

文章编号：0258-0926(2014)02-0086-04

主管道安注斜接管嘴疲劳混合分析法研究

卢喜丰，张毅雄，艾红雷，王新军，何 风

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610041

摘 要：在主管道接管嘴疲劳分析中，通常采用简化分析和详细分析 2 种方法。由于安注斜接管嘴结构比较复杂且经受的压力、温度变化较为剧烈，用简化分析法对其进行疲劳分析时，往往过于保守而导致分析结果不能满足规范要求；采用详细分析法进行分析可以减少保守性，但耗时费力。本文采用简化分析和详细分析相结合的混合分析法对主管道安注斜接管嘴进行疲劳分析，既可以减少计算中的保守性又可以节省计算成本。在混合分析中，通过传热特性试验真实模拟流体与接管嘴之间的传热情况，得到用于计算分析的传热特性参数。分析结果表明，考虑流体传热特性因素的混合分析法能够很好地减少计算保守性，是用于主管道安注斜接管嘴疲劳分析的更加实用有效的方法。

关键词：安注斜接管嘴、疲劳、混合分析法、传热特性

中图分类号：TE972 文献标志码：A

0 引 言

主管道安注斜接管嘴在反应堆运行过程中承受着各种机械载荷以及热载荷的作用。在某些特殊瞬态，如在反应堆冷却时的安注箱误排放瞬态条件下，安注箱中的流体（35℃）通过接管嘴瞬间注入主管道中（主管道中冷却剂温度为 200℃），这时，接管嘴承受着强烈的冷冲击，可能导致安注斜接管嘴出现疲劳裂纹，从而引起接管嘴的疲劳破坏。为了确定接管嘴在各种载荷下能否承受疲劳破坏，需要对接管嘴进行疲劳寿命的评估。

根据 RCC-M 规范^[1]的要求，疲劳分析方法一般有两种：RCC-M B3600 中所述的简化分析方法和 RCC-M B3200 中所述的详细分析方法。在反应堆运行过程中受某些瞬态的作用，主管道安注斜接管嘴承受的热冲击很强烈，由于简化分析方法的保守性，用于主管道安注接管嘴进行疲劳分析时，分析结果很容易超出规范中的许用值。主管道安注斜接管嘴的结构比较复杂，接管嘴经历的热瞬态比较多，因此采用详细分析方法对其进行疲劳分析则会大大增加计算成本。在分析中流体与接管嘴之间的换热系数一般考虑为直接传热或用 Colburn 经验公式^[2]计算得到，采用此保守的换热系数模拟接管嘴传热并进行疲劳分析，分析

结果也可能超出许用限值。为了减小接管嘴疲劳分析中的保守性，本文通过传热特性试验得到流体与接管嘴之间的换热系数，采用简化分析和详细分析相结合的混合分析方法对主管道安注斜接管嘴进行疲劳分析。

1 分析方法

采用混合分析方法对主管道安注接管嘴进行疲劳分析，接管嘴的各评定截面见图 1。混合分析法分为简化分析和详细分析两部分。在分析中，首先用简化分析法对接管嘴所有瞬态进行分析，对瞬态进行筛选，确定压力、温度变化剧烈的瞬态组合；对于压力、温度变化不剧烈的瞬态组合用简化分析方法进行分析，对于压力、温度变化剧烈的瞬态组合用详细分析方法进行优化分析；将简化分析和详细分析的结果进行叠加即可得到最终计算结果。

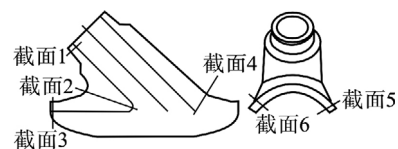


图 1 安注斜接管嘴各评定截面

Fig. 1 Calculated Section of Oblique Safety Injection Nozzle

在反应堆运行过程中，主管道安注斜接管嘴会经历一些特殊瞬态。此时，安注管中有注入流体，注入流体温度与主管道中的冷却剂的温度不同；两种不同温度的流体在接管嘴中混合，在接管嘴不同区域内的混合流体温度不同，相应的各个区域内流体和管壁的换热系数也有差异。为了真实模拟安注斜接管嘴在这些特殊瞬态下的传热特性，本文通过安注斜接管的传热试验对安注斜接管嘴在不同情况下的混合系数和换热系数进行分析研究。

在简化分析中，采用 ROCOCO 程序，建立一维模型对压力、温度变化不剧烈的瞬态进行疲劳分析。在这些瞬态条件下，用 Colburn 公式^[2] 计算接管嘴和主管道内表面与反应堆冷却剂流体的热交换系数。主系统瞬态，接管嘴和主管道内表面与反应堆冷却剂流体的热交换系数采用 Colburn 公式计算得到；接管嘴特殊瞬态，接管嘴和主管道各区域的换热系数由试验得到。

混合流体温度 T 为：

$$T = T_p + (T_i - T_p)m \quad (1)$$

式中， T_p 为冷却剂温度； T_i 为安注流体温度； m 为混合系数。

2 传热特性试验

2.1 试验模型

按 1:9 的比例制作安注斜接管嘴模型进行传热试验。根据相似原理，试验保证模型和原型的支管与主管流速比相等。

2.2 混合系数和换热系数的测量

试验中用热流计测量混合系数和换热系数，斜接管嘴的测点布置见图 2。

为了分析方便，定义无量纲的换热系数 Nh ：

$$Nh = h/h_r \quad (2)$$

式中， h 为测点处的换热系数； h_r 为参照换热系数。

参照换热系数以没有受到支流影响的主管上

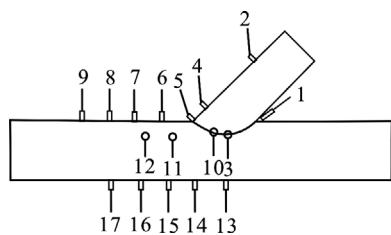


图 2 测点分布

Fig. 2 Distribution of Test Points

游流动条件为基础，根据经验公式 Petukhov 公式^[3]计算。

2.3 混合系数和换热系数的测量及结果

试验分别对各测点在流速比 (R) 范围 0.2~1.2 情况下的 m 和 Nh 进行了测量。

根据试验结果拟合出以 R 为自变量的 m 的函数关系式 $m=f(R)$ 以及 Nh 的函数关系式 $Nh=f(R)$ 。图 3、图 4 分别为 m 和 Nh 在测点 5 的实测值和拟合曲线。

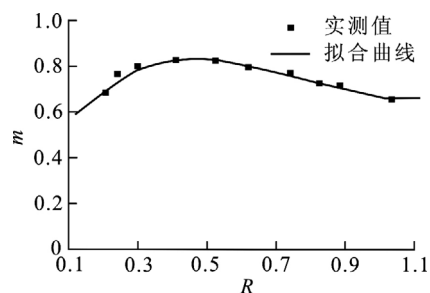


图 3 混合系数实测值

Fig. 3 Measurement of Mixed Coefficient

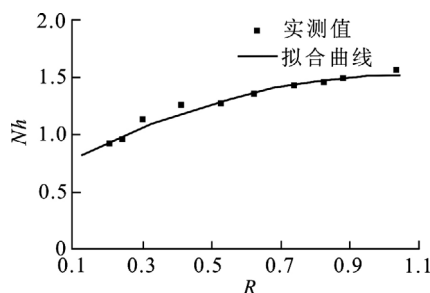


图 4 无量纲换热系数实测值

Fig. 4 Measurement of Dimensionless Heat Transfer Coefficient

根据不同的 R 对应 m 和 Nh 的拟合关系以及特殊瞬态条件下接管嘴支管与主管的 R ，可以计算得到主管道安注斜接管嘴在特殊瞬态条件下各个区域内的流体温度以及换热系数。表 1 给出了在反应堆冷却时的安注箱误排放瞬态条件下，接管嘴几个典型区域内的流体 m 、混合流体的温度及换热系数。

3 疲劳分析

3.1 分析载荷

主管道安注斜结构嘴在二类工况下的载荷包括：自重、热膨胀、地震以及压力温度瞬态。在疲劳分析中，自重载荷为恒载，不考虑。

表 1 安注箱误排放瞬态下接管嘴内混合流体混合系数、混合温度和换热系数

Table 1 Mixed Coefficient, Mixture Temperature and Heat Transfer Coefficient

截面所在区域	m	混合流体温度/ /W:(m ² ·s) ⁻¹	换热系数
截面 1	0.949	43.5	36572
截面 2	0.391	135.5	18115
截面 3	0.455	124.9	46775
截面 4	0.816	65.4	57916
截面 5	0.167	172.4	54679
截面 6	0.455	124.9	46774

3.2 分析模型

由于接管嘴是非对称结构并且结构比较复杂,本文选取整个接管嘴和部分主管道用 ANSYS 程序建立三维实体模型进行计算模拟,为消除集中载荷作用引起应力的奇异性对接管嘴计算结果的影响,将主管道两端从焊缝位置沿轴向分别延长 L_1 ($L_1 \geq 2.5\sqrt{RT}$, R 为主管道半径, T 为主管道厚度),将接管嘴端部从焊缝位置沿轴向延长 L_2 ($L_2 \geq 2.5\sqrt{rt}$, r 为接管半径, t 为接管厚度),主管道安注斜接管有限元模型见图 5。

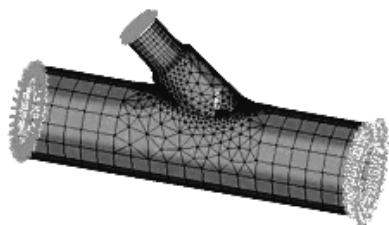


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model

3.3 边界条件

(1) 内压以均布力 (P) 的形式作用在接管嘴及主管道的内表面上;内压在主管道和接管嘴端部产生的静水端头力则以 P 的形式施加到相应位置:

$$P = \frac{R_i^2 P_{int}}{(R_o^2 - R_i^2)} \quad (3)$$

式中, R_i 为主管道和接管嘴端部横截面的内半径; P_{int} 为内压; R_o 为主管道和接管嘴端部横截面的外半径。

(2) 热应力分析时,假设结构的外表面绝热。

3.4 应力指数

在简化分析时,需要用到应力指数,由于主

管道安注斜接管支管轴线与主管壁之间的夹角为 45° , RCC-M 规范中的应力指数对安注斜接管不适用,根据应力指数的定义用有限元方法计算安注斜接管的应力指数,结果见表 2。表中 C_1 为压力载荷所对应的应力指数,适用于一次加二次应力; K_1 为压力载荷所对应的应力指数,适用于峰值应力; B_{2r} 为弯矩载荷所对应的主管段应力指数,适用于一次应力; C_{2r} 为弯矩载荷所对应的主管段应力指数,适用于一次加二次应力; K_{2r} 为弯矩载荷所对应的主管段应力指数,适用于峰值应力; B_{2b} 为弯矩载荷所对应的支管段应力指数,适用于一次应力; C_{2b} 为弯矩载荷所对应的支管段应力指数,适用于一次加二次应力; K_{2b} 为弯矩载荷所对应的支管段应力指数,适用于峰值应力; C_3 为热载荷所对应的应力指数,适用于一次加二次应力; C_3' 为热载荷所对应的应力指数,适用于一次加二次应力 (不包括热弯曲); K_3 为热载荷所对应的应力指数,适用于峰值应力。

表 2 接管嘴应力指数

Table 2 Stress Indices of the Nozzle

参数	C_1	K_1	B_{2r}	C_{2r}	K_{2r}	B_{2b}
数值	2.112	1.987	1.005	1.090	1.244	0.985
参数	C_{2b}	K_{2b}	C_3	C_3'	K_3	—
数值	1.000	1.078	1.097	0.528	1.538	—

3.5 分析结果

本文用混合分析法对主管道安注斜接管嘴进行疲劳分析。为了真实模拟实际情况,考虑在特殊瞬态条件下各个区域内混合流体温度的差异性以及流体和管壁之间换热系数的差异性,对接管嘴的各评定截面的疲劳寿命进行评定,分析结果见表 3。

当用简化分析方法对主管道安注斜接管嘴进行疲劳分析时,计算得到的最大疲劳使用系数为 12.1,远远超出限值;由于在某些瞬态下接管嘴承受比较激烈的热冲击,而简化分析方法比较保守,导致计算结果不满足要求。根据表 3 的分析结果,用混合分析法计算得到的主管道安注斜接管嘴的最大疲劳使用系数仅为 0.52,小于限值 1.0,疲劳满足 RCC-M 规范的要求,这是由于考虑了流体传热特性的混合分析法减少了计算结果的保守性;与详细分析方法比较混合分析法在减少保守性的同时能大大地减少了计算时间。

表3 疲劳分析结果
Table 3 Fatigue Evaluation Results

评定截面		最大应力强度 交变幅值/MPa	累积疲劳 使用系数
1	内表面点	974.13	0.075
	外表面点	679.77	0.030
2	内表面点	342.12	0.520
	外表面点	70.10	0.498
3	内表面点	139.31	0.498
	外表面点	94.72	0.498
4	内表面点	289.94	0.500
	外表面点	53.97	0.498
5	内表面点	352.51	0.505
	外表面点	133.54	0.498
6	内表面点	326.52	0.503
	外表面点	200.62	0.498

4 结束语

本文用简化分析和详细分析相结合的混合分

析方法对主管道安注斜接管进行了疲劳分析，疲劳分析中详细考虑了接管嘴内流体传热特性因素的影响。通过传热特性试验测量计算了斜接管嘴的流体混合系数和流体与管壁间的换热系数。比较表明，考虑了流体传热特性因素影响的混合分析法能很好地减少计算结果的保守性。由此可见，在主管道安注斜接管嘴的疲劳分析时，混合分析法是一种更加实用和有效的方法。

参考文献：

- [1] AFCEN. RCC-M Code[S]. 2000 + 2002.
- [2] Colburn A P. A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction[J]. Trans, AICHE, 29: 1933, 174-210.
- [3] Petukhov B S. Heat Transfer and Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties[J]. Advances in Heat Transfer Academic, New York, 1970, 504-564.

Study on Mixed Analysis Method for Fatigue Analysis of Oblique Safety Injection Nozzle on Main Piping

Lu Xifeng, Zhang Yixiong, Ai Honglei, Wang Xinjun, He Feng

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract : The simplified analysis method and the detailed analysis method were used for the fatigue analysis of the nozzle on the main piping. Because the structure of the oblique safety injection nozzle is complex and some more severe transients are subjected. The results obtained are more penalized and cannot be validate when the simplified analysis method used for the fatigue analysis. It will be little conservative when the detailed analysis method used, but it is more complex and time-consuming and boring labor. To reduce the conservatism and save time, the mixed analysis method which combining the simplified analysis method with the detailed analysis method is used for the fatigue analysis. The heat transfer parameters between the fluid and the structure which used for analysis were obtained by heat transfer property experiment. The results show that the mixed analysis which heat transfer property is considered can reduce the conservatism effectively, and the mixed analysis method is a more effective and practical method used for the fatigue analysis of the oblique safety injection nozzle.

Key words : Oblique safety injection nozzle, Fatigue, Mixed analysis method, Heat transfer property

作者简介：

卢喜丰（1983—），男，工程师。2008年毕业于西南交通大学工程力学专业，获工学硕士学位。现从事反应堆结构力学分析与研究工作。

张毅雄（1973—），男，研究员级高级工程师。1997年毕业于哈尔滨工程大学工程力学专业，获工学学士学位。现从事反应堆结构力学分析研究工作。

艾红雷（1981—），男，工程师。2006年毕业于武汉大学工程力学专业，获工学硕士学位。现从事反应堆结构力学分析与研究工作。

（责任编辑：王中强）