

核电厂安全壳机械贯穿件力学分析

李艳

(深圳中广核工程设计有限公司 广东 深圳 518100)

摘要：本文介绍 RCC-M 规范 C3300 篇对核电厂安全壳机械贯穿件的力学分析评定方法，并以某核电厂安全壳机械贯穿件为例，采用 ANSYS 软件计算了贯穿件在自重、内压和接管载荷等载荷作用下的应力分布，对各工况下的应力进行了评定。得出结论：1. 贯穿件在所考虑的各工况下的最大应力出现在封头靠近管道连接的地方，且向套筒方向递减；2. 贯穿件的最大总体一次薄膜应力出现在封头内环上部，最大薄膜应力加弯曲应力出现在封头内环下部。

关键词：机械贯穿件；RCC-M；应力；ANSYS

0 引言

核电厂安全壳机械贯穿件是连接核电厂安全壳内部与外部管道的部件,属于反应堆安全壳的一部分^[1]。贯穿件由封头和套筒组成,封头与管道焊接,套筒焊接在安全壳钢衬上。机械贯穿件既要满足各种工况下的管道系统设计要求,又必须确保安全壳的气密性和完整性^[2]。因此,机械贯穿件在各工况下的受力分析关系到管道系统和安全壳的安全性^[3,4]。机械贯穿件属于核安全局监管设备的范畴^[5]。

1 分析方法

安全壳机械贯穿件为核二级设备,二级设备的支承件为 S2 级,RCC-M 规范^[6]C3300 篇对二级承压设备和 S2 级板壳式支承件应力评定作了规定,具体见表 1 和表 2。封头适用于表 1 的评定方法,套筒适用于表 2 的评定方法。

表 1 二级承压设备应力评定准则

工况	准则级别	应力限值
设计工况	O 级准则	$\sigma_m \leq S$ (σ_m 或 σ_L) + $\sigma_b \leq 1.5S$
事故工况	D 级准则	$\sigma_b \leq 2S$ (σ_m 或 σ_L) + $\sigma_b \leq 2.4S$

表 1 中： σ_m 为总体一次薄膜应力； σ_L 为局部一次薄膜应力； σ_b 为一次弯曲应力； S 为基本许用应力。

表 2 二级设备板壳式支承件应力分析评定准则

工况	准则级别	应力限值
设计工况	O 级准则	$\sigma_m \leq S$ $\sigma_m + \sigma_b \leq 1.5S$
事故工况	D 级准则	$\sigma_m \leq \min(S_y, 0.5S_u)$ $\sigma_m + \sigma_b \leq \min(1.5S_y, 0.8S_u)$

表 2 中： σ_m 为总体一次薄膜应力； σ_b 为一次弯曲应力； S 为基本许用应力； S_y 为屈服强度； S_u 为抗拉强度。

2 分析实例

本文以某核电厂机械贯穿件为例,进行力学分析。该贯穿件连接安全壳内外 2" 管道,如图 1 所示。

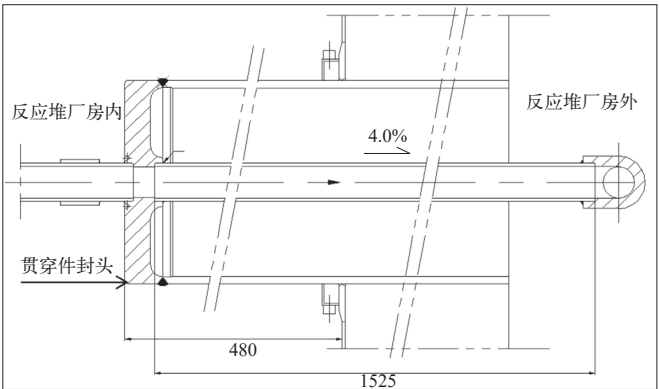


图 1 贯穿件安装图

2.1 模型简化

该机械贯穿件为轴对称元件,管道与贯穿件的连接形式是焊接,分析时贯穿件与管道视为一个整体,边界取封头外延长度为 l 的管道,长度 l 根据公式 (1) 求得。建立二维平面轴对称几何模型,如图 2 所示。

$$l = 2.5 \sqrt{Rt}$$
 (1)

式中： R — 接管半径；

t — 接管壁厚。

2.2 网格划分

根据经验判断,贯穿件的高应力区域出现在与管道连接的封头部分。远离该区域的应力分布较均匀

且应力值较小。因此，封头与管道连接处网格细划，而远离该区域部分可以简化处理。采用 PLANE25 单元，划分节点数 9629、单元数 9369，简化后的贯穿

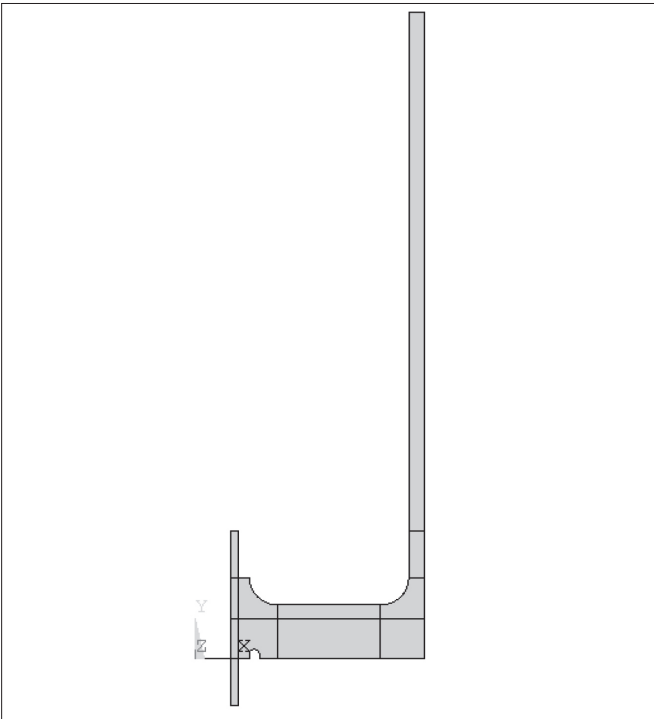


图 2 几何模型

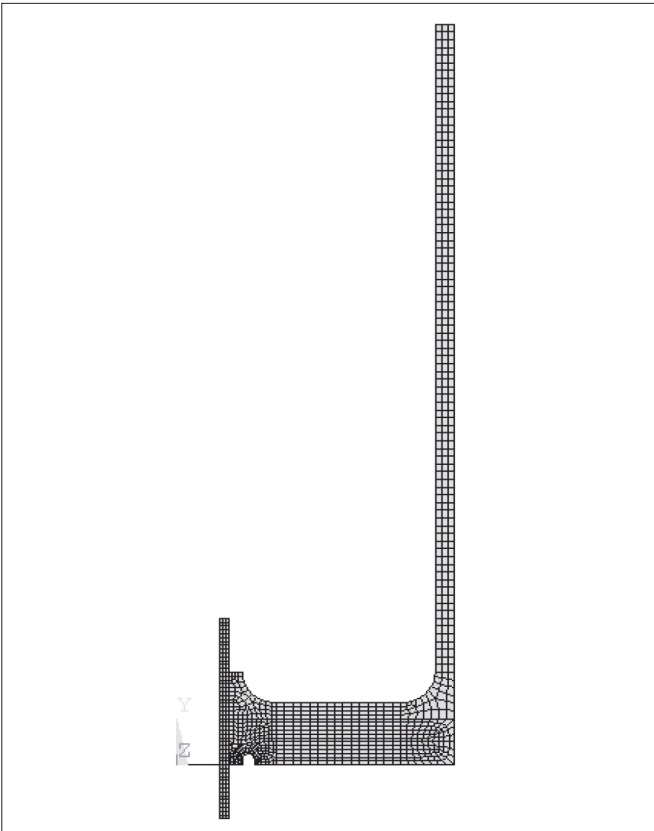


图 3 总体网格模型

件网格模型如图 3 所示。

2.3 材料参数

管道和贯穿件封头材料是 P280GH，套筒材料是 P265GH，材料属性分别见表 3 和表 4。管道内介质

表 3 P280GH 材料属性

温度 /℃	E/MPa	μ	$\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	S/MPa	S_y/MPa	S_u/MPa
300	185000	0.3	7850	118	186	470
340	180000	0.3	7850	114	171	470

表 4 P265GH 材料属性

温度 /℃	E/MPa	μ	$\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	S/MPa	S_y/MPa	S_u/MPa
300	185000	0.3	7850	103	157	410
340	180000	0.3	7850	961	144	410
350	180000	0.3	7850	95	142	410

为排污水，设计温度 316℃，设计压力 8.5MPa。

注： E 为弹性模量； μ 为泊松比； ρ 为密度； S 为基本许用应力； S_y 为屈服强度； S_u 为抗拉强度。

3 边界条件的加载

3.1 工况组合

该贯穿件采用 RCC-M C3300 评定准则进行应力评定，根据 C3300 评定准则可知，贯穿件设计工况所评定工况组合已包含了正常、扰动和紧急工况，评定限值也更加严格。本报告评定的工况载荷组合如表 5 所示。

3.2 载荷参数

贯穿件在各种工况下要考虑的载荷有内压、自重、接管载荷和地震载荷。而由于贯穿件安装在安全壳上，当发生地震时，地震载荷通过安全壳传递到贯

表 5 贯穿件 X 的受载组合

工况	准则级别	载荷组合
设计工况	O	压力 + 自重 + 接管载荷 + OBE
事故工况	D	压力 + 自重 + 接管载荷 + SSE

表 6 贯穿件 X 接管载荷值

工况	厂房	接管载荷			
		推力 /N	剪力 /N	弯矩 /Nm	转矩 /Nm
设计工况	R52	14000	14000	3500	3500
	W03	7000	7000	1750	1750
事故工况	R52	43600	43600	8450	8450
	W03	11200	11200	2800	2800

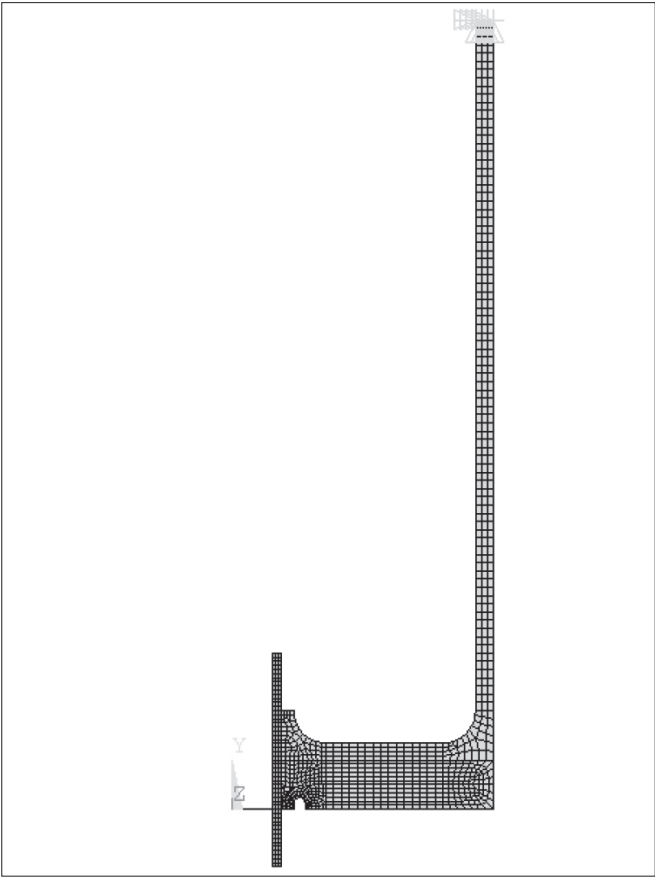


图 4 施加约束

穿件上。相对于安全壳整体而言，贯穿件 X 可以视为安全壳上的一个质点，且计算接管载荷时已在管道上考虑了地震的影响。因此对贯穿件单独分析时可不作地震分析。贯穿件 X 接管载荷值^[5]如表 6 所示。

3.3 施加约束

在贯穿件套管与钢衬底焊接处节点施加全约束，如图 4 所示。

3.4 施加载荷

贯穿件承受自重、压力和接管载荷，接管载荷施加在管道边界上，封头两侧均受到接管载荷作用。

3.4.1 自重

在贯穿件模型上施加重力加速度 (9.81m/s²)。

3.4.2 内压

贯穿件封头与管道连接，承受管道内介质的压力，考虑管道的边界压力 $P_{end-effect}$ ，按公式 (2) 计算。加载方法如图 5a 所示。

$$P_{end-effect} = \frac{1}{\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)^2 - 1} \times P$$

(2)

式中： $P_{end-effect}$ — 管道边界压力；
 D_{out} — 管道外径；
 D_{in} — 管道内径；
 P — 管道内压。

3.4.3 接管载荷

贯穿件封头与管道连接，考虑管道对封头的接管载荷：推力 P 、剪力 F 、弯矩 M_b 和转矩 M_t 。推力与转矩沿管道轴向，剪力和弯矩垂直于管道轴向。设计工况和事故工况下接管载荷取值见表 7，施加位置见图 5b。

4 结果分析

由于接管载荷施加在管道边界上，计算时需要考虑以下两点：(1) 补偿由于加载点位置变化而导致的弯矩，并充分考虑各种可能出现的接管载荷组合；(2) 两侧管道对封头作用力方向相同和相反两种情况。

不连续区域是应力集中的地方，也是分析的主要部位。根据计算结果，高应力区出现在管道与封头连接的位置，同时也需考虑套管部分的应力分布。应力分析需要从这些区域确定分析路径，在路径上

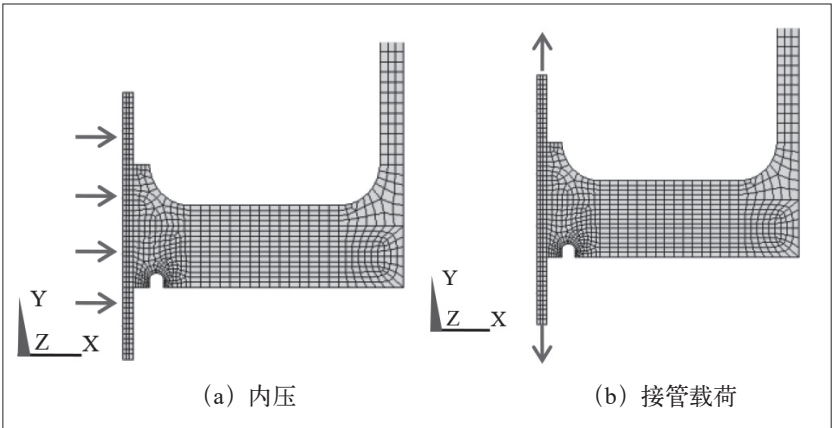


图 5 施加载荷

表 7 贯穿件接管载荷值

工况	位置	推力 /N	剪力 /N	弯矩 /Nm	转矩 /Nm
设计工况	安全壳内	14000	14000	3500	3500
	安全壳外	7000	7000	1750	1750
事故工况	安全壳内	43600	43600	8450	8450
	安全壳外	11200	11200	2800	2800

提取一次薄膜应力、二次应力进行应力评定。本文采用轴对称模型进行分析, 评定应力时需按每 5° 选取 1 个截面 (共 72 个截面), 按路径评定关注区域的应力状况。

4.1 设计工况

根据各截面各路径的应力评定结果可知, 在设计工况下, 贯穿件在所考虑的各工况下的最大应力出现在封头靠近管道连接的地方, 且向套筒方向逐渐递减。贯穿件的最大总体一次薄膜应力出现在 165° 截面中的路径 5 上, 该截面处的应力云图如图 6 所示; 贯穿件的最大二次应力出现在 180° 截面中的路径 5 上, 该截面处的应力云图如图 7 所示。

4.2 事故工况

由各截面各路径的应力评定结果可知, 在事故工况下, 贯穿件在所考虑的各工况下的最大应力出现在封头靠近管道连接的地方, 且向套筒方向逐渐递减。贯穿件的最大总体一次薄膜应力出现在 170° 截面中的路径 5 上, 该截面处的应力云图如图 8 所示; 贯穿件的最大局部一次薄膜应力加弯曲应力出现在 180° 截面中的路径 5 上, 该截面处的应力云图如图 9 所示。

5 结语

根据以上计算结果分析可得出如下结论:

(1) 贯穿件在所考虑的各工况下的最大应力出现在

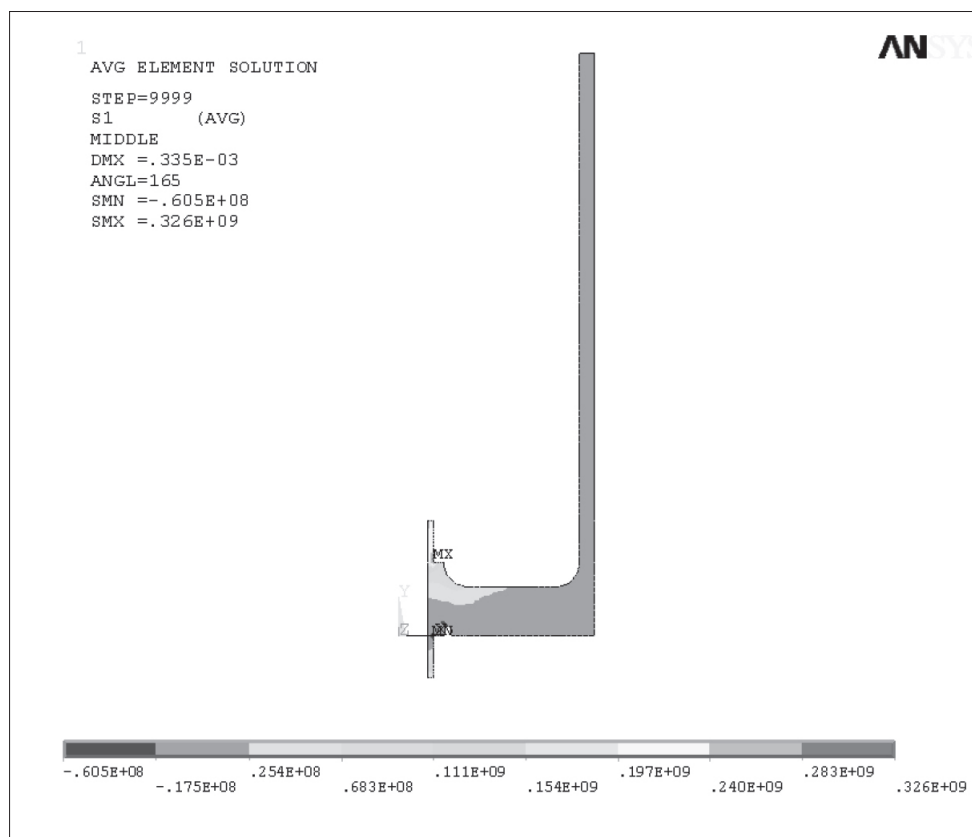


图 6 设计工况薄膜应力

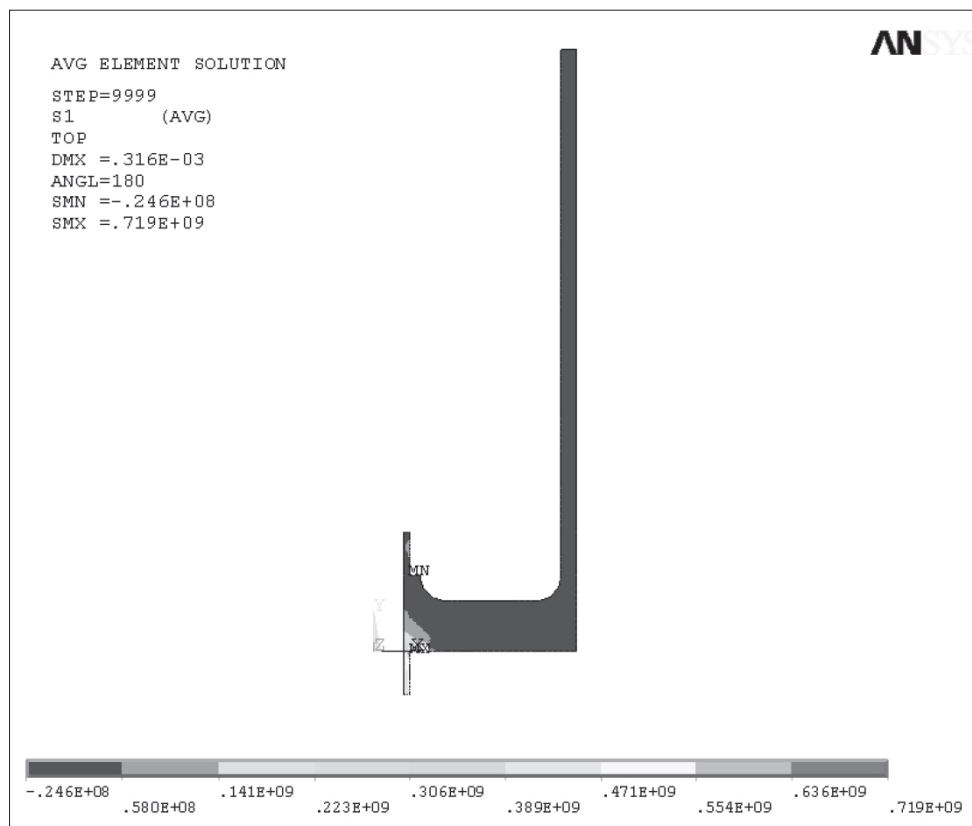


图 7 设计工况薄膜 + 弯曲应力

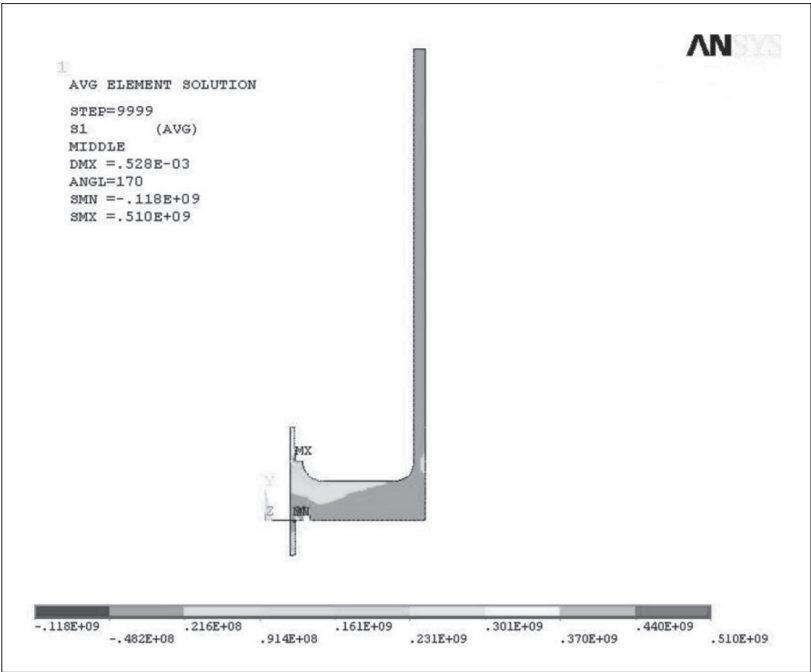


图 8 事故工况薄膜应力

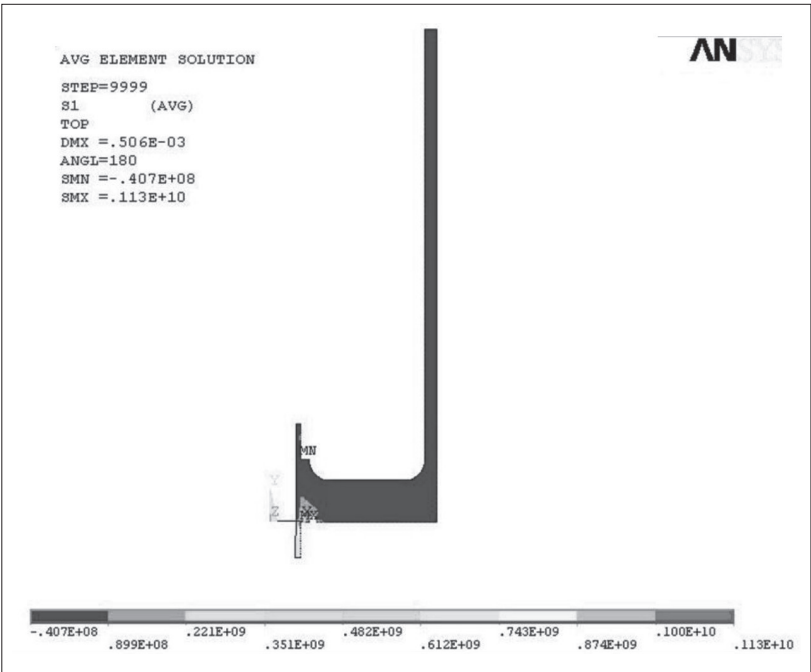


图 9 事故工况薄膜 + 弯曲应力

封头靠近管道连接的地方，且向套筒方向逐渐递减；

(2) 贯穿件的最大总体一次薄膜应力出现在封头内环上部；最大薄膜应力加弯曲应力出现在封头内环下部。

本例中贯穿件最大应力比均小于 1，满足 RCC-M 规范要求。

参考文献：

[1] 王红扬，王恒．核电厂安全壳机械贯穿件焊接技术 [J]．焊接工艺，2015，45 (4) :148-152.

[2] 0426G4117 安全壳机械贯穿件技术规格书 [Z]．2010.

[3] 上海核工程研究设计院有限公司．压水堆核电厂钢制安全壳设计建造规范 :NB/T 20482-2018[S]．北京：国家能源局，2018.

[4] 民用核安全设备焊接人员资格管理规定：000014672/2020-00063[Z]．国家核安全局，2020.

[5] 民用核安全设备目录（第一批）[Z]．北京：国家核安全局，2007.

[6] 法国核岛设备设计建造及在役检查规则协会．压水堆核岛机械设备设计和建造规则 :RCC-M 2000 版 + 2002 补遗 [Z]．

作者简介：李艳（1982.03-），女，汉族，四川资阳人，硕士研究生，工程师，研究方向：结构设计和分析。