

文章编号:1673-9469(2022)02-0019-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.003

热流固耦合下 T 型管道疲劳分析

袁莹浩¹, 丁新宇², 白文婷^{1*}

(1. 河北地质大学 城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 北方工程设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要: 为研究热流固耦合下对 T 型管道疲劳寿命的影响, 基于 ANSYS 有限元软件对管道流场内的压强场、速度场的演变规律进行研究, 根据相关性理论, 引用皮尔逊相关性系数对结果进行相关性分析。结果表明流场区域内的压强和速度的变化规律同主支管温差关系极小, 与主支管速度差关系密切; 通过流固耦合分析得到管道在受流场复杂应力以及不同管道初始应力的情况下所产生应力的变化规律, 发现管道最大等效应力出现在 T 型连接处和固定端附近; 根据皮尔逊相关性系数发现管道最大应力以及危险点处的疲劳寿命同主支管温差关系显著。

关键词: T 型管; 热流固耦合; 有限元; 疲劳分析; 皮尔逊相关性系数

中图分类号: TQ055.8

文献标识码: A

Fatigue Analysis of T-pipe Under Thermo-Fluid-Solid Coupling

YUAN Yinghao¹, DING Xinyu², BAI Wenting^{1*}

(1. Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Northern Engineering Design and Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050031, China)

Abstract: For the purpose of studying the effect of the thermal-fluid-solid coupling on the fatigue life of T-pipe, the evolution of the pressure and velocity fields in the flow domain of the pipe was studied based on ANSYS finite element software, and the results were correlated according to the correlation theory and the Pearson correlation coefficient. The results show that the variation of the pressure and velocity in the flow field area has very little relationship with the temperature difference of the main branch pipe, and is closely related to the velocity difference of the main branch pipe. The variation of stresses in the pipe under complex stresses in the flow field and different initial stresses is obtained through the fluid-solid coupling analysis, and it is found that the maximum equivalent stresses in the pipe occur near the T-joint and the fixed end. On the basis of the Pearson correlation coefficient, the maximum equivalent stresses of the pipe and the fatigue life at the danger point were found to be significantly related to the temperature difference between the main branch pipe.

Key words: T-pipe; thermo-fluid-solid coupling; finite element method; fatigue analysis; Pearson correlation coefficient

在工程中, 疲劳失效是结构中主要的失效问题^[1]。尤其是在核电、化工等这种大型设施中, 存在由管内流体温度场, 速度场分布不均和管壁耦合作用导致的管道失效问题, 是不可忽视的安全隐患。国内外对管道的热应力以及热疲劳现象研究多是基于实验与有限元数值模拟方法结合并进行对比, Gauder 等^[2]研究了湍流入口条件对核电

站三通管道冷热混合特性的影响, 其研究结果表明入流湍流对温度波动、湍流动能和温度-速度相关性等参数的评估有不可忽视的影响, 而普通的流动条件没有引起近壁温度波动的任何主导频率。Boo 等^[3]利用计算流体力学与格林函数对核电站管道的局部温度和热应力进行了数值模拟分析, 得出的流体温度也与实际设计的温度差别不

收稿日期: 2022-01-04

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2021403012)

作者简介: 袁莹浩(1997-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 从事设备的疲劳分析方面的研究。

* 通讯作者: 白文婷(1979-), 女, 内蒙古牙克石市人, 博士, 高级工程师, 主要从事反应堆结构工程研究工作。

大。其研究表明数值模拟在该问题上的可行性^[4-7],而且在大型特殊管道工程,有限元方法也能提供很好的预测。余志兵等^[8]采用有限元分析软件,结合管-土相互作用参数,建立多跨海管数值计算模型,提出悬空管道模态分析方法并采用 Miner 线性累计损伤理论和 $S-N$ 曲线对管道的疲劳寿命做出了预测。在疲劳领域中相关性分析仍缺乏,而在研究影响因素并揭示一般规律时,相关性系数是一个很好的度量指标。

本文通过引用皮尔逊相关性系数,对影响管道应力及其疲劳寿命的复杂原因进行了分析。T型三通管道在核电、化工、石油等管道系统应用广泛,且往往是管路系统中最为薄弱环节。在复杂工况的情况下,主支管可能存在不可忽视的温度差、速度差,在此期间存在冷热水的持续混合过程,产生交替变化的热疲劳载荷作用,在其作用下,管道可能产生热疲劳裂纹,甚至发展为贯穿裂纹,造成管道的失效。故选取一段三通管作为物理分析模型。

1 计算模型

1.1 数学模型

较于标准的 K-Epsilon 湍流模型,Realizable K-Epsilon 模型能更好地体现管内旋转剪切流、含有射流和混合的自由流、管内流动的现象^[9],采用 Realizable K-Epsilon 湍流模型以及标准壁面函数的方法同大涡模拟相比,在保证计算精度的同时大大节省了计算资源,能更高效地研究 T 管中由于主支管射入流的温差以及速度差影响。

为研究流场内压强和速度与主支管温差和速度差之间相关性的强弱,引入了皮尔逊相关系数来判断其相关性。该系数是描述两变量间关系密切程度的度量指标^[10],其关系如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

式中: X 为自变量, Y 为因变量,下标 i 为样本编号, \bar{X} 和 \bar{Y} 为样本均值,其取值范围是 $[-1, 1]$ 。 $r > 0$ 时,两变量正相关; $r < 0$ 时,两变量负相关。一般情况下当 $|r| \geq 0.8$,则被视为高度相关; $0.3 \leq |r| < 0.8$,中度相关; $0 \leq |r| < 0.3$ 之间,为弱相关。

1.2 有限元模型

管道模型外径 63 mm,壁厚 4 mm,主管长度

600 mm,支管 200 mm。其中 inlet1、2 为进口,并将 inlet2 设为固定端, outlet 为出口,控制进出口处管道的轴向位移为零,管道及有限元网格模型详见图 1。

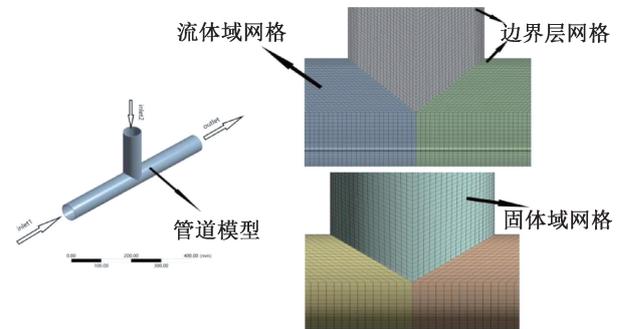


图 1 有限元模型图

Fig. 1 Finite element model diagram

2 应力计算

2.1 工况设计

设计六组实验组,每组包含 5 种工况。第一组和第二组管道初始应力采用 10.268 MPa,第三组、第四组 9.651 MPa,最后两组设为 9.270 MPa,以此来观察管道米塞斯应力随主支管温差以及速度差变化的影响。从第一组到第六组每组主支管的温差依次递减,递减梯度为 20 °C,且管道初始应力随着温度的升高也逐级减小;每组 5 种工况的主支管速度差依次递减,递减梯度为 0.2 m/s,详见表 1。

表 1 工况

Tab. 1 Work conditions

实验组 组序	初始应 力/MPa	主、支管 温差/°C	速度差/(m·s ⁻¹)				
一	10.268	140	0.8	0.6	0.4	0.2	0
二		120	0.8	0.6	0.4	0.2	0
三	9.651	100	0.8	0.6	0.4	0.2	0
四		80	0.8	0.6	0.4	0.2	0
五	9.270	60	0.8	0.6	0.4	0.2	0
六		40	0.8	0.6	0.4	0.2	0

2.2 计算参数设置

2.2.1 流场计算

流场域的具体边界条件详见表 2,设定流体域壁层为绝热边界,热交换系数为 0,出口表压为 0,管道内壁面作为耦合边界。在计算过程中,考虑重力因素,将流体域设定成流动的单相液态水,使用 FLUENT 材料库中自带的 WATER-LIQUID 材料,采用 Realizable K-Epsilon 数学模型并打开能量

表 2 计算边界条件
Tab. 2 Boundary conditions of calculation

边界名称	速度/(m·s ⁻¹)					温度/°C						
Inlet1	1					160						
Inlet2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	20	40	60	80	100	120	

方程,选择混合初始化,使用 Couple 耦合求解器与 Second Order Upwind 格式开始进行瞬态求解。为了更好地贴近实际情况,先计算一个极短的时间步,设定为 1E-5 s,导出该过程中流体域的温度,压强等数值,再重新进行混合初始化,将导出的数据作为初始化的数据,进行瞬态计算。瞬态求解总时间为 200 s,时间步长设定为 0.05 s,数据监测频率为 300 Hz。

2.2.2 流固耦合计算

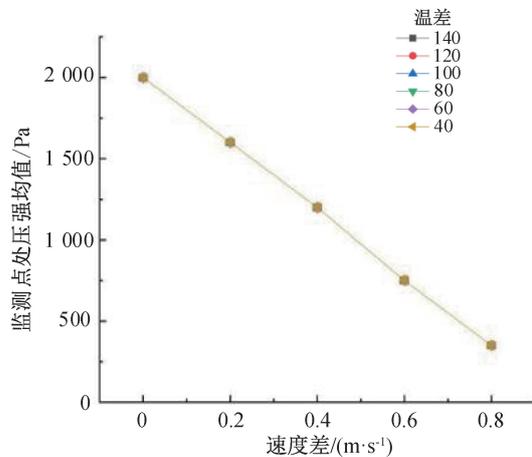
流固耦合分为单向耦合和双向耦合,在实际工况下,管道因流体作用导致的变形相对较小,对流场的影响可忽略不计,故选择单向耦合方法进行计算。其中固体域的边界条件详见表 3。将在流体域计算得到的管道内壁面压强、温度作为瞬态载荷加载到固体域。

表 3 流固耦合边界条件

Tab. 3 Boundary conditions of fluid-solid coupling

边界名称	边界条件
主管入口端面初始应力/MPa	10.268, 9.651, 9.270
支管入口端面固定约束	固定约束
主管出口端面轴向位移	轴向位移为 0
管道内壁面	导入流体域面瞬态压强
固体管道	导入流体域面瞬态温度

设管道的材料为 304L 不锈钢,密度为 7 930 kg/m³,热膨胀系数设为 1.84E-5/°C,杨氏模量为 1.45E5 MPa,泊松比是 0.3,采用双线性各向同性硬化曲线考虑材料的非线性。



3 结果分析

3.1 流场域分析

在 FLUENT 进行瞬态计算后,统计进出口流量,得到出口流量等于两个进口流量之和,故计算满足质量守恒定律,在管道的 T 型中央沿 x 轴轴向方向设置 5 个监测点,出口处每隔 90 度设置一个监测点,总共 4 个,见图 2。为探究主支管温差,速度差对流场内速度和压强的影响,选择节点平均压强以及节点平均速度作为具体的指标来进行分析,结果见图 3。监测点处的压强均值同主支管速度差具有明显的线性规律,并且六种线型几乎完全重合,表明流场的监测点处的平均压强和速度受温差的影响极小。

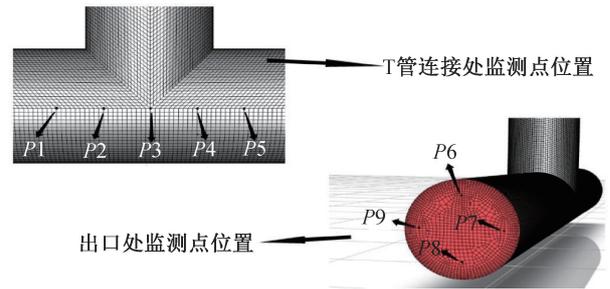


图 2 监测点分布图

Fig. 2 Monitoring point distribution diagram

引用皮尔逊相关性系数,直观地观察流场监测点处平均压强和速度与主支管速度差相关性的

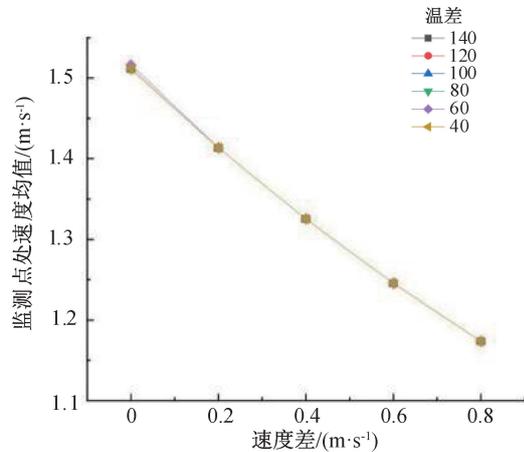


图 3 计算结果图

Fig. 3 Calculation results diagram

表 4 监测点处皮尔逊相关性系数

Tab. 4 Pearson correlation coefficient at the monitoring site

皮尔逊系数	监测点					
	P1	P2	P3	P4	P5	出口处监测点
监测点处平均压强同主管速度差	-0.999 61	-0.999 75	-0.999 83	-0.999 91	-0.998 74	—
监测点处平均速度同主管速度差	-0.998 18	-0.997 23	-0.998 11	-0.998 15	-0.998 26	-0.993 38

注: $|r| \geq 0.8$, 高度相关。

强弱。为方便分析,因出口处 4 个监测点表压为 0,则只统计 4 个监测点速度的均值。计算结果见表 4。从表中可以看出,皮尔逊相关性系数的绝对值均大于 0.8,说明流场内压强和速度与主管速度差高度相关,与上述分析一致。

3.2 固体域分析

在 Workbench 平台中,将流固耦合计算结果通过 Static Structure 模块施加到固体域,给定材料的导热系数 $15 \text{ W/m}\cdot\text{C}$,比热容 $500 \text{ J/Kg}\cdot\text{C}$ 。耦合计算时间共 5 s,耦合计算发现,在初始应力,主管速度差以及温差三个因素的共同作用下,管道最大米塞斯等效应力位置即管道危险处大致分为两种情况。

第一种情况:在第一、二和第五实验组所设置的工况下(在第三实验组中仅当主管速度差在 0.6 及以上时)最大米塞斯应力位置出现在 T 型连接处即主管冷热水交汇区域。米塞斯应力与主管温差高度相关,与管道初始应力中度相关,同速度差弱相关,详见表 5。说明在主管温差较大情况下,管道最大米塞斯等效应力取决于管道内部冷热水的持续混合,产生交替变化的热疲劳载荷作用。在 30 种工况中选择第 7 种工况的米塞斯应力云图,详见图 4。

第二种情况:在第四和第六实验组所设置的工况下(在第三实验组中仅当主管速度差在 0.4 及以下时)最大米塞斯应力位置出现在固定端附

近且米塞斯等效应力和管道初始应力,温差中度相关(同管道初始应力相关性更高),与速度差弱相关,详见表 5。说明在管内的总温度逐渐上升之后,由于冷热水混合产生的热疲劳荷载逐渐减小,外部管道初始应力对管道的作用效果更为明显。在 30 种工况中选择第 26 种工况的管道最大米塞斯等效应力云图,详见图 5。

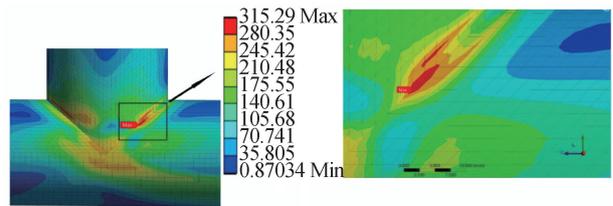


图 4 管道 T 型连接处最大米塞斯应力云图
Fig. 4 Cloud map of the location of the maximum Mises stress at pipe T-junction

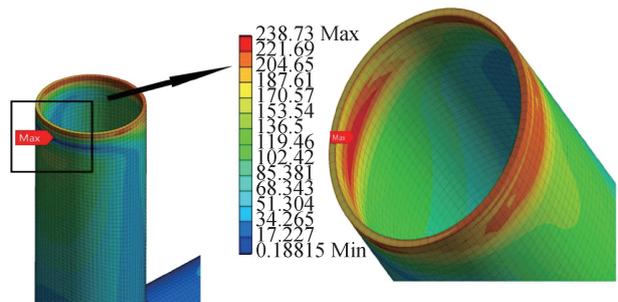


图 5 管道固定端处最大米塞斯等效应力云图
Fig. 5 Cloud map of the location of the maximum mises stress at the fixed of the pipe

表 5 皮尔逊相关性系数

Tab. 5 Pearson correlation coefficient

皮尔逊系数	双变量		
	管道应力和温差	管道应力和速度差	管道应力和初始应力
第一种情况	0.841 07	-0.265 19	0.783 88
第二种情况	0.433 56	0.100 64	0.693 21

注: $|r| \geq 0.8$, 高度相关; $0.3 \leq |r| < 0.8$, 中度相关; $0 \leq |r| < 0.3$, 弱相关。

6 组最大米塞斯等效应力大小详见图 6。在第一、第二和第四实验组工况下,其最大米塞斯等效应力均普遍大于第三、第五和第六实验组,且第三组数据结果出现不单一性,原因在于当支管温度上升到 60 ℃时,管内流体在该温差和速度差下未能充分进行混合,并且在管道初始应力外部作用的参与下,其复杂应力导致管道最大米塞斯等效应力和温差中度相关。大量实验数据表明,由于管道内流体平均温度的升高而产生的热应力对管道的作用远远小于冷热水混合产生的交变热荷载效应。

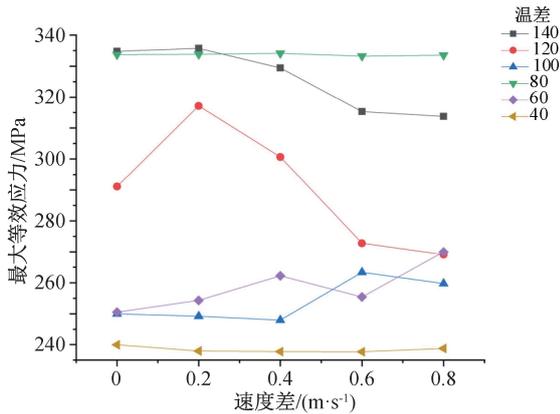


图 6 每组等效应力图

Fig. 6 Equivalent stress of per group diagram

4 疲劳寿命预测

基于本文所采用的工况,管道受到的循环应

力次数远远超过 10^5 ,故属于高周疲劳,采用名义应力法对管道的疲劳寿命进行预测^[11],本文采用 ANSYS 自带的疲劳工具 Fatigue Tool,疲劳强度因子(K_f)取 1,载荷加载方式选择 Fully-Reversed,见图 7。放缩系数设置为 1,应力通过 Goodman 曲线进行修正。

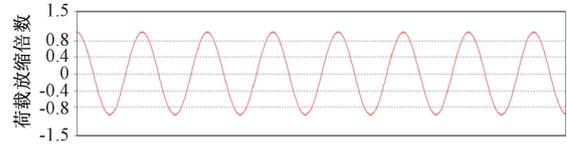


图 7 荷载加载方式图

Fig. 7 Load loading method diagram

通过计算发现,不同工况下危险处的疲劳寿命与其最大米塞斯等效应力大小有直接关系,一般疲劳寿命最小处则为管道米塞斯等效应力最大处,计算结果详见表 6。

对应上述热应力分析管道最大米塞斯等效应力位置出现的两种情况,分别引用皮尔逊相关性系数进行相关性分析得到:管道的疲劳寿命与米塞斯等效应力呈现极其显著的负相关,与计算结果吻合。当危险点出现在 T 型管连接处时,其疲劳寿命与主管温差和管道初始应力高度相关(与温差相关性更高),与速度差相关性弱相关;当危险点出现在固定端附近时,其疲劳寿命与管道初始应力,温差和速度差为中度相关(与管道初始应力相关性更高),详见表 7。

表 6 疲劳寿命

Tab. 6 Fatigue life

T 型连接处附近		固定端附近		T 型连接处附近		固定端附近	
工况	疲劳寿命(循环)	工况	疲劳寿命(循环)	工况	疲劳寿命(循环)	工况	疲劳寿命(循环)
1	17 978	13	44 006	10	24 120	27	48 771
2	17 752	14	43 433	11	38 577	28	48 740
3	15 672	15	43 094	12	36 923	29	48 627
4	14 744	16	15 068	21	33 866	30	47 729
5	14 844	17	14 965	22	40 576	—	—
6	34 257	18	14 984	23	37 420	—	—
7	32 554	19	15 022	24	41 803	—	—
8	19 902	20	15 045	25	42 824	—	—
9	17 483	26	48 279	—	—	—	—

表 7 疲劳寿命皮尔逊相关性系数

Tab. 7 Pearson correlation coefficient of fatigue life

皮尔逊系数	双变量			
	疲劳寿命和温差	疲劳寿命和速度差	疲劳寿命和初始应力	疲劳寿命和管道应力
第一种情况	-0.863 29	0.216 95	-0.833 77	-0.984 22
第二种情况	-0.460 44	-0.337 27	-0.714 54	-0.999 53

注: $|r| \geq 0.8$,高度相关; $0.3 \leq |r| < 0.8$,中度相关; $0 \leq |r| < 0.3$,弱相关。

5 结论

1) 流场内的压强和速度主支管速度差高度负相关。

2) 在管道初始应力, 主支管速度差以及温差三个因素的共同作用下, 管道危险处分别出现在 T 管连接处和固定端附近, 第一种情况取决于管道内部冷热水的持续混合, 产生交替变化的热疲劳载荷作用; 第二种则取决于外部管道初始应力对管道的作用。

3) 管道的疲劳寿命与管道最大米塞斯等效应力呈现高度的负相关。因管内流体平均温度的升高而使管道产生的热应力远远小于冷热水混合产生的交变热荷载使管道产生的热应力, 控制主支管温差可大大减小因交变热荷载而导致 T 型连接处发生失效的概率, 来延长管道的疲劳寿命。

参考文献:

- [1] SCHÜTZ W. A History of Fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54(2): 263-300.
- [2] GAUDER P, SELVAM P K, KULENOVIC R, et al. Large Eddy Simulation Studies on the Influence of Turbulent Inlet Conditions on the Flow Behavior in a Mixing Tee[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, 298: 51-63.
- [3] BOO M H, OH C K, KIM H S, et al. Numerical Simulation of Temperature and Thermal Stress for Nuclear Piping by Using Computational Fluid Dynamics Analysis and Green's Function[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2017, 31(5): 2243-2249.
- [4] METZNER K J, WILKE U. European THERFAT Project—Thermal Fatigue Evaluation of Piping System“Tee”—Connections[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(2-4): 473-484.
- [5] ZHANG Y, LU T, Study of the Quantitative Assessment Method for High-Cycle Thermal Fatigue of a T-pipe Under Turbulent Fluid Mixing Based on the Coupled CFD-FEM Method and the Rain Flow Counting Method[J]. Nuclear Engineering & Design, 2016, 309: 175-196.
- [6] DE SANTIS A, SHAMS A, Assessment of Different URANS Models for the Prediction of the Unsteady Thermal Mixing in a T-junction[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 121: 501-512.
- [7] 龚玮, 张小春, 王晓艳, 等. 基于 PepS 的高温核一级管道蠕变疲劳分析方法研究[J]. 核技术, 2020, 43(3): 89-96.
- [8] 余志兵, 孙国民, 戚晓明, 等. 深水多跨海底悬空管道的疲劳分析[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(3): 58-61.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 鲁雷雷. 激光雷达探测大气气溶胶雷达比和退偏比相关性分析及仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学. 2017.
- [11] 李庚旺, 张骐, 陈爽, 等. T 型管湍流穿透现象的热流固耦合疲劳分析[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2020, 47(4): 81-88.

(责任编辑 周雪梅)