程、几何方程，计算得到应力场。假设边界条件为**内侧承压 $p_i$** ，方向为内壁面内法线方向；**外侧承压 $p_o$** ，方向为外壁面内法线方向；**两端封口**，则：

$$\begin{cases} \sigma_{rr}(r = R_i) = C_3 - \frac{C_4}{r^2} = -p_i \\ \sigma_{rr}(r = R_o) = -\frac{E\alpha}{(1-\mu)r^2} \int_{R_i}^{R_o} (T - T_{ref}) r dr + C_3 - \frac{C_4}{r^2} = -p_o \\ \int_{R_i}^{R_o} 2\pi r \sigma_{zz} dr = \pi(R_i^2 p_i - R_o^2 p_o) \end{cases}$$

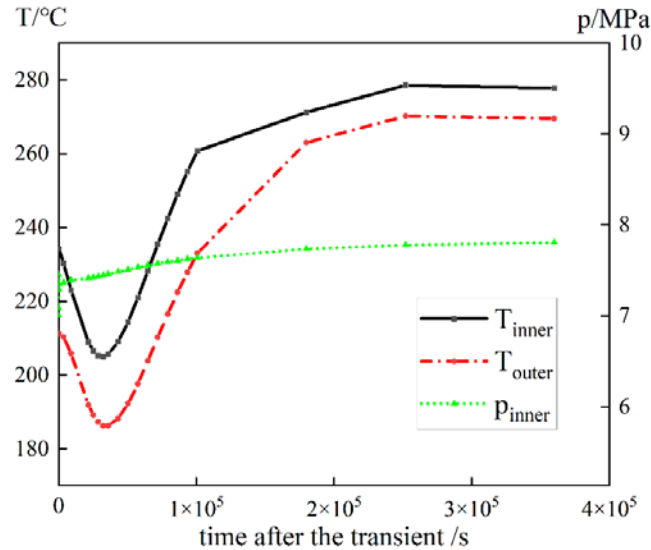


据此可解出环向应力场  $\sigma_{\theta\theta}(r, \tau)$  、  
轴向应力场  $\sigma_{zz}(r, \tau)$

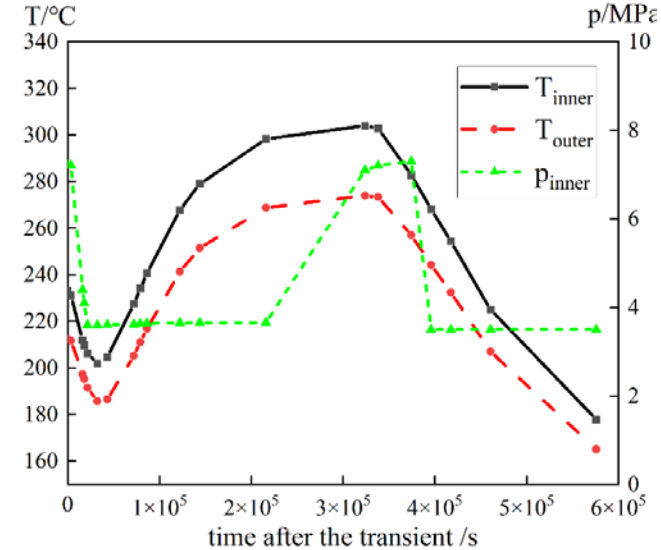
# 反应堆压力容器温度场与应力场计算



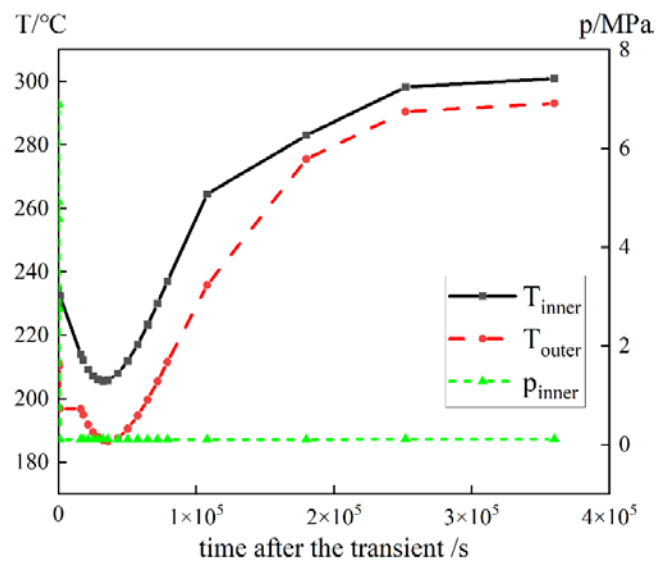
瞬态1



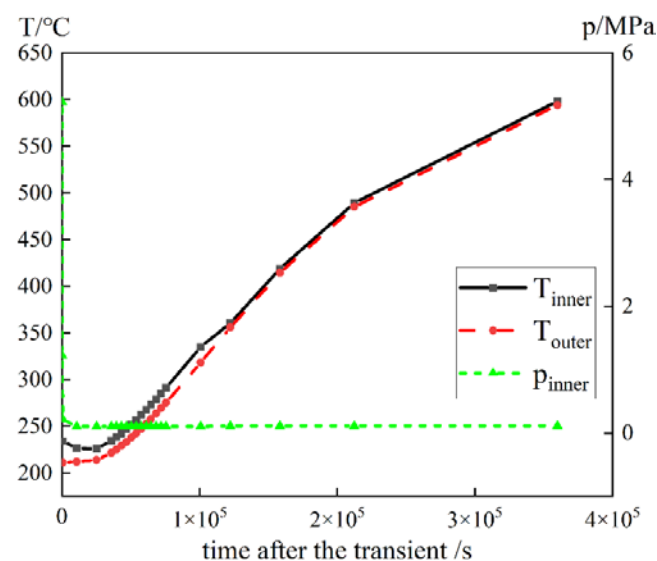
瞬态2



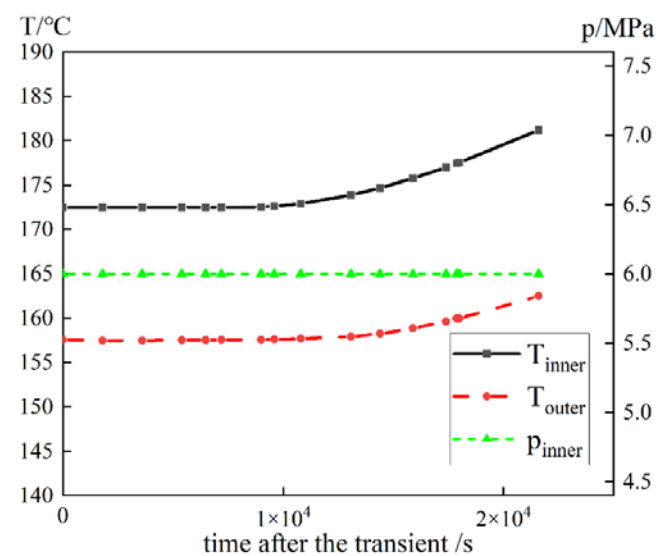
瞬态3



瞬态4



瞬态5

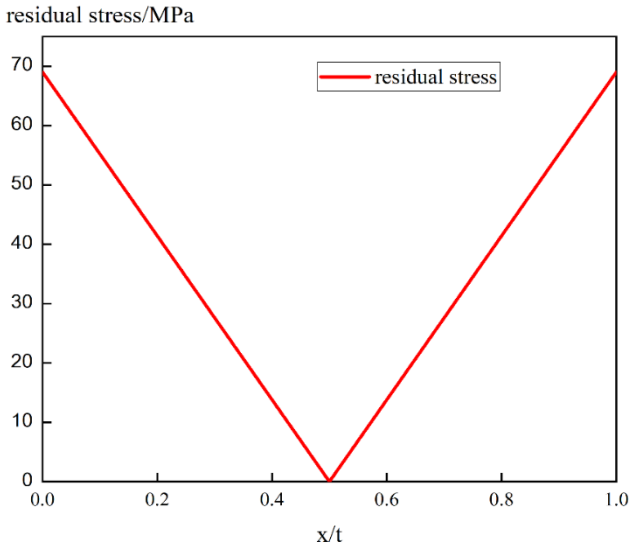


瞬态6

# 反应堆压力容器温度场与应力场计算

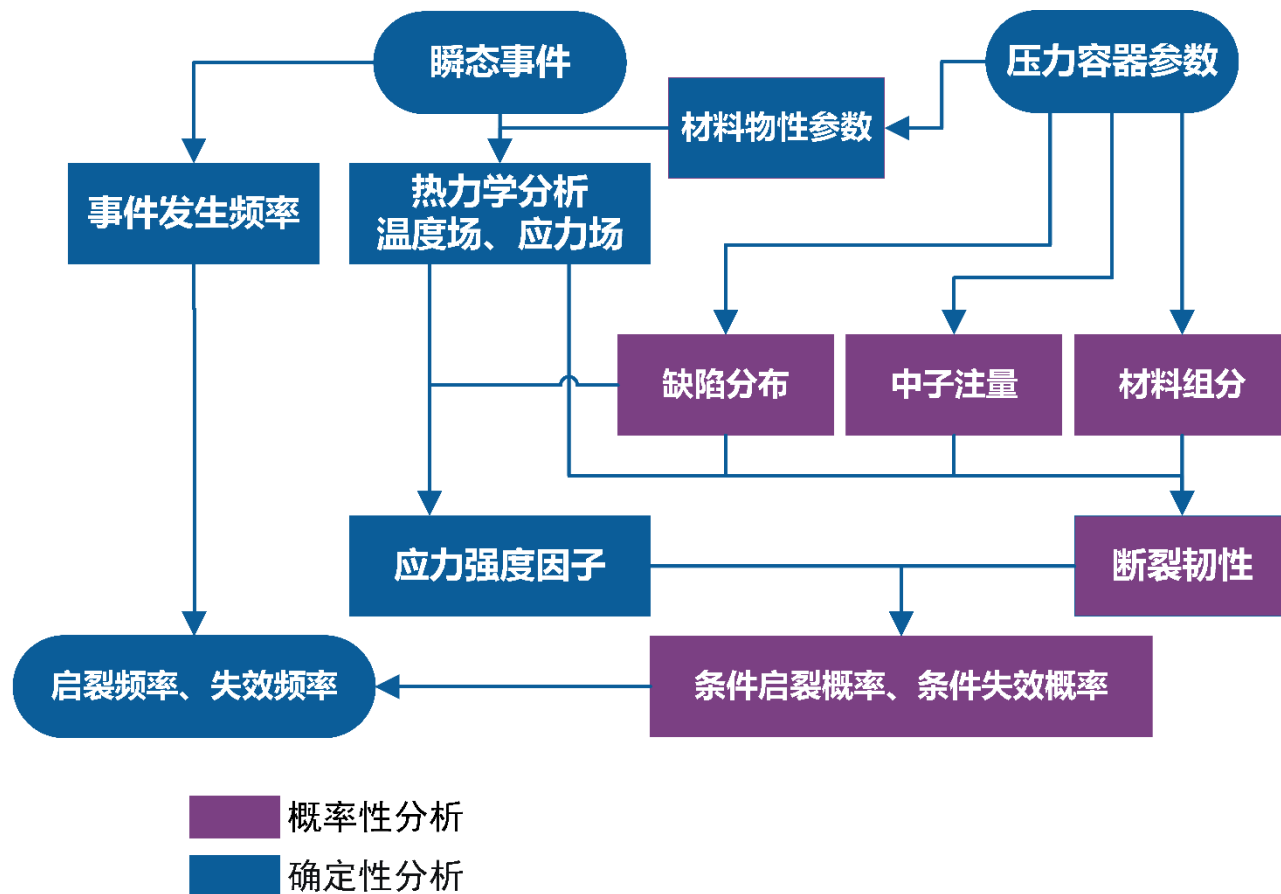
| 序号 | 瞬态                          | 发生频率（1/堆年） |
|----|-----------------------------|------------|
| 1  | 破口事故（不可隔离DN65mm断管）          | 7.22E-05   |
| 2  | 二回路丧失给水                     | 2.16E-01   |
| 3  | 紧急停堆后小流量冷却                  | 2.34       |
| 4  | 破口ATWS                      | 2.50E-05   |
| 5  | 失冷失压事故叠加反应堆舱室冷却系统失效         | 2.39E-07   |
| 6  | 工况1“1#（或 2#）NSSS 启动、汽机冷态启动” | 3.55       |

参考ASME XI卷附录E<sup>[1]</sup>并做了适当修改，在焊缝区施加容器内外表面+69MPa，壁厚中点值为0，沿容器壁线性分布的残余应力。



1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants, 2021 Edition.

# 概率断裂力学



## 确定性断裂力学

### Deterministic Fracture Mechanics(DFM)

对缺陷分布、温度与载荷、断裂韧性等参数做出偏于安全的假设，对各个参数选取确定值进行评定。

## 概率断裂力学

### Probabilistic Fracture Mechanics(PFM)

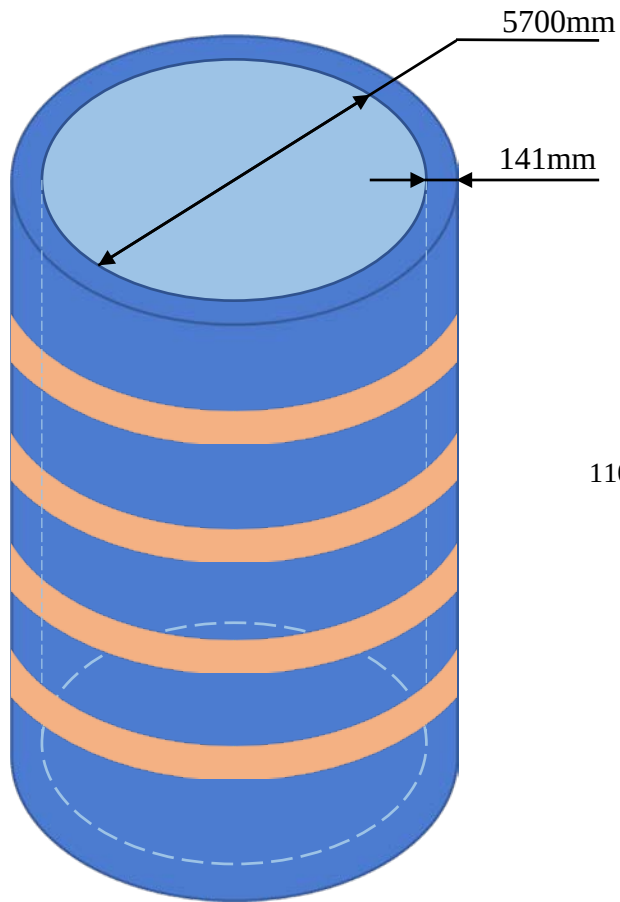
反应堆压力容器的概率断裂力学分析是在确定性断裂力学的基础上，应用概率统计理论**考虑相关参数的统计分布特性**，结合**可靠性概率风险评价**，利用**蒙特卡洛**分析方法进行压力容器的结构完整性**概率评估**<sup>[1-2]</sup>。

1. R.A. Smith (Ed.). Fracture mechanics: Current status, future prospects[M]. Cambridge: Pergamon Press, 1979.
2. G.O. Johnston. A review of probabilistic fracture mechanics literature[J]. Reliability Engineering, 1982, 3(6): 423-448.



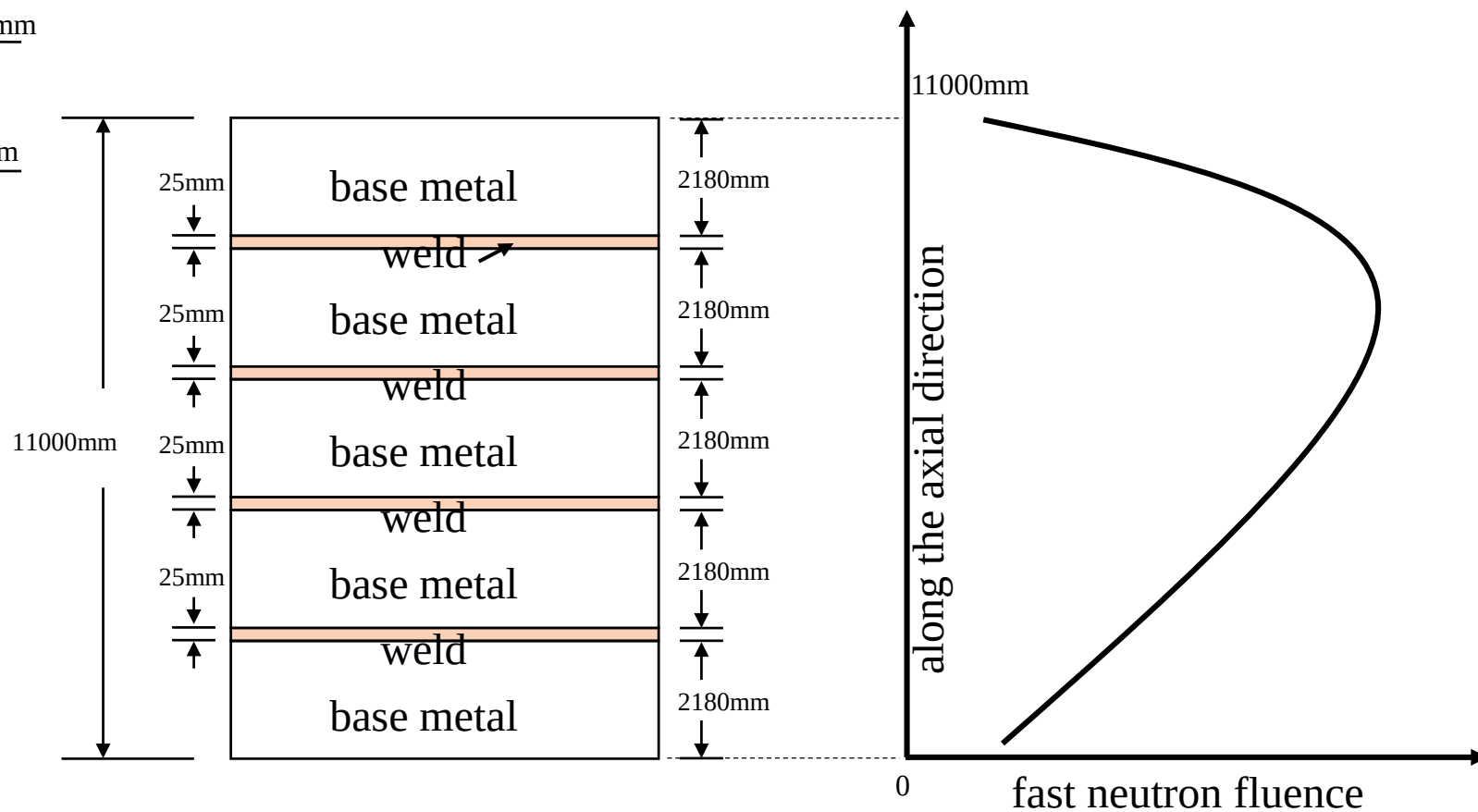
# 计算过程与结果

## RPV几何参数

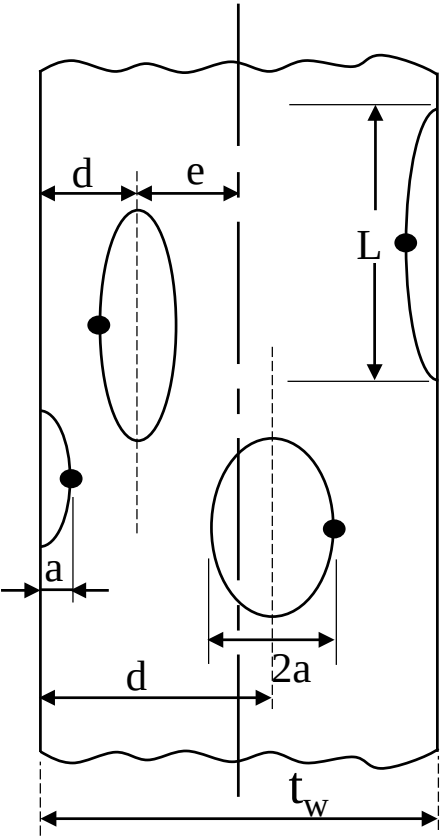


base metal      weld

## 中子注量分布



# 计算过程与结果



● calculation point

- a) 第一列：缺陷位置。
- b) 第二列：缺陷方向。
- c) 第三列：缺陷所处材料。
- d) 第四列：缺陷尺寸。
- e) 第五列：缺陷密度，即此种缺陷在此种尺寸下的数量。
- f) 第六列及之后：缺陷形状比例分布情况。表面缺陷的形状比例分布按列分别为2、6、10和无限长，后续列无意义；埋藏缺陷的形状比例分布按列分别为1.125、1.375、1.75、2.5、3.5、4.5、5.5、7、9、12.5、15。

| 1 | 2 | 3 | 4    | 5           | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       |
|---|---|---|------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5 | 0 | 1 | 0.01 | 9048.7992   | 2.284885 | 2.231977 | 4.310205 | 8.038667 | 7.322123 | 6.670671 | 6.0782   | 10.58794 | 8.798161 | 16.04441 | 27.63275 |
| 5 | 0 | 1 | 0.02 | 694.55672   | 6.680405 | 6.229931 | 11.22972 | 18.27489 | 13.84933 | 10.50433 | 7.972632 | 10.65413 | 6.153476 | 6.293797 | 2.157341 |
| 5 | 0 | 1 | 0.03 | 66.34984    | 13.92482 | 11.93934 | 19.04338 | 24.47661 | 13.47931 | 7.485865 | 4.186462 | 3.687118 | 1.18872  | 0.54824  | 0.040109 |
| 5 | 0 | 1 | 0.04 | 18.7570864  | 20.3837  | 16.10569 | 22.88277 | 23.70857 | 9.749281 | 4.095175 | 1.745733 | 1.077345 | 0.203637 | 0.047344 | 0.000778 |
| 5 | 0 | 1 | 0.05 | 5.4824396   | 28.2125  | 19.98129 | 24.41168 | 19.30279 | 5.558313 | 1.707795 | 0.549628 | 0.243911 | 0.028273 | 0.003794 | 0.000019 |
| 5 | 0 | 1 | 0.06 | 2.3380632   | 36.68211 | 22.97133 | 23.61827 | 13.57439 | 2.4814   | 0.513972 | 0.118561 | 0.037167 | 0.002602 | 0.000207 | 0        |
| 5 | 0 | 1 | 0.07 | 1.33060616  | 43.74195 | 24.4826  | 21.48717 | 9.116343 | 1.016293 | 0.131061 | 0.020101 | 0.004285 | 0.000176 | 0.000008 | 0        |
| 5 | 0 | 1 | 0.08 | 0.8610106   | 49.28098 | 24.94904 | 19.06887 | 6.225285 | 0.437649 | 0.03444  | 0.003285 | 0.00045  | 0.00001  | 0        | 0        |
| 5 | 0 | 1 | 0.09 | 0.58135204  | 53.91776 | 24.83171 | 16.71788 | 4.321578 | 0.200497 | 0.00995  | 0.000578 | 0.000048 | 0.000001 | 0        | 0        |
| 5 | 0 | 1 | 0.1  | 0.39749748  | 58.00623 | 24.35446 | 14.5234  | 3.017694 | 0.094998 | 0.003097 | 0.000112 | 0.000006 | 0        | 0        | 0        |
| 5 | 1 | 0 | 0.01 | 8722.7415   | 46.75308 | 21.9478  | 15.54054 | 5.601463 | 1.710962 | 1.307802 | 1.09991  | 1.717063 | 1.228796 | 1.75269  | 1.339877 |
| 5 | 1 | 0 | 0.02 | 2863.33146  | 88.77727 | 8.969366 | 1.222117 | 0.37729  | 0.233297 | 0.148719 | 0.095255 | 0.100967 | 0.042628 | 0.028578 | 0.004504 |
| 5 | 1 | 0 | 0.03 | 126.682809  | 85.24916 | 3.578091 | 2.923855 | 3.721114 | 2.042499 | 1.12112  | 0.615379 | 0.523186 | 0.157629 | 0.064584 | 0.003387 |
| 5 | 1 | 0 | 0.04 | 11.6113866  | 30.06935 | 13.29398 | 19.41989 | 21.14644 | 9.131114 | 3.942854 | 1.702541 | 1.05261  | 0.196264 | 0.044306 | 0.000675 |
| 5 | 1 | 0 | 0.05 | 6.9946371   | 28.88017 | 16.82977 | 22.64822 | 20.89342 | 7.097289 | 2.410879 | 0.818951 | 0.372688 | 0.043004 | 0.005584 | 0.000025 |
| 1 | 0 | 1 | 0.03 | 0.071655898 | 67.4503  | 20.76893 | 3.964178 | 7.816589 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 1 | 0 | 0 | 0.03 | 7.685446272 | 67.4503  | 20.76893 | 3.964178 | 7.816589 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 3 | 0 | 1 | 0.03 | 0.071655898 | 67.4503  | 20.76893 | 3.964178 | 7.816589 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 3 | 0 | 0 | 0.03 | 3.842723136 | 67.4503  | 20.76893 | 3.964178 | 7.816589 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 3 | 1 | 0 | 0.03 | 3.842723136 | 67.4503  | 20.76893 | 3.964178 | 7.816589 | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

|      | 表面缺陷 | 埋藏缺陷 |
|------|------|------|
| 缺陷尺寸 | a    | 2a   |
| 形状比例 | L/a  | L/2a |
| 缺陷深度 | 0    | d    |

# 计算过程与结果

## 缺陷分布

- 为了模拟更严峻的缺陷情况，以模拟不同的制造能力
- 为了获得RPV在缺陷尺寸和密度方面的裕度

(1) 基础的缺陷尺寸和密度<sup>[1]</sup>

(2) 缺陷尺寸和密度放大为原来的二倍

(3) 缺陷尺寸和密度放大为原来的四倍

## 温度修正——RT<sub>NDT-cro</sub>

HTGR的辐照温度（~200℃）略低于RG1.99标准温度（288℃），以RG1.99 Rev.2 公式为基础，叠加温度修正值RT<sub>NDT-cro</sub>来建立HTGR的辐照预测模型，取温度修正值为30℃，可以包络辐照温度在60-288℃中材料实测的RT<sub>NDT</sub>（最大24.6℃）<sup>[2]</sup>

## 材料成分——SA-508-3-1

[2-4]

|    | Cu   | Ni    | RT <sub>NDT0</sub> | σ <sub>RT<sub>NDT0</sub></sub> | RT <sub>NDT-cro</sub> |
|----|------|-------|--------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 母材 | 0.1% | 0.05% | -20℃               | 0                              | 30℃                   |
| 焊缝 | 0.8% | 0.8%  | -20℃               | 17°F                           | 30℃                   |

1. F. A. Simonen, S. R. Doctor, G. J. Schuster, et al. A Generalized Procedure for Generating Flaw-Related Inputs for the FAVOR Code[R]. Pacific Northwest National Laboratory, 2003.
2. F. M. Haggag. Effects of Irradiation Temperature on Embrittlement of Nuclear Pressure Vessel Steels, Effects of Radiation on Materials: 16th International Symposium[R], ASTM STP 1175.
3. The American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Section II, Ferrous Material Specifications (2021 Edition)[S], ASME, 2021.
4. P.T. Williams, T.L. Dickson, B.R. Bass, et al. Fracture Analysis of Vessels – Oak Ridge FAVOR, v16.1, Computer Code: Theory and Implementation of Algorithms, Methods, and Correlations[R]. Oak Ridge National Laboratory, 2016.

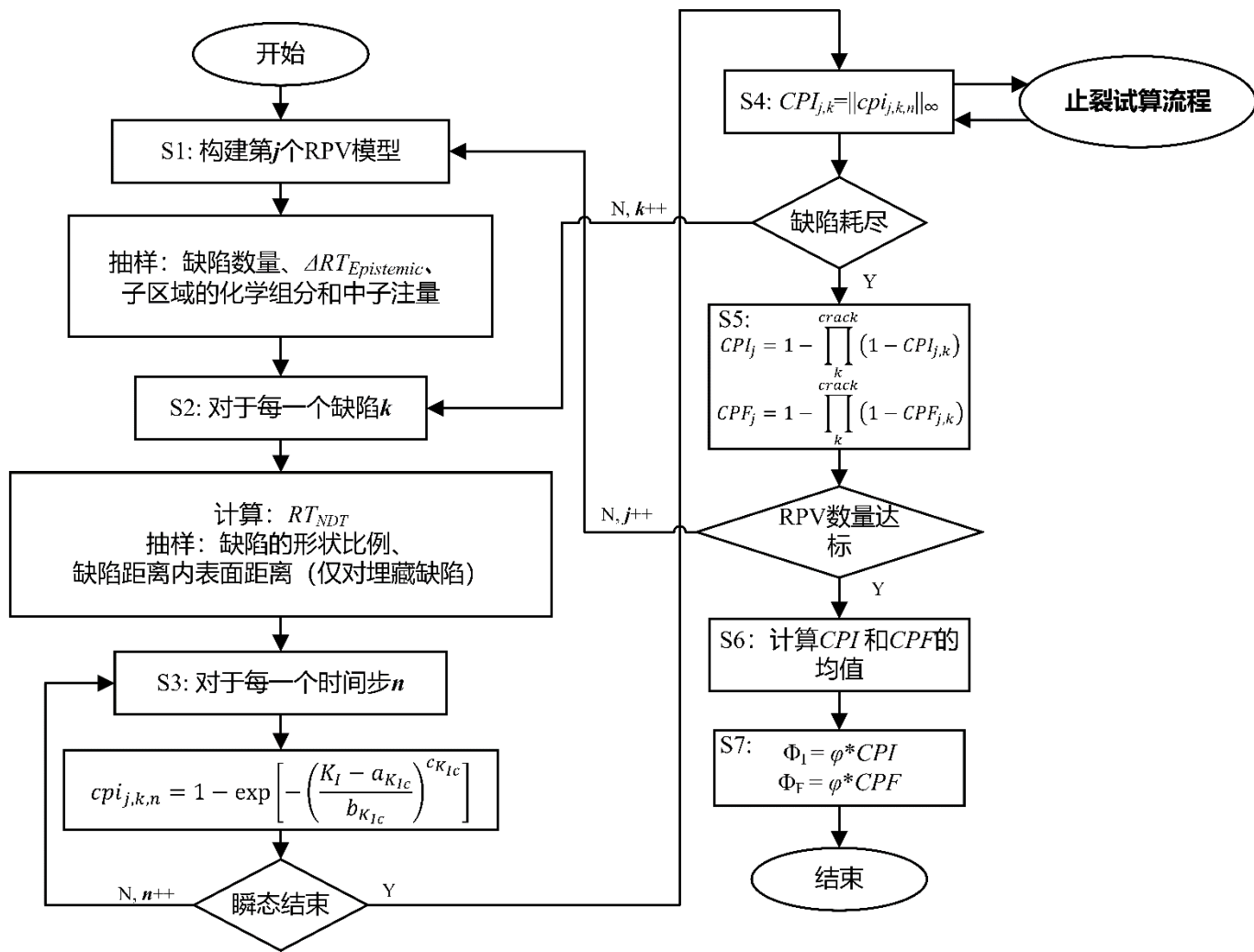
# 计算过程与结果

**S1:** 建立带有缺陷分布的RPV模型，对每个RPV抽样缺陷数量、 $\Delta RT_{epistemic}$ 。对每个子区域，抽样Cu含量、Ni含量等化学组分含量，未辐照无延性参考转变温度 $RT_{NDT0}$  和内表面中子注量 $f_{surf}$ 。

**S2:** 对每一个缺陷，抽样其形状比例（对埋藏缺陷还要抽样其缺陷位置），计算裂尖处 $RT_{NDT}$ 。

**S3:** 在每一个时间步 $n$ ，计算启裂韧性 $K_{Ic}$ 的威布尔分布三参数，结合由应力场算出的应力强度因子 $K_I$ ，计算缺陷在此时刻的条件启裂概率 $cpi_{j,k,n}$ 。

**S4:** 各个时间步里最大的 $cpi_{j,k,n}$ 作为该缺陷 $k$ 的条件启裂概率 $CPI_{j,k}$ ，记录此时间作为裂纹扩展判定时间 $time_{propagation++}$ （在此时间之后不考虑裂纹继续的扩展）并进入止裂试算流程。



# 计算过程与结果

**A1:** 对于每一个启裂概率增加的时间点，将其视为有裂纹扩展潜力进行若干次止裂试算，直到达到裂纹扩展判定时间 $time_{propagation++}$ 。

**A2:** 每个具有扩展潜力的裂纹在启裂后的下一个时间点扩展为以裂纹最深点为裂尖的轴向无限长或环向360°裂纹。

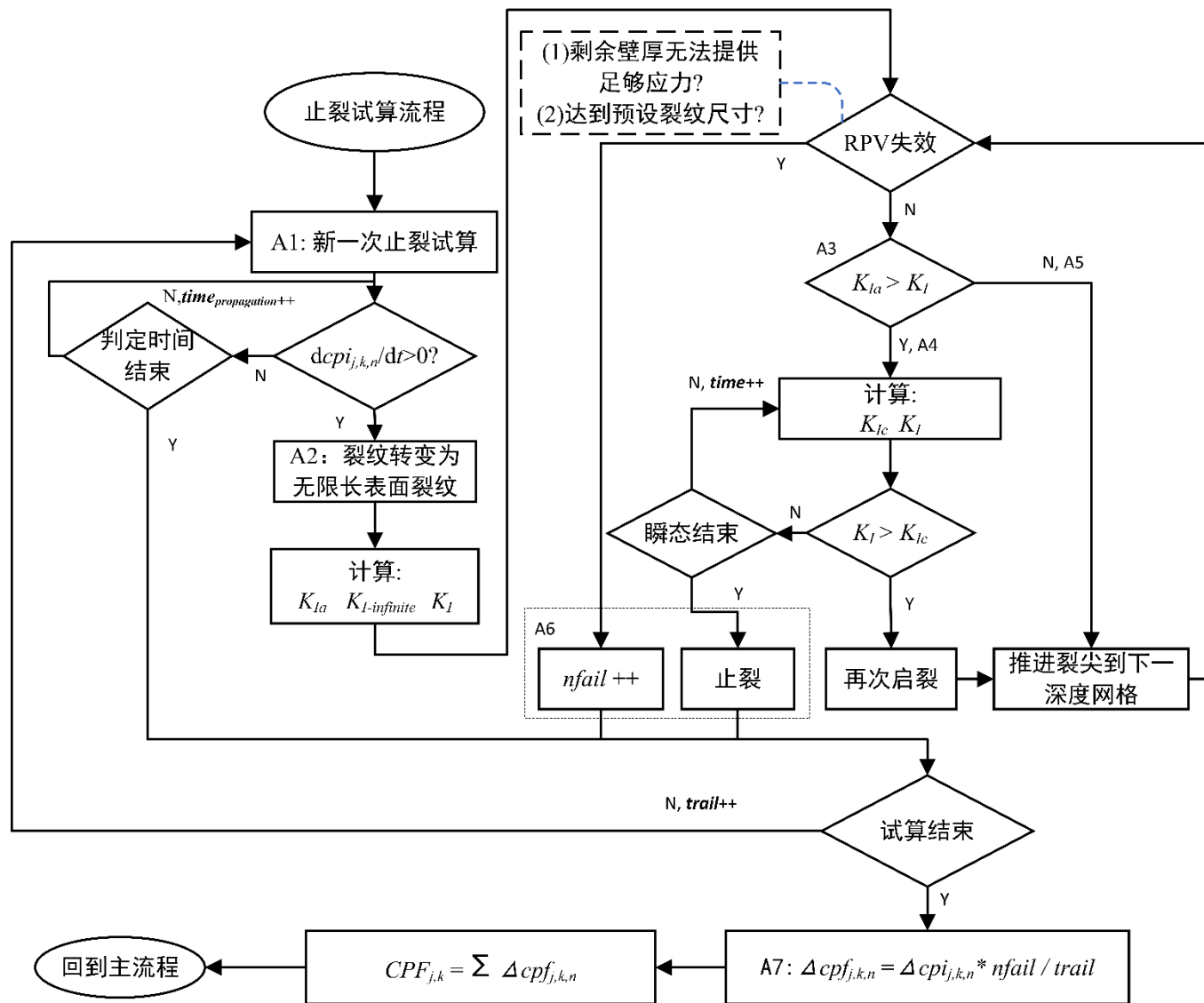
**A3:** 计算得到止裂韧性( $K_{Ia}$ )，判断裂纹是否止裂。

**A4:** 如果裂纹止裂，则推进时间步向前，并在每个时间步重新计算其是否再启裂。

**A5:** 如果裂纹没有止裂或裂纹再启裂，则推进裂纹深度向前，并在每个深度网格处计算是否止裂。

**A6:** 当时间步能够到达瞬态结束，则裂纹成功止裂；当裂纹深度达到指定的极限深度或压力容器的剩余壁厚无法提供维持完整性所需的应力，则裂纹失效。

**A7:** 直到达到裂纹扩展判定时间 $time_{propagation++}$ ，本次试算结束。当所有试算结束，所有时间点启裂概率增加值与失效次数和试算次数比值的乘积为裂纹 $k$ 的失效概率



# 计算过程与结果

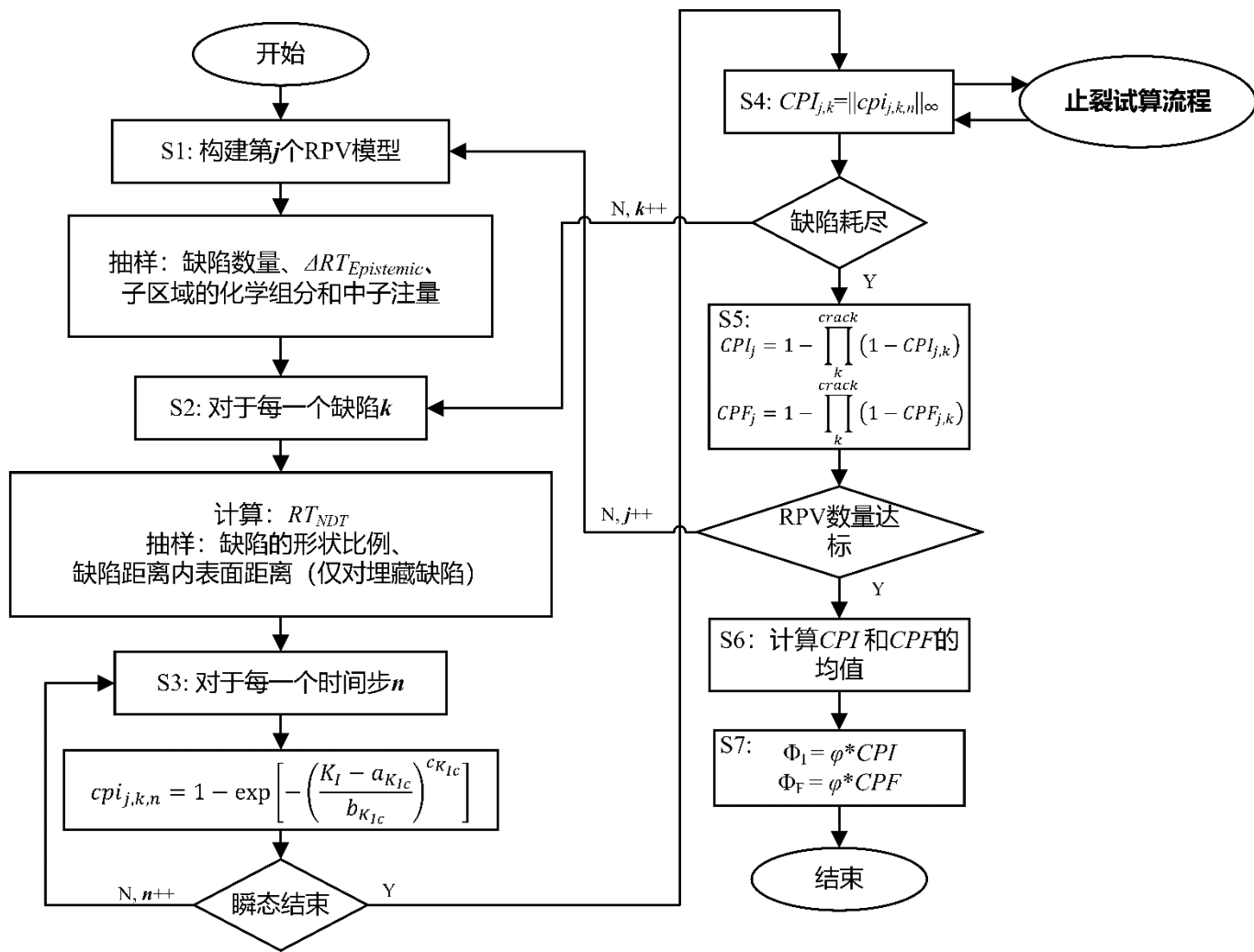
**S5:** 计算至少有一个裂纹启裂的概率作为第 $j$ 个RPV的条件启裂概率 $CPI_j$ ，同样的，至少有一个裂纹失效的概率为第 $j$ 个RPV的条件失效概率 $CPI_j$ 。

$$CPI_j = 1 - \prod_k^{crack} (1 - CPI_{j,k})$$

$$CPF_j = 1 - \prod_k^{crack} (1 - CPF_{j,k})$$

**S6:** 做所有RPV的平均值，得到最终的条件启裂概率CPI和条件失效概率。

**S7:** 计算得到启裂频率 $\Phi_I$ 和失效频率 $\Phi_F$ 。



# 计算过程与结果

为了获得非0值，在数值上将温度修正从30°C提高为130°C和230°C

| 瞬态  | 条件概率 | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=30°C |          |          | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=130°C |          |          | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=230°C |          |          |
|-----|------|-----------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
|     |      | 缺陷放大倍数×1                    | 缺陷放大倍数×2 | 缺陷放大倍数×4 | 缺陷放大倍数×1                     | 缺陷放大倍数×2 | 缺陷放大倍数×4 | 缺陷放大倍数×1                     | 缺陷放大倍数×2 | 缺陷放大倍数×4 |
| 瞬态1 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.76E-08                     | 1.16E-05 | 1.74E-02 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 2.76E-08                     | 1.16E-05 | 1.74E-02 |
| 瞬态2 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 1.34E-06 | 1.86E-07                     | 3.63E-04 | 9.46E-02 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 1.34E-06 | 1.86E-07                     | 3.63E-04 | 9.44E-02 |
| 瞬态3 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 2.61E-07 | 3.41E-08                     | 1.13E-05 | 2.43E-02 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 2.61E-07 | 3.41E-08                     | 1.13E-05 | 2.41E-02 |
| 瞬态4 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.75E-07                     | 1.47E-05 | 1.81E-02 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 1.75E-07                     | 1.47E-05 | 1.81E-02 |
| 瞬态5 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 2.61E-06 | 1.06E-02 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 2.61E-06 | 1.06E-02 |
| 瞬态6 | CPI  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 7.11E-05 | 4.97E-07                     | 2.38E-04 | 1.04E-01 |
|     | CPF  | 0.00E+00                    | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00                     | 0.00E+00 | 7.11E-05 | 4.97E-07                     | 2.38E-04 | 1.04E-01 |

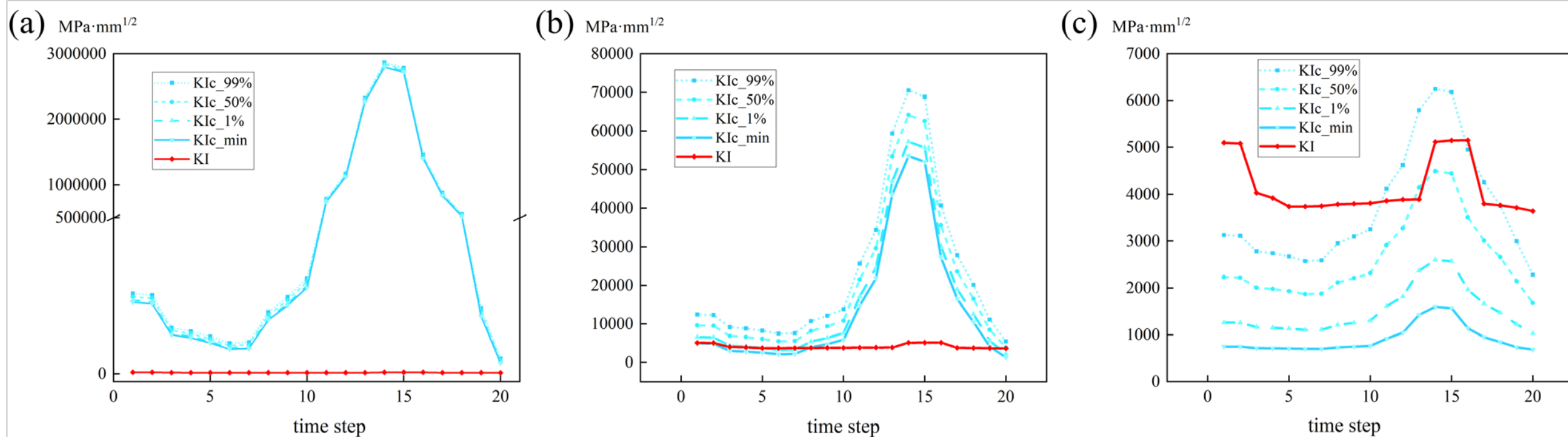


# 计算过程与结果

| 瞬态  | 启裂/失效<br>频率 | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=30℃ |              |              | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=130℃ |              |              | RT <sub>NDT0</sub> 修正值=230℃ |              |              |
|-----|-------------|----------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|
|     |             | 缺陷放大<br>倍数×1               | 缺陷放大<br>倍数×2 | 缺陷放大<br>倍数×4 | 缺陷放大<br>倍数×1                | 缺陷放大<br>倍数×2 | 缺陷放大<br>倍数×4 | 缺陷放大<br>倍数×1                | 缺陷放大<br>倍数×2 | 缺陷放大<br>倍数×4 |
| 瞬态1 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 1.99E-12                    | 8.36E-10     | 1.26E-06     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 1.99E-12                    | 8.36E-10     | 1.26E-06     |
| 瞬态2 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 2.90E-07     | 4.02E-08                    | 7.84E-05     | 2.04E-02     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 2.90E-07     | 4.02E-08                    | 7.84E-05     | 2.04E-02     |
| 瞬态3 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 6.10E-07     | 7.97E-08                    | 2.65E-05     | 5.68E-02     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 6.10E-07     | 7.97E-08                    | 2.65E-05     | 5.64E-02     |
| 瞬态4 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 4.37E-12                    | 3.68E-10     | 4.52E-07     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 4.37E-12                    | 3.68E-10     | 4.52E-07     |
| 瞬态5 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 6.23E-13     | 2.54E-09     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 6.23E-13     | 2.54E-09     |
| 瞬态6 | $\Phi_I$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 2.52E-04     | 1.76E-06                    | 8.45E-04     | 3.68E-01     |
|     | $\Phi_F$    | 0.00E+00                   | 0.00E+00     | 0.00E+00     | 0.00E+00                    | 0.00E+00     | 2.52E-04     | 1.76E-06                    | 8.45E-04     | 3.68E-01     |



# 计算过程与结果

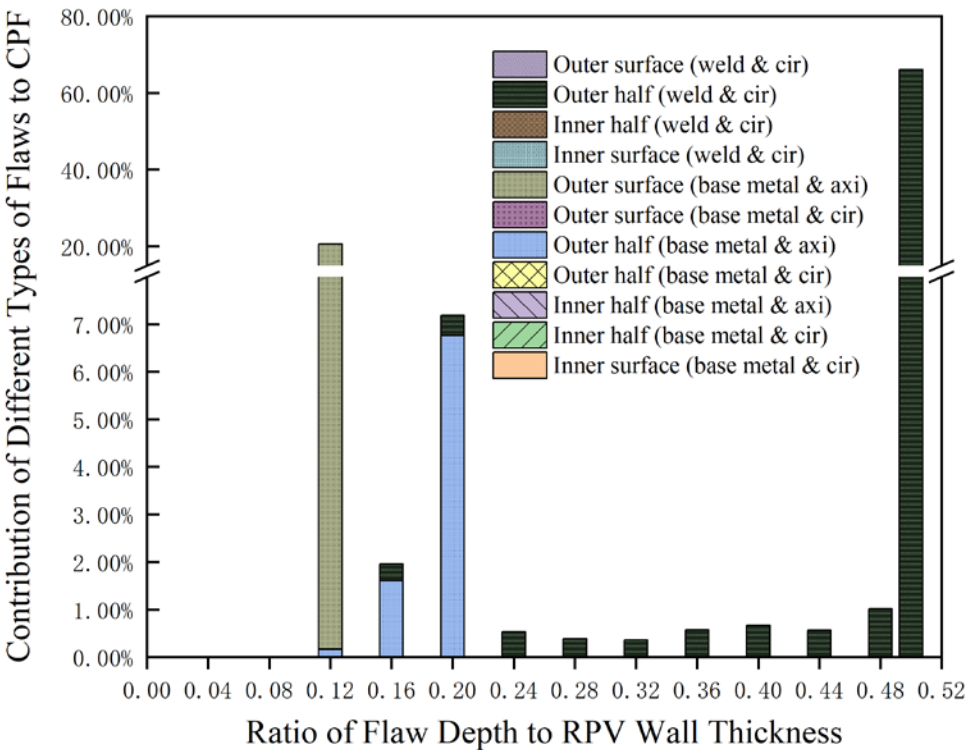
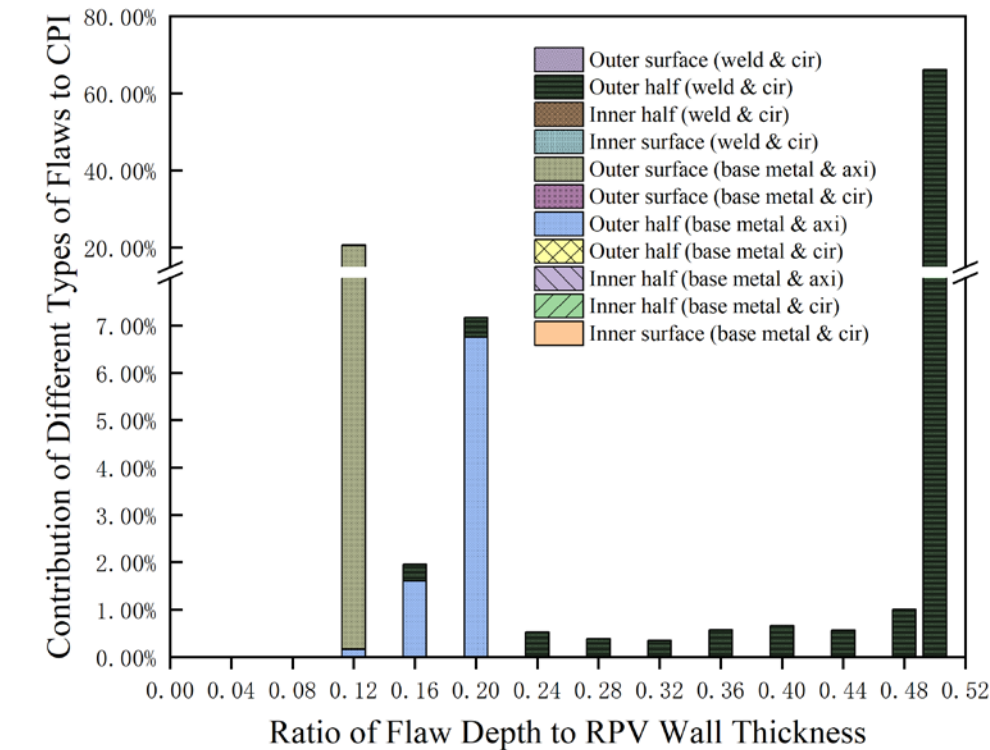


瞬态3断裂韧性 ( $K_{Ic}$ ) 和应力强度因子 ( $K_I$ ) 的时程分析

(a)  $RT_{\text{NDT-cro}}=30^{\circ}\text{C}$ , (b)  $RT_{\text{NDT-cro}}=130^{\circ}\text{C}$ , (c)  $RT_{\text{NDT-cro}}=230^{\circ}\text{C}$

# 计算过程与结果

取缺陷尺寸和密度放大为4倍、温度修正值放大为230℃的实验组



处于焊缝区域的外半壁厚环向缺陷

处于母材区域的外半壁厚和外表面的轴向缺陷

# 结论

---

1. 在高温气冷堆典型瞬态下，其CPI和CPF计算结果均为0，可能是由于快中子通量水平非常低(比典型的压水堆低一到两个数量级)和瞬态发展平缓所致。
2. 考虑了更加保守的缺陷情况，但即使假设压力容器的缺陷情况很差（将缺陷数量、深度都放大2倍、4倍），其CPI和CPF仍然为0，表明高温气冷堆压力容器的相关设计和制造安全分级有优化的可能。
3. 为了得到非零的CPI和CPF数值，仅从数学角度上考虑，将 $RT_{NDT}$ 放大为实际上不可能出现的极端值，在极端值下，终于得到了非零数据。对比此时不同缺陷情况的数据可以得到CPI和CPF对缺陷密度和深度的敏感性。
4. 对不同的缺陷组进行启裂与失效的贡献分析，确定了外半壁厚焊缝区域的环向缺陷是主要贡献。

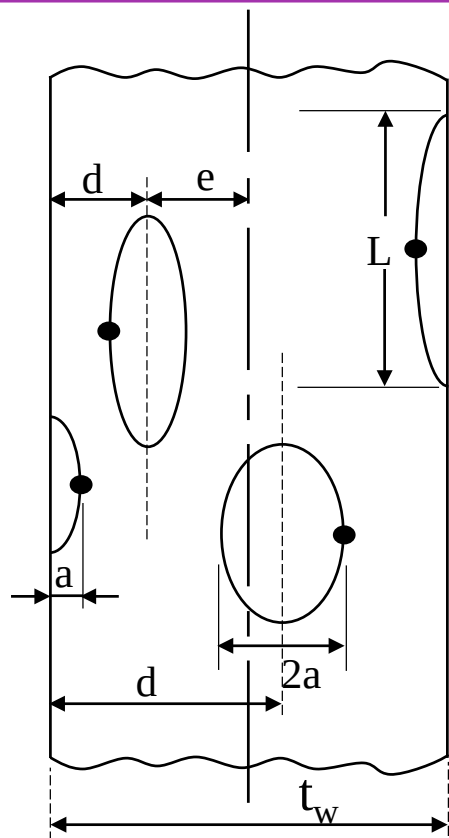


# 报告完毕 欢迎批评指导

2025/5/18

# 应力强度因子计算

根据ASME规范、FAVOR软件以及一些研究者的成果<sup>[1-2]</sup>



表面缺陷:

$$\sigma = A_0 + A_1 \left( \frac{x}{t_w} \right) + A_2 \left( \frac{x}{t_w} \right)^2 + A_3 \left( \frac{x}{t_w} \right)^3 + A_4 \left( \frac{x}{t_w} \right)^4$$

$$K_I = \left[ (B_0 + B_p) G_0 + B_1 \left( \frac{a}{t_w} \right) G_1 + B_2 \left( \frac{a}{t_w} \right)^2 G_2 + B_3 \left( \frac{a}{t_w} \right)^3 G_3 + B_4 \left( \frac{a}{t_w} \right)^4 G_4 \right] \sqrt{\pi a / Q}$$

埋藏缺陷:

$$K_I = (M_m \sigma_m + M_b \sigma_b) \sqrt{\pi a / Q}$$

其中 $M_m$ 、 $M_b$ 是和缺陷中心偏心距 $e$ 、裂纹深度比 $a/t_w$ 有关的无量纲数， $Q$ 是和缺陷形状有关的无量纲形状因子。

1. I.S. Raju, J.C. Newman. Stress-Intensity Factors for Internal and External Surface Cracks in Cylindrical Vessels[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1982, 104(4): 293-298.
2. I.S. Raju, J.C. Newman. Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1979, 11(4): 817-829.

# 辐照脆化模型

Regulatory Guide 1.99, Revision 2

$$\Delta RT_{NDT} = CF * FF$$

$$FF = f^{0.28-0.1\log(f)}$$

$$f = f_{surf} * e^{-0.24x}$$

$CF$  = 化学因子, 是Cu和Ni的函数。查找10CFR50.61规范中的表格获得

$f$  = 压力容器内壁面中子注量最佳估计值[ $10^9\text{n/cm}^2$ ,  $E>1\text{ MeV}$ ]

$x$  = 裂尖到容器内壁面的距离[in.]

法国RCCM规范 (设计制造规范)

将中Cu和P这两种元素作为影响辐照脆化的主要因素, 将0.08%和0.008%分别作为Cu和P的门槛值。

$$\Delta RT_{NDT} = [22 + 556(Cu - 0.08) + 2778(P - 0.008)] \cdot f^{0.5}$$

法国RSEM规范 (在役检测规范)

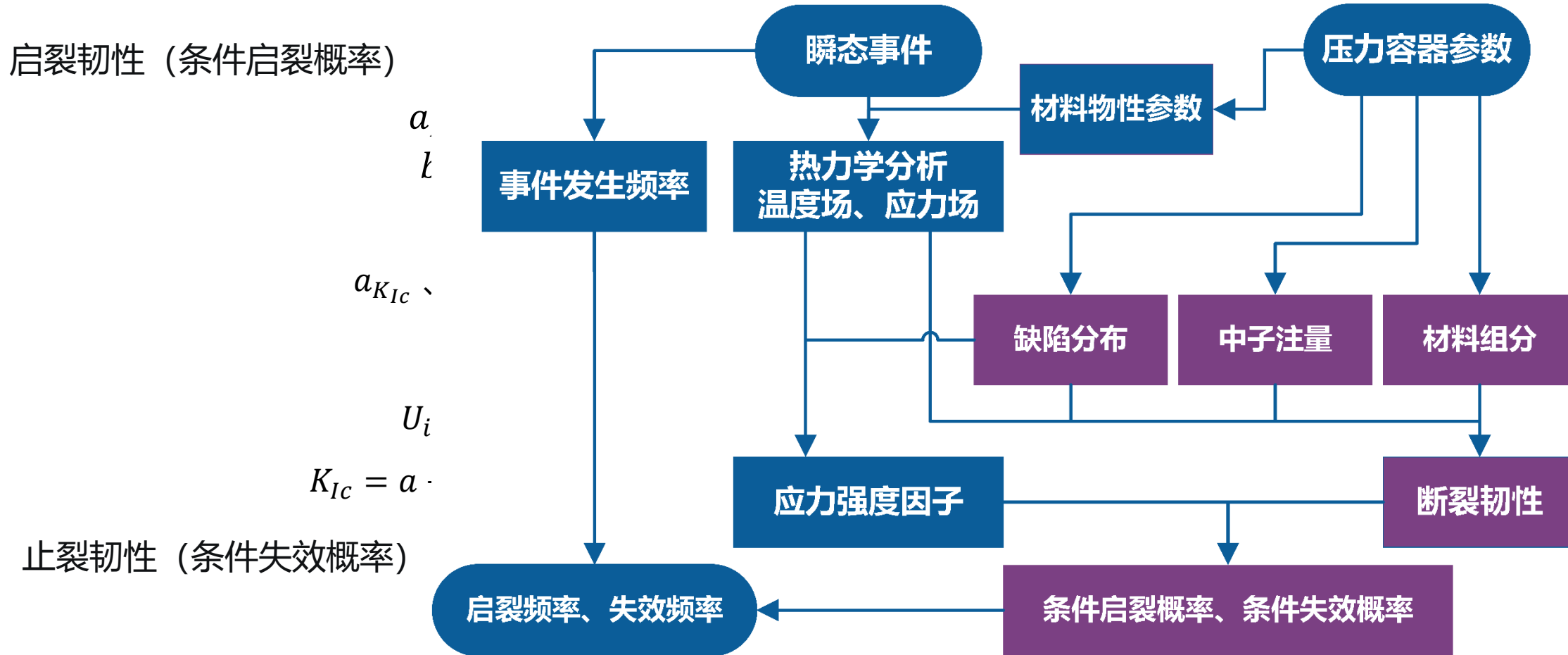
$$\Delta RT_{NDT} = 8 + [24 + 1537(P - 0.008) + 238(Cu - 0.08) + 191(Ni^2Cu)] \cdot f^{0.35}$$

日本JEAC4201-2007规范

$$\Delta RT_{NDT} = [-16 + 1210P + 215Cu + 77\sqrt{Cu \cdot Ni}] \cdot f^{0.29-0.04 \ln f} \quad \text{母材}$$

$$\Delta RT_{NDT} = [26 - 24 \cdot Si - 61 \cdot Ni + 301\sqrt{Cu \cdot Ni}] \cdot f^{0.25-0.1 \ln f} \quad \text{焊缝}$$

# 断裂韧性



其中 $Z_{\Phi_{K_{Ia}}}$ 是标准

概率性分析

确定性分析

1. P.T. Williams, T.L. Dickson, B.I. Implementation of Algorithms, N

2. The American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, Rules for Inspection and Testing of Components of Light-Water-Cooled Plants (2021 Edition)[S]. ASME, 2021.

theory and

# 相关计算软件

|              |                                                                                                                |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FAVOR        | 热-水力事件下结构完整性的概率断裂力学方法，重点是RPV的堆芯带区。美国核管理委员会（NRC）使用FAVOR来评估 <b>加压热冲击（PTS）</b> 下反应堆压力容器（RPV）的结构完整性，前身是VISA和OCA-P。 |
| PASCAL       | 日本为压水堆和沸水堆中反应堆压力容器的完整性评估而开发的概率断裂力学代码。                                                                          |
| SRRA         | 概率断裂力学代码，用于评估核结构的失效概率 <sup>[1]</sup> 。                                                                         |
| xLPR         | 用于分析核电厂管道系统在主动退化机制下的风险。主要功能包括分析由于疲劳和应力腐蚀裂纹引起的裂纹萌生和扩展、破前漏事件 <sup>[2]</sup> 。                                    |
| PRAISE-CANDU | CANDU管道系统的概率断裂力学代码 <sup>[3]</sup> 。                                                                            |
| SCEPTR       | 用于评估CANDU反应堆堆芯与缺陷相关的降解机制和破前漏分析 <sup>[4]</sup> 。                                                                |

1.

U.S. Nuclear Regulatory Commission. Safety Evaluation Report related to “Westinghouse Owners Group application of Risk-Informed Methods to Piping Inservice Inspection” (Topical Report WCAP-14572, Revision 1)[R]. U.S. NRC, 1998.

2.

D. Rudland, C. Harrington, R. Dingreville. Development of the Extremely Low Probability of Rupture (xLPR) Version 2.0 Code[C]. ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, 2015.

3.

D. Somasundaram, M. Wang, Y. Huang, et al. Probabilistic fracture mechanics code: PRAISE-CANDU 2.1[C]. 40th Annual CNS conference and 45th CNS/CNA Student Conference, 2021.

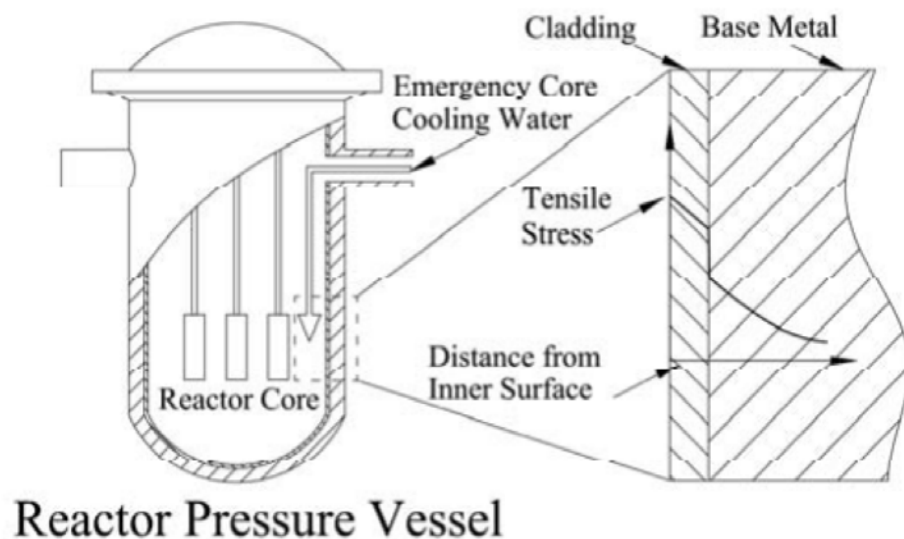
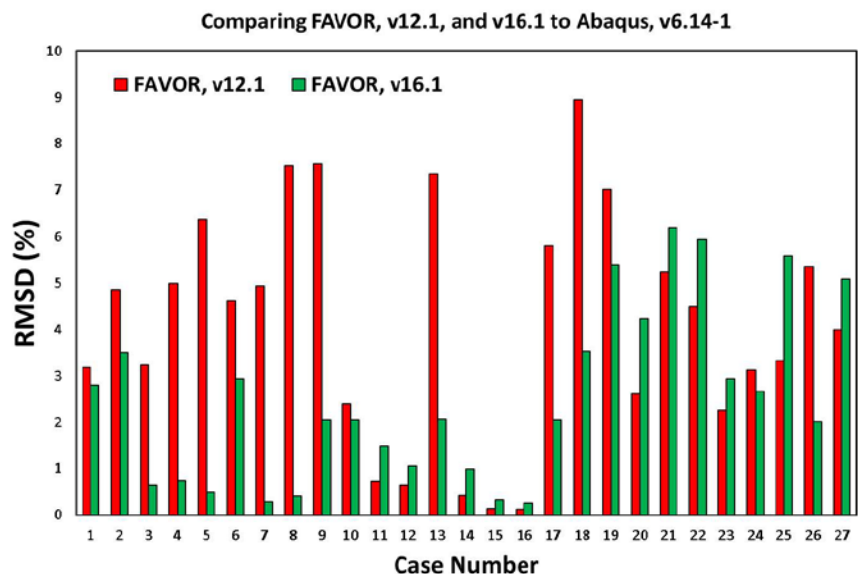
4.

D. Cho, D.H.B. Mok, S.X. Xu, et al. Probabilistic Assessment of CANDU Reactor Core for Risk of Pressure Tube Failure due to Presence of In-Service Flaws[C]. ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, 2017.



# 概率断裂力学

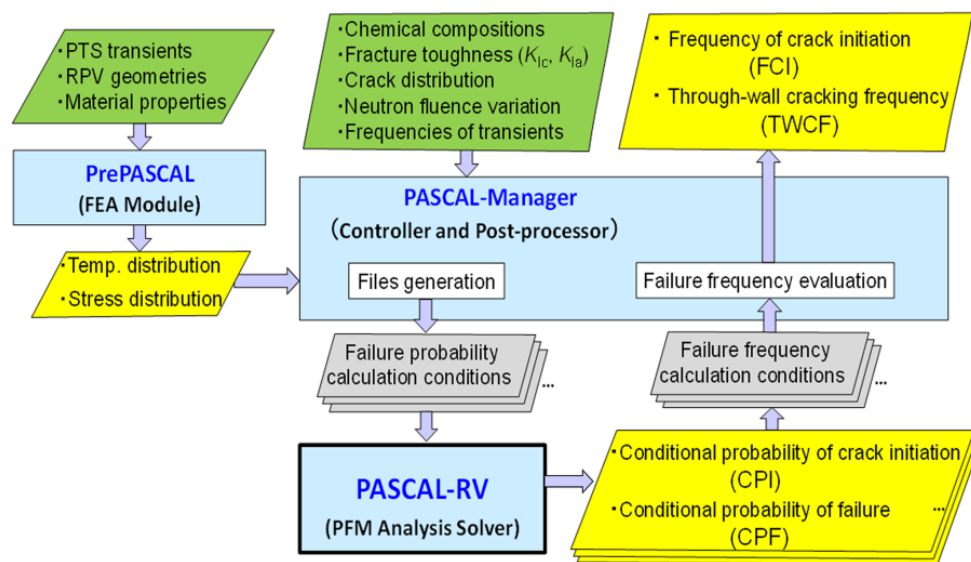
- 介绍了FAVOR代码的流程、ORNL在FAVOR代码方面的最新进展、还包括代码验证流程性工作；
- 相对于v12.1，来自v16.1的在预测精度方面有所提高，特别是对于跨堆焊层缺陷和浅层缺陷<sup>[1]</sup>。
- 堆焊层下裂纹；
- 修改FAVOR 12.1计算机代码的计算程序，对裂缝进行PFM分析。证明在核电站的全寿期内，这种裂纹不会对反应堆的安全构成威胁<sup>[2]</sup>。



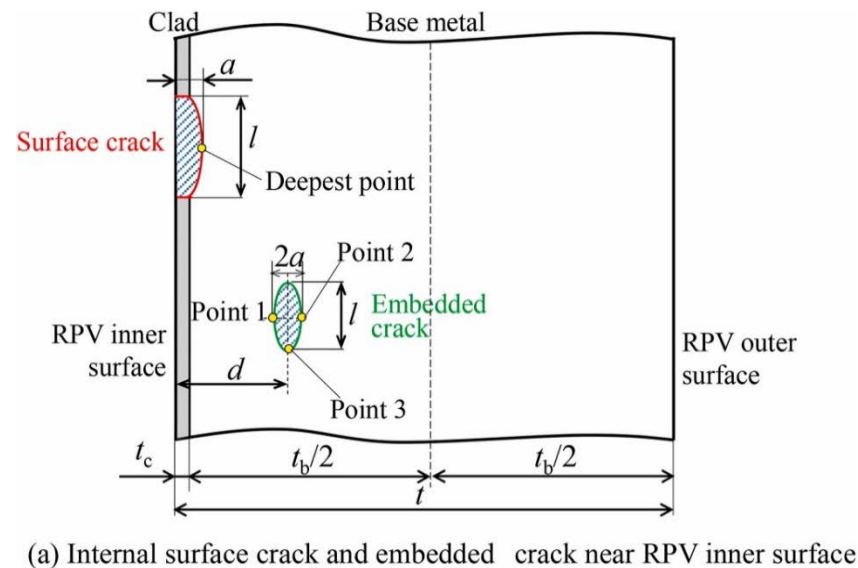
1. B. Richard Bass, P.T. Williams, T.L. Dickson, H.B. Klasky. FAVOR Version 16.1: A Computer Code for Fracture Mechanics Analyses of Nuclear Reactor Pressure Vessels[C]. ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference, 2017.
2. K.T. Chen, K. Ting, A.T. Nguyen, et al. Probabilistic fracture mechanics analysis of reactor pressure vessel with underclad and through-clad cracks under pressurised thermal shock transient[J]. International Journal of Nuclear Energy Science and Technology, 2018, 12(1): 45-65.

# 概率断裂力学

- 采用PASCAL4软件对日本压水堆（PWR）模型RPV进行PFM分析；
- 定量评价了无损检测（NDE）和中子通量的降低对RPV失效频率的影响<sup>[1]</sup>。



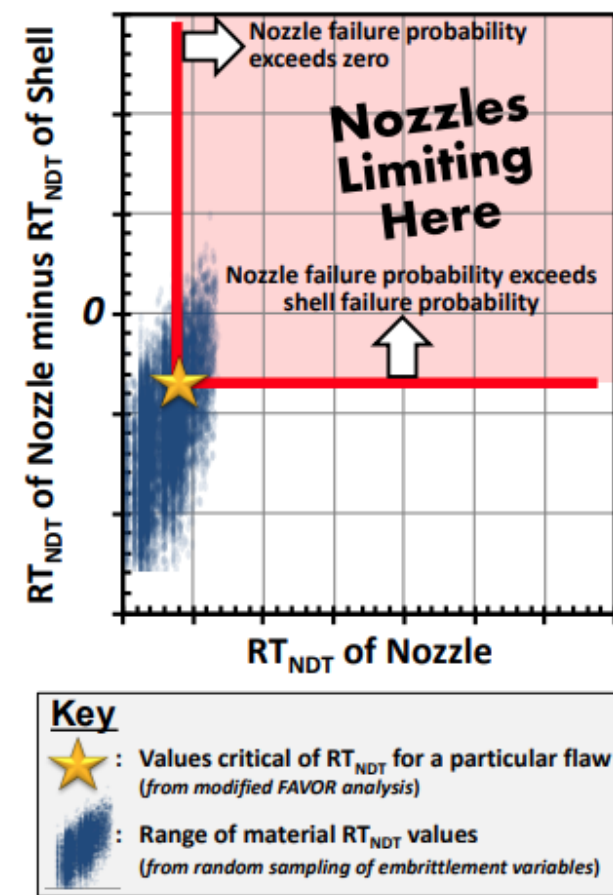
- 介绍了PASCAL5的最新改进，包括RPV外表面裂纹和埋藏裂纹的应力强度因子；
- 利用PASCAL5对日本沸水堆型反应堆核心区PTS瞬态和加热瞬态的PFM分析实例进行了分析<sup>[2]</sup>。



1. K. Lu, J. Katsuyama, Y.S. Li, et al. Application of Probabilistic Fracture Mechanics to Reactor Pressure Vessel Using PASCAL4 Code[J]. JOURNAL OF PRESSURE VESSEL TECHNOLOGY-TRANSACTIONS OF THE ASME, 2021, 143(2): 021505.
2. K. Lu, H. Takamizawa, J. Katsuyama, et al. Recent improvements of probabilistic fracture mechanics analysis code PASCAL for reactor pressure vessels[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF PRESSURE VESSELS AND PIPING, 2022, 199:104706.

# 概率断裂力学

- 为确定RPV运行的P-T限制，需在考虑RPV壳体材料的同时考虑RPV结构不连续性的区域（如喷嘴、法兰）
- 总结了NRC和橡树岭国家实验室（ORNL）对其进行的PFM分析，量化这些应力集中处对RPV PFM分析结果的影响<sup>[1]</sup>。



1. G.L. Stevens, M.T. Kirk, T. Dickson. Probabilistic Fracture Mechanics Evaluations That Consider Nozzles in the Extended Beltline Region of Reactor Pressure Vessels[C]. ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, 2015.

- 埋藏裂纹的处理方法;
- PTS条件下, 比较了埋藏裂纹的不同应力强度因子计算点和裂纹扩展方向对失效概率的影响

还有一些论文使用pfm方法评估压力管道的失效概率[2-3]

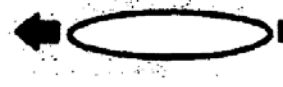
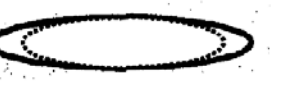
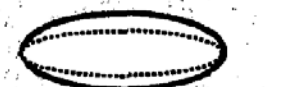
| Model | SIF Evaluation                                                                                        | Crack extension when $SIF \geq K_{Ic}$                                                                                               |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A     | Long. dir.: Not considered                                                                            | -                                                                                                                                    |
|       | Point 1 only<br>   | Conversion to surface crack*<br>                  |
| B     | Long. dir.: Not considered                                                                            | -                                                                                                                                    |
|       | Points 1 and 2<br> | Crack extension $\Delta a_1, \Delta a_2^{**}$<br> |
| C     | Point 3<br>        | Crack extension $\Delta a_3^{***}$<br>            |
|       | Points 1 and 2<br> | Crack extension $\Delta a_1, \Delta a_2^{**}$<br> |

Figure 3 – Crack extension analysis models for an embedded crack

1. K. Onizawa, K. Shibata, M. Suzuki, et al. Embedded crack treatments and fracture toughness evaluation methods in probabilistic fracture mechanics analysis code for the PTS analysis of RPV[C]. ASME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference, 2008.
2. Y. Tian, G. Zhang, X. Miao, et al. Probabilistic and non-probabilistic failure assessment curves of primary coolant pipe contained internal circumferential surface crack in pressurized water reactor nuclear power plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 322: 313-323.
3. K. Fuhr, M. Wolfson, G. White, et al. Probabilistic Fracture Mechanics Evaluation of PWR Cast Austenitic Stainless Steel Piping Components – Axial Cracking Methods and Results[C]. ASME 2023 pressure vessels and piping conference, 2023.