

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209783

冲击波压力在分叉管道内的传播规律

刘宇^{1,2} 廉政^{3,4} 崔春生^{1,2} 李顺^{1,2} 李新域^{1,2}

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 中北大学电气与控制工程学院 太原 030051;
3. 中国兵器工业火炸药工程与安全技术研究院 北京 100053; 4. 中国兵器工业集团公司燃烧与
爆炸安全技术重点实验室 北京 100053)

摘要: 为研究冲击波在分叉管道内的压力分布和衰减规律,搭建模块化分叉管道模型,进行冲击波传播试验,得到了不同破膜压力和不同分叉角度条件下冲击波在管道内各测点的超压峰值,并利用兰基涅-胡果尼方程插值拟合衰减曲线。使用 FLUENT 软件的压强速度关联算法对冲击波在管道分叉处的传播过程进行数值模拟,观察管内压力流场分布。得出结论:分叉角度对干管和支管的压力分布有显著影响,冲击波在管道内的衰减速率与破膜压力有关。30°、90°和 150°三种分叉管道中,90°分叉管道支管的平台压力最低。同一破膜压力下,支管与干管的衰减速率变化趋势相反。

关键词: 分叉管道;冲击波;传播规律;流场分布;平台压力

中图分类号: TJ011;O382;TM932 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410

Propagation law of shock wave pressure in bifurcated tubes

Liu Yu^{1,2} Lian Zheng^{3,4} Cui Chunsheng^{1,2} Li Shun^{1,2} Li Xin'e^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
3. China Safety Technology Research Academy of Ordnance Industry, Beijing 100053, China;
4. NORINCO GROUP Key Laboratory of Combustion and Explosion Safety Technology, Beijing 100053, China)

Abstract: To reveal pressure distribution and attenuation law of shock wave in bifurcated tubes, a modular bifurcated tube model was built for shock wave propagation test. The overpressure of shock wave at each measuring point under different membrane breaking pressures and different bifurcation angles was obtained, and the attenuation curve was fitted with Rankine-Hugoniot equation. The pressure velocity correlation algorithm of FLUENT was used to simulate the propagation process of shock wave at the tube bifurcation and observe the distribution of pressure flow field in tubes. The results show that the bifurcation angle has a significant impact on the pressure distribution of the main tubes and branch tubes. The attenuation rate of shock wave in the tubes is related to the membrane breaking pressure. Among the three bifurcation tubes of 30°, 90° and 150°, the platform pressure of 90° branch tube is the lowest. Under the same membrane breaking pressure, the attenuation rate of branch tubes is opposite to main tubes.

Keywords: bifurcated tubes; shock wave; propagation law; flow field distribution; platform pressure

0 引言

冲击波在管状结构内传播时,与自由场爆炸冲击波相似,具有十分陡峭的前沿,不同的是受到结构约束,出现马赫反射现象,有一定宽度的平台段,其传播规律不同于自由场。分叉作为矿井、巷道、坑道、管廊内常见的结构形式,不仅是相关设施的功能需要,也对冲击波具有分压和耗散的作用。

国内外学者对不同加载源爆炸系统的分叉管道爆轰后的冲击波进行了大量研究。Lin 等^[1]研究了分叉结构对管道中气体爆炸的影响,讨论了分叉位置对超压峰值的影响。Igra 等^[2]用 FLUENT 软件和 AUSM 求解器,研究分支段的不同方向角度对冲击波压力流场的影响。Jing 等^[3]研究了分叉管内冲击波超压的变化及分布规律,分叉后直管段和直管段冲击波超压突变系数均受管道分叉角影响。邱进伟^[4]认为瓦斯爆炸后超压衰减主要受拐弯或分叉角度和初

收稿日期:2022-04-28

始压力的影响。贾智伟、许胜铭等^[5-6]和王春林等^[7]均认为爆轰后分叉管道有分流作用,支线管道冲击波与直线管道冲击波超压衰减系数呈负相关。梁东升^[8]研究了不同弯道或分叉角度对冲击波恢复为平面波所需距离的影响。张学博等^[9]研究了分叉巷道长度对冲击波超压影响较小。刘如成等^[10]研究了巷道分叉及转角能有效降低冲击波超压。上述研究具有参考意义,但目前对管内冲击波压力平台段和流场分布尚未系统研究。

激波管实验一般用于传感器的动态校准,通常使用直管进行试验避免管道内旋波、稀疏波等影响实验结果。本文试验系统改变传统观念,以高压氮气罐作为冲击波加载源,探明分叉管道内冲击波的压力分布和衰减规律,能有效控制冲击波造成的伤害,对相关工业设施的结构强度设计、安全风险评估和人员避险场所布置都有重要意义。以高压氮气罐作为冲击波加载源沿激波管传播的优点是:传播过程无高温干扰,有利于传感器测试的稳定性,冲击波超压的一致性,有十分陡峭的前沿和平台段,有利于排除干扰研究冲击波本征的传播特性。由于管道试验通常只能测试管道内壁典型位置的超压,难以直接观测压力流场全貌细节,也难以捕捉管道内气体流速、流向等更多参数。因此本研究结合实验数据和理论分析,引入 FLUENT^[11] 仿真软件对管道内的冲击波流场分布进行模拟,并分析了分叉处流场的细节特征。

1 试验方案

试验系统由高压氮气罐、膜片、模块化管道、管道壁面若干传感器和测试装置搭建而成,测试装置由信号调理器、多通道冲击波超压测试装置^[12-13]和上位机组成,信号调理器将压力传感器输出的电压信号调理到多通道超压测试装置中 A/D 转换模块的有效输入范围^[14]内,多通道超压测试装置具有采集和存储的功能,上位机读取数据输出波形。原理如图 1 所示,试验系统中搭建管道和测试装置如图 2 所示。

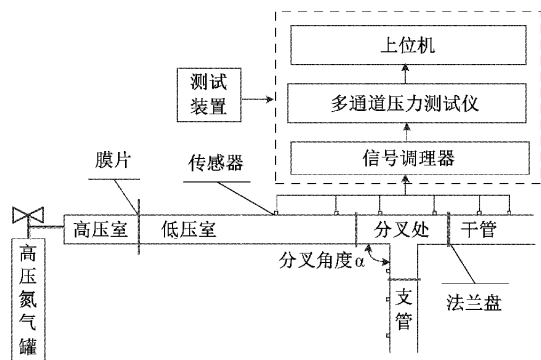


图 1 试验系统原理图

激波管口径为 24 mm,管体为钢质,通过法兰盘模块化搭建,其尾部不封闭。高压氮气罐作为冲击波加载源,当膜片破裂时,冲击波由高压段向低压段驱进,沿搭建好的管道传播。试验提供 3 种不同的分叉角度 α ,分别为 30°、90°、

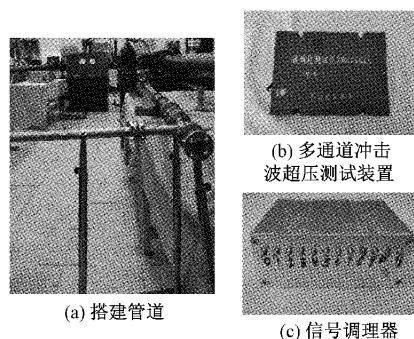


图 2 试验系统

150°,分叉处如图 3 所示。提供三种不同的膜片,膜片材质为铝箔,膜片厚度分别为 1、1.5、2.5 mm。不同厚度的膜片破膜时产生不同的冲击波压力,不同角度分叉管道产生不同压力分布,可以组合 9 种工况,试验温度为 20 °C。

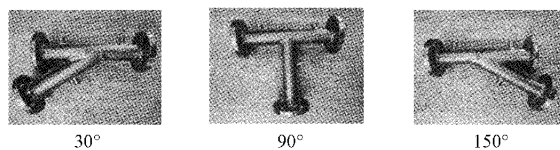


图 3 分叉处模块化管道

以分叉角度 90°为例作测点分布图,如图 4 所示。分叉前测点 T1、T2,分叉后支管测点 T3、T4、T5,分叉后干管测点 T6、T7、T8,相邻两测点的中心点 J、J1、J2、J3、J4。分叉后各测点和相邻两测点的中心点距离分叉点 M 距离如表 1 所示。

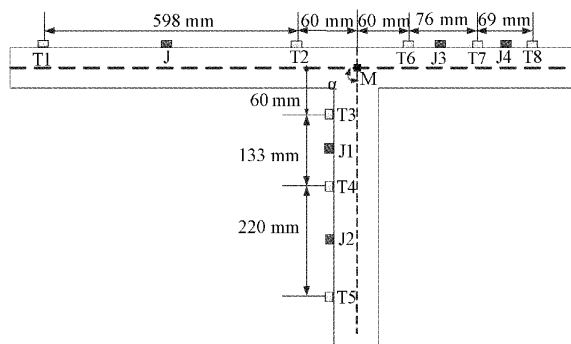


图 4 测点分布图

表 1 距离分叉点 M 的距离 mm

位置	T3	T4	T5	T6	T7	T8
距离	60	193	413	60	136	205
位置	J1	J2	J3	J4		
距离	126.5	303	98	170.5		

2 实测结果与理论结合分析

2.1 实测结果分析

以分叉角度 α 为 30°,膜片厚度为 1 mm 的工况为例,

展示实测波形,如图 5 所示。T1 和 T2 为分叉前的测点, T3、T4、T5 为分叉后支管测点, T6、T7、T8 为分叉后干管测点。

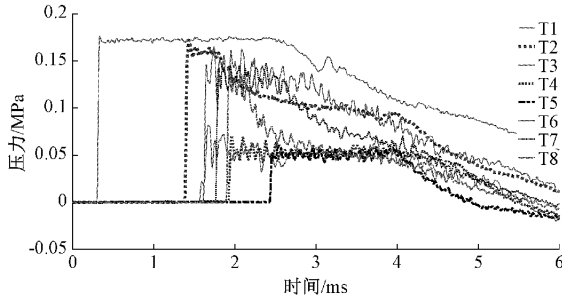


图 5 全部测点实测超压曲线

以分叉角度 α 为 30° 、 90° 、 150° , 膜片厚度为 1 mm 的 3 种工况为例,管道分叉处 T2、T3、T6 测点的实测超压曲线如图 6~8 所示。

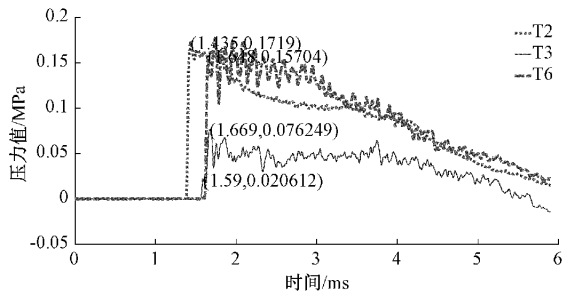


图 6 30° 管道分叉处各测点的超压曲线

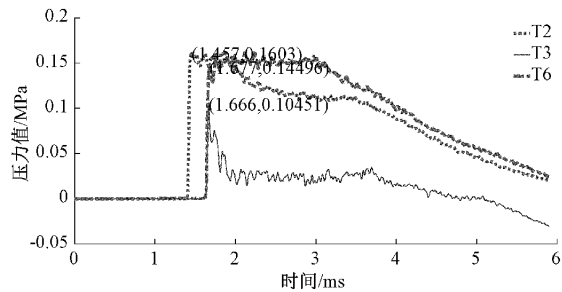


图 7 90° 管道分叉处各测点的超压曲线

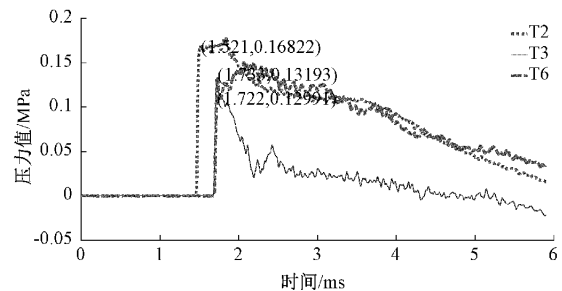


图 8 150° 管道分叉处各测点的超压曲线

激波管中的激波有一定宽度的平台段,平台段对应的压力称为平台压力,对应的时间称为平台时间。分析

图 6~8 分叉处 T3 测点的超压曲线, 30° 分叉管道 T3 测点的平台压力为 0.045 MPa,平台时间为 2.423 ms; 90° 分叉处 T3 测点的平台压力为 0.022 MPa,平台时间为 1.828 ms; 150° 分叉处 T3 测点的平台压力为 0.303 MPa,平台时间为 0.540 ms。

分析试验数据后得出规律:分叉角度越小,分叉后支管第一个超压峰值越低; 30° 分叉管道分叉后支管有一个极小的超压峰值,随后又上升到平台段。 90° 分叉管道支管的平台压力最低,平台时间较长。 150° 分叉管道支管平台时间较短。

2.2 理论分析

由于实测考虑到传感器的灵敏度,以及实验过程中管道达不到绝对水平带来的误差,利用 Rankine-Hugoniot 方程插值拟合超压峰值随距离的衰减曲线。Rankine-Hugoniot 方程根据气体动力学等能量和等熵过程计算出激波压力和激波速度的关系。将 9 种工况全部测点的超压峰值以及正压到达时间进行统计,每一实验点数值均是多次实验数据中的最优数据,如表 2 和 3 所示。将管内冲击波经过相邻两测点的时间间隔 t 和两测点距离 s 带入 Rankine-Hugoniot 方程得到两测点中心 J , $J_1 \sim J_4$ 超压计算值,如表 4 所示。Rankine-Hugoniot 方程^[15 16]空气冲击波的入射超压和波前马赫数的关系如式(1)~(4)所示。

$$\Delta p_2 = \frac{7}{6} \times (M_s^2 - 1) \times P_1 \quad (1)$$

$$M_s = \frac{v}{c} \quad (2)$$

$$v = \frac{s}{t} \quad (3)$$

$$c = C_0 \times \sqrt{1 + \frac{T}{273.15}} \quad (4)$$

式中: Δp_2 为空气冲击波波前的入射超压,单位为 MPa; M_s 为冲击波波前马赫数; c 为空气中的声速,单位为 m/s; $C_0 = 331.45$ m/s; $T = 20^\circ\text{C}$, 为试验温度; $P_1 = 0.093$ MPa, 为破膜前低压区初始压力; s 为两测点间的距离,单位为 m; t 为冲击波经过两测点的时间间隔,即正压到达时间差,单位为 s; v 为两实测点中心点的速度,单位为 m/s。

3 数据分析

表 2 实测值和表 4 计算值比较,表 4 计算值符合实测值的衰减趋势,可进行插值拟合。分析距离和超压峰值的相关系数 r ,如表 5 所示,其中 88.9%数据呈高度负线性相关,11.1%数据呈显著相关,可进行线性拟合。

相关系数的数学表达式如式(5)所示。

$$r(x, y) = \frac{Cov(x, y)}{\sigma_x \times \sigma_y} \quad (5)$$

其中, x 代表各测点离中心 M 的距离, y 代表各测点的超压峰值。

表 2 全部测点超压峰值

角度/ (°)	膜片厚度/ mm	测点位置超压峰值实测结果/MPa							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
30	1	0.175	0.171	0.076	0.070	0.051	0.157	0.144	0.142
	1.5	0.273	0.253	0.113	0.097	0.077	0.250	0.225	0.219
	2.5	0.312	0.273	0.119	0.100	0.081	0.267	0.239	0.234
90	1	0.168	0.16	0.105	0.076	0.058	0.145	0.131	0.129
	1.5	0.272	0.243	0.155	0.106	0.081	0.221	0.207	0.202
	2.5	0.304	0.272	0.172	0.117	0.089	0.248	0.230	0.224
150	1	0.173	0.168	0.130	0.110	0.099	0.132	0.116	0.108
	1.5	0.278	0.259	0.207	0.168	0.151	0.220	0.187	0.180
	2.5	0.294	0.272	0.219	0.175	0.161	0.235	0.198	0.190

表 3 全部测点正压到达时间

角度/ (°)	膜片厚度/ mm	测点位置正压到达时间/ms							
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
30	1	0.298	1.380	1.617	1.917	2.428	1.614	1.759	1.891
	1.5	0.508	1.444	1.666	1.944	2.428	1.648	1.774	1.889
	2.5	0.538	1.452	1.668	1.949	2.427	1.651	1.774	1.887
90	1	0.319	1.404	1.627	1.922	2.418	1.625	1.774	1.910
	1.5	0.227	1.171	1.378	1.645	2.111	1.366	1.497	1.616
	2.5	0.476	1.388	1.588	1.849	2.305	1.576	1.702	1.817
150	1	0.361	1.455	1.677	1.946	2.406	1.684	1.838	1.980
	1.5	0.580	1.529	1.723	1.965	2.372	1.728	1.864	1.986
	2.5	0.600	1.537	1.726	1.966	2.369	1.734	1.866	1.987

表 4 相邻两测点中心超压计算值

角度/ (°)	膜片厚度/ mm	相邻两测点中心位置超压计算值/MPa				
		J	J1	J2	J3	J4
30	1	0.173	0.073	0.062	0.145	0.143
	1.5	0.268	0.103	0.082	0.227	0.224
	2.5	0.286	0.098	0.087	0.244	0.235
90	1	0.172	0.079	0.073	0.131	0.129
	1.5	0.262	0.120	0.097	0.202	0.202
	2.5	0.288	0.131	0.106	0.227	0.224
150	1	0.167	0.117	0.102	0.116	0.109
	1.5	0.258	0.170	0.161	0.179	0.186
	2.5	0.267	0.175	0.166	0.197	0.191

表 5 距离与超压峰值的相关系数

角度/ (°)	膜片 厚度/mm	支管		干管	
		相关程度	高度相关	相关程度	高度相关
30	1.0	-0.986 3	高度相关	-0.815 8	高度相关
	1.5	-0.986 3	高度相关	-0.836 1	高度相关
	2.5	-0.986 3	高度相关	-0.883 5	高度相关
90	1.0	-0.904 2	高度相关	-0.817 6	高度相关
	1.5	-0.904 2	高度相关	-0.731 4	显著相关
	2.5	-0.904 2	高度相关	-0.808 7	高度相关
150	1.0	-0.880 3	高度相关	-0.910 3	高度相关
	1.5	-0.880 3	高度相关	-0.701 6	显著相关
	2.5	-0.880 3	高度相关	-0.820 2	高度相关

利用最小二乘法对距离和超压峰值进行拟合,拟合出支管和干管超压峰值随距离的衰减曲线。如图 9~11 所示,虚线为对应超压峰值随距离的衰减曲线 $y=kx+b$,其中 y 代表超压峰值,压力衰减速率为 $|k|$ 。具体参数 k 、 b 如表 6 所示。并分析衰减速率随分叉角度变化规律,如图 12~13 所示。

如上图 12~图 13 所示,分析可得:同一分叉角度下,破膜压力越大,支管和干管压力的衰减速率越大;同一破

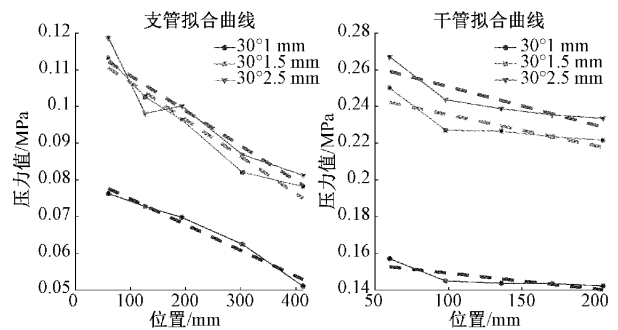


图 9 30°分叉管道衰减曲线

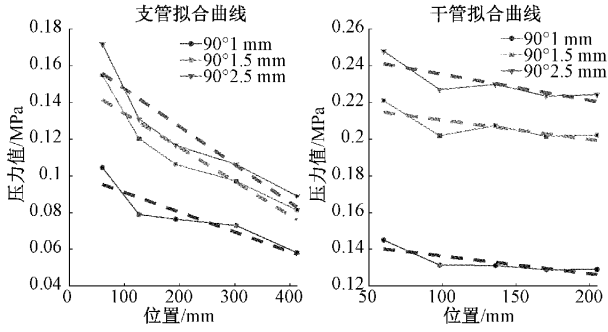


图 10 90°分叉管道衰减曲线

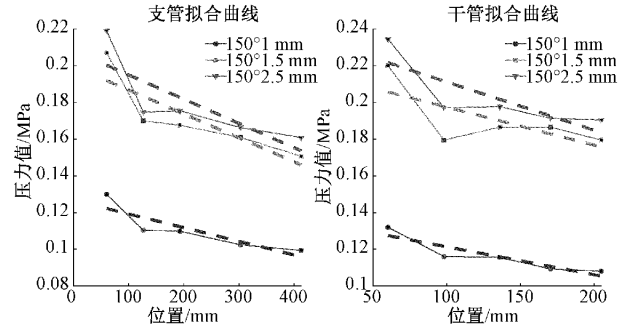


图 11 150°分叉管道衰减曲线

表 6 拟合函数曲线参数

角度/ (°)	膜片厚度/ mm	拟合函数曲线($y=kx+b$)			
		支管		干管	
		$k1$	$b1$	$k2$	$b2$
30	1.0	-0.000 070	0.081 819	-0.000 121	0.157 843
	1.5	-0.000 101	0.116 542	-0.000 169	0.252 278
	2.5	-0.000 095	0.117 867	-0.000 210	0.271 721
90	1.0	-0.000 108	0.101 811	-0.000 096	0.145 994
	1.5	-0.000 185	0.152 508	-0.000 106	0.220 973
	2.5	-0.000 206	0.168 115	-0.000 142	0.249 571
150	1.0	-0.000 074	0.126 695	-0.000 152	0.136 570
	1.5	-0.000 130	0.199 826	-0.000 207	0.218 123
	2.5	-0.000 132	0.208 200	-0.000 262	0.237 389

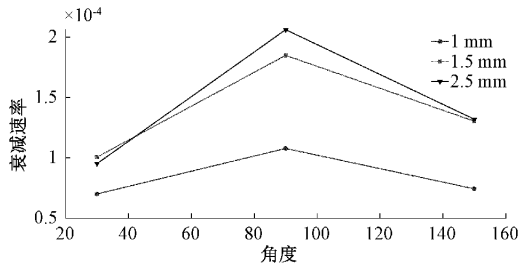


图 12 支管衰减速率随分叉角度变化规律

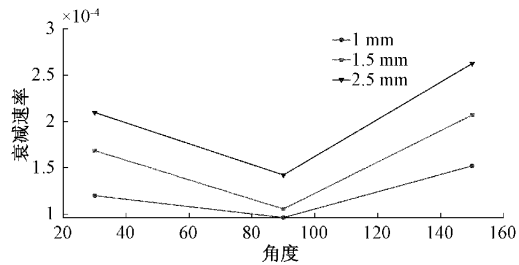


图 13 干管衰减速率随分叉角度变化规律

膜压力下,支管的衰减速率在 90°分叉角度下达到最大,而干管的衰减速率在 90°分叉角度下达到最小。支管的衰减速率与干管的衰减速率趋势相反。

4 数值模拟

为了更直观地分析管道分叉处压力流的细节特征,使用 FLUENT 仿真软件,以分叉角度 α 为 30°, 90°, 150°, 膜片厚度为 1 mm 的 3 种工况管道分叉处为例,进行稳态数值模拟,气体介质选择 N_2 , 建模尺寸为前文试验方案分叉处管道模块实际尺寸,建立分叉管道的 3D 几何模型,全局设定选择 CFD, 网格尺寸函数选择 Curvature, 网格平均质量为 0.83。边界条件设置:管道左侧分叉前边界为速度入口 (velocity-inlet), 分叉后两个边界设置为压力出口 (pressure-outlet), 管道壁面为边界 (wall)。压力出口和速度入口按照前文实测结果设置,以 150°管道分叉处模型为例展示,如图 14 所示,选择 Coupled 算法进行局部管道数值模拟。分析管道分叉处数值模拟流场压力云图结果如图 15~17 所示。

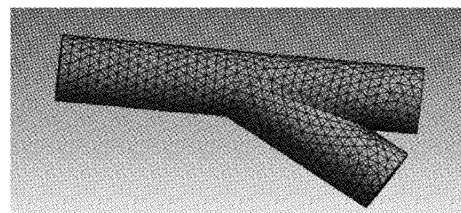


图 14 150°管道分叉处模型

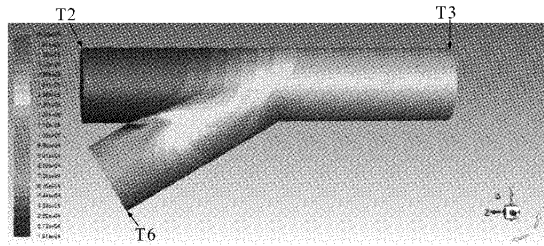


图15 30°管道分叉处流场分布

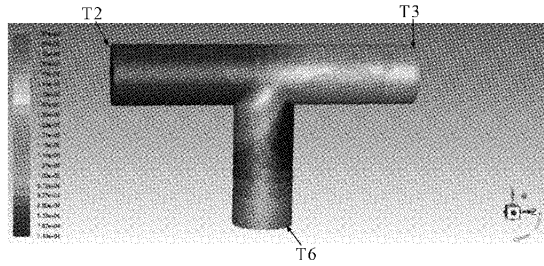


图16 90°管道分叉处压力流场分布

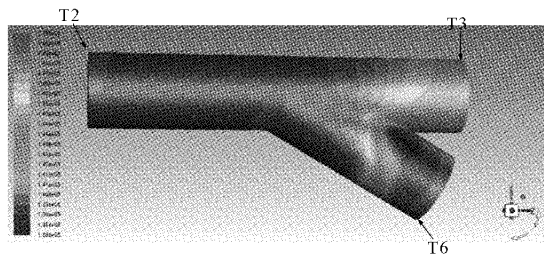


图17 150°管道分叉处压力流场分布

图15~17可直观地分析管道分叉处压力流场的细节特征,由图15可知,30°管道分叉后支管出现低压区旋波,是角度拐弯过大,气体流向发生巨大变化。与图6 T3测点实测超压曲线较低的超压峰值相对应。从图16可得,90°管道分叉后支管低压区范围较大,明显比干管压力小,与图7 T3测点较低平台段对应,由图17可得,150°管道分叉后支管压力小于直管。

读取FLUENT数值仿真测点T2、T3、T6的超压值,经校验,如表7所示,30°、90°、150°分叉管道实测超压值与

表7 管道分叉处模拟超压与实测超压对比表

角度/ (°)	测点	实测超压值/ MPa	模拟超压值/ MPa	相对 误差/%
30	T2	0.18	0.194	7.78
	T3	0.077	0.084	9.09
	T6	0.145	0.133	8.28
90	T2	0.168	0.161	4.17
	T3	0.105	0.102	2.86
	T6	0.134	0.133	0.75
150	T2	0.159	0.148	6.92
	T3	0.13	0.139	6.92
	T6	0.132	0.144	9.09

数值模拟和试验数据有较好一致性。

数值模拟超压值总体相对误差在10%以下,在误差允许范围内。

5 结 论

分叉角度对干管和支管的压力分布有显著影响,破膜压力不变时,分叉角度越小,支管第一个测点处超压峰值越低。

冲击波在管道内的衰减速率与破膜压力有关,分叉角度不变,破膜压力越大,支管和干管压力的衰减速率越大。

30°、90°和150°三种分叉管道中,90°分叉管道支管的平台压力最低。

同一破膜压力下,支管的衰减速率与干管的衰减速率趋势相反。

参考文献

- [1] LIN B, GUO C, SUN Y M, et al. Effect of bifurcation on premixed methane-air explosion overpressure in pipes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43:464-470.
- [2] IGRA D, IGRA O. Simulation of shock wave propagation in a duct with a side branch [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(12): 2226-2236.
- [3] JING G, GUO S, WU Y. Investigation on the characteristics of single-phase gas explosion and gas-coal dust coupling explosion in bifurcated tubes[J]. Thermal Science, 2021, 25(5): 3595-3605.
- [4] 邱进伟. 瓦斯爆炸冲击波在管网内传播特征及灾变过程仿真研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2018.
- [5] 许胜铭. 复杂管道内瓦斯爆炸冲击波、火焰及有毒气体传播规律研究[D]. 焦作:河南理工大学,2015.
- [6] 贾智伟,许胜铭,景国勋. 瓦斯爆炸冲击波在单向分叉管道内的传播规律试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2015,25(12):51-55.
- [7] 王春林,杜鹃. 瓦斯爆炸冲击波在不同通风管网中的传播规律试验研究[J]. 建井技术,2021,42(4):32-38,26.
- [8] 梁东升. 基于LS-DYNA模拟的巷道爆破空气冲击波传播特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
- [9] 张学博,高建良,沈帅帅,等. 矿井大尺度冲击波传播规律数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(4):9.
- [10] 刘如成,朱云飞. 煤矿长壁工作面瓦斯爆炸全尺寸模拟[J]. 中国安全科学学报,2018,28(12):58-64.
- [11] 王莎莎,张东东,李新娥,等. 基于FLUENT和ADAMS的外弹道加速度仿真[J]. 探测与控制学报, 2019,41(5):47-52.
- [12] 尤文斌,丁永红. 基于WPSO-PO的冲击波测试适配器参数优化研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(10):

- 221-228.
- [13] 李冒金,李剑,刘宾,等.基于 Zynq 的大动态冲击波超压测试系统设计[J].国外电子测量技术,2022,41(1):51-56.
- [14] 张鑫宇,韩跃平,张鹏,等.基于 FPGA 的片上多通道采集模块设计[J].国外电子测量技术,2021,40(4):144-149.
- [15] 祖静,马铁华,裴东兴,等.新概念动态测试[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [16] 杨帆,杜红棉,王玉全.冲击波超压测试系统动态校准的研究[J].传感器世界,2015,21(9):11-14.

作者简介

刘宇,硕士研究生,主要研究方向为动态测试与智能

仪器。

E-mail:liu13347454996@163.com

廉政,工学博士,工程师,主要研究方向为工程防护技术。

E-mail:lianzhengbit@163.com

崔春生,工学博士,讲师,主要研究方向为动态测试与智能仪器、爆炸冲击波的毁伤评估。

E-mail:ccs007008@126.com

李顺,硕士研究生,主要研究方向为动态测试与智能仪器。

E-mail:lishun960615@163.com

李新娥,工学博士,教授,研究生导师,主要研究方向为动态测与校准试、智能测控、传感技术、通信。

E-mail:Zn11xe@163.com