

文章编号: 1000-7598-(2006)08-1312-05

爆破振动对砂浆锚杆的影响研究

易长平^{1,2}, 卢文波²

(1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要: 爆破振动对锚杆有不利影响, 运用应力波理论, 并利用波函数展开法, 研究了爆炸应力波与锚杆的相互作用过程, 给出了爆破振动作用下砂浆锚杆周围砂浆体中的动应力和峰值振速分布情况, 比较了不同频率应力波对锚杆的影响, 导出了不同频率应力波作用下砂浆锚杆的安全质点振速范围。研究表明: 入射波频率越高, 砂浆锚杆所允许的安全质点峰值振速越大。

关 键 词: 爆破振动; 砂浆锚杆; 质点峰值振动速度; 频率

中图分类号: O 382

文献标识码: A

Research on influence of blasting vibration on grouted rockbolt

YI Chang-ping^{1,2}, LU Wen-bo²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Blasting vibration can induce some adverse influence on grouted rockbolt. The stress wave theory and wave function expansion method are adopted to analyze the interaction between stress wave and rockbolt. The distribution of stress and peak particle velocity around grout under the blasting vibration is derived; influences of stress wave in different frequencies on grouted rockbolt are compared; the safe peak particle velocity range in the grouted rockbolt is derived with stress waves of different frequencies. The result shows that the higher the frequency of incident wave is, the bigger the safe peak vibration velocity for grouted rockbolt is.

Key words: blasting vibration; grouted rockbolt; peak particle velocity; frequency

1 引 言

锚杆已在岩土工程中被广泛应用,但在高边坡、地下工程及其他工程中,由于爆破作业与锚固施工经常穿插进行,形成边挖边锚或先锚后挖的施工流程,不可避免地存在开挖爆破对正在施工和已施工锚杆的影响问题。对于常用的水泥砂浆锚杆,锚杆和岩体之间的水泥砂浆在爆破振动作用影响下,砂浆自身强度将降低,砂浆和岩石及锚杆之间的胶结会受损,甚至脱落,从而影响锚杆的锚固质量。对于预应力锚杆,爆破振动可能会因松动锚固端面而降低锚杆中的预应力,或者增加锚杆中的应力致使锚杆拉断,带来安全隐患。

对于动力荷载(爆破或地震)作用对锚杆的影响问题,国内外学者从现场试验和数值计算方面进行了研究^[1~6]。在国家“八五”攻关“岩质高边坡开挖及加固措施研究”专题中,列入了“高边坡开挖爆破对锚固设施的影响”的子题进行专门研究;我国《水利水电地下工程锚喷支护施工技术规范》

(SDJ57-85)中规定:“砂浆锚杆安装 8 h 后,方可在作业区附近进行爆破开挖作业”。实际工程中对于爆破振动作用下锚杆的振速也有严格的规定,如在瀑布沟水电工程施工中规定:对于水泥砂浆锚杆,7 d 内的振速应小于 3 cm/s; 7~28 d 的振速应小于 5 cm/s。本文拟采用应力波理论,通过分析应力波在岩石、砂浆和锚杆之间的反射、衍射过程,来研究爆破振动对锚杆的影响机理,以期为工程实践提供理论依据。

2 应力波与锚杆的相互作用分析

在距离爆源一定距离处,岩石中传播的应力波可视作平面波。由于爆破应力波是多频率成分叠加而成的复杂组合,因而任何单一的波形都无法代表爆破振动的传播特征。但各频率成分应力波的贡献却有大有小,如果选取统计意义上贡献最大的频率成分作为参考对象,可将爆炸应力波视为简谐平面波^[7]。文献[8]通过理论分析认为,在一定条件下可以将爆炸应力波简化为平面应力波,并确定了将爆

收稿日期: 2004-10-18

修改稿收到日期: 2005-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 50239070); 教育部科学技术重点项目(No. 02133); 湖北省自然科学基金项目(No. 2002AB006)。

作者简介: 易长平,男,1975年生,博士,讲师,主要从事岩石动力学方面的研究。E-mail: yccpp@163.com

炸应力波简化为平面应力波的条件。

下面就弹性平面稳态 P 波与砂浆锚杆的相互作用进行分析。

计算模型如图 1 所示。爆破应力波垂直于锚杆的轴线入射, 锚杆的半径为 a , 砂浆体的外半径为 b , 入射的 P 波为 $\phi^{(i)}$ 。由于考虑的是无限岩体中的锚杆, 所取截面均为圆形, 将 x 轴的方向取为与入射波的方向一致, 圆频率为 ω , 入射波在极坐标系中的表达式为

$$\phi^{(i)} = \phi_0 \exp(i\alpha_1 \cos \theta) \quad (1)$$

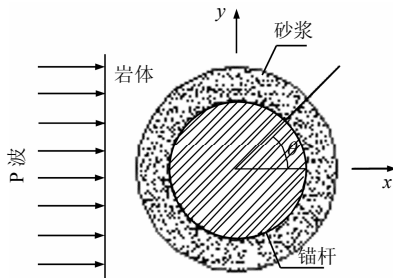


图 1 计算模型示意图
Fig.1 Calculation model

式中 ϕ_0 为入射波的幅值; i 为复数单位; α_1 为岩石中 P 波波数。为了分析方便, 式(1)及下文中波函数都省略了时间因子 $\exp(-i\omega t)$, 将式(1)展开为 Fourier-Bessel 级数:

$$\phi^{(i)} = \phi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(\alpha_1 r) \cos n\theta \quad (2)$$

式中 r 为极径; θ 为极角; $J_n(x)$ 为第一类 Bessel 函数。当 $n=0$ 时, $\varepsilon_0=1$; 当 $n=1, 2, \dots, \infty$ 时, $\varepsilon_n=2$ 。

岩石与砂浆体界面间的反射波 (P 波和 SV 波) 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1^{(R)} &= \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(\alpha_1 r) A_n \cos n\theta \\ \varphi_1^{(R)} &= \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(\beta_1 r) B_n \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $H_n^{(1)}(x)$ 为第一类 Hankle 函数, 代表从圆心向外传播的柱面波, $\phi_1^{(R)}$ 为反射 P 波, $\varphi_1^{(R)}$ 为反射 SV 波; β_1 为岩石中 SV 波的波数; A_n, B_n 均为待定系数。岩体中总的位移势函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi^{(i)} + \phi_1^{(R)} \\ \varphi_1 &= \varphi_1^{(R)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

砂浆中总的位移势函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \phi_2 &= \phi_2^{(T)} + \phi_2^{(R)} \\ \varphi_2 &= \varphi_2^{(T)} + \varphi_2^{(R)} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

各项的 Fourier-Bessel 级数表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \phi_2^{(T)} &= \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\alpha_2 r) C_n \cos n\theta \\ \varphi_2^{(T)} &= \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\beta_2 r) D_n \sin n\theta \\ \phi_2^{(R)} &= \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(\alpha_2 r) E_n \cos n\theta \\ \varphi_2^{(R)} &= \sum_{n=0}^{\infty} H_n^{(1)}(\beta_2 r) F_n \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 α_2 为砂浆中的 P 波数; β_2 为砂浆中的 SV 波波数; $\phi_2^{(T)}$ 为由岩体进入砂浆的透射 P 波; $\varphi_2^{(T)}$ 为由岩体进入砂浆的透射 SV 波; $\phi_2^{(R)}$ 为从锚杆进入砂浆的反射 P 波; $\varphi_2^{(R)}$ 为从锚杆进入砂浆的反射 SV 波; C_n, D_n, E_n, F_n 均为待定系数。

锚杆中的位移势函数可表示为^[9]

$$\left. \begin{aligned} \phi_3 &= \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\alpha_3 r) G_n \cos n\theta \\ \varphi_3 &= \sum_{n=0}^{\infty} J_n(\beta_3 r) H_n \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 α_3 为锚杆中的 P 波波数; β_3 为锚杆中的 SV 波波数; G_n, H_n 均为待定系数。

波函数与位移和应力的关系为^[10]:

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \\ u_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} - \frac{\partial \varphi}{\partial r} \\ \sigma_{rr} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) \right] \\ \sigma_{\theta\theta} &= \lambda \nabla^2 \phi + 2\mu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r \partial \theta} \right) \right] \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left\{ 2 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right] + \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} - r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \right] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 u_r 为径向位移; u_θ 为切向位移; σ_{rr} 为径向应力; $\sigma_{\theta\theta}$ 为切向应力; $\sigma_{r\theta}$ 为剪应力; λ, μ 均为拉梅常数。

由式 (8) 可分别导出各介质中的应力和位移表达式。

岩石中的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr1} &= 2\mu_1 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{11}^{(1)}(\alpha_1 r) + A_n \varepsilon_{11}^{(3)}(\alpha_1 r) + B_n \varepsilon_{12}^{(3)}(\beta_1 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{\theta\theta1} &= 2\mu_1 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{21}^{(1)}(\alpha_1 r) + A_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\alpha_1 r) + B_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_1 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{r\theta1} &= 2\mu_1 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{41}^{(1)}(\alpha_1 r) + A_n \varepsilon_{41}^{(3)}(\alpha_1 r) + B_n \varepsilon_{42}^{(3)}(\beta_1 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

岩石中的位移为

$$\left. \begin{aligned} u_{r1} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{71}^{(1)}(\alpha_1 r) + \\ &A_n \varepsilon_{71}^{(3)}(\alpha_1 r) + B_n \varepsilon_{72}^{(3)}(\beta_1 r)] \cos n\theta \\ u_{\theta 1} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [\phi_0 \varepsilon_n i^n \varepsilon_{81}^{(1)}(\alpha_1 r) + \\ &A_n \varepsilon_{81}^{(3)}(\alpha_1 r) + B_n \varepsilon_{82}^{(3)}(\beta_1 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

砂浆中的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr2} &= 2\mu_2 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{11}^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n \varepsilon_{12}^{(1)}(\beta_2 r) + \\ &E_n \varepsilon_{11}^{(3)}(\alpha_2 r) + F_n \varepsilon_{12}^{(3)}(\beta_2 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{\theta\theta 2} &= 2\mu_2 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{21}^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n \varepsilon_{22}^{(1)}(\beta_2 r) + \\ &E_n \varepsilon_{21}^{(3)}(\alpha_2 r) + F_n \varepsilon_{22}^{(3)}(\beta_2 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{r\theta 2} &= 2\mu_2 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{41}^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n \varepsilon_{42}^{(1)}(\beta_2 r) + \\ &E_n \varepsilon_{41}^{(3)}(\alpha_2 r) + F_n \varepsilon_{42}^{(3)}(\beta_2 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

砂浆中的位移为

$$\left. \begin{aligned} u_{r2} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{71}^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n \varepsilon_{72}^{(1)}(\beta_2 r) + \\ &E_n \varepsilon_{71}^{(3)}(\alpha_2 r) + F_n \varepsilon_{72}^{(3)}(\beta_2 r)] \cos n\theta \\ u_{\theta 2} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [C_n \varepsilon_{81}^{(1)}(\alpha_2 r) + D_n \varepsilon_{82}^{(1)}(\beta_2 r) + \\ &E_n \varepsilon_{81}^{(3)}(\alpha_2 r) + F_n \varepsilon_{82}^{(3)}(\beta_2 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

锚杆中的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr3} &= 2\mu_3 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \varepsilon_{11}^{(1)}(\alpha_3 r) + H_n \varepsilon_{12}^{(1)}(\beta_3 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{\theta\theta 3} &= 2\mu_3 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \varepsilon_{21}^{(1)}(\alpha_3 r) + H_n \varepsilon_{22}^{(1)}(\beta_3 r)] \cos n\theta \\ \sigma_{r\theta 3} &= 2\mu_3 r^{-2} \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \varepsilon_{41}^{(1)}(\alpha_3 r) + H_n \varepsilon_{42}^{(1)}(\beta_3 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

锚杆中的位移为

$$\left. \begin{aligned} u_{r3} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \varepsilon_{71}^{(1)}(\alpha_3 r) + H_n \varepsilon_{72}^{(1)}(\beta_3 r)] \cos n\theta \\ u_{\theta 3} &= r^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} [G_n \varepsilon_{81}^{(1)}(\alpha_3 r) + H_n \varepsilon_{82}^{(1)}(\beta_3 r)] \sin n\theta \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

以上各式中 $\varepsilon_{ij}^{(n)}$ 的表达式参见文献[10], μ_i ($i=1,2,3$) 分别为岩石、砂浆和锚杆的拉梅常数。求解未知数 A_n-H_n 时, 可利用砂浆与锚杆和岩石交界面上的连续性条件得到。

在 $r=b$ 上的连续性条件为

$$\left. \begin{aligned} u_{r1} &= u_{r2} \\ u_{\theta 1} &= u_{\theta 2} \\ \sigma_{rr1} &= \sigma_{rr2} \\ \sigma_{r\theta 1} &= \sigma_{r\theta 2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

在 $r=a$ 上的连续性条件为

$$\left. \begin{aligned} u_{r2} &= u_{r3} \\ u_{\theta 2} &= u_{\theta 3} \\ \sigma_{rr2} &= \sigma_{rr3} \\ \sigma_{r\theta 2} &= \sigma_{r\theta 3} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

在式(9)~(14)中, 令 $r=a, b$, 并利用式(15)和式(16), 求出各待定系数后, 即可求出介质中各点的应力和位移。

3 算例分析

为了定量分析爆破振动对砂浆锚杆的影响, 现取一算例进行分析。3种介质的材料参数如表1所示。

表1 介质参数

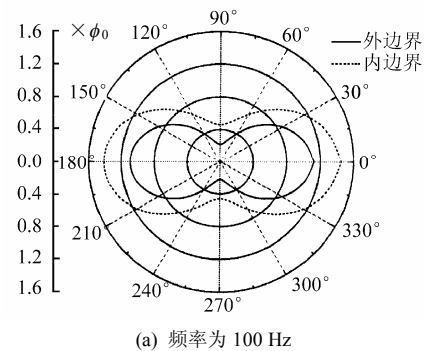
Table 1 Parameters of media

介质	密度 ρ / g·cm ⁻³	弹性模量 / GPa	泊松比
岩石	2.7	32	0.20
浆体	2.0	26	0.17
锚杆	7.0	200	0.25

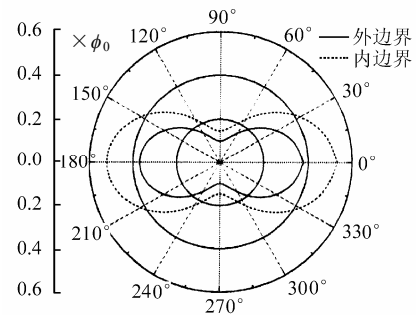
锚杆的半径取为 0.016 m, 砂浆的外半径取为 0.04 m, 分别计算入射波频率为 100 Hz 和 60 Hz 时砂浆锚杆的动力响应。

3.1 砂浆体边界上的应力分布

图2~4分别是两种工况下, 砂浆体周围径向应力、切向应力和剪应力的分布情况。



(a) 频率为 100 Hz



(b) 频率为 60 Hz

图2 砂浆边界上的峰值径向应力(单位: GPa)
Fig.2 Peak radial stress around grout (unit: GPa)

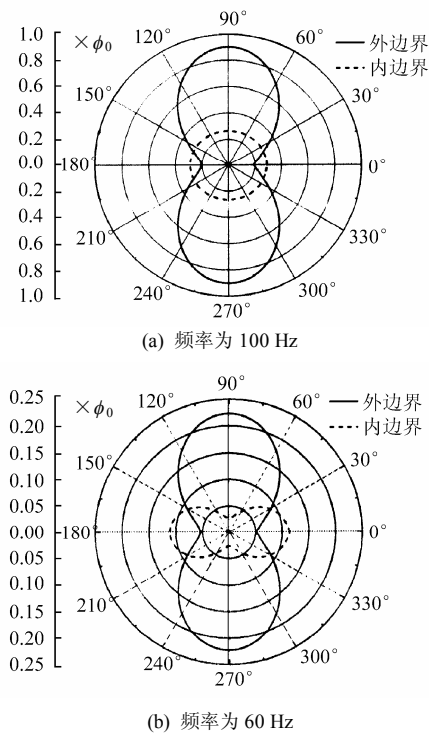


图 3 砂浆边界上的峰值切向应力 (单位: GPa)
Fig.3 Peak tangent stress around grout (unit: GPa)

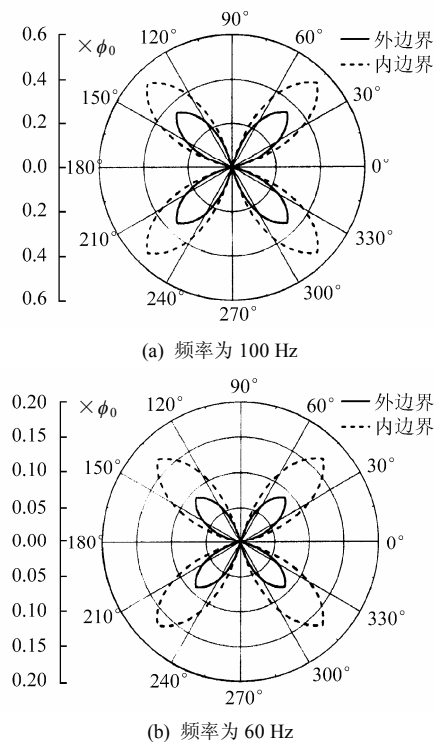


图 4 砂浆边界上的峰值剪应力分布 (单位: GPa)
Fig.4 Distribution of peak shear stress around grout (unit: GPa)

对边界条件进行验算, 以砂浆体外边界 $\theta=0^\circ$ 处的径向应力为例, 当入射波频率为 100 Hz 时, 由岩石中的总位移势函数求得的径向应力 $\sigma_{r1}=1.127\phi_0$ (GPa), 由砂浆体内的总位移势函数

求出的径向应力 $\sigma_{r2}=1.113\phi_0$ (GPa)。当入射波频率为 60 Hz 时, 由岩石中的总位移势函数求得的径向应力 $\sigma_{r1}=0.379\phi_0$ (GPa), 由砂浆体内的总位移势函数求出的径向应力 $\sigma_{r2}=0.379\phi_0$ (GPa)。由此可见, 由于数值计算的误差, 当入射波频率为 60 Hz 时, 岩石和砂浆体中的总位移势在砂浆体外边界处引起的径向应力稍有差异; 而当入射波频率为 60 Hz 时, 两者在砂浆体外边界处引起的径向应力完全相同, 说明计算结果是正确的。

由图 2 可以看出, 内边界上的径向应力较外边界上的径向应力大, 出现最大径向应力的部位与应力波的入射方向一致, 而与应力波入射方向垂直的部位径向应力最小。由图 3 可以看出, 外边界上的切向应力较内边界上大, 外边界上的切向应力峰值出现在 $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=270^\circ$ 处, 而内边界上的切向应力峰值出现在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=180^\circ$ 处。由图 4 可以看出, 沿砂浆体周围出现了 4 个应力峰值, 最大值出现的部位与入射方向呈 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$; 两种工况下, 频率越高, 相应位置的应力也越大。

3.2 砂浆体边界上的峰值振速分布

将式 (12) 中的位移函数对时间求导, 即可得到振速的解析表达式。由于砂浆体的内外半径相差不大, 其内外边界上的峰值振速也相差不大, 图 5 是入射波频率不同时砂浆体内边界上径向和切向的峰值振速分布。

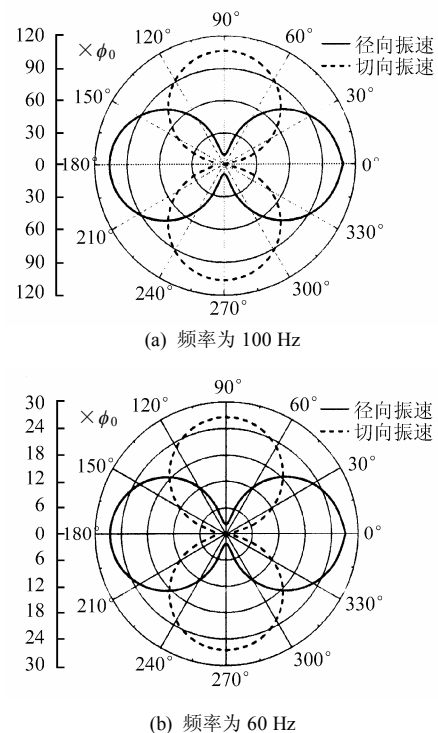


图 5 砂浆体内边界峰值振速分布 (单位: m/s)
Fig.5 Distribution of peak vibration velocity around the inboard grout (unit: m/s)

由图 5 可以看出,无论是径向峰值振速还是切向峰值振速,频率越高,振速越大;径向峰值振速最大出现在 0° 和 180° 部位,切向峰值振速出现在 90° 和 270° 部位。

3.3 爆破振动对砂浆锚杆的影响分析

砂浆锚杆在张拉和正常工作时,主要依靠孔内灌浆材料与钢筋的黏结以及浆体与岩石的结合,当连接岩石与锚杆的浆体被破坏后,锚杆就失去了其应有的作用。锚杆周围的水泥砂浆一般灌注的是纯水泥浆或按一定配合比制成的水泥砂浆,其力学性能较周围的岩体和锚杆要差,尤其是其抗拉强度较低,根据砂浆锚杆在爆破振动作用下砂浆边界上的应力分布,在砂浆体边界上 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=180^\circ$ 处,出现较大的径向应力;在 $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=270^\circ$ 处,出现较大的切向应力。由于入射波是简谐波,其动力响应也呈简谐变化,故在上述 4 点会出现较大的拉应力。当爆破振动引起的拉应力超过砂浆的抗拉强度时,砂浆将会被拉裂。

比较图 2 和图 3,在频率一定时,砂浆体内边界上产生的最大径向拉应力要大于砂浆外边界上产生的最大切向拉应力,所以当爆破引起的振动过大时,砂浆体中首先在砂浆内边界($\theta=0^\circ$ 和 180° 处)上产生径向裂纹,设砂浆的抗拉强度为 σ_1 , 令

$$\sigma_{rr2} \Big|_{r=a} = \sigma_1 \quad (17)$$

即可求出最大允许入射的应力波幅值 ϕ_0 , 根据图 5,可求出相应的砂浆锚杆的安全质点峰值振速。砂浆的极限抗拉强度与水泥种类、配合比、添加剂的种类及龄期等因素有关,一般情况下砂浆的抗拉强度在 1~3 MPa 范围内,表 2 给出了入射波频率不同时,其相应的安全质点峰值振速范围。

表 2 不同频率入射波作用下锚杆的安全质点峰值振速范围

Table 2 Safe PPV range of grouted rockbolt with incident wave of different frequencies

频率/Hz	30	60	100	150
振速范围/cm·s ⁻¹	7.0~21.0	7.3~21.9	7.5~22.5	7.6~22.8

4 结 论

利用波函数展开法,给出了爆炸应力波作用下砂浆锚杆动力响应的解析解,比较了入射应力波频率不同对砂浆锚杆的影响,可得如下结论:

(1) 通过分析在爆炸应力波作用下砂浆发生拉伸破坏的情形,导出了不同频率的爆炸应力波入射情况下锚杆周围砂浆的安全质点振动速度范围,计算结果比较符合工程实践的经验标准。应该指出,由于介质中天然自重应力场的存在,增加了介质中的正应力,故实际的安全峰值质点振速可稍大于计

算值,或当作一种安全储备。

(2) 砂浆的安全质点振速与入射波的频率密切相关,入射波频率越高,所允许的安全质点峰值振速越大。

(3) 由于本文所得计算结果是在特定的计算条件下取得的,故砂浆的安全质点峰值振速势必与岩石和锚杆的性质有关。

本文仅考虑了爆破振动荷载作用下锚杆周围砂浆的破坏情况,其对砂浆周围的岩体和锚杆本身的影响以及对整个砂浆锚杆系统的影响有待进行深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 陆遐龄. 岩石高边坡爆破开挖对锚固设施的影响[J]. 爆破, 2000, (增刊): 147—151.
LU Xia-ling. Influence of rock high slope explosive excavation on anchored installations[J]. **Blasting**, 2000, (Supp.): 147—151.
- [2] Tannant D D, Brummer R K. Rockbolt behaviour under dynamic loading field tests and modeling[J]. **Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, 1995, 32(6): 537—550.
- [3] Gisle Stjern, Arne Myrvang. The influence of blasting on grouted rockbolts[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 1995, 13(1): 65—70.
- [4] 张云, 刘开运. 近区爆破对锚固设施的影响研究[J]. 水力发电, 1996, (8): 23—26.
ZHANG Yun, LIU Kai-yun. Study of blast-induced influence on vicinal anchored installations[J]. **Water Power**, 1996, (8): 23—26.
- [5] 张明瑶, 张云. 岩质高边坡开挖及加固措施研究[R]. 西安: 电力工业部西北勘测设计研究院, 1995.
- [6] 程良奎, 范景能, 韩军, 等. 岩土锚固[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [7] 许红涛, 卢文波, 蔡联明. 邻近爆破对坝基灌浆帷幕的影响机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 325—1 329.
XU Hong-tao, LU Wen-bo, CAI Lian-ming. Mechanism study of blast-induced influence on vicinal curtain grouting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(8): 1 325—1 329.
- [8] 朱传云, 许桂生. 爆炸应力波近似处理的分析与研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(4): 455—458.
ZHU Chuan-yun, XU Gui-sheng. Analysis and study on dealing with blasting wave as planar-wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(4): 455—458.
- [9] 梁建文, 严林隽, Vincent W Lee. 圆弧形层状沉积谷地对入射平面P波的散射解析解[J]. 地震学报, 2001, 23(2): 167—184.
LIANG Jian-wen, YAN Lin-jun, Vincent W Lee. Scattering of plane P waves by circular-arc layered alluvial valleys: an analytical solution[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2001, 23(2): 167—184.
- [10] Pao Y H, Mow C C. The diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. New York: Crane & Russak, 1973.