

DOI: 10.15951/j.tmgcxb.23010044

超临界 CO₂ 热冲击破岩技术：致裂原理与振动安全研究

王小飞¹ 胡少斌² 王恩元¹

(1. 中国矿业大学, 江苏徐州 221116; 2. 河海大学土木与交通工程学院隧道与地下工程研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 新型超临界 CO₂ 热冲击破岩技术与传统钻爆法相比振动弱、能量可控, 适合城市公共区域等复杂敏感地区破岩工作。目前超临界 CO₂ 热冲击破岩技术的致裂原理尚不清楚, 现场试验中振动安全评价没有标准。为了研究超临界 CO₂ 热冲击破岩技术致裂原理和振动安全, 同时进行了真三轴 CO₂ 热冲击致裂试验和破岩现场振动监测试验。试验结果表明: ①CO₂ 热冲击破岩诱发振动速度在 6m 时即降到了 30mm/s 左右, 满足爆破振动安全允许标准要求; ②CO₂ 热冲击破岩引发振动频率主要分布于 1~100Hz, 随着震源距的增加, 破岩诱发振动波形频谱主要成分分布也逐渐变宽; ③传统 CO₂ 相变致裂能量计算公式同样适用于 CO₂ 热冲击破岩技术, 致裂能量的 TNT 当量适用于萨道夫斯基公式; ④CO₂ 热冲击破岩是冲击波和高能气体共同作用致裂岩石, 可以分为 3 个阶段, 其中高能气体的气楔作用在岩体损伤中占主导作用。

关键词: 破岩技术; CO₂ 热冲击; 振动安全; 致裂原理; 能量计算

中图分类号: TD803 文献标志码: A 文章编号: 1000-131X(2023)08-0118-13

Supercritical CO₂ thermal shock rock breaking technology: fracture principle and vibration safety

Wang Xiaofei¹ Hu Shaobin² Wang Enyuan¹

(1. China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Institute of Tunneling and Underground Engineering, School of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China.)

Abstract: The new supercritical CO₂ thermal shock rock-breaking technology is suitable for rock-breaking work in urban public areas and other sophisticated and sensitive areas due to its weak vibration and controllable energy compared with the traditional drilling and blasting method. The fracturing principle of supercritical CO₂ thermal shock rock-breaking technology is still unclear, and there is no standard for vibration safety evaluation in field experiments. In order to study the fracturing principle and vibration safety of supercritical CO₂ thermal shock rock-breaking technology, both true triaxial CO₂ thermal shock fracturing experiments and vibration monitoring tests were conducted at the rock-breaking site. The experimental results show that: (1) the vibration velocity induced by CO₂ thermal shock fracturing drops to about 30 mm/s at 6 m, which meets the requirements of blasting vibration safety standards; (2) the vibration frequency induced by CO₂ thermal shock fracturing is mainly distributed in the range of 1-100 Hz, and the distribution of the main components of the fracture-induced vibration spectrum gradually widens as the source distance increases; (3) the conventional CO₂ phase change fracturing The energy calculation formula is also applicable to CO₂ thermal shock fracturing technology, and the TNT equivalent of fracturing energy is applicable to Sadovsky formula; (4) CO₂ thermal shock fracturing is a joint action of shock wave and high-energy gas to fracture the rock, which can be divided into three stages, among which the gas wedge of high-energy gas plays a dominant role in the rock damage.

Keywords: rock-breaking technology; CO₂ thermal shock; vibration safety; fracture principle; energy calculation

E-mail: hsbhhu@126.com

基金项目: 国家重点实验室开放基金(HKLBEF202004)、江苏省自然

科学基金(BK20201313)

作者简介: 胡少斌, 博士, 副教授

收稿日期: 2023-01-12

引言

随着经济的高速发展,越来越多的公共服务工程需要进行大规模破岩工作。传统钻爆法破岩效率高、成本低、技术成熟被广泛使用,但是对于临近已有建筑结构的破岩工程,钻爆法由于振动强且爆破能量大,容易对关键结构产生损伤,造成安全事故^[1-3]。钻爆法使用的炸药容易威胁公共安全,且化学炸药会对环境造成严重污染,因此国家对炸药的使用进行了严格管控^[4]。CO₂相变致裂技术是一种物理膨胀破岩方法,其原理为利用加热药剂在激发后产生大量热能使致裂管内的液态 CO₂相变后体积膨胀600倍达到设定压力后瞬间泄出致裂岩石^[5]。CO₂相变致裂技术由于绿色和能量可控的优点,作为钻爆法的替代技术受到岩石开挖领域的广泛关注。

CO₂相变技术产生于20世纪70年代,第一代CARDON致裂技术由英国学者提出^[6]。自CO₂气爆技术问世以来,有关超临界流体冲击破岩机理的讨论从未间断。1994年,郭志兴^[7]通过地面模型试验对CO₂气爆破岩进行了研究,认为超临界CO₂冲击破岩是一种缓慢的、膨胀的、扩散及有剪切效果的过程,释放的高压CO₂气体可以使岩体沿原生致裂,适用于多孔脆性材料的破碎。1998年,Singh^[8]分析了英国CARDON公司致裂管的作用过程,认为超临界CO₂相变后释放的高压CO₂气体通过在钻孔底部施压形成拉应力场,以较小的拉应力破坏岩石,随后在岩体内部产生锥形裂隙^[9-10],从而达到破岩目的。孙可明等^[11]进行了煤样的CO₂气爆致裂实验,结果显示致裂孔周围煤体在高压CO₂气体的作用下被爆碎,致裂孔周边同时出现了多条径向裂缝,裂纹的大小与气爆压力成正比,且当气爆压力达到一定程度后,煤样整体将完全破碎。随着CO₂气爆技术在中国逐渐大规模的测试和应用,现有观点普遍认为,同炸药爆破机理类似,超临界流体相变冲击荷载下的岩石破碎本质上是应力波与高压气体共同驱动下的岩体裂纹扩展行为^[12]。然而传统CO₂相变膨胀致裂技术存在飞管等安全隐患,胡少斌等^[13-14]提出了超临界CO₂热冲击压裂工艺,主要利用具有自主知识产权的本安型CO₂聚能剂在电压激发下燃烧释放的大量热量实现干冰粉相变,目前CO₂热冲击破岩致裂机理和动力传播特性尚不清楚。

在破岩工程中,考虑对临近建筑物和支护结构的影响,需要进行实时的振动监测。传统钻爆法、超临界CO₂热冲击破岩在破岩中产生的振动信号各不相同,

需要对其进行深入的分析。振动信号分析研究一直是爆破领域的重要研究方向,通过信号分析技术提取振动信号的特征参数量化,可以多角度分析振动安全^[15]。振动安全评价主要参量为振动速度峰值和振动频率分布。通过对振动峰值速度衰减规律研究中得到拟合曲线,可以给同地质条件工程提供参照^[16-19]。陈冠等^[20]基于小波包变换对现场振动信号进行了分析,结果显示超临界流体冲击破岩振动信号主振频带与振动信号方向及传播距离相关性较小,基本位于0~4Hz子频带,该频率范围与构建筑物的自振频率十分接近,需特别注意可能引起的振动灾害。刘小雄等^[21]借助HHT对超临界CO₂相变破岩时的振动信号频谱特征、能量分布进行了研究,指出该技术引起的质点振动能量主要集中于0~20Hz,且竖直垂向能量>水平径向>水平切向,随距离增加能量逐渐向高频带集中分布。李保林等^[22-23]研究了超临界流体冲击破岩引起的质点振动衰减情况,认为其峰值同样符合幂函数的衰减形式,而且当振动沿斜坡向下传播时,质点振速峰值将加速衰减,坡度越陡、衰减越快。李启月等^[24-25]在基坑致裂开挖时设置防爆毯,发现致裂时无飞石产生,扬尘较少,16m外声音强度小于76dB,致裂破岩产生的粉尘和炮烟较爆破也减少了50%,能满足敏感区域开挖的要求。目前关于CO₂相变破岩技术的研究主要关注现场运用,其致裂原理尚不清晰。几乎所有的能量计算公式都没有得到现场工程实践,且都通过振动速度峰值单一指标评价振动安全,没有提出针对具体支护结构本体的损伤安全评价指标。本文利用自主设计的真三轴超临界CO₂热冲击致裂试验系统进行了不同药量试验,通过压力曲线和试样裂隙分布特征研究了CO₂热冲击致裂原理,在现场试验中使用边坡振动位移作为安全评价指标,对于新技术的理论完善和安全应用具有重要意义。

1 试验方案

1.1 真三轴 CO₂热冲击致裂试验

1.1.1 试验系统

如图1所示,在真三轴压裂系统中进行了超临界CO₂热冲击压裂试验。试验系统包括双缸泵,真三轴液压加载系统,压力监测系统和引爆器。双缸泵系统包括双缸泵和水浴系统,水浴系统可以降低双缸泵内CO₂的温度;真三轴加载系统通过液压泵提供压力;压力监测系统包括压力传感器和数据采集仪;引爆器用于引爆试样中的致裂管。气瓶中的CO₂通过双缸泵提高压力之后注入致裂管中,压力传感器实时记录致

裂管中的气体压力。围压可以通过 3 个液压泵沿 X、Y 和 Z 方向独立施加，并通过加载板和钢板沿每个方向

施加在试样上。

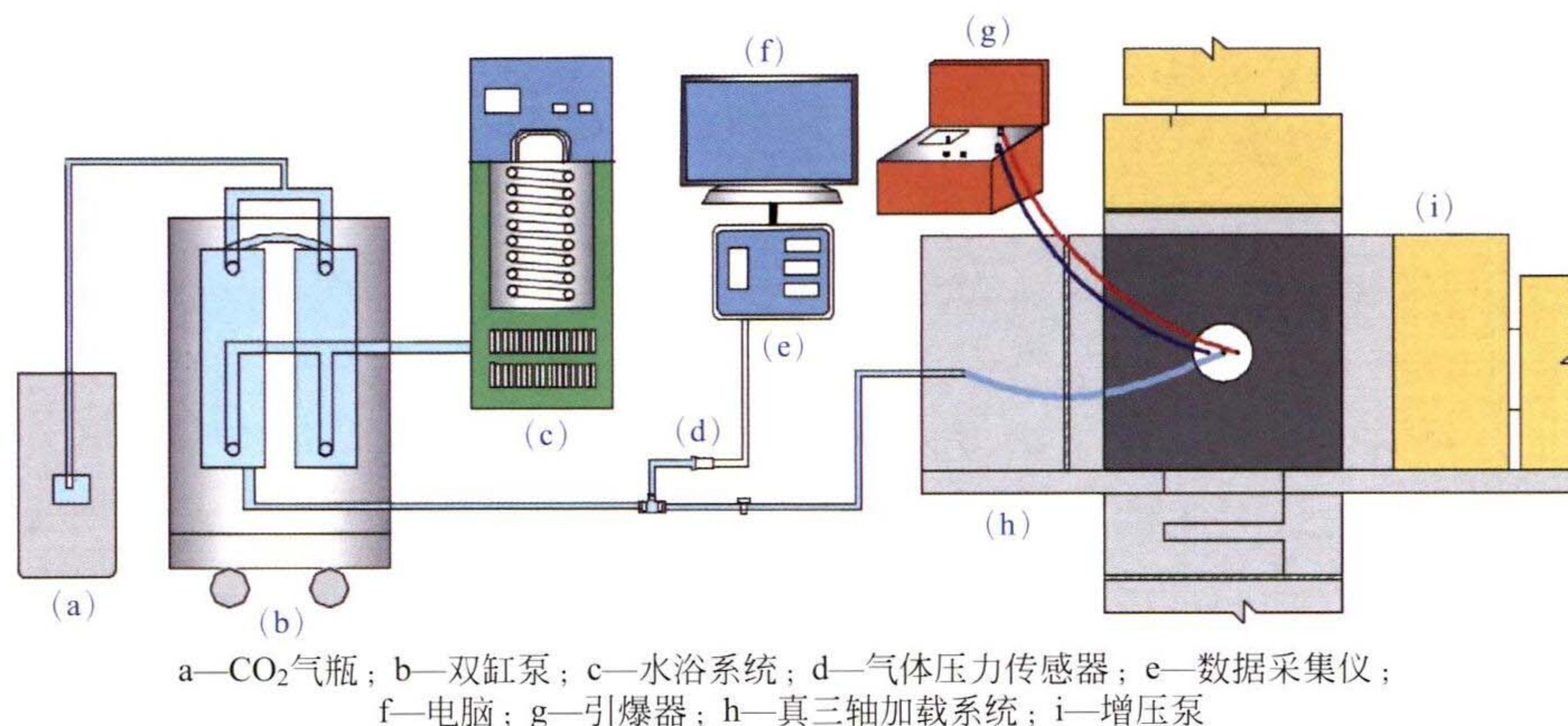


图 1 试验系统的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

1.1.2 试验步骤

如图 2 所示，由于天然岩石的强非均质性和各向异性很容易使试验具有随机性，所有试样均选用高强度水泥制成的 200mm×200mm×200mm 人造立方体试样，水泥中不添加骨料可视为均质各向同性。高强度水泥水灰比为 0.11，样品养护保持 4 周。所用致裂筒采用 Q235 钢制作，高 100mm，直径 50mm，由点火头、加热药、进气口、引爆药组成。水泥试样物理参数见表 1。

CO₂通过增压泵加压，通过水浴系统冷却至 0℃后再注入致裂筒。在加压降温过程中，压力传感器开始记录致裂筒内的压力变化。CO₂ 加压过程中，在压力达到目标值时保持压力一段时间后再关闭阀门。试样断裂后喷上白漆仔细观察样品表面的裂纹痕迹，将样品沿断裂痕迹剥离观察。

本次试验共进行了 3 次，三轴加载压力分别为 3MPa、4MPa、5MPa。设置初始气压为 15MPa、18MPa、

21MPa，观察相同药量下，不同初始气压的试验压力曲线和试样损伤情况。

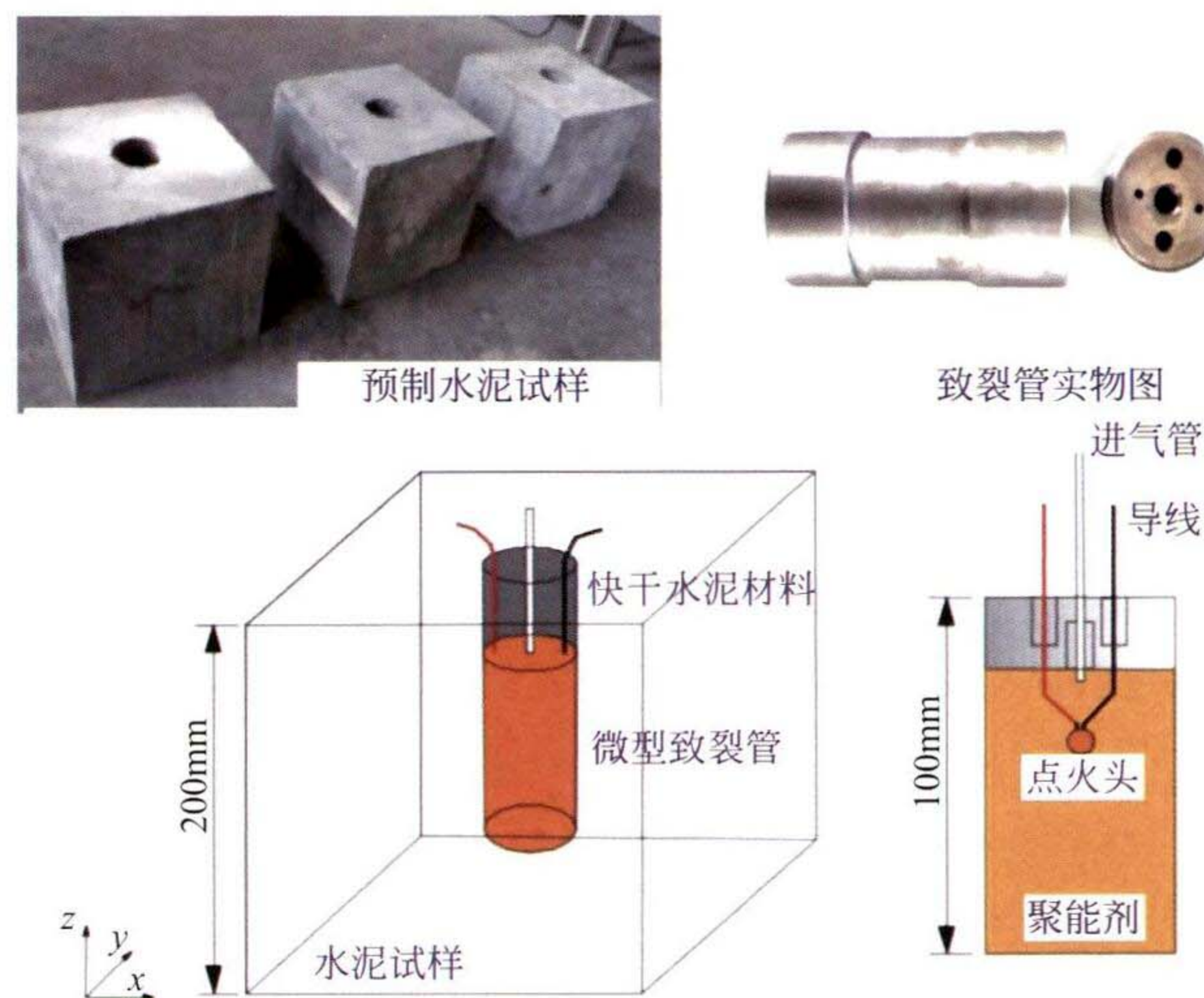


图 2 试样制作

Fig. 2 Specimen production

表 1 特种高强混凝土基本力学参数表

Table 1 Table of basic mechanical parameters of special high strength concrete

密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	抗拉强度(MPa)	单轴抗压强度(MPa)	渗透率(m ²)	孔隙率
2300	22	0.13	10.1	105	4.64e-14	0.07

1.2 现场测试

1.2.1 测试地点

如图 3 所示，本次试验地点选定在重庆市合川区草场泵站基坑开挖工程，基坑主要岩性为黄绿、紫红夹深灰色砂质泥岩，主要物理性质见表 2。泵站基坑施工区域毗邻居民区，人员密集，最近的民居距离基

坑施工段仅 50m，因此基坑施工团队目前主要使用镐头机破岩，造成了严重的噪音污染且施工进度十分缓慢。工程边坡高度大，且存在顺坡向泥岩、砂岩互层边坡，工程地质条件较差，保证边坡稳定是工程重点，为减少噪音污染并保证破岩效率，并考虑对临近区域的影响，在该区域进行了 CO₂热冲击破岩试验。

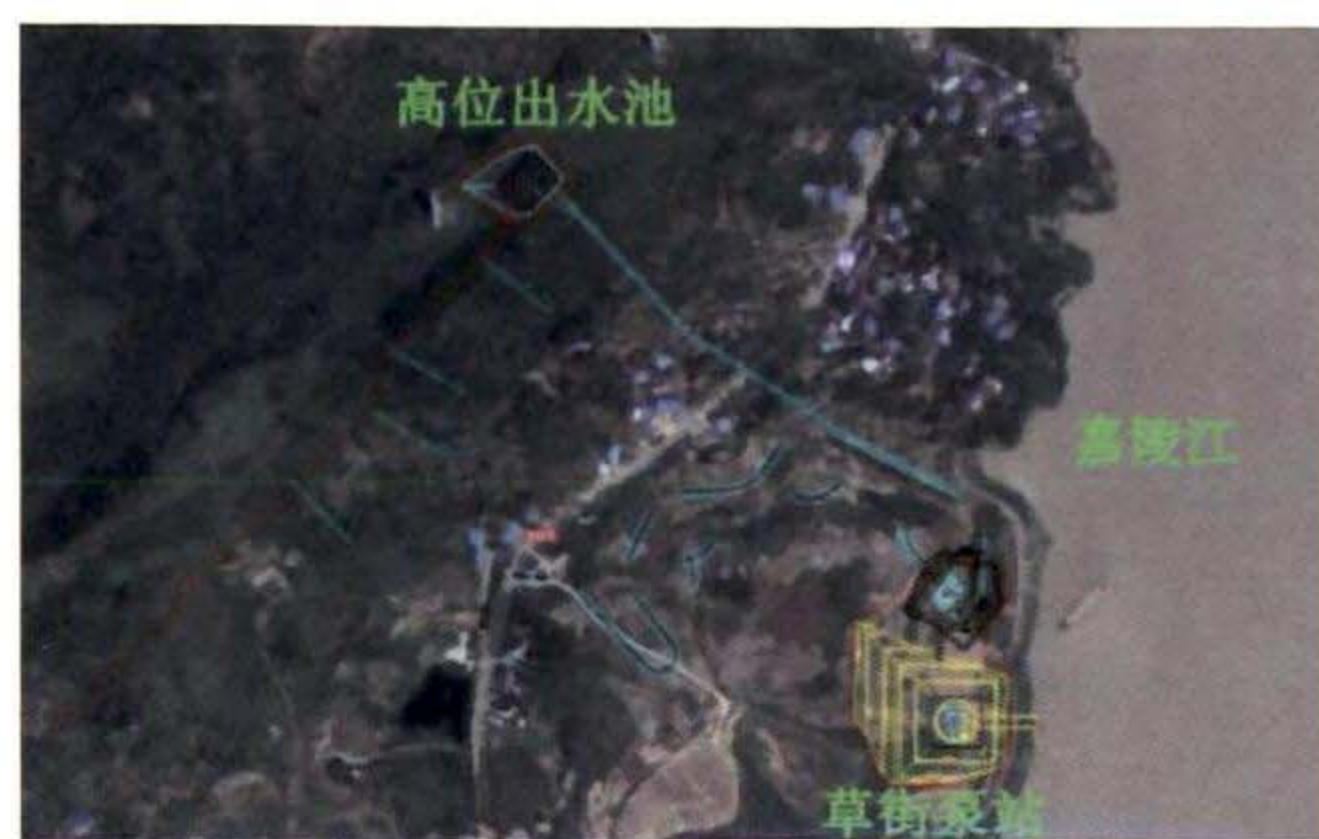


图 3 试验地点
Fig 3 Test location

1.2.2 破岩装备与破岩过程

破岩设备选用河海大学研发的 L-600 型干冰致裂筒，图 4 为干冰致裂筒内部结构。干冰致裂筒直径为 90mm，长度为 600mm，主要结构包括干冰粉舱、加热棒、CO₂ 聚能剂、引爆药、加热导线、引爆导线、安全导管。干冰粉舱容纳干冰，引爆药引燃 CO₂ 聚能剂后急速供热，安全导管可以外接传感器监测内部压力同时可以在激发不成功时泄气。所用 CO₂ 聚能剂为核心科技，具有完全自主知识产权，与传统 CO₂ 相变致裂技术所用药剂不同，完全不具有爆炸性且反应

表 2 破岩区域岩石物理性质参数表
Table 2 Table of physical properties of rocks in the broken rock area

密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比	抗拉强度(MPa)	单轴抗压强度(MPa)	含水率
2.45	4.4	0.26	1.72	36.29	3.17%

产生超过 3000℃ 高温，具体物理和化学参数见表 2。

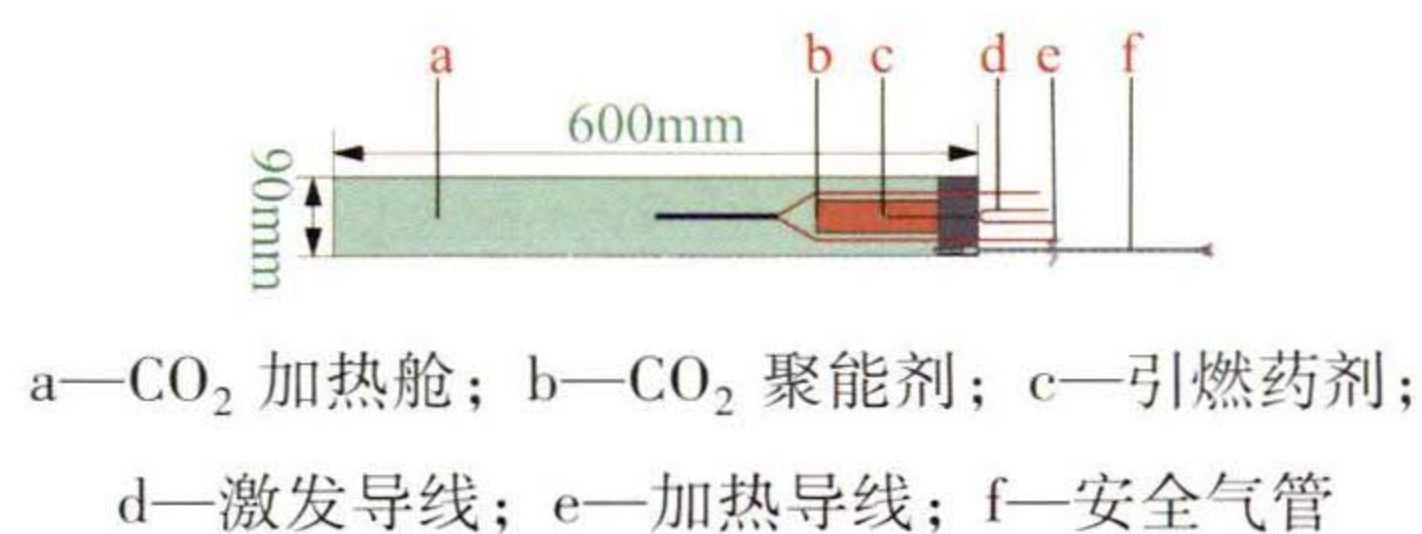


图 4 CO₂ 热冲击致裂器结构图

Fig.4 Structure diagram of dry ice powder thermal shock fractor

CO₂ 热冲击破岩技术原理为利用自主研发的 CO₂ 聚能剂快速供热使干冰粉舱内的流体温度压力升高至超临界状态，达到破裂压力后大量高能气体释放冲击压缩周围岩石，引起冲击破坏形成初始裂隙，随后高能气体扩展裂隙损伤岩石。试验过程如图 5 所示，包括干冰致裂筒装配、钻孔、封孔和传感器布置 4 个步骤。

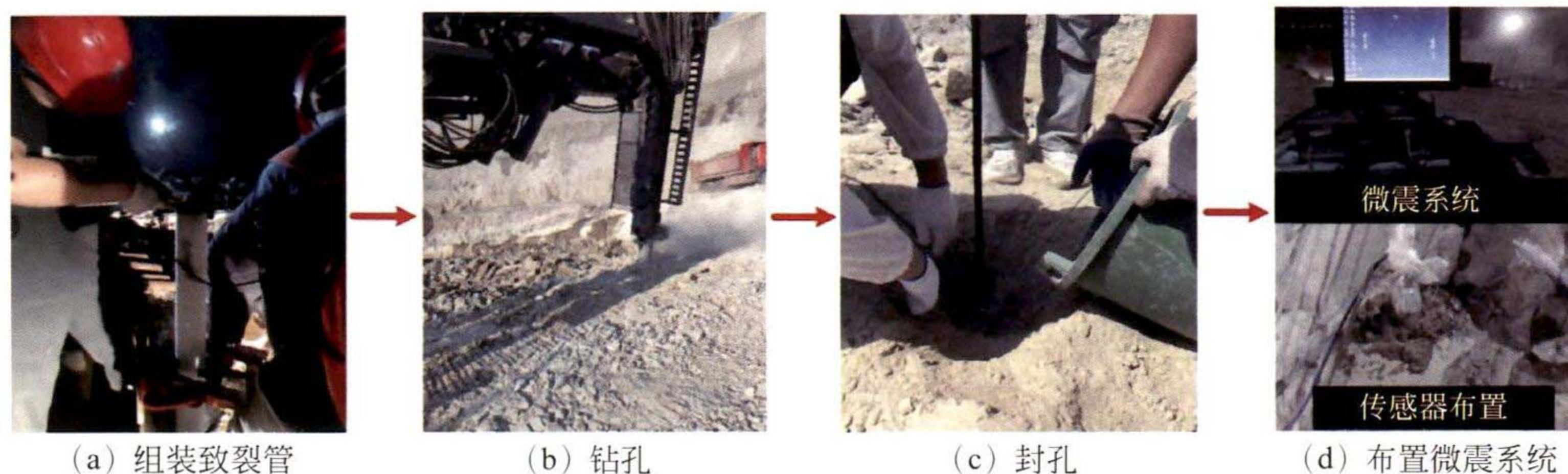


图 5 试验步骤图

Fig.5 Test step diagram

1.2.3 振动噪音监测及测点布置

试验所用振动监测装备为福安科技公司生产的 KJ521 振动监测系统，硬件包括数据采集仪、信号放大器、接线盒、压电式振动传感器和电脑。系统最多可同时采集 16 个测点，采样频率为 1000Hz，AD 转换为 24bit。系统软件包括振动信号采集系统、振动数据处理系统和振动数据分析系统，分别负责采集、处理、分析振动数据，可以实现自动拾取振动触发时间和结束时间，振动震源位置和能量计算。

振动传感器布置台网如图 6 所示，试验一共布置了 7 个传感器，其中 V6 距离 H1、H2 最近，距离分别为 6.04m 和 5.40m，从 V6，V7，V5，V4，V3，V2，V1 距离 H1 和 H2 渐渐变远，V1 距离 H1 和 H2 分别为 33.60m 和 32.71m。V1，V2，V3 沿边坡布置。从高程图中，可以看出在 V7 与 V5 之间存在 4.9m 的高差，V5 和 V4 之间存在 3.2m 的高差，在布置传感器时存在 2 个台阶。每个传感器布置时使用石膏作为耦合剂让传感器和支撑混凝土充分耦合。

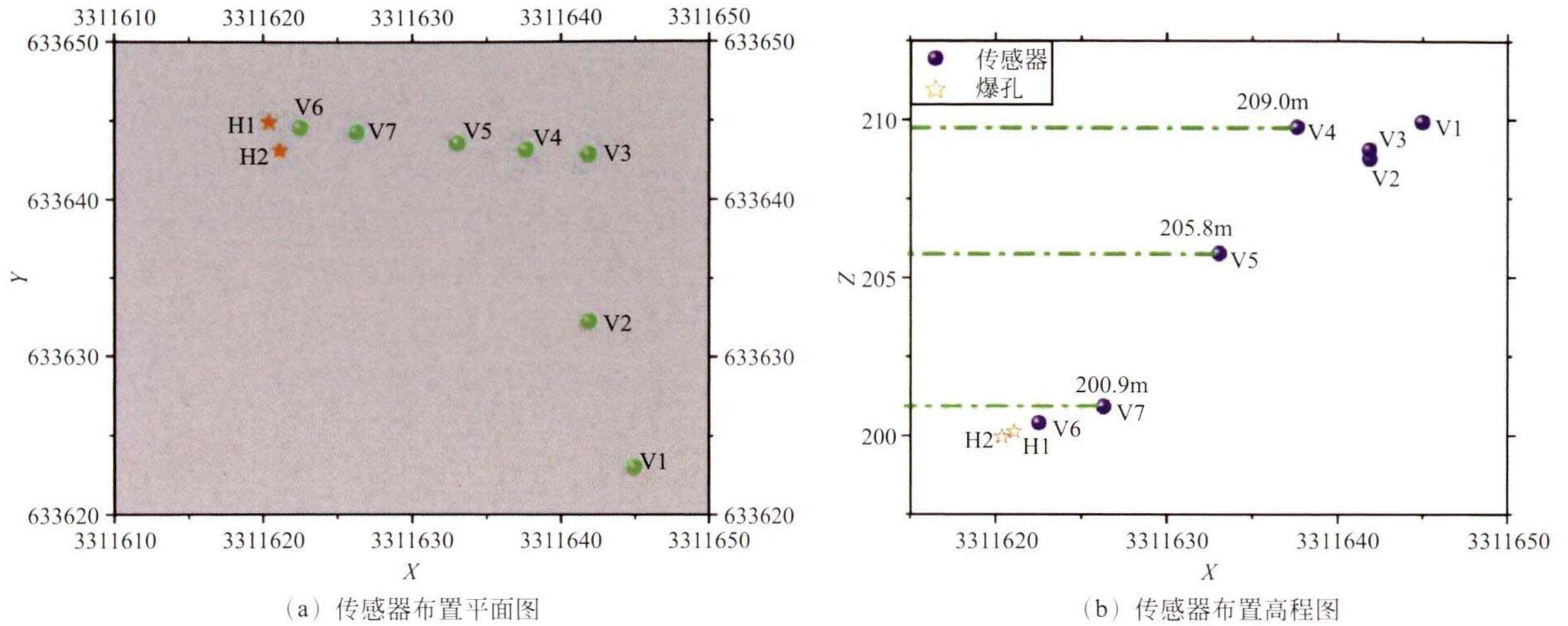


图 6 振动台网布置图和高程图
 Fig. 6 Shaker network layout and elevation map

2 试验结果

2.1 试验压力曲线

通过观察图 7 中曲线可知，所有试验曲线可以分为：激发阶段、剧烈反应阶段、缓慢上升阶段、泄压阶段、脉冲阶段、缓慢下降阶段。激发阶段，压力曲线由平行开始逐渐增加，呈下凹的曲线开始变化，但整个过程较为缓慢；剧烈反应阶段，曲线陡增，由曲线转变近似为一定斜率的直线上升，作用时间较短；缓慢上升阶段，曲线由原本的一定斜率的直线开始变缓，呈现出上凸的曲线，直到达到压力峰值；泄压阶段，致裂管破裂，压力陡降，时间较短；脉冲阶段，压力出现脉冲，此阶段对应高压气楔作用在岩体内造缝；缓慢下降阶段，在压力降至 15MPa 之后压力下降速率逐渐降低，压力趋于稳定，最终降至 0MPa。

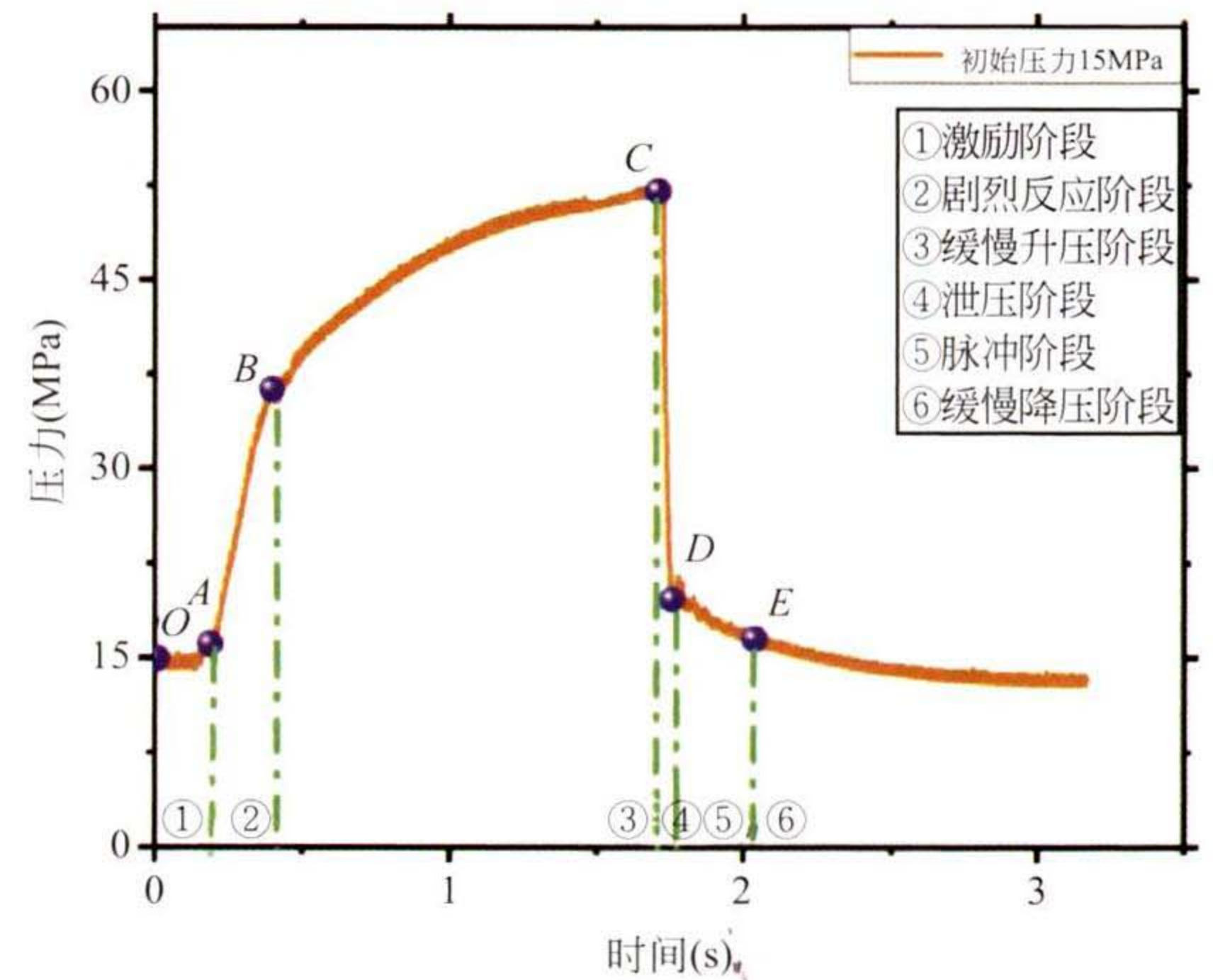


图 8 S1 试验压力曲线图
 Fig. 8 S1 experimental pressure curve

从图 8 中观察，可知：通过观察图 8 的曲线，D 点的压力峰值集中在 40~60MPa。在试验中薄弱处的强度控制泄出压力^[26]，致裂管壁厚为 0.15mm，对应于 40~60MPa 的破裂压力，可以控制薄弱环节的厚度控制压力峰值。3 组试验中达到压力峰值的时间在 2.5~3.5s 左右，压力上升速率接近，说明药量为 12g 即满足 18MPa 的 CO₂ 达到峰值压力的需求。

2.2 振动波测试结果

如图 9 为 2 次 CO₂ 热冲击破岩事件诱发的振动波形。随着震源距的增加，波形速度幅值越来越小。不同波形的初至时刻差异较为明显，距离震源越远，传感器接受波形越滞后，反应了振动从近及远的传播。在现场试验中，V6, V7 由于距离爆源近，振动幅值更高。在 13 m 时最大振动速度即降到了 20mm/s 以下 (V5)，远低于爆破振动安全允许标准中对一般建筑物的振动速度要求，是一种更加安全可靠的破岩技术。

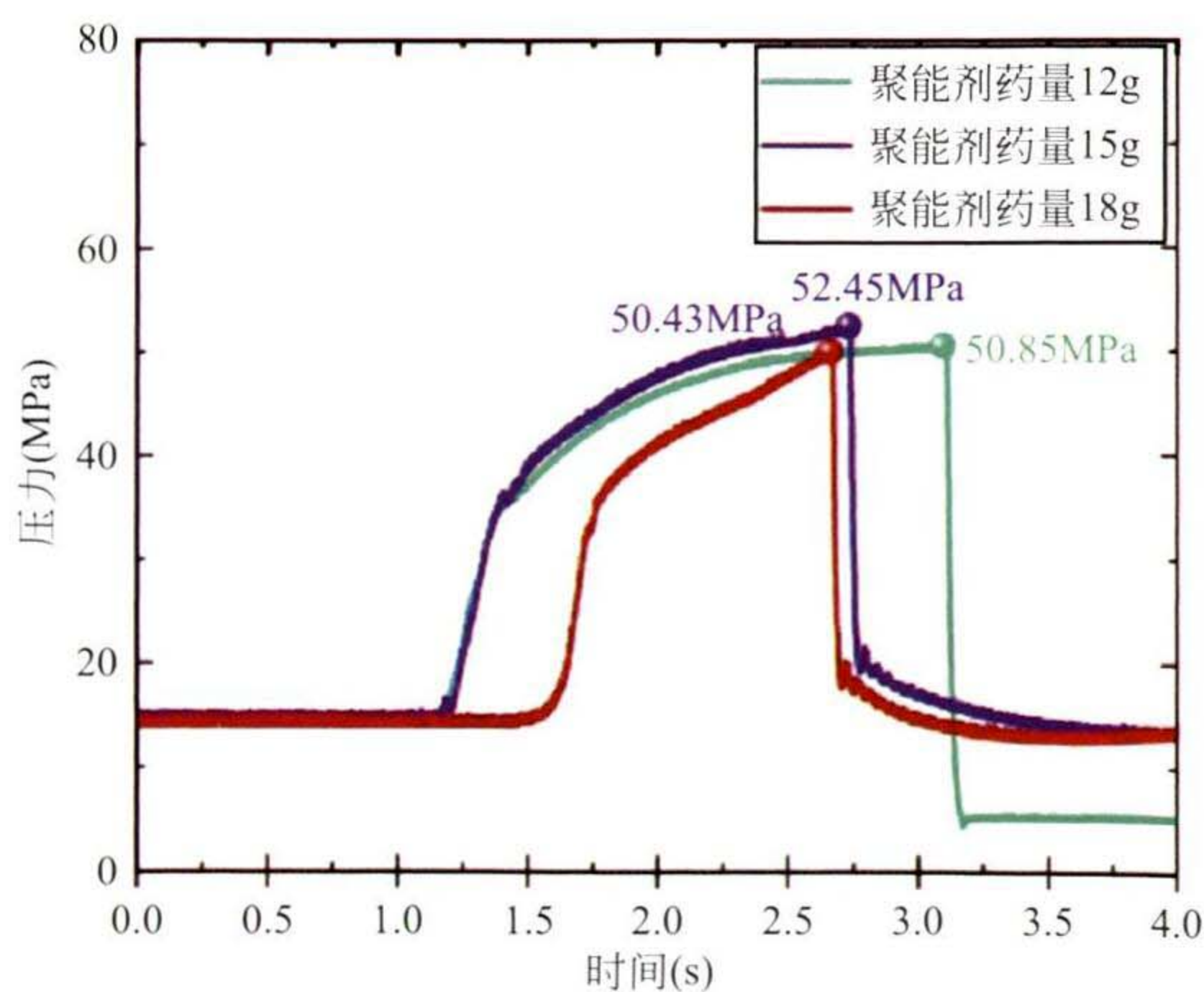


图 7 3 组试验压力曲线图
 Fig. 7 Three sets of experimental pressure curves

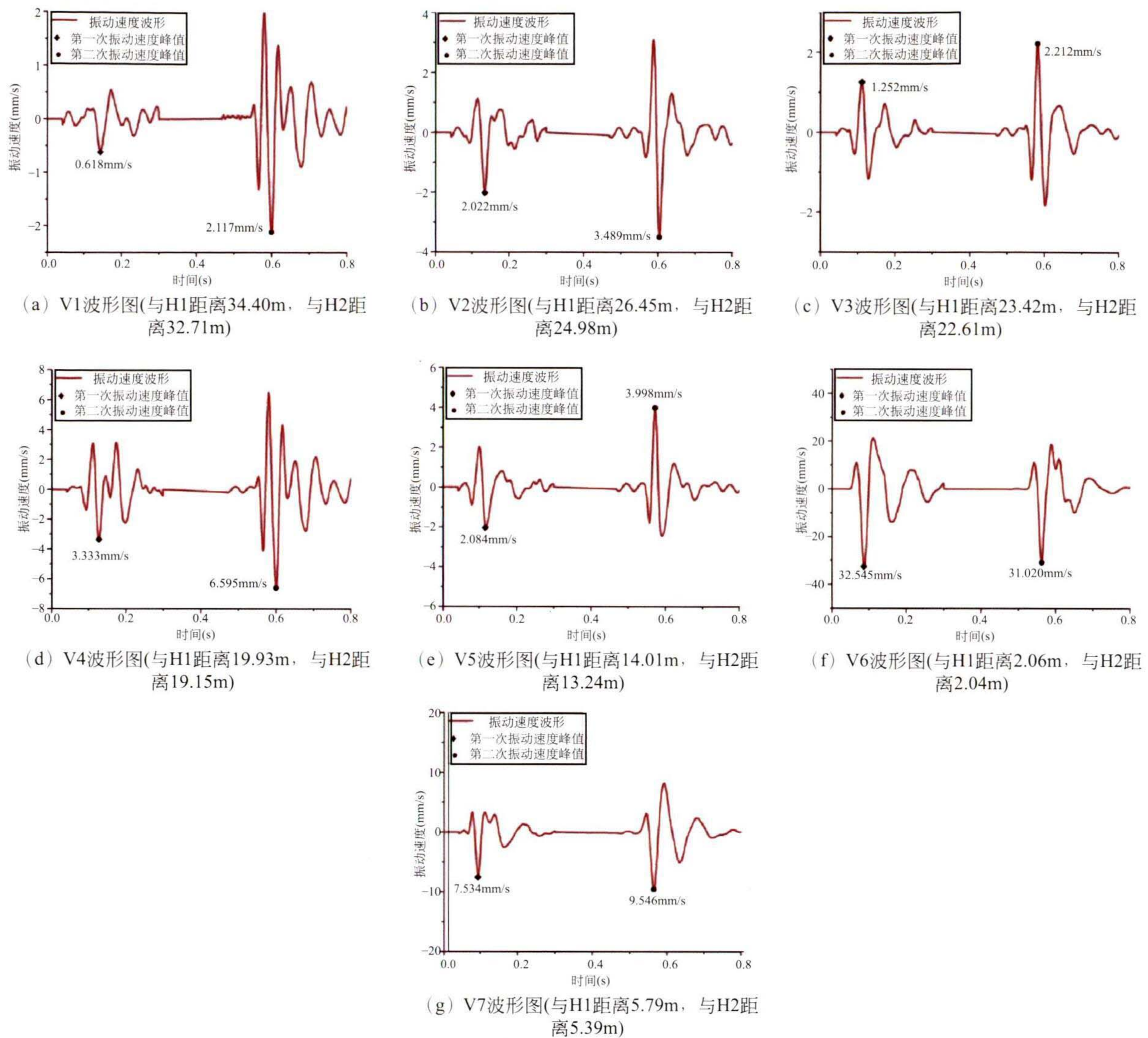


图 9 振动波形图

Fig. 9 Vibration waveform diagram

2.3 CO₂ 热冲击破岩 TNT 当量计算

本次使用的 H1 和 H2 钻孔中的干冰致裂筒尺寸为 $\phi 100\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，通过现场测量获得的破裂压力为 60MPa。CO₂ 相变致裂在开采煤层气、抽采瓦斯、做勘探震源^[27] 等运用中的能量计算均采用如下公式：

$$E_g = \frac{PV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (1)$$

式中： E_g 为气体的爆破能量，kJ； P 为容器内气体的绝对压力，MPa； V 为容器的容积，m³； K 为气体的绝热指数，即气体的定压比热与定容比热之比，取 1.295。将上述数据代入式中，可得出 600mm 致裂管爆破能量为 793.402kJ。

液态 CO₂ 相变致裂装置的近似 TNT 当量 W_{TNT} (单位为 kg) 可以利用式(2) 计算：

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E_g}{Q_{\text{TNT}}} \quad (2)$$

式中： Q_{TNT} 为 1kg TNT 爆炸能，取 4250kJ/kg。经过计算，600mm 致裂管 TNT 当量为 179.674g。

2.4 振动数据的频谱分析

2.4.1 希尔伯特黄变换原理

根据监测系统传感器接收的信号的特点选择希尔伯特黄变换方法进行预处理，Hilbert 变换将分解得到的 IMF 分量进行时频处理得到信号的时频属性。由于希尔伯特黄变换具有局部性能良好，自适应性强等特点，已经在地球物理，机械故障诊断^[28] 等领域有了研究应用，效果显著。

(1) 经验模态分解

传感器接收到的复杂振动信号经过经验模态分解(EMD)后可以表示为若干个固有模态函数(IMF) 与一个平稳余项，原始信号中非常重要的信息通常存在于分解出来的前几个固有模态函数中，因此主要着重观察和分析前几个固有模态分量，原信号 $s(t)$

经过经验模态分解后可以用下列形式表示：

$$s(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) + r(t) \quad (3)$$

式中： $x_i(t)$ 为固有模态分量， $r(t)$ 为分解余项。

(2) 希尔伯特变换

现实中得到的信号 $s(t)$ 多是实数信号，分解得到的固有模态函数同样是实函数，对上面求得的固有模态函数 $x_i(t)$ 进行希尔伯特变换如下：

$$y_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x_i(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (4)$$

构造 $x_i(t)$ 解析形式如下：

$$\nabla \cdot \sigma + f = \rho_s \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (5)$$

式中： $A_i(t) = \sqrt{x_i^2(t) + y_i^2(t)}$ ， $\theta_i(t) = \arctan\left(\frac{y_i(t)}{x_i(t)}\right)$ 。

瞬时频率： $\omega_i(t) = \frac{d\theta_i(t)}{dt}$

此时忽略余项后，原信号 $s(t)$ 可以表示为：

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n A_i(t) \exp(j\omega(t) dt) \quad (6)$$

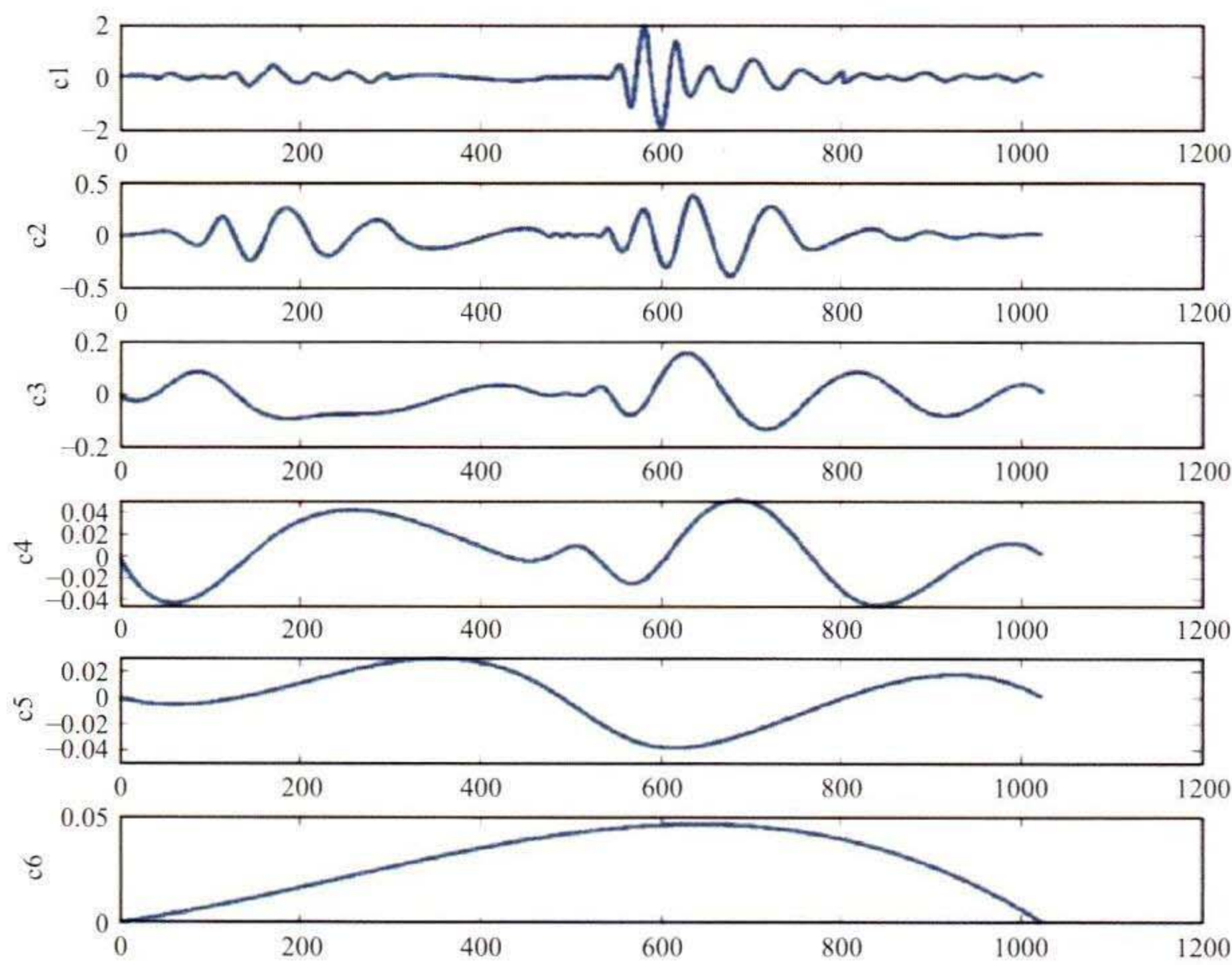
式中： $\omega_i(t)$ ， $A_i(t)$ 均为时间的函数，可以构成时间、频率、振幅的三维时频谱图，精确描述信号在时间段频率和振幅随时间的变化，为 Hilbert 谱，表示为 $H(\omega, t)$ 。对 $H(\omega, t)$ 在整个时间段上进行积分可以得到边际谱 $h(\omega)$ ，边际谱定义为：

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (7)$$

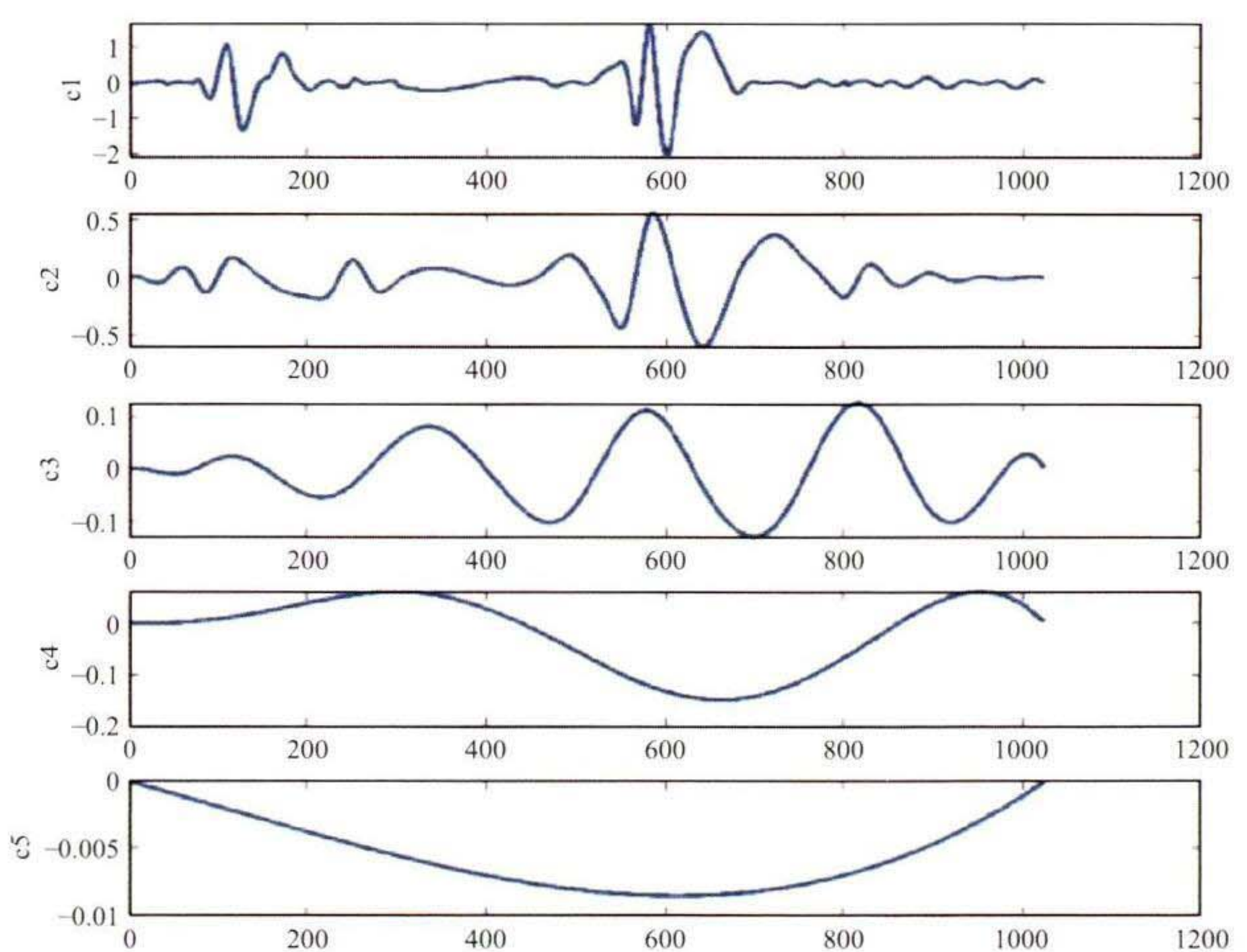
边际谱纵坐标是相同频率全部幅度的统计累加，表达了每个频率在全局上的幅度的分布。

2.4.2 振动波形的 IMF 分量

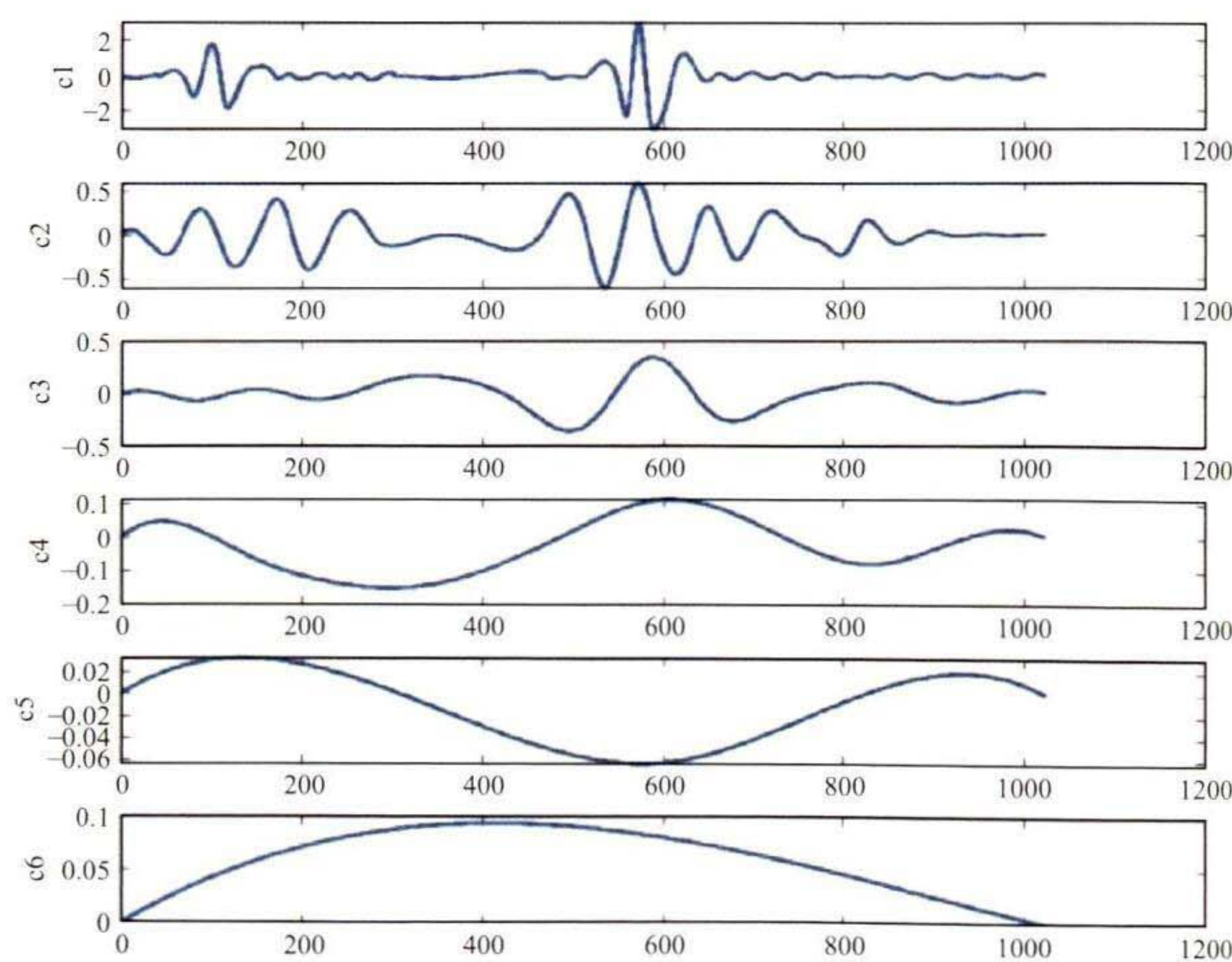
EMD 分解结果如图 10 所示，每个振动波形可以分解为 6~7 个 IMF，C1 的频率最高且幅值最大，C2、C3、C4、C5、C6 的频率依次减小，幅值下降。最后的剩余分量 (r) 波长最长，频率最低且幅值最小。与原振动波形一样，随着距离震源的距离增加，各个分量的幅值也逐渐减小。从 C3 分量观察，已经无法区分前后两次振动事件。



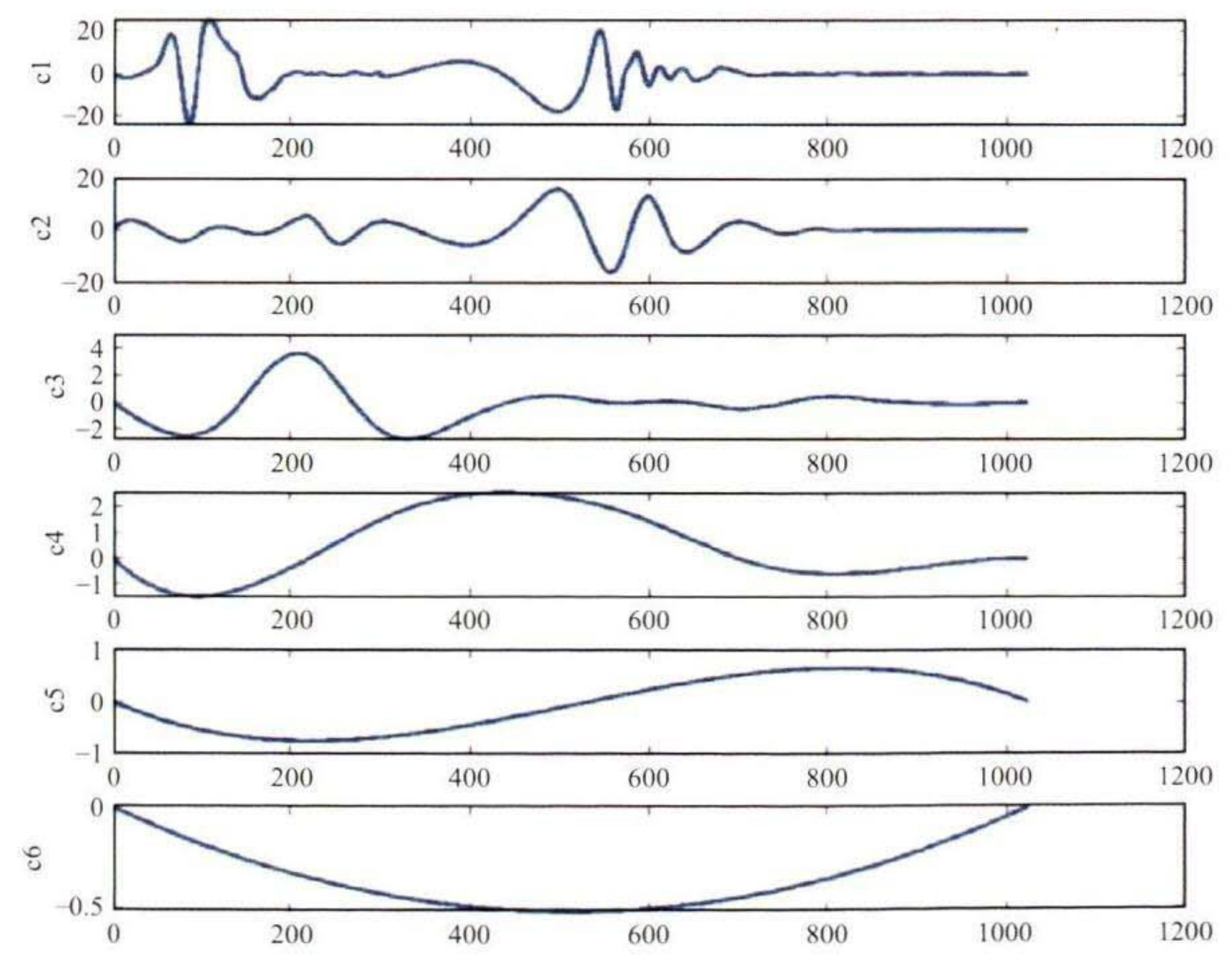
(a) V1的EMD分解



(b) V3的EMD分解



(c) V5的EMD分解



(d) V6的EMD分解

图 10 振动波形 EMD 分解

Fig. 10 EMD decomposition of vibration waveform

2.4.3 振动信号时频分析

如图 11 所示，振动能量主要分布于 0~100Hz，且集中于 0~30Hz。随着震源距增加，幅值整体呈下降趋势，从 2.50~11.28m，幅值的峰值下降达到 95%，这与傅里叶分析结果一致。随着震源距的增加，能量在频率上的分布逐渐分散，在 50~100Hz 部分出现明显的幅值分布。根据边缘谱图可知，破岩引发的振动波形中低频能量占据主要地位，随着震

源距的增加高频能量逐渐占据优势，从图中可以观察能量在时间上的分布情况。随着震源距的增加，能量峰值下降明显，从距离 2.21~34.397m，能量峰值下降了 94%。震源距最小的 V6，能量分布于采样点 0~1000，在 1.0s 时间上均有分布，主要集中于 0~0.4s 和 0.4~0.7s，2 个峰值分别代表 2 次干冰致裂管爆破。随着震源距的增加，能量在时间上的分布变得越来越窄，最终集中于 0~0.4s 和 0.4~0.7s。

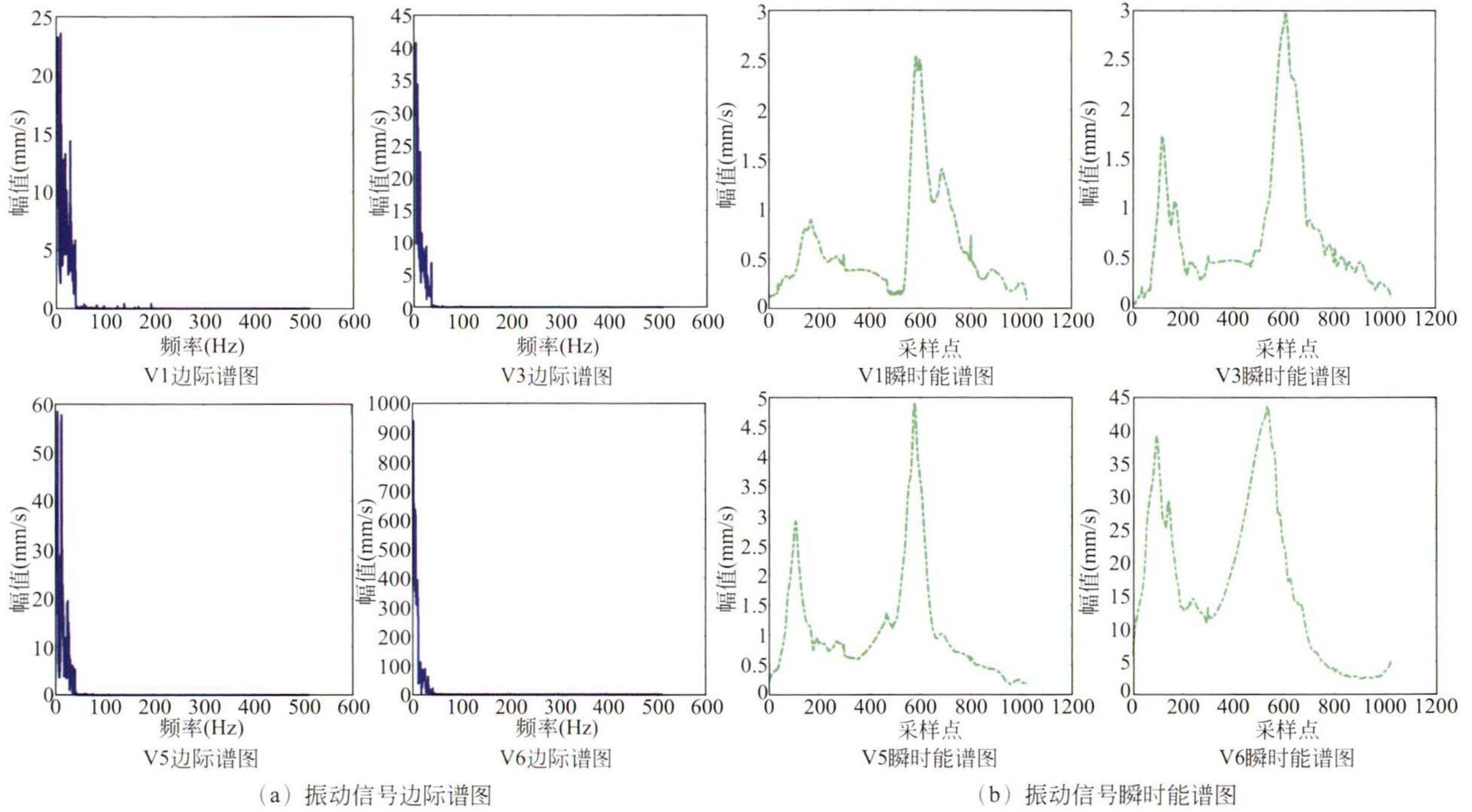


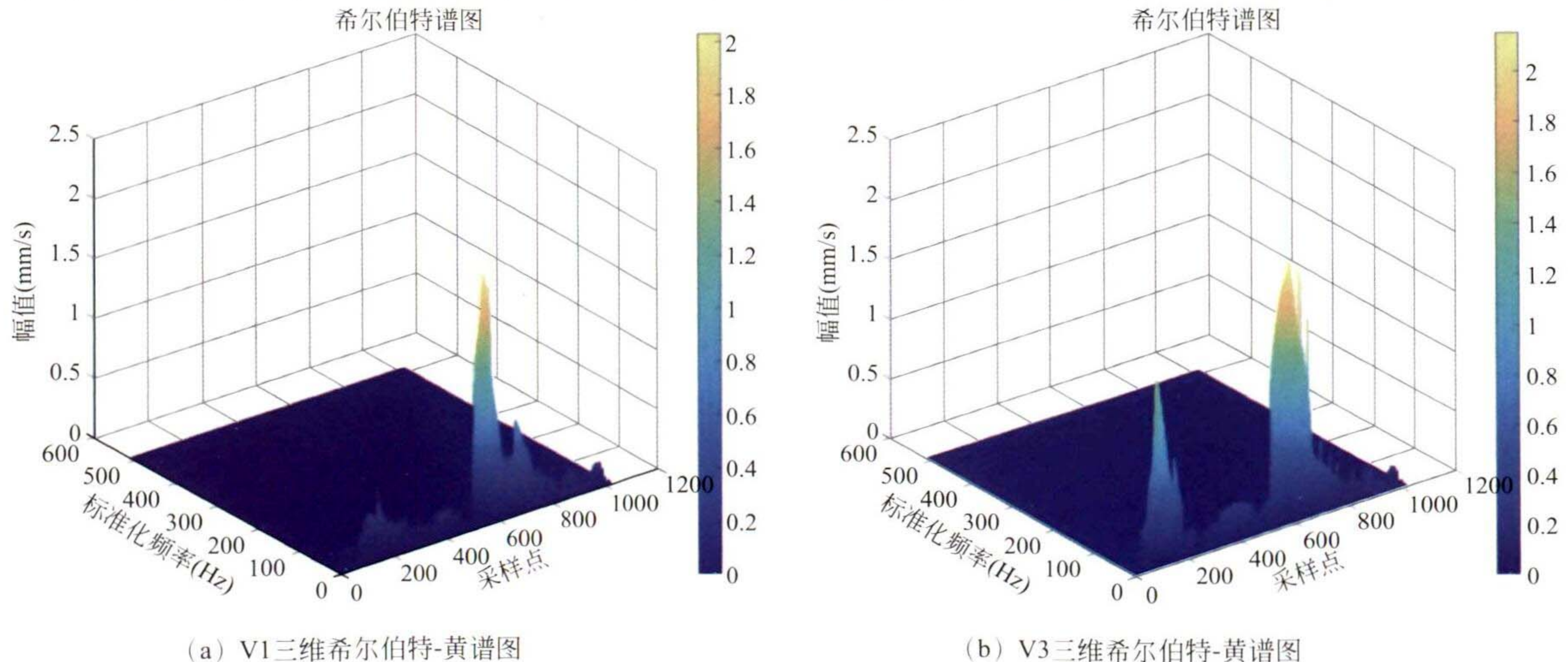
图 11 振动信号边际谱图和瞬时能谱图

Fig. 11 Marginal and instantaneous energy spectra of vibration signals

2.4.4 三维希尔伯特谱

图 12 是一个三维的希尔伯特频谱图，其中 X、Y、Z 轴分别代表采样点、频率和能量。该图直观地显示了能量在时间和频率上的分布，应特别注意能量的峰值和突然变化。与傅里叶频谱相比，HHT 的离散化反映了由于先验函数的存在，不会出现傅里叶变换等窗

口增加引起的空间谱值的连续分布。瞬时能量峰值对应于波形的最大振幅。总体来看，随着震源距增加，幅值整体呈下降趋势。能量主要分布在 0~100Hz，在时间点上主要分布于 0~0.4s 和 0.4~0.7s，随着震源距的增加，能量在频率上分散，在时间上集中，这与瞬时能谱图和边际谱图结果一致。



(a) V1 三维希尔伯特-黄谱图

(b) V3 三维希尔伯特-黄谱图

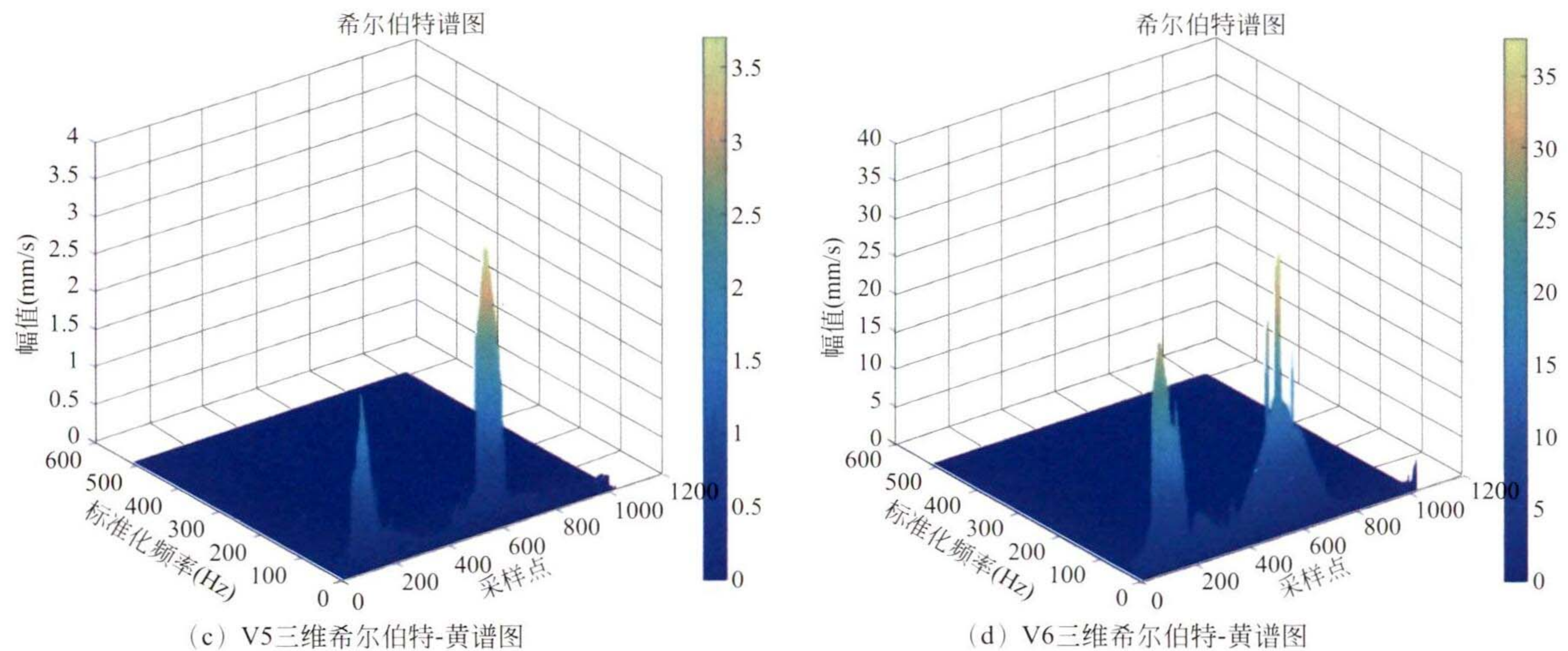


图 12 三维希尔伯特-黄谱图

Fig. 12 Three-dimensional Hilbert-Huang spectrum

3 讨 论

3.1 CO₂ 热冲击破岩致裂机理研究与钻爆法对比

如图 13 所示, 试验后取出试样, 观察裂缝形态发现, 除了高能气体泄出产生径向主裂隙、裂隙分叉、表面脱落以外在试样的 3 个面上还出现了环状裂隙。在试样损伤中, 环向裂隙的直径较小, 在损伤面积中占极少部分。CO₂ 相变产生的应力波由孔壁传播至试样表面, 此过程中应力波在不断压缩试验表面, 由于遇到自由面存在波阻抗不同, 应力波发生反射, 形成反向的拉伸应力波, 会对表面的岩石产生拉伸应力。而岩石的抗拉强度要远低于其抗压强度, 因此极易在表面形成破坏, 但由于能量在不断地衰减, 这种破坏仅存在于岩石接近表面的区域, 由中心向外围形成片落破坏产生环形裂纹。为了最大限度的还原现场破岩, 基于现场破岩的步骤设计模拟试验, 在此试验中致裂筒尺寸与试样接近存在尺寸效应^[29-30]。

目前, 在传统钻爆法中主要使用爆破应力波和爆破气体的联合作用理论解释破岩机理。联合作用理论认为爆破引起的应力波的作用是一种动态作用, 被认为是岩石破裂的主要引发剂。爆破气体的作用被认为是一种准静态作用, 它进一步扩大了由爆破引起的应力波形成的一些裂缝。通过对比 CO₂ 热冲击破岩与钻爆法发现 CO₂ 热冲击属于物理变化, 爆破产物只含无毒的二氧化碳气体, 传统岩石乳化炸药爆破属于化学变化, 爆炸过程中生成大量 CO、NO、NO₂、N_xO_y 和硫氧化物等有毒有害气体^[31]。

从能量计算和振动测量结果来看, CO₂ 热冲击破岩能量密度低且振动弱, 适合在城市公共工程等敏感区域施工使用。

如图 14 所示为两发致裂管的破岩效果图, 从钻孔平面看来, 在暴孔周围形成环向裂隙, 裂隙宽度在 1~10mm; 在靠近自由面一侧碎石并发生崩落, 同时产生了沿节理方向裂隙和水平裂隙, 裂隙宽度在 10~40mm。根据试验压力曲线和裂隙分布特征提出超临界 CO₂ 热冲击破岩 HIG 模型, 在模型中 H 指热源加热(Heating), I 代表冲击(Impact), G 代表气楔作用(Gas wedge)。热源加热过程中, 聚能剂提供热量的过程重点关注加热效率和药量是否足量, 加热过程由初始气压至泄出气压, 由薄弱环节厚度控制。压力瞬间泄出后, 产生冲击波作用于孔壁, 产生初始裂隙, 冲击波遇到加载板后反射作用产生块体崩落和环向裂隙。冲击波产生初始裂隙后, 气楔作用是造成裂隙扩展、裂隙分叉的主要诱因。加热后的高压气体泄出后, 作用于初始裂隙中, 使裂隙扩展, 在遇到结晶体石发生裂隙弯曲和分叉。如图 15 所示, 试样可以分为粉碎区域、裂隙区域和振动影响区域, 气楔作用于初始裂隙完成裂隙扩展, 裂隙数量取决于初始裂隙数量。

3.2 CO₂ 热冲击破岩能量计算

萨道夫斯基公式是由前苏联科学院地球物理研究所的 M. A. 萨道夫斯基等通过研究集中药包的爆破地震效应, 按照大量实测数据和相似律原理得到的经验公式^[32]

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (8)$$

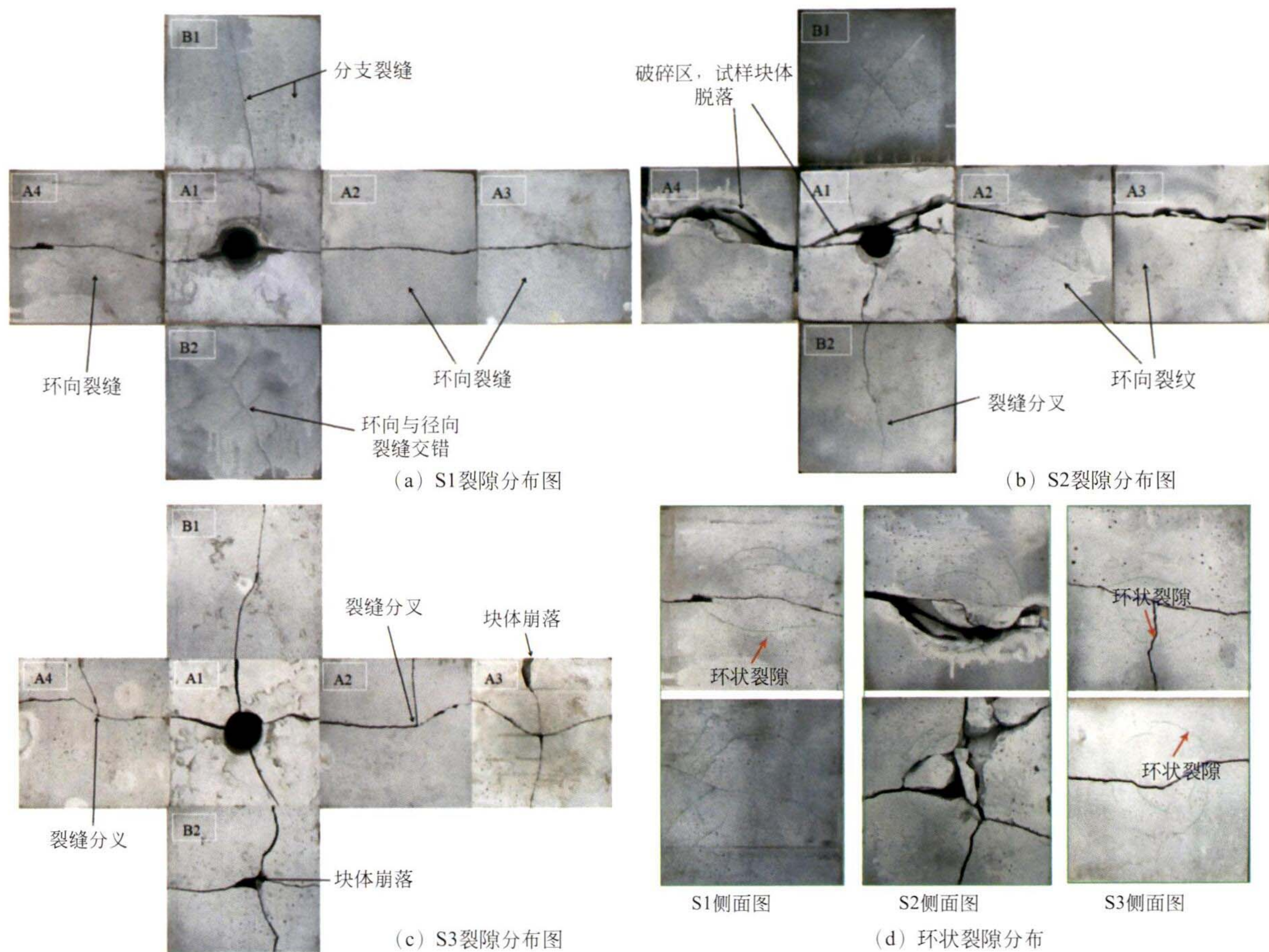


图 13 试样裂隙图

Fig. 13 Specimen fracture diagram

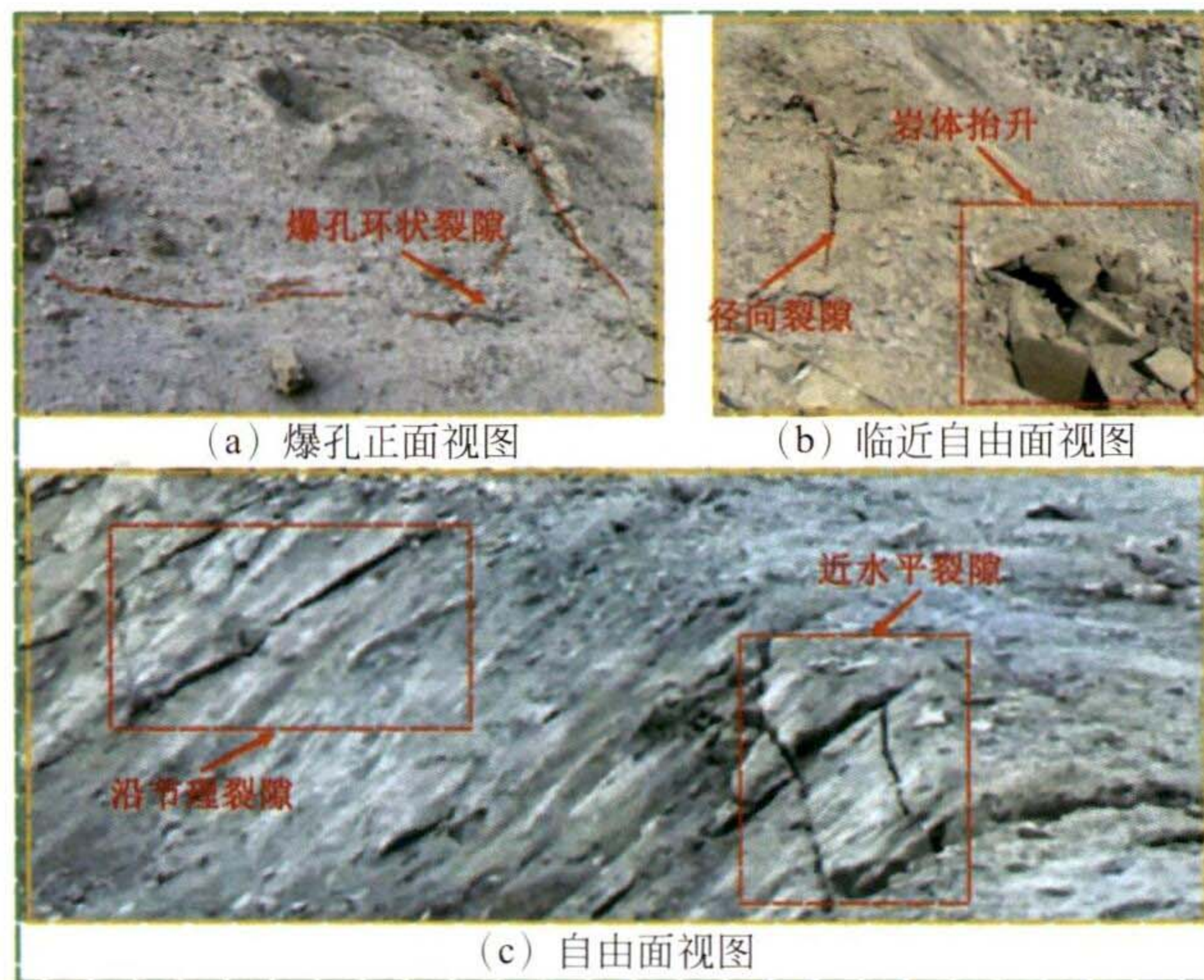


图 14 现场破岩裂隙分布示意图

Fig. 14 Schematic diagram of the distribution of rock-breaking fissures on site

式中： v 为质点振动速度，cm/s； K 为与爆破场地条件有关的参数，无量纲； Q 为单段装药量，kg； R 为测点到药包中心的距离，m； α 为与地质条件有关的系数。《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》(DT/L 5389-2007)^[33] 和相关学者考虑高程对振

动速度的影响，提出爆破振动速度公式为：

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H} \right)^\beta \quad (9)$$

式中： H 为起爆点至测点的高程差，m； β 为与高程有关的影响系数。

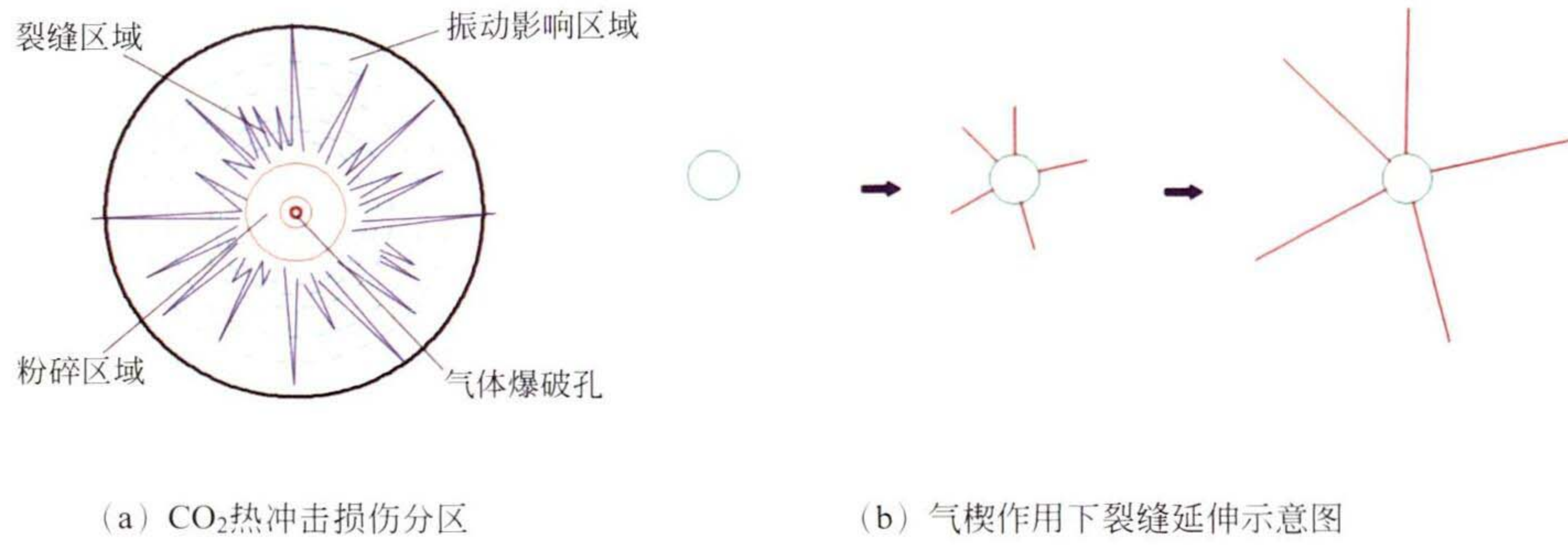


图 15 CO₂ 热冲击致裂原理示意图

Fig. 15 Schematic diagram of CO₂ thermal shock fracturing principle

根据表 3 和工程实况，当地地表高风化砂岩的强度在 20MPa 左右，属于软岩 K 值取 250~350， α 值取 1.8~2.0， β 取值为 0.92，可计算出 Q 的取值区间。

通过计算得到：600mm 致裂管药量估值区间为 173.244~236.157g。

根据计算结果发现 600mm 致裂管 TNT 当量为 179.674g，很明显处于振动能量的药量区间之内，说明使用式(2)计算干冰致裂管能量是合理的。可以通过药量估计振动速度来判断对建筑物的影响。

表 3 岩性与 K 值和 α 值之间的关系
Table 3 Relationship between lithology and K and α values

岩性	K	α
硬岩	50~150	1.3~1.5
中硬岩	150~250	1.5~1.8
软岩	250~350	1.8~2.0

3.3 基岩振动损伤与边坡振动安全评价

在 CO₂ 热冲击破岩中确定与自由面之间的合适距离对于取得最佳破岩效果和保证不产生飞石具有重要意义。在传统爆破对于基岩的损伤的研究中，通过大量的工程实践获得了计算公式^[34]在爆源的近中区，岩体主要受爆炸冲击波和应力波的作用。确定波动问题下基岩开裂的爆破振动安全判据的理论依据是应力波理论：根据岩石抗拉强度反求临界振动速度和根据岩石拉伸破坏的极限应变值反求临界振动速度。

在平面波条件下有

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (10)$$

$$\sigma = \rho C_p v \quad (11)$$

式中： ε 为岩石的应变(无量纲)； σ 为应力波作用下岩石中的应力，MPa； E 为岩石弹性模量，MPa； ρ

为岩石的密度，kg/m³； C_p 为岩石的纵波速度，m/s； v 为质点峰值振动速度，m/s。

于是，可推得

$$[PPV] = C_p [\varepsilon] = C_p \frac{[\sigma_t]}{E} \quad (12)$$

式中： $[PPV]$ 为允许的质点峰值振动速度，mm/s， $[\varepsilon]$ 为允许应变，无量纲； $[\sigma_t]$ 为岩石的允许抗拉强度，MPa。可见，质点峰值振动速度与岩体的动应变或动应力间存在对应关系。因此，根据岩体的动力强度或极限拉伸应变值，就可确定允许的质点峰值振动速度门槛值。国内外学者通过爆前爆后岩体中新增裂隙调查、声波对比测试等手段，提出了多种基岩开裂的质点峰值振动速度判据：Holmberg 等^[35]认为硬基岩的质点峰值振动速度安全上限为 700~1000mm/s。根据实测的边坡处振动速度峰值为 V2 的 3.489mm/s，远低于振动速度要求是绝对安全的。

如图 16 所示为振动速度随距离衰减曲线，通过曲线拟合发现衰减曲线符合乘幂函数，对于边坡的安全评估应该重点关注原岩损伤，通过频谱分析获得了振动主频率，结合最大振动速度峰值可以计算得到结构的最大振动位移^[36]，其计算公式为：

$$S = \frac{v}{2\pi f} \quad (13)$$

式中： S 为最大振动位移，mm； v 为最大振动速度峰值，mm/s； f 为振动主频率，Hz。为了控制位移需要降低振动速度峰值和提高主频率。在本次测试中距离震源最近的传感器 V6 的振动速度峰值最高且主频率最低。因此该点的振动位移最大。第一发破岩的振动主频率为 24.9Hz，振动速度峰值为 32.545mm/s。计算所得破岩的振动最大位移为：0.208mm。通过监测获得的振动速度峰值和频谱分析获得的振动主频率计算最大振动位移可以更加直接的评价边坡支护结构安全。

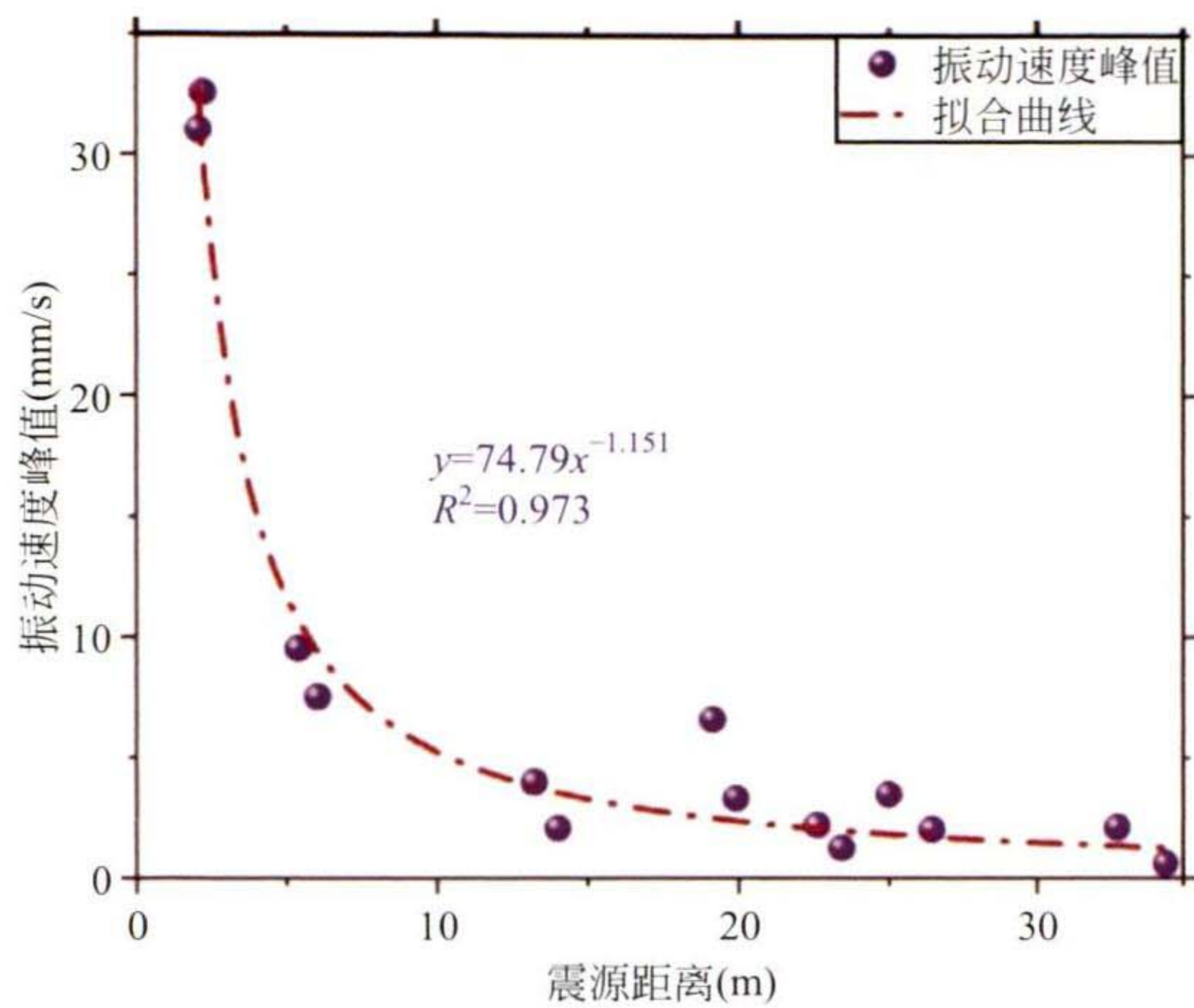


图16 振动速度峰值衰减曲线

Fig. 16 Vibration velocity peak decay curve

4 结 论

本文通过真三轴CO₂热冲击致裂实验和现场测试获得压力曲线、试样裂隙分布、现场振动速度曲线和现场岩体破坏特征。通过分析压力曲线和裂隙扩展特征分析致裂原理，同时使用希尔伯特黄变换提取振动特征，评价破岩现场边坡结构安全性，获得主要结论如下。

(1) CO₂热冲击破岩诱发振动速度在6m时即降到了30mm/s左右(V6)，远低于爆破振动安全允许标准要求，是一种更加安全可靠的破岩技术。

(2) 传统CO₂相变致裂能量计算公式同样适用于CO₂热冲击破岩技术，通过对照发现，致裂能量的TNT当量适用于萨道夫斯基公式，可以在现场工程中应用萨道夫斯基公式预测波速从而进行现场安全评估。

(3) CO₂热冲击破岩引发振动频率主要分布于1~100Hz且接近炸药振动的主要频率分布，通过计算最大位移更加直接评价边坡结构安全。

(4) CO₂热冲击破岩可以分为三个阶段，一是高压CO₂气体冲击孔壁产生应力波，形成初始裂纹；二是应力波反射作用的过程，产生环状裂纹和表面脱落；三是气楔作用过程，初始裂纹不断扩展延伸。

参 考 文 献

- [1] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 隧道爆破近区爆破振动测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 335-340 (Fu Hongxian, Zhao Yong, Xie Jinshui, et al. Study of blasting vibration test of area near tunnel blasting source [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 335-340 (in Chinese))
- [2] 吕国鹏, 周传波. 隧道断层带注浆加固围岩体爆破动力损伤特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 2038-2047 (Lv Guopeng, Zhou Chuanbo. Damage

characteristics of grouted tunnel rock mass in fault zones induced by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(10): 2038-2047 (in Chinese))

- [3] 孙冰峰, 张顶立, 陈铁林, 等. 下穿隧道爆破施工引起的振动对既有地铁车站人员舒适性的影响[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(2): 81-87 (Sun Bingfeng, Zhang Dingli, Chen Tielin, et al. Effect of vibration caused by blasting construction of undercrossing tunnel on comfort of personnel in existing metro station [J]. China Railway Science, 2019, 40(2): 81-87 (in Chinese))
- [4] 管晓明, 聂庆科, 李华伟, 等. 隧道爆破振动下既有建筑结构动力响应及损伤研究综述[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增1): 151-158 (Guan Xiaoming, Nie Qingke, Li Huawei, et al. Research overview on dynamic response and damage of existing structure under tunnel blasting vibration [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 151-158 (in Chinese))
- [5] Gao F, Tang L H, Zhou K P, et al. Mechanism analysis of liquid carbon dioxide phase transition for fracturing rock masses[J]. Energies, 2018, 11(11): 2909
- [6] Lu T K, Wang Z F, Yang H M, et al. Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 300-312
- [7] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994, 11(3): 72-74
- [8] Singh S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305-311
- [9] R. 罗伯茨, 梁艺鹤, 李林. 劈裂锥破岩技术的新突破[J]. 国外金属矿山, 2002(3): 59-60
- [10] B. P. 米克, J. D. 沃森, C. 扬第三, 等. 贯通式锥形裂隙与机械破碎相结合的破岩新方法[J]. 国外金属矿山, 1996(2): 19-24
- [11] 孙可明, 王金彧, 辛利伟. 超临界CO₂气爆致裂爆生气体压力沿破裂面变化规律实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(4): 693-699 (Sun Keming, Wang Jinyu, Xin Liwei. Experimental study of variation pattern of gas pressure from explosion along fracture surface in supercritical CO₂ gas explosion [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(4): 693-699 (in Chinese))
- [12] 曾范永, 李成全, 孙可明, 等. 气爆对煤体渗透性影响的实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(2): 35-38 (Zeng Fanyong, Li Chengquan, Sun Keming, et al. Influence of gas explosion on permeability of coal body [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(2): 35-38 (in Chinese))
- [13] Hu S B, Pang S G, Yan Z Y. A new dynamic fracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide [J]. International Journal of Fracture, 2019, 220(1): 99-111
- [14] 颜正勇, 胡少斌, 卞怡, 等. 干冰粉气动压裂混凝土质量比实验研究[J]. 工程爆破, 2019, 25(5): 14-18 (Yan Zhengyong, Hu Shaobin, Bian Yi, et al. Experimental study on the mass ratio of dry ice powder pneumatic fracturing concrete [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5): 14-18 (in Chinese))
- [15] 孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 等. 超临界CO₂气爆煤体致裂规律模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 501-506

- (Sun Keming, Xin Liwei, Wang Tingting, et al. Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO₂ explosion [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 501-506 (in Chinese))
- [16] 舒大强, 李小联, 占学军, 等. 龙滩水电工程右岸高边坡开挖爆破震动观测与分析[J]. 爆破, 2002, 19(4): 65-67 (Shu Daqiang, Li Xiaolian, Zhan Xuejun, et al. Observation and analysis of blasting vibration on the right bank's high slope of Longtan Hydropower project [J]. Blasting, 2002, 19(4): 65-67 (in Chinese))
- [17] 谭文辉, 璩世杰, 毛市龙, 等. 边坡爆破振动高程效应分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 619-623 (Tan Wenhui, Qu Shijie, Mao Shilong, et al. Altitude effect of blasting vibration in slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 619-623 (in Chinese))
- [18] Monjezi M, Hasanipanah M, Khandelwal M. Evaluation and prediction of blast-induced ground vibration at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network [J]. Neural Computing and Applications, 2013, 22: 1637-1643
- [19] Kumar S, Mishra A K. Reduction of blast-induced ground vibration and utilization of explosive energy using low-density explosives for environmentally sensitive areas [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 655
- [20] 陈冠, 李启月, 刘小雄, 等. 液态 CO₂ 相变破岩振动信号能量分布特征 [J]. 爆破, 2018, 35(2): 155-163 (Chen Guan, Li Qiyue, Liu Xiaoxiong, et al. Research on energy distribution characters about liquid CO₂ phase-transition broken rock vibration signal [J]. Blasting, 2018, 35(2): 155-163 (in Chinese))
- [21] 刘小雄, 李启月, 冯国伟, 等. 液态二氧化碳相变破岩振动能量分布研究 [J]. 矿冶工程, 2018, 38(3): 5-10 (Liu Xiaoxiong, Li Qiyue, Feng Guowei, et al. Vibrational energy distribution of rock broken by phase transition of liquid carbon dioxide [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(3): 5-10 (in Chinese))
- [22] Li B L, Wang E Y, Hu S B, et al. A study of vibration velocity attenuation induced by pneumatic rock breaking with carbon dioxide ice powder for safety assessment [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54: 6481-6493
- [23] Ye W, Lu Y, Xi L Z, et al. Vibration effect induced by rock breaking technology based on dry ice and energy-gathered agent in trench excavation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2148: 012023
- [24] 李启月, 刘小雄, 吴正宇, 等. 液态 CO₂ 相变破岩技术在地铁基坑开挖中的应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 163-169 (Li Qiyue, Liu Xiaoxiong, Wu Zhengyu, et al. Application of liquid CO₂ phase change rock breaking technology in metro foundation pit excavation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 163-169 (in Chinese))
- [25] 刘光辉, 王海亮. 二氧化碳致裂技术的应用研究 [J]. 公路, 2018, 63(12): 72-75 (Liu Guanghui, Wang Hailiang. Application of carbon dioxide fracturing technology [J]. Highway, 2018, 63(12): 72-75 (in Chinese))
- [26] 朱宽, 钟冬望, 周桂松. 二氧化碳膨胀爆破一次性致裂管性能研究与应用 [J]. 爆破, 2022, 39(2): 133-139 (Zhu Kuan, Zhong Dongwang, Zhou Guisong. Performance research and application of carbon dioxide expansion blasting one-time cracking pipe [J]. Blasting, 2022, 39(2): 133-139 (in Chinese))
- [27] Wang B, Qiu W Y, Liu S D, et al. Supercritical CO₂ source for underground seismic exploration [J]. Journal of King Saud University-Science, 2020, 32(2): 1731-1737
- [28] Lei Y G, He Z J, Zi Y Y, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(5): 2280-2294
- [29] 巫绪涛, 相福斌, 张瑞乾, 等. 尺寸效应对岩石动态力学行为的影响研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2021, 44(10): 1379-1384 (Wu Xutao, Xiang Fubin, Zhang Ruiqian, et al. Study on the influence of size effect on dynamic mechanical behavior of rock [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2021, 44(10): 1379-1384 (in Chinese))
- [30] 伍法权, 乔磊, 管圣功, 等. 小尺寸岩样单轴压缩试验尺寸效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(5): 865-873 (Wu Faquan, Qiao Lei, Guan Shengong, et al. Uniaxial compression test study on size effect of small size rock samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(5): 865-873 (in Chinese))
- [31] 陶明, 赵华涛, 李夕兵, 等. 液态 CO₂ 相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析 [J]. 爆破, 2018, 35(2): 41-49 (Tao Ming, Zhao Huatao, Li Xibing, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO₂ phase change fracturing and explosive rock fracturing [J]. Blasting, 2018, 35(2): 41-49 (in Chinese))
- [32] Yang Y B, Hung H H, Chang D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(4): 263-278
- [33] DL/T 5389—2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2007 (DL/T 5389—2007 Construction technical specifications on rock-foundation excavating engineering of hydraulic structures [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007 (in Chinese))
- [34] Mojtabai N, Beattie S G. Empirical approach to prediction of damage in bench blasting [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A, Mining Technology, 1996, 105(A1-80): 75-80
- [35] Holmberg R, Persson P A. The Swedish approach to contour blasting [C] // Proceedings of the 4th Conference on Explosive and Blasting Technique. New Orleans: ISEE, 1978
- [36] Jiang L C, Hu L Q, Lai X Y. Investigation on the threshold control of safety blasting vibration velocity for the extraction of complicated orebody under railway [J]. Mining Science and Technology (China), 2011, 21(2): 169-174

王小飞(1995—),男,博士研究生。主要从事高压水热冲击破岩方面的研究。

胡少斌(1990—),男,博士,副教授。主要从事 CO₂ 热冲击破岩和高压水热冲击破岩方面的研究。

王恩元(1968—),男,博士,教授。主要从事冲击地压监测预警方面的研究。