柱面SH波作用下管道的动力响应

雷鸣 张茂晨 秦子豪 杨民 张维 路世伟

Dynamic Response of Pipeline Subjected to Cylindrical SH Wave

LEI Ming, ZHANG Maochen, QIN Zihao, YANG Min, ZHANG Wei, LU Shiwei

引用本文:
雷鸣, 张茂晨, 秦子豪, 等. 柱面SH波作用下管道的动力响应[J]. 高压物理学报, 2023, 37(2):024203. DOI: 10.11858/gywlxb.20220690
LEI Ming, ZHANG Maochen, QIN Zihao, et al. Dynamic Response of Pipeline Subjected to Cylindrical SH Wave[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(2):024203. DOI: 10.11858/gywlxb.20220690

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220690

第 37 卷　第 2 期　　高　压　物　理　学　报　　Vol. 37, No. 2
2023 年 4 月　　CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS　　Apr. , 2023

DOI: 10.11858/gywlxb.20220690

柱面 SH 波作用下管道的动力响应

雷　鸣[1,2], 张茂晨[1], 秦子豪[1,2], 杨　民[1,2], 张　维[1], 路世伟[1,2]

(1. 长江大学城市建设学院, 湖北 荆州　434023;
2. 长江大学油气地下储库研究中心, 湖北 荆州　434023)

摘要: 在地下空间开发建设过程中, 钻爆法开挖诱发的爆破地震波对地下管道安全至关重要。当爆源距离管道较近时, 波阵面的曲率会对管道的爆破动力响应特性产生显著影响。采用波函数展开法研究了柱面 SH 波爆破作用下管道的动应力集中问题, 首先讨论了混凝土管道和 PVC 管道的动应力集中系数分布规律, 进而探讨了一般情况下波源到管道轴线距离、入射波频率以及管道与土层剪切模量比 η 对管道内壁动应力集中系数的影响。结果表明: 相较于 PVC 管道, 混凝土管道内壁的动应力集中系数分布形状对柱面 SH 波频率较敏感; η 是影响管道动应力集中系数的重要指标, 当入射波频率一定时, 随着 η 的增大, 管道最大动应力集中系数也逐渐增大; η 一定时, 随着入射波频率增大, 管道最大动应力集中系数逐渐减小; 波源到管道轴线距离会因波阵面曲率对管道破坏位置产生影响, 而其对最大动应力集中系数的影响较小。

关键词: 柱面 SH 波; 管道; 频率; 动应力集中系数; 管道与土层剪切模量比

中图分类号: O347　　　　**文献标识码:** A

随着城市化进程的不断推进, 越来越多的地下空间被开发。在地下空间建设过程中, 由于工程地质条件的复杂性及施工成本考虑, 越来越多的工程采用钻孔爆破开挖法进行施工。然而在钻孔爆破开挖施工过程中, 爆破地震波往往会威胁到临近地下空间中管道的安全, 因此, 深入研究地下结构在爆破地震波作用下的动力响应具有重要的理论和实用价值。

关于弹性波在含障碍物的散射及动力集中问题, 国内外学者已经开展了大量的研究。Pao 等[1] 针对圆柱体含有夹杂的动应力集中问题进行了研究。Baron 等[2] 首次运用积分变换法和波函数展开法研究了圆柱空腔结构的弹性波散射问题。Yi 等[3] 采用傅里叶-贝塞尔展开法研究了均匀介质中圆形空腔和衬砌隧道在平面波作用下的动力响应。Lee 等[4–5] 研究了平面 SV 波在地下圆柱形空腔中的散射问题及地下圆柱形空腔对平面纵波散射的影响。我国许多学者也就此问题开展了研究。刘殿魁等[6] 利用复变函数方法对无限空间各向异性介质中入射 SH 波对圆孔散射问题进行了研究。齐辉等[7] 在复平面上求解了半无限空间中 SH 波对浅埋圆形衬砌结构的散射和动应力集中问题。许华南等[8] 采用复变函数、格林函数法研究了 SH 波作用下地下复杂衬砌结构的地震动问题。梁瑞等[9]、纪冲等[10] 采用 ANSYS/LS-DYNA 程序研究了爆破荷载下埋地管道的动力响应问题。周俊等[11] 运用弹性波动理论方法研究了上土下岩地层中平面 SH 波的传播特性。曹天阁[12] 采用波函数展开法和虚拟镜像法研究了含单个圆孔半无限平板内弹性波的动应力集中与破坏问题。Lu 等[13–14] 采用波函数展开法研究了柱面

* **收稿日期:** 2022-11-09; **修回日期:** 2022-12-21
基金项目: 中国石油科技创新基金(2017D-5007-0604); 湖北省自然科学基金(2019CFB224); 爆破工程湖北省重点实验室开放基金(HKLBEF202011)
作者简介: 雷　鸣(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事油气储运工程安全评估及预警技术研究.
E-mail: 88456455@qq.com
通信作者: 路世伟(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石动力学、岩土体稳定性研究.
E-mail: lushiwei364@163.com

P 波作用下圆形洞室的动应力集中和振动速度分布。王进[15]通过多极坐标以及复变函数法研究了 SH 波作用下正交各向异性凹陷地形中浅埋一个各向同性圆柱夹杂的动应力集中问题。

在过去, 相关研究将爆炸波视为平面波, 此简化适用于震源较远的情况。然而, 钻孔爆破作业有时必须在靠近现有地下结构的区域进行, 平面波的假设不再适用, 必须考虑波前的曲率。因此, 一些研究人员开始研究圆柱波的传播。Li 等[16]研究了柱面 P 波引起的地面运动。Chai 等[17−18]研究了柱面纵波在节理岩体中的传播和柱面 P 波的传播。Yi 等[19]研究了柱面 P 波作用下非完美界面圆形衬砌隧道的动应力集中问题。到目前为止, 关于柱面 SH 波诱导地下结构动力响应的理论研究还很少。为此, 本研究拟采用波函数展开法探究柱面 SH 波爆破作用下管道的动应力集中问题, 首先讨论混凝土管道和 PVC 管道的动应力集中系数(dynamic stress concentration factor, DSCF)分布规律, 进而分析一般情况下波源到管道轴线距离 r_0、入射波频率 f 以及管道与土层剪切模量比 η 对管道内壁动应力集中系数的影响。

1　柱面 SH 波与围岩的相互作用

1.1　简化模型

柱面 SH 波与围岩相互作用的简化模型如图 1 所示, 一条内、外半径分别为 a、b 的圆形管道位于土壤中, $O_1x_1y_1$ 为谐波扩张线源位于 O_1 处的局部坐标系, $O_2x_2y_2$ 为原点位于圆形管道圆心的坐标系, 以 $O_2x_2y_2$ 为整体坐标系。P 为土体中任意一点, P 与 O_1 的距离为 r_1, 与 O_2 的距离为 r_2, O_1 与 O_2 的距离为 r_0。

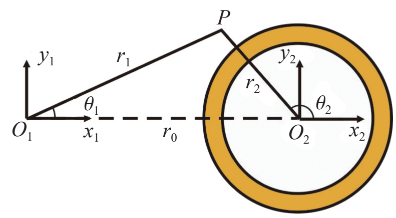


图 1　简化模型

Fig. 1　Simplified model

在 O_1 处, 由线源产生的单位振幅简谐柱面 SH 波位移函数可表示为

$$W^{(\mathrm{i})} = H_0^{(1)}(\beta_1 r_1)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \tag{1}$$

式中: $H_0^{(1)}(x)$为第一类零阶 Hankle 函数; β_1 为波数, $\beta_1=\omega/C_{\mathrm{S}1}$, ω 为入射波的角频率, $C_{\mathrm{S}1}$ 为波速, $C_{\mathrm{S}1}=\sqrt{\mu_1/\rho_{\mathrm{s}}}$, μ_1 为 Lamé常数, ρ_{s} 为土壤密度。

一般来说, 当柱面 SH 波遇到管道时, 在土壤中会产生向外传播的反射 SH 波, 并且在管道中会产生向外和向内传播的 SH 波, 即反射的 SH 波($W^{(\mathrm{r})}$)和折射的 SH 波($W^{(\mathrm{f})}$), 它们的形式均为

$$W^{(\mathrm{r})} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r_2)\cos(n\theta_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \tag{2}$$

$$W^{(\mathrm{f})} = \sum_{n=0}^{\infty}\left[C_n H_n^{(1)}(\beta_2 r_2) + D_n H_n^{(2)}(\beta_2 r_2)\right]\cos(n\theta_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \tag{3}$$

式中: B_n 为未知变量参数, β_2为管道中的横波波数, $H_n^{(1)}(x)$为 n 阶第一类 Hankle 函数, $H_n^{(2)}(x)$为 n 阶第二类 Hankle 函数。

为了得到岩体中的位移, 需要将 $O_1x_1y_1$ 中的 $W^{(\mathrm{i})}$ 转换为 $O_2x_2y_2$, 即进行以下转换

$$H_n^{(1)}(\beta_1 r_1)\begin{bmatrix}\cos(n\theta_1)\\ \sin(n\theta_1)\end{bmatrix} = \sum_{m=-\infty}^{\infty}(-1)^m J_m(\beta_1 r_0) H_{m+n}^{(1)}(\beta_1 r_2)\begin{bmatrix}\cos[(m+n)\theta_2]\\ \sin[(m+n)\theta_2]\end{bmatrix} \qquad r_0 < r_2 \tag{4}$$

$$H_n^{(1)}(\beta_1 r_1)\begin{bmatrix}\cos(n\theta_1)\\ \sin(n\theta_1)\end{bmatrix} = \sum_{m=-\infty}^{\infty}(-1)^m H_m^{(1)}(\beta_1 r_0) J_{m+n}(\beta_1 r_2)\begin{bmatrix}\cos[(m+n)\theta_2]\\ \sin[(m+n)\theta_2]\end{bmatrix} \qquad r_2 \leqslant r_0 \tag{5}$$

由于主要关注 $r_2 \leqslant r_0$ 区域的动态响应, 因此式 (5) 适用。将式 (5) 代入到式 (1), 则位移可以表示为

$$W^{(\mathrm{i})} = \sum_{n=0}^{\infty}(-1)^n \varepsilon_n H_n^{(1)}(\beta_1 r_0) J_n(\beta_1 r_2)\cos(n\theta_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} = \sum_{n=0}^{\infty} A_{0n} J_n(\beta_1 r_2)\cos(n\theta_2)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \tag{6}$$

式中: $A_{0n} = (-1)^n \varepsilon_n H_n^{(1)}(\beta_1 r_0)$, 当$n>0$时, $\varepsilon_n = 2$, 否则$\varepsilon_0 = 1$。

1.2　解决方案

使$W_1 = W^{(i)} + W^{(r)}$, $W_2 = W^{(f)}$, 边界条件可表示为

当 r_2=b 时

$$\begin{cases} W_1 = W_2 \\ \tau_{rz1} = \tau_{rz2} \end{cases} \tag{7}$$

当 r_2=a 时

$$\tau_{rz} = 0 \tag{8}$$

根据 $O_2x_2y_2$ 中位移与应力的关系, 可以表示为

$$\begin{cases} \tau_{rz1} = \mu_1 \dfrac{\partial W_1}{\partial r_2} \\ \tau_{\theta z1} = \mu_1 \dfrac{1}{r_2} \dfrac{\partial W_1}{\partial \theta_2} \\ \tau_{rz2} = \mu_2 \dfrac{\partial W_2}{\partial r_2} \\ \tau_{\theta z2} = \mu_2 \dfrac{1}{r_2} \dfrac{\partial W_2}{\partial \theta_2} \end{cases} \tag{9}$$

式中: μ_2为管道的剪切模量。忽略时间常数, 应力和位移可以表示为

$$\begin{cases} W_1 = \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} \left[A_{0n} J_n(\beta_1 r_2) + B_n H_n^{(1)}(\beta_1 r_2) \right] \cos(n\theta_2) \\ W_2 = \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} \left[C_n H_n^{(1)}(\beta_2 r_2) + D_n H_n^{(2)}(\beta_2 r_2) \right] \cos(n\theta_2) \\ \tau_{rz1} = \dfrac{\mu_1}{r_2} \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} [A_{0n}\varepsilon_{11}(n, r_2) + B_n \varepsilon_{12}(n, r_2)] \cos(n\theta_2) \\ \tau_{\theta z1} = \dfrac{\mu_1}{r_2} \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} [A_{0n}\varepsilon_{21}(n, r_2) + B_n \varepsilon_{22}(n, r_2)] \sin(n\theta_2) \\ \tau_{rz2} = \dfrac{\mu_2}{r_2} \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} [C_n\varepsilon_{31}(n, r_2) + D_n \varepsilon_{32}(n, r_2)] \cos(n\theta_2) \\ \tau_{\theta z2} = \dfrac{\mu_2}{r_2} \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} [C_n\varepsilon_{41}(n, r_2) + D_n \varepsilon_{42}(n, r_2)] \sin(n\theta_2) \end{cases} \tag{10}$$

考虑到边界条件, 有

$$\begin{cases} \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} \left[A_{0n} J_n(\beta_1 b) + B_n H_n^{(1)}(\beta_1 b) - C_n H_n^{(1)}(\beta_2 b) - D_n H_n^{(2)}(\beta_2 b) \right] \cos(n\theta_2) = 0 \\ \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} \left\{ A_{0n}\varepsilon_{11}(n, b) + B_n \varepsilon_{12}(n, b) - \dfrac{\mu_2}{\mu_1} [C_n \varepsilon_{31}(n, b) + D_n \varepsilon_{32}(n, b)] \right\} \cos(n\theta_2) = 0 \\ \displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{31}(n, a) + D_n \varepsilon_{32}(n, a)] \cos(n\theta_2) = 0 \end{cases} \tag{11}$$

通过对式 (11) 进行整理积分, 可得

$$\begin{cases} A_{0n} J_n(\beta_1 b) + B_n H_n^{(1)}(\beta_1 b) - C_n H_n^{(1)}(\beta_2 b) - D_n H_n^{(2)}(\beta_2 b) = 0 \\ A_{0n}\varepsilon_{11}(n, b) + B_n \varepsilon_{12}(n, b) - \dfrac{\mu_2}{\mu_1} [C_n \varepsilon_{31}(n, b) + D_n \varepsilon_{32}(n, b)] = 0 \\ C_n \varepsilon_{31}(n, a) + D_n \varepsilon_{32}(n, a) = 0 \end{cases} \tag{12}$$

B_n、C_n、D_n 确定如下

$$B_n = -A_{0n}\frac{\begin{vmatrix} J_n(\beta_1 b) & -H_n^{(1)}(\beta_2 b) & -H_n^{(2)}(\beta_2 b) \\ \varepsilon_{11}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{31}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{32}(n,b) \\ 0 & \varepsilon_{31}(n,a) & \varepsilon_{32}(n,a) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} H_n^{(1)}(\beta_1 b) & -H_n^{(1)}(\beta_2 b) & -H_n^{(2)}(\beta_2 b) \\ \varepsilon_{12}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{31}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{32}(n,b) \\ 0 & \varepsilon_{31}(n,a) & \varepsilon_{32}(n,a) \end{vmatrix}} \tag{13}$$

$$C_n = -A_{0n}\frac{\begin{vmatrix} H_n^{(1)}(\beta_1 b) & J_n(\beta_1 b) & -H_n^{(2)}(\beta_2 b) \\ \varepsilon_{12}(n,b) & \varepsilon_{11}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{32}(n,b) \\ 0 & 0 & \varepsilon_{32}(n,a) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} H_n^{(1)}(\beta_1 b) & -H_n^{(1)}(\beta_2 b) & -H_n^{(2)}(\beta_2 b) \\ \varepsilon_{12}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{31}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{32}(n,b) \\ 0 & \varepsilon_{31}(n,a) & \varepsilon_{32}(n,a) \end{vmatrix}} \tag{14}$$

$$D_n = -A_{0n}\frac{\begin{vmatrix} H_n^{(1)}(\beta_1 b) & -H_n^{(1)}(\beta_2 b) & J_n(\beta_1 b) \\ \varepsilon_{12}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{31}(n,b) & \varepsilon_{11}(n,b) \\ 0 & \varepsilon_{31}(n,a) & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} H_n^{(1)}(\beta_1 b) & -H_n^{(1)}(\beta_2 b) & -H_n^{(2)}(\beta_2 b) \\ \varepsilon_{12}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{31}(n,b) & -\dfrac{\mu_2}{\mu_1}\varepsilon_{32}(n,b) \\ 0 & \varepsilon_{31}(n,a) & \varepsilon_{32}(n,a) \end{vmatrix}} \tag{15}$$

2　数值计算结果及讨论

2.1　动应力集中系数的定义

解决柱面时间简谐 SH 波对管道边缘 DSCF 分布的影响是非常重要的。根据余弦定理, r_1 可以表示为

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 + r_2^2 - 2r_0 r_2 \cos(\pi - \theta_2)} \tag{16}$$

剪应力表示为

$$\tau_{rz}^{(i)} = -\mu_1 \beta_1 H_1^{(1)}(\beta_1 r_1)\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega t} \tag{17}$$

动应力集中系数定义为

$$\delta = \frac{\tau_{\theta z2}}{\tau_{rz}^{(i)}} \tag{18}$$

2.2　工况分析

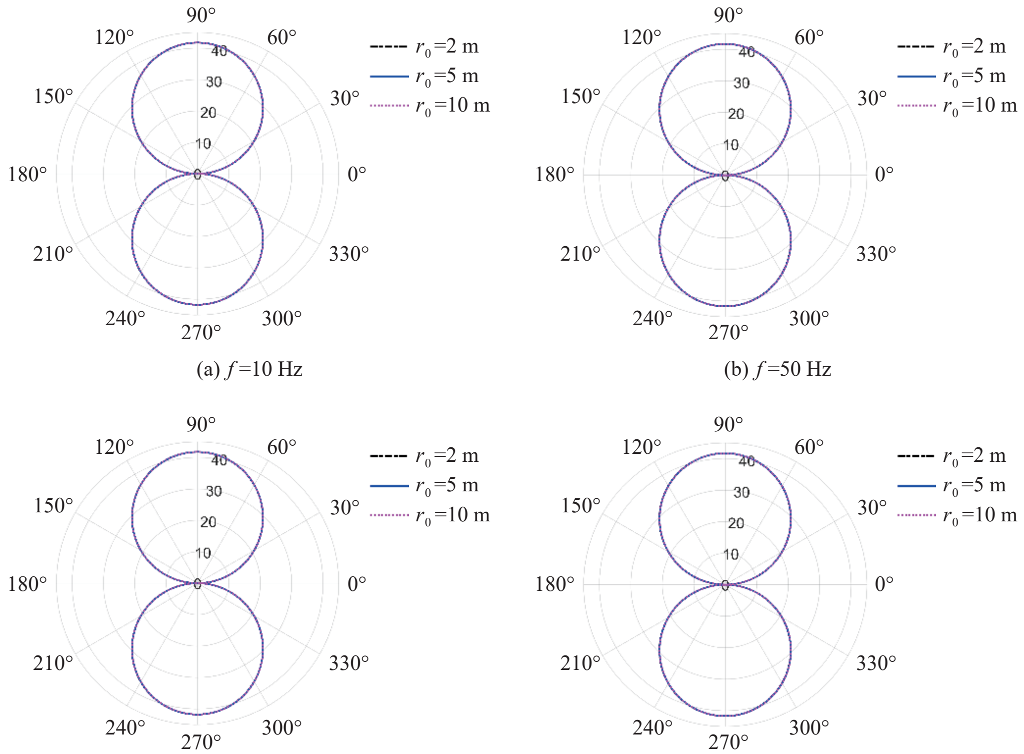
相对于埋地管道外侧受到土层的约束,管道内侧在爆破地震波作用下更加危险,因此选择混凝土管道与 PVC 管道内侧边界作为研究对象,研究入射波频率为 10、50、100 和 200 Hz 作用下管道的动力响应,相关参数如表 1 所示。其中 ρ、μ分别为密度和剪切模量,下标 s、p、pvc 分别代表土壤、混凝土管和 PVC 管。

表 1　计算工况

Table 1　Calculation condition

f/Hz	r_0/m	Parameters of soil		Parameters of concrete pipe				Parameters of PVC pipe			
		ρ_s/(kg·m^{-3})	μ_s/MPa	ρ_p/(kg·m^{-3})	μ_p/GPa	a_p/mm	b_p/mm	ρ_{pvc}/(kg·m^{-3})	μ_{pvc}/GPa	a_{pvc}/mm	b_{pvc}/mm
10, 50, 100, 200	2, 5, 10	1 200	17	2 300	12.5	500	585	1 500	0.96	15.5	16.0

入射波频率为 10、50、100、200 Hz 作用下, PVC 管道内壁与混凝土管道内壁的 DSCF 环向分布曲线分别如图 2 和图 3 所示。

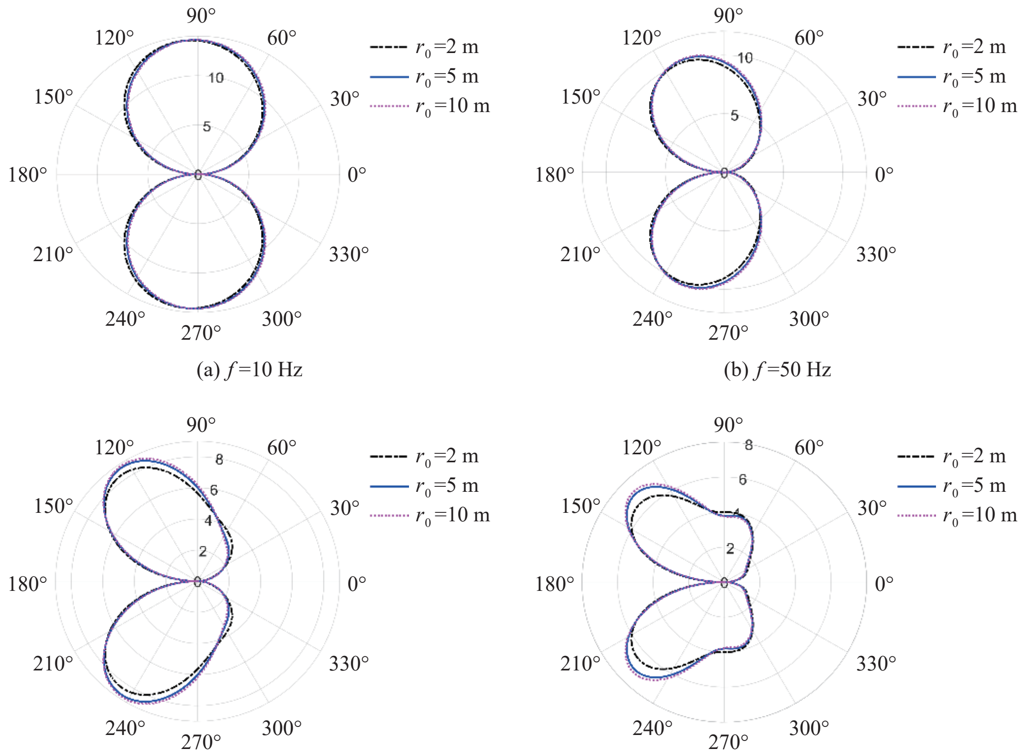


(a) f=10 Hz　(b) f=50 Hz

(c) f=100 Hz　(d) f=200 Hz

图 2　入射频率不同时 PVC 管道内壁 DSCF 环向分布曲线

Fig. 2　DSCF circumferential distribution curves in the inner wall of the PVC pipe at different incident frequencies



(a) f=10 Hz　(b) f=50 Hz

(c) f=100 Hz　(d) f=200 Hz

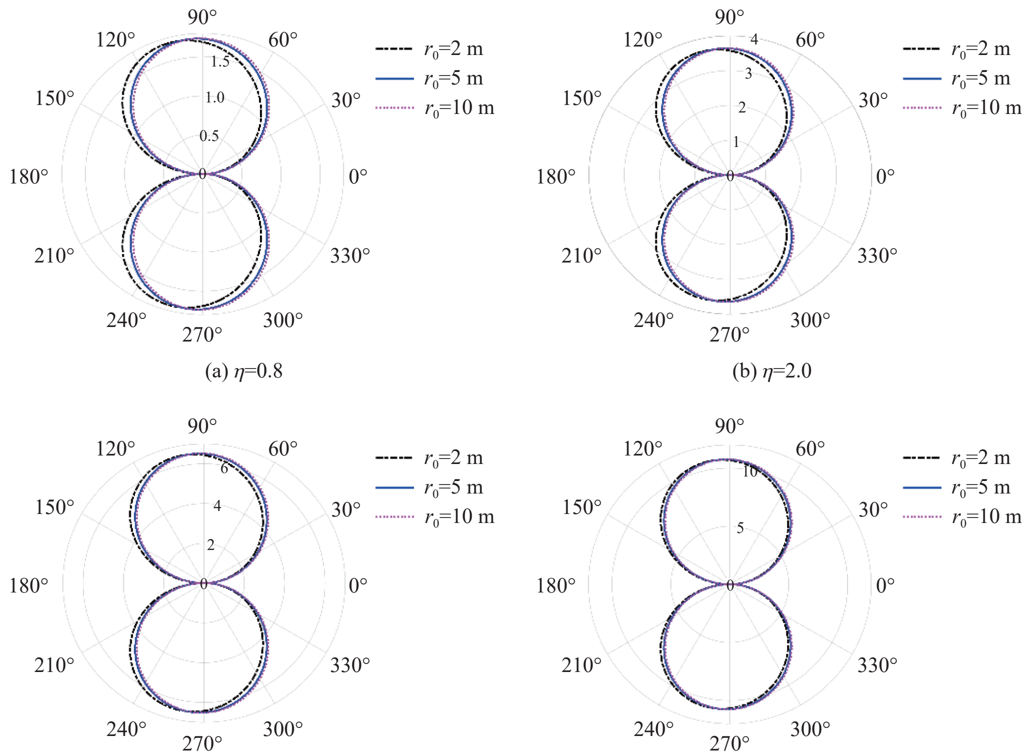
图 3　入射频率不同时混凝土管道内壁 DSCF 环向分布曲线

Fig. 3　DSCF circumferential distribution curves in the inner wall of the concrete pipe at different incident frequencies

由图 2 可知, 当入射波频率一定时, 不同 r_0 下, PVC 管道内边界的 DSCF 分布曲线基本重合, 并且随着管道边界呈上下对称分布; DSCF 峰值主要集中在 π/2～2π/3 与 4π/3～3π/2 之间。随着入射柱面 SH 波频率的增大, PVC 管道内边界的 DSCF 分布及峰值大小基本未发生变化, 即波源到管道轴线的距离 r_0 对其分布曲线的影响不大。而由图 3 可知, 混凝土管道与 PVC 管道内边界 DSCF 分布明显不同。当入射波频率为 10 Hz 时, 随着 r_0 增大, 混凝土管道边界 DSCF 分布在临近波源侧有减小趋势, 而在背波源侧有增大趋势, DSCF 峰值与 PVC 管一样主要集中在 π/2～2π/3 与 4π/3～3π/2 之间。当入射波频率较低(10 Hz)时, 临近波源侧的 DSCF 随 r_0 的增大而减小; 随着入射波频率的增大, 临近波源侧的 DSCF 随 r_0 的增大而增大, 但相应频率下 DSCF 峰值逐渐减小; 此外, 随着入射波频率的增大, DSCF 分布由 10 Hz 时的上下对称双椭圆形逐渐转变为向波源侧靠近的蝶形。

对比 PVC 管道与混凝土管道在不同入射波频率、不同波源距离下的内边界 DSCF 分布可知, 随着入射波频率变化, 混凝土管道的 DSCF 曲线形状发生变化, 而 PVC 管道的 DSCF 曲线未发生相应的变化, 只是 PVC 管的 DSCF 最大值约为混凝土管道的 4 倍。因此, 可得混凝土管道内壁 DSCF 分布形状对入射 SH 波频率(即波长与管径比)较敏感。考虑到混凝土的剪切模量与土层剪切模量相差较大, 因此为了研究更具一般性的埋地管道动力响应规律, 定义管道与土层剪切模量之比为 $\eta=\mu_p/\mu_s$ 进行分析, 其中 μ_p、μ_s 分别为管道和土层的剪切模量。

为研究柱面 SH 波频率和 η 对 DSCF 分布情况的影响, 图 4、图 5、图 6 展示了 η 分别为 0.8、2.0、5.0 和 20.0 时不同入射波频率的管道内壁 DSCF 环向分布曲线。



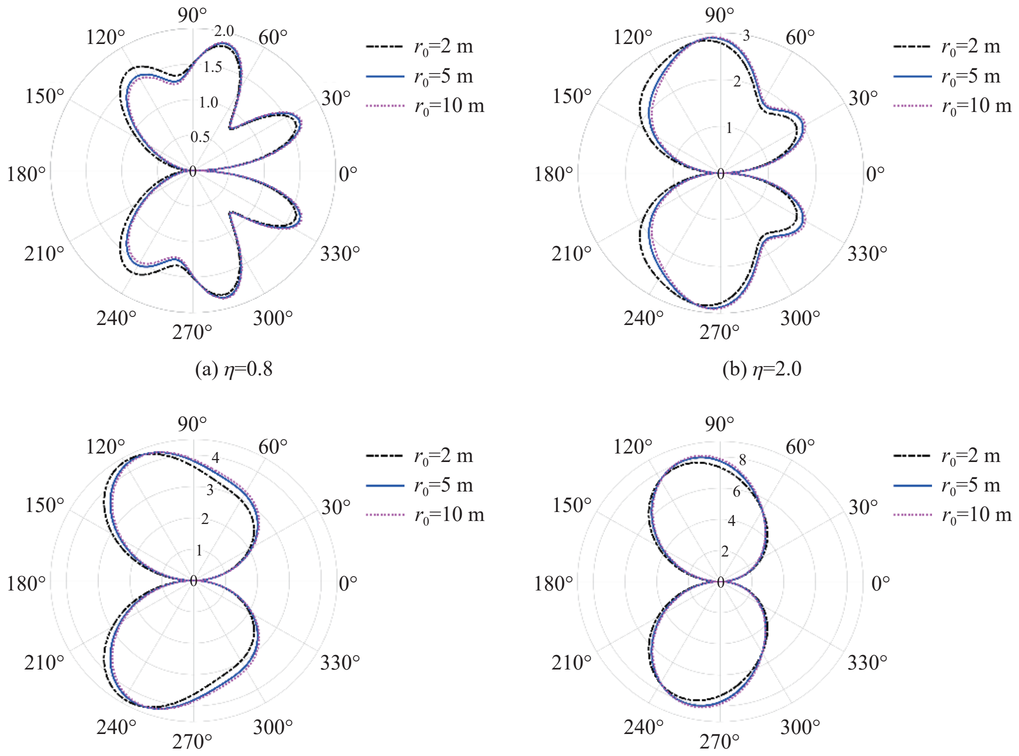
(a) η=0.8　　(b) η=2.0

(c) η=5.0　　(d) η=20.0

图 4　f=10 Hz 时不同 η 对应的管道内壁 DSCF 环向分布曲线

Fig. 4　Circular distribution curves of DSCF in the inner wall for different η pipes (f=10 Hz)

通过图 4、图 5 和图 6 可知, 当 η=0.8 时, 随着入射波频率增加, 管道内壁 DSCF 峰值位置的数量逐渐增多, 并由集中在 π/2 及 2π/3 处向背源面转移, 但峰值总体都小于 2, 说明当管道的剪切模量小于土层剪切模量时, 随着入射波频率的增加, 管道反应更加复杂; 当 η 为 2.0、5.0、20.0 时, 随着入射波频率增加, 管道内壁 DSCF 分布向靠近波源侧转移, 并且 DSCF 峰值逐渐减小, 说明当管道剪切模量大于土层剪切模量时, 入射柱面 SH 波在近源侧的反射程度较大。

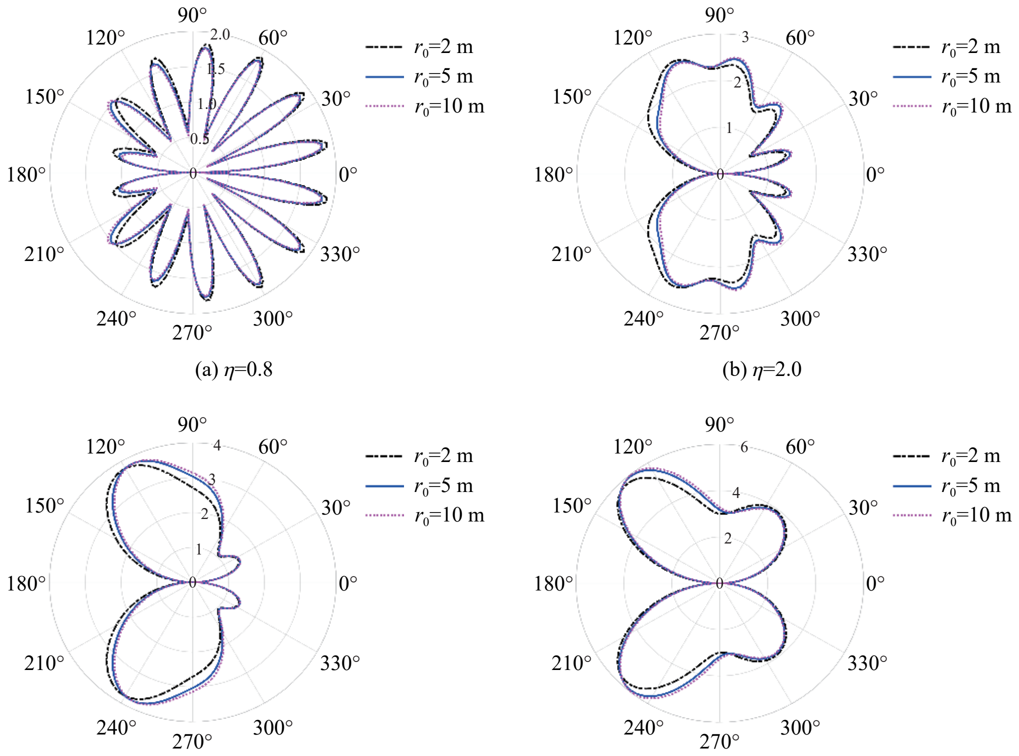


(a) η=0.8　　(b) η=2.0

(c) η=5.0　　(d) η=20.0

图 5　f=100 Hz 时不同 η 对应的管道内壁 DSCF 环向分布曲线

Fig. 5　Circular distribution curves of DSCF in the inner wall for different η pipes (f=100 Hz)



(a) η=0.8　　(b) η=2.0

(c) η=5.0　　(d) η=20.0

图 6　f=200 Hz 时不同 η 对应的管道内壁 DSCF 环向分布曲线

Fig. 6　Circular distribution curves of DSCF in the inner wall for different η pipes (f=200 Hz)

由图 4、图 5 和图 6 可知，当 f=10 Hz 时，随着 η 增大，对应不同 r_0 分散分布的 DSCF 曲线逐渐向 r_0=10 m 集中；当 f 为 100 和 200 Hz 时，随着 η 增大，对应不同 r_0 分散分布的 DSCF 曲线由 η<1 的背源侧向近源侧转变，并且 r_0=5 m 时与 r_0=10 m 时非常靠近，可以认为 DSCF 最大值趋于稳定。这表明，随着 r_0 逐渐增大，波阵面曲率影响逐渐减小，并且 r_0 对 DSCF 分布的影响较大，但 r_0 对 DSCF 峰值大小几乎无影响。

3　结　论

利用波函数展开法研究了柱面 SH 波爆破作用下管道的动应力集中问题，得到以下主要结论。

(1) 混凝土管道内壁 DSCF 分布形状对柱面 SH 波频率(即波长与管径之比)比较敏感。

(2) 管道与土层剪切模量之比 η 是影响管道动应力集中的重要指标，当入射波频率一定时，随着 η 的增大，管道的最大 DSCF 也逐渐增大；当 η 一定时，随着入射波频率增大，管道最大 DSCF 逐渐减小。

(3) 当考虑管道破坏位置时，需要考虑不同 r_0 作用下波阵面曲率的影响，而当研究管道最大 DSCF 值时可忽略。

参考文献:

[1] PAO Y H, MOW C C. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations [M]. New York: Crane Russak, 1973.

[2] BARON M L, MATTHEWS A T. Diffraction of a pressure wave by a cylindrical cavity in an elastic medium [J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(3): 347–354.

[3] YI C P, LU W B, ZHANG P, et al. Effect of imperfect interface on the dynamic response of a circular lined tunnel impacted by plane P-waves [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 68–74.

[4] LEE V W, KARL J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1992, 11(8): 445–456.

[5] LEE V W, KARL J. On deformation near a circular underground cavity subjected to incident plane P waves [J]. European Journal of Earthquake Engineering, 1993, 7(1): 29–36.

[6] 刘殿魁, 袁迎春. 各向异性介质中由 SH 波引起的圆孔周围的远场位移 [J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 52–62.
LIU D K, YUAN Y C. Far field displacement around a circular cavity caused by SH wave in an anisotropic medium [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 52–62.

[7] 齐辉, 王艳, 刘殿魁. 半无限空间界面附近 SH 波对圆形衬砌的散射 [J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 41–46.
QI H, WANG Y, LIU D K. Dynamic analysis of shallow-embedded lining structure by incident SH-wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 41–46.

[8] 许华南, 张洋, 黄清云, 等. 出平面波作用下地下复杂衬砌结构的地震动研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(6): 154–159.
XU H N, ZHANG Y, HUANG Q Y, et al. Study on ground motion of underground complex lining structure under out of plane wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(6): 154–159.

[9] 梁瑞, 包娟, 周文海, 等. 地铁隧道掘进爆破对既有埋地管道的动力影响 [J]. 爆破, 2021, 38(1): 41–50.
LIANG R, BAO J, ZHOU W H, et al. Dynamic effects of existing buried pipes in metro tunnels under tunnel excavation blasting [J]. Blasting, 2021, 38(1): 41–50.

[10] 纪冲, 龙源, 唐献述, 等. 爆炸载荷下 X70 钢管道的局部破坏效应 [J]. 高压物理学报, 2013, 27(4): 567–574.
JI C, LONG Y, TANG X S, et al. Local damage effects of X70 steel pipe subjected to contact explosion loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(4): 567–574.

[11] 周俊, 石文革, 董玉飞, 等. 上土下岩地层中平面 SH 波的传播特性分析 [J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 062302.
ZHOU J, SHI W G, DONG Y F, et al. Analysis of propagation characteristics of SH waves in upper soil and lower rock strata [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 062302.

[12] 曹天阁. 基于精确化平板理论求解弹性波散射与动应力集中问题 [D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
CAO T G. Elastic wave scattering and dynamic stress concentrations based on the refined plate theory [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016

[13] LU S W, ZHOU C B, ZHANG Z, et al. Dynamic stress concentration of surrounding rock of a circular tunnel subjected to blasting cylindrical P-waves [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 2363–2371.

[14] LU S W, ZHOU C B, ZHEN Z, et al. Particle velocity response of surrounding rock of a circular tunnel subjected to cylindrical P-waves [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83(1): 393–400.

[15] 王进. SH 波作用下正交各向异性弹性半空间凹陷地形浅埋圆柱动应力集中 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
WANG J. Dynamic stress concentration around shallow cylindrical inclusion by SH wave in orthogonal anisotropy elastic half-space with a semi-cylindrical canyon [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.

[16] LI J C, MA G W, ZHOU Y X. Analytical study of underground explosion-induced ground motion [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(6): 1037–1046.

[17] CHAI S B, LI J C, LI H B, et al. Analytical study of cylindrical P-wave propagation across jointed rock masses [J]. Advanced Materials Research, 2014, 988: 502–507.

[18] CHAI S B, LI J C, LI H B, et al. Parametric study on cylindrical P-wave propagation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 621: 225–229.

[19] YI C, ZHANG P, JOHANSON D, et al. Dynamic response of a circular lined tunnel with an imperfect interface subjected to cylindrical P-waves [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 165–171.

Dynamic Response of Pipeline Subjected to Cylindrical SH Wave

LEI Ming[1,2], ZHANG Maochen[1], QIN Zihao[1,2], YANG Min[1,2], ZHANG Wei[1], LU Shiwei[1,2]

(1. *School of Urban Construction*, *Yangtze University*, *Jingzhou* 434023, *Hubei*, *China*;
2. *Research Center of Underground Oil and Gas Storage*, *Yangtze University*, *Jingzhou* 434023, *Hubei*, *China*)

Abstract: In the process of underground space development and construction, the blasting seismic wave induced by drilling and blasting is very important to the safety of underground pipeline. When the explosion is close to the pipe, the curvature of the wave front will have a significant impact on the blasting dynamic response of the pipe. In this paper, the wave function expansion method was used to study the dynamic stress concentration of pipelines under the blasting effect of cylindrical SH wave. The distribution law of the dynamic stress concentration factor (DSCF) of concrete pipe and PVC pipe was discussed. Then the effects of the distance from the wave source to the pipe axis r_0, the incident frequency of cylindrical SH waves, and the shear modulus ratio η of the pipe and soil layer on the DSCF of the pipe inner wall were also discussed. The results show that the distribution shape of DSCF of the inner wall of the concrete pipe is more sensitive to the frequency of cylindrical SH wave than that of PVC pipe. η is an important index affecting the concentration of dynamic stress in the pipeline. When the incident wave frequency is constant, the maximum DSCF of the pipeline increases with the increase of η. When η is constant, the maximum DSCF decreases with the increase of incident frequency. The distance from the wave source to the pipe axis influences the failure position of the pipeline due to the curvature of the wave front, but it has little effect on the maximum DSCF value.

Keywords: cylindrical SH wave; pipeline; frequency; dynamic stress concentration factor; shear modulus ratio of pipeline to soil layer