

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.005

节理岩体爆破振动传播衰减规律 相似模型试验研究*

李继业¹, 康强^{2,3}, 赵明生², 王园园⁴

(1. 中交一公局第四工程有限公司, 南宁 530003; 2. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002;
3. 河海大学土木与交通学院, 南京 839202; 4. 贵州建设职业技术学院, 贵阳 551499)

摘要: 节理对于爆破振动传播衰减规律具有显著的影响, 相关研究对于爆破振动控制具有重要意义。采用水泥石膏材料制作岩石相似模型试件, 采用云母片模拟充填节理, 以单发雷管作为爆源产生爆破振动信号, 采用 TC-4850 监测入射波与出射波爆破振动速度。测试了选用的水泥石膏材料配方的力学性能, 包括单轴抗压强度、抗拉强度、弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角, 测得的力学参数与石灰石的相似比约为 20。试验中设置的条件包括: 1~3 条节理三种节理数量条件, 20°、40°、60° 三种节理倾角条件。基于试验的入射波与出射波振动数据, 对比分析了不同条件下爆破振动的强度与衰减率的变化情况, 试验结果表明: 相比完整模型爆破振速数据, 节理前方入射波区域存在爆破振动的放大现象, 节理后方的出射波区域存在爆破振动衰减的增大现象; 爆破振速衰减随着节理数量的增大而增大但是增幅较小; 爆破振速衰减随着节理倾角的增大而减小且变化幅度显著; 水平轴向与垂直方向的爆破振速变化具有相同的规律与一致的变化幅度。

关键词: 爆破振动; 岩石节理; 模型试验; 衰减规律

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0030-06

Study on Propagation Attenuation Law of Blasting Vibration in Jointed Rock Mass by Similarity Model Test

LI Ji-ye¹, KANG Qiang^{2,3}, ZHAO Ming-sheng², WANG Yuan-yuan⁴

(1. The fourth Engineering Co., Ltd., of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd.,
Nanning 530003, China; 2. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd.,
Guiyang 550002, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering,
Hohai University, Nanjing 839202, China; 4. Guizhou Polytechnic of Construction,
Guiyang 551499, China)

Abstract: Joint has significant influence on propagation and attenuation of blasting vibration, and relevant research is of great significance for blasting vibration control. In this paper, cement gypsum material was used to make rock similarity model specimen, mica sheet was used to simulate filling joints, single detonator was used as the detonation source to generate blasting vibration signal, and TC-4850 was used to monitor the blasting vibration velocity of incident and exiting waves. The mechanical properties of the selected cement gypsum material were tested, including uniaxial compressive strength, tensile strength, elastic modulus, Poisson ratio, cohesive, internal friction angle. The similarity ratio between the mechanical parameters and limestone was about 20. The conditions set in the test include: 1~3 joints as three joint quantity conditions and 20°, 40°, 60° joint angles as three joint dip angle conditions. Based on the vibration data of incident wave and outgoing wave, the changes of blasting vibration intensity and attenuation rate under different conditions were compared and analyzed. The experimental results show that compared with the blasting vibration velocity data of the complete model, the blasting vibration amplifies in the incident wave region

in front of the joint, and the blasting vibration attenuation increases in the outgoing wave region behind the joint. The attenuation of blasting vibration velocity increases with the increase of the number of joints, but the increase is small. However, the attenuation of blasting vibration velocity decreases with the increase of the joint inclination angle, and the variation amplitude is significant. The variation of blasting vibration velocity in horizontal axial direction and vertical direction has the same law and the same change amplitude.

Key words: blast vibration; rock joint; model test; propagation law

节理裂隙是岩体最常见的构造特征,也是工程爆破施工最不可避免又具有重要影响的岩体构造。节理裂隙不但在炸药爆破过程中影响爆破效果,也通过影响爆破振动波的传播衰减,从而在爆破振动相关研究中具有重要意义,一直以来都是爆破行业岩石构造特征研究中的重点内容。节理裂隙的存在带来的爆破振动波的反射散射透射效应,结合自然岩体随机生成的复杂几何形态,在考虑到爆破振动波本身作为非平稳信号的复杂多变,在岩体中会形成非常复杂的响应特征。除了爆破振动波本身入射角、频率、幅值、持续时间及节理的倾角、厚度、数量等几何形态的影响,节理填充物的刚度、多相介质特征、张开闭合断续特征、粗糙度等也同样影响到节理对爆破振动波的透射效应^[1-3],从而带来了实际上非常复杂的综合效应。除了作为地震动有关研究的子集的爆破振动有关研究,天然地震研究领域、地球物理勘探领域等同样非常重视岩体节理裂隙,节理裂隙影响地震波传播衰减规律的研究在多个领域都具有显著的重要意义。

近年来,有关节理裂隙对爆破振动波的研究有:杨仁树等采用 ABAQUS/EXPLICIT 的有限元模拟^[4],以 ricker 子波信号作为爆破震源,分析了爆破后产生的复合应力场状态与爆炸应力波在节理处的反射与衍射效应,以及节理在爆炸应力波作用下的破坏特征。陈雪峰等采用水泥砂浆制作岩石模型试件^[5],以天然岩体常见的填充物红黏土作为模型节理材料,试验研究了充填节理厚度对爆炸应力波的吸收衰减作用。李鹏等采用 FLAC3D 模拟巷道上方存在两条平行节理条件^[6],输入爆破荷载分析了层状节理岩体对爆破振动波在不同方向的作用规律。刘洪宇等采用数值模拟分析了 2 条平行节理条件下^[7],节理刚度、归一化间距、倾角、刚度比等对 P 波衰减的影响作用。董千采用云母片模拟充填节

理^[8],分析了地应力作用对节理对爆炸应力波衰减规律的影响,结果显示在地应力作用下节理倾角、数量、间距等对爆炸应力波的作用与无地应力条件存在差异。柴少波等采用 UDEC 分析了平面 P 波在两条交叉节理中的传播规律^[9],模拟显示节理刚度、几何形态、入射波频率等都会影响透反射系数,且交叉节理不同位置的透反射系数也不同。

节理与入射波间的夹角、节理刚度、节理数量、节理间距等一直是相关研究的重点。相比天然岩体节理裂隙发育的随机性,采用模型试验可以根据需要严格控制模拟节理的条件,因此成为了节理有关研究常用的试验研究手法。采用水泥砂浆制作岩石相似模型试件,以云母片作为节理相似材料模拟充填节理,开展试验研究,分析了上述因素对爆破振动传播衰减规律的影响作用,研究成果可以为节理岩体条件下的爆破振动控制提供参考。

1 试验方案

1.1 相似材料配方

相似模型实验采用水泥石膏材料制作试件。水泥石膏材料在脆性上接近岩石,是常用的相似材料之一。参考有关文献^[8,10],选取的材料为 42.5 硅酸盐水泥、粒度模数为中砂的河砂、特技熟石膏,配比为细砂:水泥石膏 = 4:1,水泥:石膏 = 7:3,水固比 = 5:1。采用上述配比分别制作 3 个正方体标准试件与 6 个圆柱体试件,放入养护箱养护满 28 d 后,经过打磨机加工后,开展单轴抗压强度测试、巴西劈裂测试、直剪测试、密度测试等性能测试试验,试验见图 1 所示。经过物理力学测试取平均值,上述配比下的有关参数为:密度为 2034.6 kg/m³、单轴抗压强度 6.7 MPa、抗拉强度约 0.7 MPa、弹性模量为 5.26 GPa、泊松比 0.25、内聚力 0.78 MPa、内摩擦角 31.2°。由于天然岩体的性能参数变化值很大,因此上述配方及其性能参数对应不同岩体时的相似比不同,如对应于石灰岩的相似比在 20 左右。

1.2 相似模型设计

模型尺寸如图 2 所示,均为长 2 m,截面尺寸 0.2 m 的长方体试件。起爆点设置在试件中间,试件两边分别可以设置一种节理条件,从而可以一次起爆获取 2 种条件的振动数据。参考文献^[8]的设

收稿日期:2022-03-06

作者简介:李继业(1975-),男,山东淄博人,路桥工程师,主要从事高速公路技术管理工作,(E-mail)602574716@qq.com。

通讯作者:康强(1987-),男,湖北省汉川人,高级工程师、硕士,主要从事爆破工程施工及安全技术研究,(E-mail)609991197@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(52064003);贵州省科技计划项目(黔科合成果[2020]2Y049)

计,在试件中央放置一个 10 cm 直径钢管,在钢管内部中点预制炮孔,放入雷管堵塞后作为爆源,从而可

以利用钢管保护水泥砂浆试件避免爆炸破坏,实现对一个试件进行重复利用。

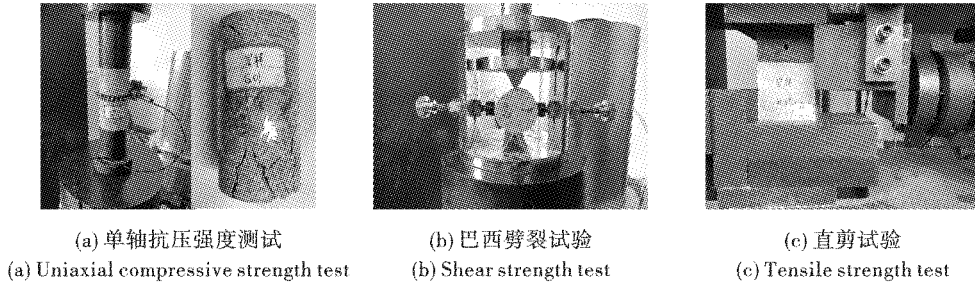


图 1 岩石力学性能测试

Fig. 1 Rock mechanical performance test

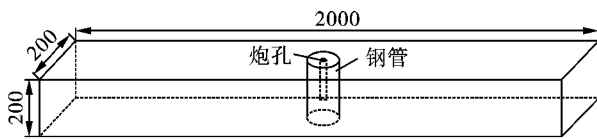


图 2 试件示意图(单位:mm)

Fig. 2 Model schematic(unit:mm)

模型中使用云母片模拟节理材料。为了固定云母片,采用在木头模具底部木板上开槽,以及上部使用开槽木条固定,从而确保浇筑模型振捣水泥砂浆过程中云母片的固定,如图 3 所示。

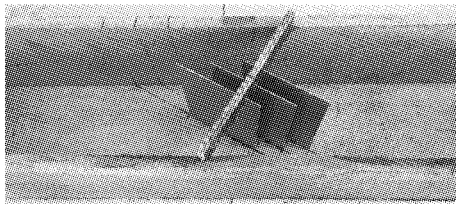


图 3 模具照片示例

Fig. 3 Mold example

相似模型试验总共包括了下述条件:数量 1 条、2 条、3 条,间距均为 5 cm;三种节理倾角 20°、40°、60°,均为 3 条 5 cm 间距节理。试验试件浇筑完成后需浇水养护 28 d 以上。

2 模型试验及数据

试验测试采用仪器为国产爆破测振仪 TC-4850,采用石膏作为耦合剂固定在试件轴线上节理前后位置,两侧测点距离最中间节理中点距离均为 13 cm。每次爆破前在钢管内采用与试件相同配方水泥石膏材料填塞入钢管内并留出炮孔,然后养护 7 d 以上。爆源均为单发电雷管,放置位置位于试件中心处,并采用速凝石膏堵孔。

试验情况如图 4 所示。

模型试验所得典型信号如图 5 所示。

测试所得数据如表 1 所示。

表 1 试验数据

Table 1 Tests data

类别	轴向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/ Hz	切向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/ Hz	垂向/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	主频/ Hz	矢量和/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
完整 01	6.800	24.470	3.270	20.060	10.100	28.220	12.610
完整 02	2.920	23.330	1.440	19.470	4.160	23.540	5.290
1 充填节理 01	7.560	21.730	3.600	21.900	11.290	30.030	14.050
1 充填节理 02	2.540	13.820	1.240	20.200	3.600	20.480	4.580
2 充填节理 01	7.790	34.280	3.820	24.810	11.680	22.220	14.560
2 充填节理 02	2.360	19.300	1.180	21.260	3.350	17.300	4.260
3 充填节理 01	8.100	24.630	3.940	22.460	12.130	36.040	15.110
3 充填节理 02	1.970	14.800	0.970	16.460	2.800	17.340	3.560
20°倾角 01	8.107	21.490	3.920	25.198	12.083	24.625	15.070
20°倾角 02	1.992	15.321	1.011	15.128	2.729	22.336	3.526
40°倾角 01	8.089	12.275	3.824	16.795	11.875	31.064	14.868
40°倾角 02	2.116	9.515	1.003	9.706	3.058	14.366	3.852
60°倾角 01	8.155	37.464	3.925	26.843	12.261	41.256	15.240
60°倾角 02	2.216	16.272	1.119	11.824	3.286	23.836	4.119

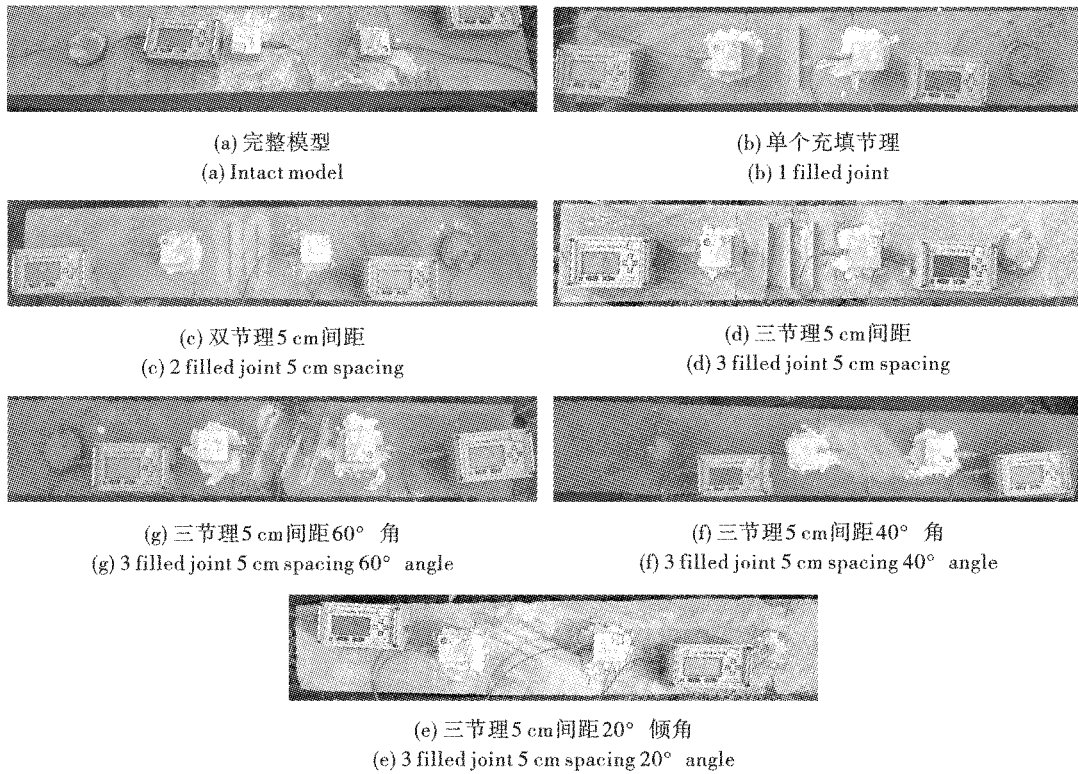


图 4 相似模型试验

Fig. 4 Similar models tests

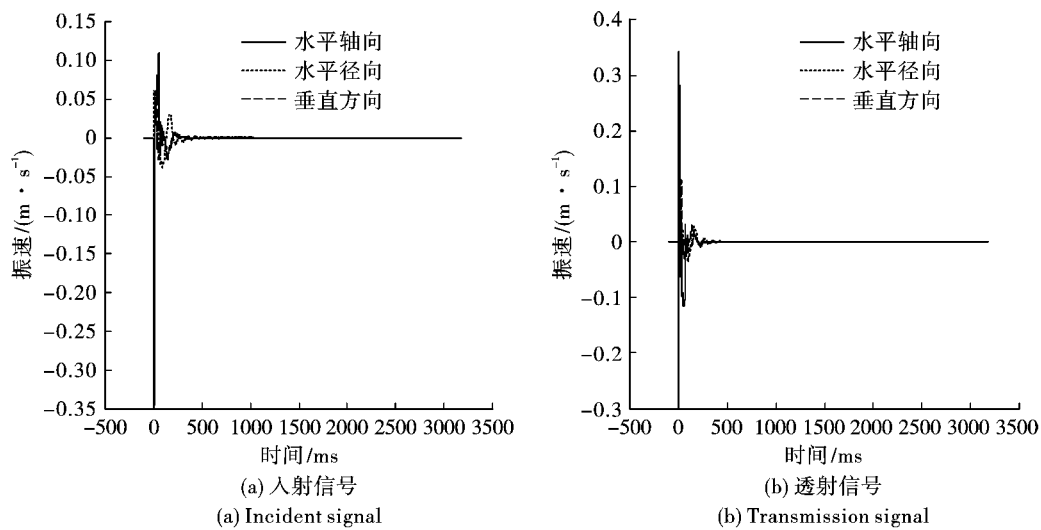


图 5 典型信号

Fig. 5 Typical signal

3 数据分析

由于模型为长宽比 10:1 的对称长方体且爆源位于轴线上,导致处于对称方向上的试件表面的水平切向爆破振动信号幅值远小于水平轴向与垂直方向,数值相差达一个数量级,因此在此忽略不予分析,只对水平轴向与垂直方向振动信号进行分析。

(1) 节理数量对爆破振动影响

节理数量对水平轴向、垂直方向爆破振动衰减

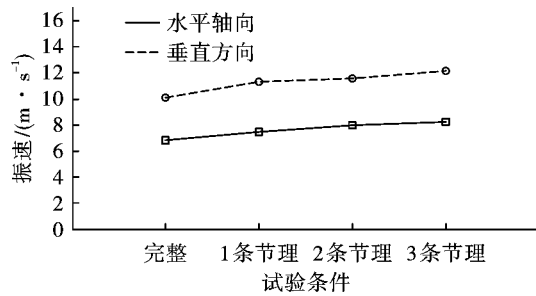
规律影响的振动测试数据分析结果如图 6 所示。

基于相似模型试验,可以得到如下结论:

①入射波的变化:相比完整模型的震动术,节理模型在节理前入射波处测点随着节理数量由 1 增加到 3,测得入射波振速值呈现增大趋势,增大的幅值相比完整模型由 1 到 3 个节理分别为:水平轴向 10.1%、17.2%、21.1%,垂直方向 11.9%、14.4%、20.2%。水平轴向与垂直方向的变化规律一致,变化幅值也接近处于同一数量级。由于测点位置固

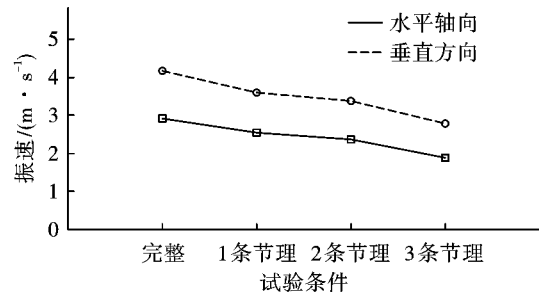
定,而随着节理数量的增大节理距离测点更近,因此这种幅值的变化应来自于测点与节理距离减小带来

的反射波叠加效应的增强。



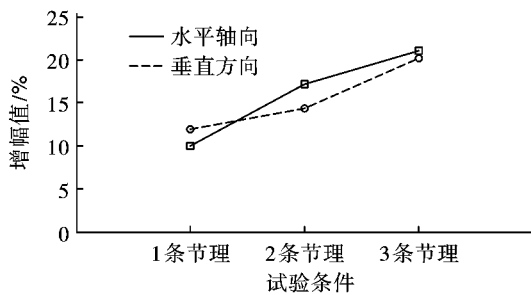
(a) 入射波振速幅值变化情况

(a) Change of vibration velocity of incident signal



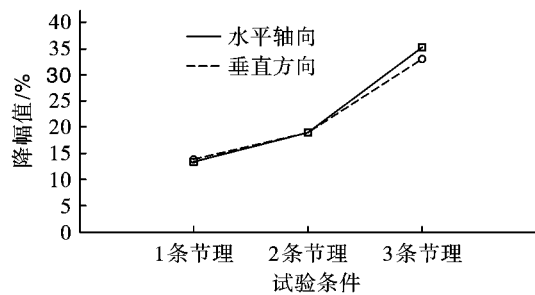
(b) 出射波振速幅值变化情况

(b) Change of vibration velocity of transmission signal



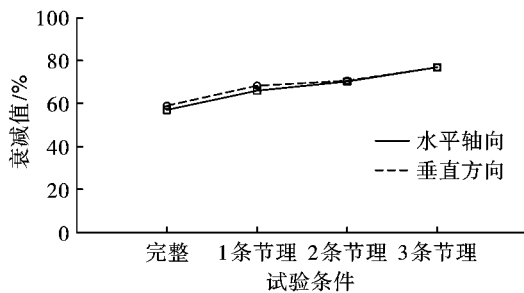
(c) 入射波振速幅值变化比例

(c) Proportional change of vibration velocity of incident signal



(d) 出射波振速幅值变化情况

(d) Proportional change of vibration velocity of incident signal



(e) 爆破振动波振速幅值衰减幅度变化

(e) Proportional change of vibration velocity

图6 不同节理数量爆破振动数据分析

Fig. 6 Analysis of blast vibration signal of different joint numbers

②出射波的变化:与完整模型比较,节理使出射波振速衰减增大,1至3条节理使出射波振速相比完整模型,分别下降:水平轴向13.3%、18.9%、35.3%,垂直方向13.8%、18.8%、33.0%。显然,随着节理数量的增大,出射波振速衰减值也越大。水平轴向与垂直方向的变化规律一致。

③衰减率的变化:由于入射波在节理作用下,受到反射叠加作用影响存在一定程度的幅值增大现象,因此在此以完整模型的入射波振速值为基准比较不同节理数量的出射波相比完整的衰减比例,则完整、1条节理、2条节理、3条节理条件的衰减率分别为:水平轴向57.0%、62.7%、65.1%、72.2%,垂直方向58.8%、64.5%、66.3%、72.4%,总体看振

速随着节理数量增大而加速衰减,但是衰减增加的程度较小。

(2) 节理角度对爆破振动影响

节理角度对水平轴向、垂直方向爆破振动衰减规律影响的振动测试数据分析结果如图7所示。

基于不同节理倾角的相似模型试验,可以得到如下结论:

①入射波的变化:相比完整模型的振速,入射波处振速也有所增大,且随着节理角度有所变化,倾角20°、40°、60°的入射波振速相比完整模型的增大比例值分别为:水平轴向19.2%、19.0%、19.9%,垂直方向19.6%、17.6%、21.4%。整体上,入射波的变化没有显示出线性的规律变化。

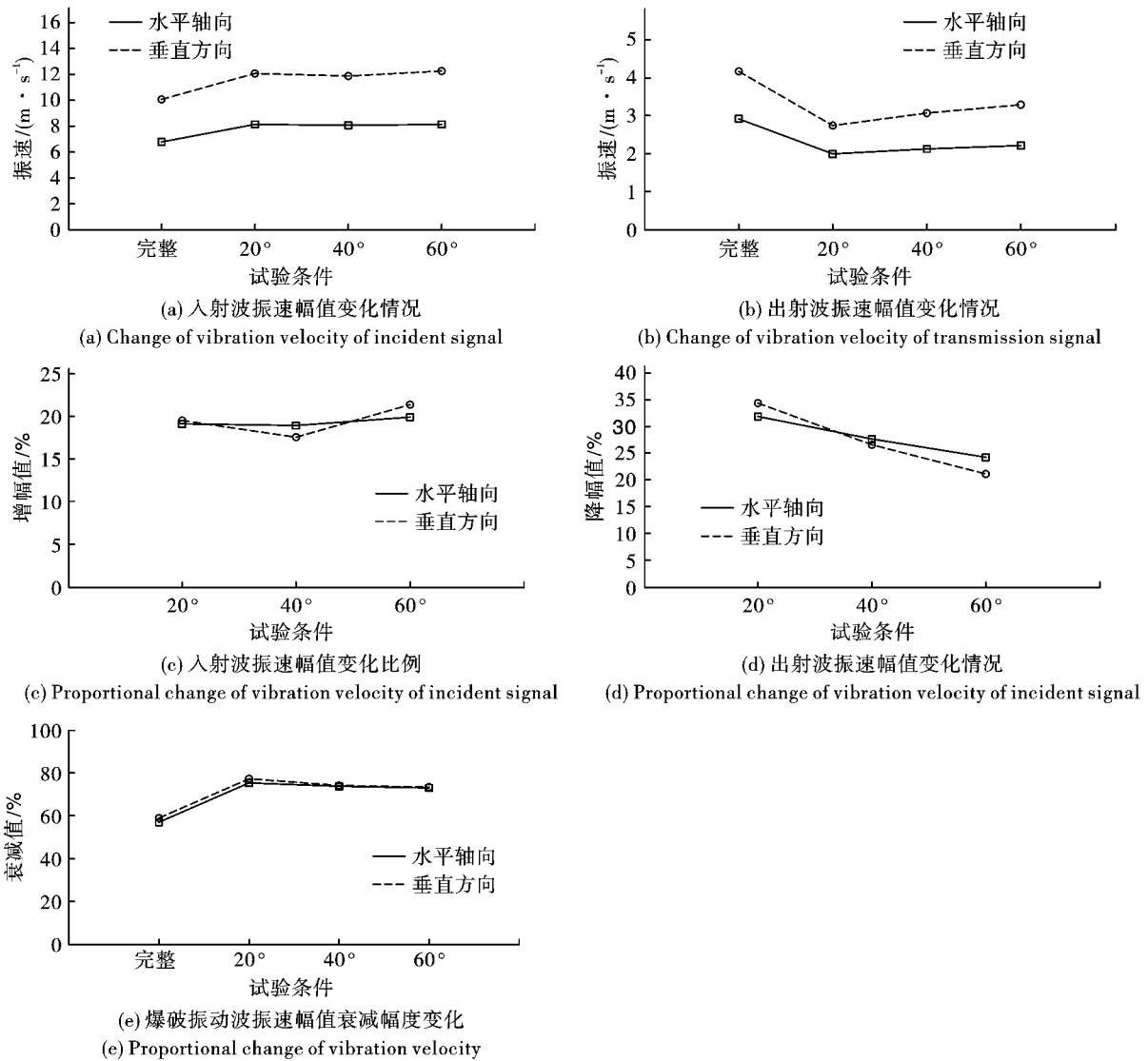


图 7 不同节理倾角爆破振动数据分析

Fig. 7 Analysis of blast vibration signal of different joint angles

②出射波的变化:相比完整模型出射波数据,不同角度节理模型出射波的振速幅值在 20°、40°、60°节理倾角条件下的降幅分别为:水平轴向 31.9%、27.7%、24.2%,垂直方向 34.4%、26.5%、21.1%。水平轴向与垂直方向变化趋势一致,均随着节理倾角增大而减小,也即随着入射波入射角的减小而减小。

③衰减率的变化:同样由于节理模型入射波的增大效应,在此以完整模型的测点数据为基准计算节理模型的振速变化幅值,则 0°、40°、60°节理倾角三种条件下的衰减率分别为:水平轴向 70.7%、68.9%、67.4%,垂直方向 73.0%、69.7%、67.5%。数据显示爆破振动随着节理倾角的增大,也即随着入射角的减小而逐渐减小。

4 结论

采用相似模型试验对节理的数量、倾角对爆破

振动波传播衰减规律的影响进行了分析,结论如下:

(1)相似模型试验表明节理区域前方振动波入射区域存在入射波幅值增大的现象,节理区域后方出射波存在幅值减小的现象,节理区域的存在显著的提高了爆破振动波的衰减率。

(2)分析了节理数量对爆破振动波衰减规律的影响,结果显示随着节理数量的增大,爆破振动波的衰减率随之增大,增大的幅度较小。

(3)分析了节理倾角对爆破振动波衰减规律的影响,结果显示随着倾角的增大,爆破振动波衰减率有所上升,但是幅值较小,倾角由 0°增加到 60°,爆破振动波衰减率略有增加约 6%。

(下转第 74 页)