

干冰含量对乳化炸药水下及空中爆炸能量释放特性的影响

王俊喆¹, 汪泉¹, 黄瑞卿², 黄小明², 李雪交¹, 杜艳春², 李烨², 李瑞¹

(1.安徽理工大学 化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001; 2.安徽海螺集团有限责任公司, 安徽 芜湖 241004)

摘要: 为探究干冰部分替代乳化炸药用于矿山破岩的可行性, 制备了干冰含量 0%~50% 的复合药包, 分别开展空中爆炸冲击波测试与水下爆炸能量测试实验, 系统研究了干冰含量对复合药包爆炸能量输出特性的影响规律。空中爆炸结果表明, 随着干冰含量增加, 峰值超压、正压作用时间和冲量均呈单调下降趋势, 50% 干冰含量时三者降幅分别为 63.5%、13.7% 和 73.9%。水下爆炸结果表明, 比冲击波能、比气泡能和总能量均随干冰含量增加而降低, 50% 含量时降幅分别为 59.2%、39.2% 和 48.2%; 能量分配向气泡能方向偏移, 气泡能占比由 55.1% 升至 64.7%。研究发现, 水下冲击波能降幅显著大于空中超压降幅, 这源于干冰升华形成的气层在水介质中产生的额外声阻抗失配耗散。气泡能降幅相对较小, 主要得益于干冰升华产生的 CO₂ 气体对气泡脉动的补偿效应, 有利于破岩所需的气体膨胀做功。综合考虑能量保持率与成本, 推荐干冰替代比例为 20%~30%, 此时总能量保留约 70%~80%, 可在满足一般矿山破岩需求的前提下降低材料成本实现显著的经济效益。

关键词: 干冰; 乳化炸药; 水下爆炸; 协同爆破; 能量输出

中图分类号: O383.1

文献标识码: A

引言

乳化炸药是目前矿山爆破工程中应用最广泛的破岩能源, 其成本通常占爆破总费用的 40%~60%^[1-3]。在矿山企业普遍追求降本增效的背景下, 如何在保证破岩效果的前提下有效控制炸药成本, 已成为工程爆破领域的重要研究方向。

围绕乳化炸药的爆炸能量输出特性, 国内外学者开展了大量研究工作。在水下爆炸能量测试方面, 郑欣颖等^[4]; 刘磊等^[5]探讨了深水静压下化学敏化乳化炸药的爆炸能量输出规律; 李雪交等^[6]研究了含能微球敏化乳化炸药的水下爆炸能量输出特性; 史锐等^[7]系统分析了炸药爆炸能量的水中测试方法; Wang 等^[8]研究了影响乳化炸药水下爆炸能量输出的关键因素。在炸药改性方面, 钱海等^[9]研究了铝粉含量和粒径对乳化炸药作功能力的影响; Liu 等^[10]和 Chen 等^[11]探讨了铝粉含量对乳化炸药爆轰与能量输出特性的影响规律; Yang 等^[12]研究了 RDX 粉末对乳化炸药爆轰特性的影响; 程扬帆等^[13]探索了氢化镁储氢型乳化炸药的爆炸特性; Fan 等^[14]开展了岩石乳化炸药 TNT 当量系数的实验研究。此外, 部分学者关注了特殊环境下乳化炸药的性能变化, 刘赛等^[15]研究了低温环境的影响, 林谋金等^[16]探讨了水浴加热对爆炸威力的影响, Wang 等^[17]分析了高温降解乳化炸药的爆炸性能, 王尹军等^[18]研究了密度对压力减敏的影响。上述研究主要围绕炸药本身的能量提升、改性或特定条件下的性能演化展开, 为乳化炸药的工程应用提供了重要基础数据。

降低爆破成本最直接的途径是减少单位矿石的炸药消耗量。传统做法包括优化孔网参数、改善装药结构、采用现场混装炸药车等, 但这些措施受限于岩体条件和施工工艺, 降本空间有限^[19]。近年来, 将廉价惰性材料与炸药复合以替代部分炸药的思路逐步受到关注, 其核心逻辑在于: 以廉价材料替代等质量炸药后, 若保留的能量足以维持破岩所需的基本功, 即可在保证工程效果的同时实现成本优化。在替代材料选择方面, CO₂ 相变致裂技术已受到广泛关注^[20], 其基本原理是利用液态 CO₂ 相变产生高压气体致裂岩体。然而, 该技术本质上是物理致裂过程, 能量释放速率远低于炸药爆轰, 破岩效率有限^[21], 目前, 将干冰直接掺入炸药中参与爆轰过程的复合技术研究极为有限, 干冰对炸药水下及空中爆炸能量释放特性的影响规律尚不清楚。干冰 (固态 CO₂) 具有较高的升华潜热 (约 571 kJ/kg) 和显著的气化体积膨胀比, 若将其引入药包中替代部分

收稿日期:

基金项目: 安徽省高校重大项目 (2024AH040070)

作者简介: 王俊喆 (2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药-干冰复合结构爆炸能量输出特性研究.E-mail:1696574302@qq.com

通讯作者: 汪泉 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事爆炸理论与技术研究.E-mail:lab206@126.com

乳化炸药,一方面可利用其价格优势降低材料成本;另一方面,干冰在爆轰高温下瞬时升华产生的大量 CO_2 气体,可能对气泡脉动阶段的膨胀做功形成补偿,从而部分弥补因炸药减少导致的能量损失^[21]。

鉴于此,本研究制备了不同干冰含量(0%~50%)的干冰-乳化炸药复合药包,分别开展水下爆炸能量测试和空中冲击波超压对比实验,系统考察干冰替代比例对复合药包比冲击波能、比气泡能及总能量的影响规律;结合水下与空中爆炸结果的对比分析,揭示干冰对冲击波衰减的物理机制;最终基于能量保持率与成本分析,给出合理的干冰替代比例范围,为干冰-乳化炸药复合药包在矿山爆破中的工程应用提供基础数据与理论依据。

1 实验

1.1 实验材料与样品制备

1.1.1 实验材料

实验所用乳化炸药由淮南舜泰化工有限责任公司提供,为现场混装用乳胶基质,密度 1.15 g/cm^3 ,爆速 4800 m/s ,爆热 3.211 MJ/kg 。干冰为工业级块状产品(CO_2 含量 $\geq 99.5\%$),储存于专用保温箱中。使用前取出,在低温环境下用木槌破碎,人工挑选粒径 $3\sim 5 \text{ mm}$ 的颗粒,即刻密封于保温容器中备用,从破碎到完成装药的时间控制在 3 min 以内,以最大限度减少升华损失。

1.1.2 复合药包制备

复合药包采用乳化炸药球体与干冰颗粒复合组装的方式制备。按设计总质量(空中爆炸组 40 g ,水下爆炸组 30 g)用电子天平(精度 $\pm 0.01 \text{ g}$)称取乳化炸药,在专用模具中压制成球体。将块状干冰从保温箱中取出,在 -10°C 环境下用木槌破碎,人工挑选粒径 $3\sim 5 \text{ mm}$ 的颗粒。将乳化炸药球体置于预冷至 $0\sim 4^\circ\text{C}$ 的不锈钢托盘中,随后将干冰颗粒均匀撒布于球体外表面并轻轻压实,使干冰颗粒形成连续包裹层。

将组装好的复合药包用保鲜膜(缠绕3层)紧密包裹,确保干冰层与炸药球体保持紧密接触,用扎带封口。每组配方制备3发平行试样,测试结果取平均值。纯乳化炸药对照组采用相同制备流程(仅不包裹干冰)。所有药包从制备完成到起爆的时间间隔控制在 5 min 以内,以减小干冰升华损失。采用8号工业电雷管实施中心起爆。

1.2 实验装置与测试方法

1.2.1 空中爆炸冲击波测试

空中爆炸测试采用 40g 球形装药,药包悬挂于距地面 1.5 m 高度处,以避免地面反射波对直达冲击波的干扰。药包质量设计如表1,药包冲击波压力由布置于距爆心 0.7m 处的 CY-YD-205 型自由场压力传感器测量,传感器感应面与爆心保持同一水平高度,确保测试数据的准确性。使用1发8号数码电子雷管实施中心起爆,压力信号由 LECROY WP403053 型数字示波器记录,采样率设为 1 MHz ,记录时长 50 ms ,以完整捕捉冲击波到达后的压力衰减全过程。每组配方重复测试3次。

表1 空中爆炸不同干冰含量的复合药包组分设计

Table 1 Component Design of Composite Charges with Different Dry Ice Contents for Air Explosion

Sample	Emulsion explosive / %	Dry ice / %	Charge mass / g
A ₀	100	0	40
A ₁	100	0	36
A ₂	100	0	32
A ₃	100	0	28
A ₄	100	0	24
A ₅	100	0	20
B ₁	90	10	40
B ₂	80	20	40
B ₃	70	30	40
B ₄	60	40	40
B ₅	50	50	40

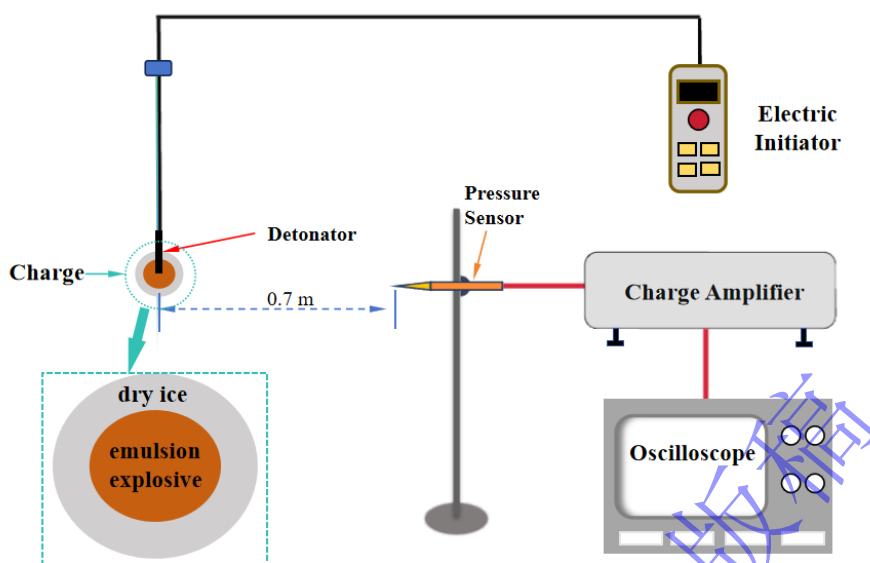


图 1 空中爆炸测试药包悬挂及传感器布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of charge suspension and sensor arrangement for air blast test.

1.2.2 水下爆炸实验

水下爆炸实验在钢制爆炸水池中进行（尺寸：直径 10 m×深度 7 m）。实验场地布置如图 2 所示。药包悬挂于水下 4m 深度处，药包几何中心与水面距离由尼龙绳精确控制。药包质量设计如表 2，分别在距药包中心 1.0 m 和 1.2 m 处各放置一枚水下压力传感器（KD2101L 型，扬州科动电子有限责任公司），传感器与药包中心位于同一水平高度。该双传感器配置一方面可验证测试结果的重复性，另一方面可观察冲击波传播过程中的能量衰减规律。传感器的灵敏度通过标准落锤装置进行标定。

起爆由 8 号工业电雷管从药包顶部垂直引爆。压力信号经传感器转换为电信号后，由 NUXI-1008 型高速数据采集仪（拓普）同步记录，采样率设为 5 MHz，记录时长 200 ms，以完整捕捉首次冲击波和后续气泡脉动全过程。每组配方重复测试 3 次，取平均值作为最终结果，以减少随机误差。

表 2 水下爆炸不同干冰含量的复合药包组分设计

Table 2 Component Design of Composite Charges with Different Dry Ice Contents for Underwater Explosion

Sample	Emulsion explosive / %	Dry ice / %	Charge mass / g
C ₀	100	0	30
C ₁	100	0	27
C ₂	100	0	24
C ₃	100	0	21
C ₄	100	0	18
C ₅	100	0	15
D ₁	90	10	30
D ₂	80	20	30
D ₃	70	30	30
D ₄	60	40	30
D ₅	50	50	30

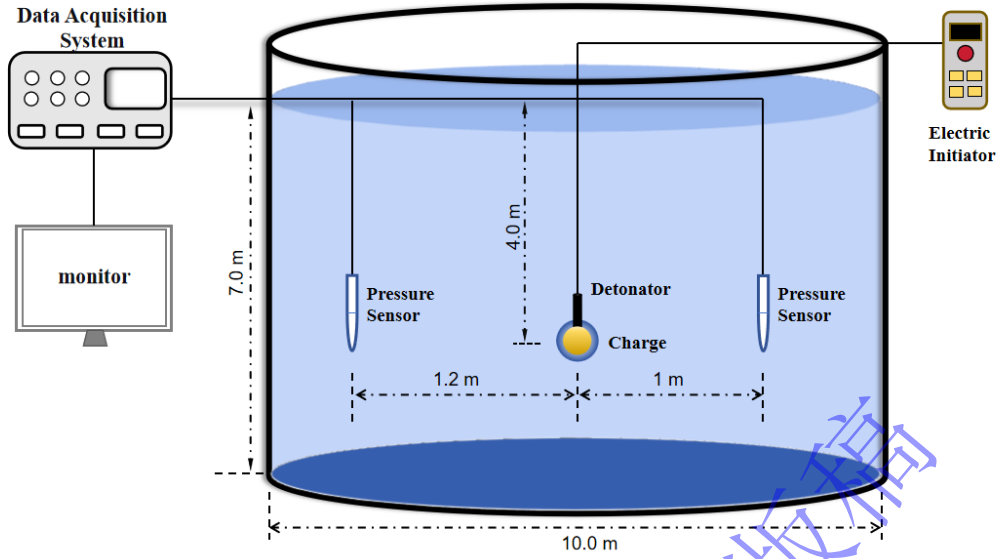


图2 水下爆炸实验场地布置及传感器测点分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of underwater explosion experimental layout and pressure sensor positions.

1.2.3 水下爆炸能量计算方法

水下爆炸能量由冲击波能和气泡能两部分组成，分别对应药包对水介质的瞬态冲击做功和气泡脉动做功。本研究基于 Cole 水下爆炸理论^[22]，根据实测压力-时程曲线计算各项能量参数。

比冲击波能 E_s 按式(1)计算：

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_0 C_0 W} \int_{t_0}^{t_0+6\theta} p^2(t) dt \quad (1)$$

式中： ρ_0 为水的密度，取 1000 kg/m^3 ； C_0 为水中声速，取 1482 m/s ； R 为测点距药包中心距离，m； W 为药包总质量，kg； t_0 为冲击波到达时刻，s； θ 为冲击波衰减时间常数，即压力由峰值 P_m 衰减至 P_m/e 所需的时间，s。积分上限取 $t_0+6\theta$ ，基于水下冲击波压力遵循指数衰减规律 $P(t) \propto e^{-(t/\theta)}$ ，理论分析表明该时间区间内包含冲击波总机械能的 99.99% 以上^[22]。

比气泡能 E_b 根据气泡脉动周期计算。水下爆炸后，爆轰产物以气泡形式在水中经历膨胀与收缩脉动，从起爆到气泡第一次收缩至最小体积所经历的时间定义为实测气泡脉动周期 t_b 。受水面大气压和药包入水深度影响，实测周期 t_b 需按式(2)修正为标准大气压下的等效周期 T_b ^[22]：

$$T_b = t_b \left(\frac{P_i + P_H}{P_0 + P_H} \right)^{5/6} \quad (2)$$

式中： P_i 为实测水面大气压，Pa； P_0 为标准大气压，取 101325 Pa ； H 为药包入水深度，m； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； P_H 为装药深度处总的静水压力，Pa。

修正后的等效气泡周期 T_b 与药包质量满足以下关系^[22]：

$$E_b = \frac{1}{8C^3 K_1^3 W} (\sqrt{1 + 4CT_b} - 1)^3 \quad (3)$$

总比爆炸能 E_t 按下式计算：

$$E_t = K_f (\mu \cdot E_s + E_b) \quad (4)$$

式中： K_f 为装药形状修正系数，对于球形或长径比 ≈ 1 的药包， $K_f=1$ ， μ 为冲击波损失系数，反映了冲击

波自药包表面传播至测点过程中的能量耗散, 其值由爆轰压力 P_{C-J} 按式(5)确定^[22]:

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-2} P_{c-j} - 6.5775 \times 10^{-5} P_{c-j}^2 + 1.2595 \times 10^{-7} P_{c-j}^3 \quad (5)$$

爆轰压力 P_{C-J} 由式(6)计算:

$$P_{c-j} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (6)$$

式中 ρ_0 为装药密度 (kg/m^3), D 为爆速 (m/s)。本实验所用乳化炸药 $\rho_0 = 1150 \text{ kg/m}^3$, $D = 4800 \text{ m/s}$, 代入式(5)和式(6)即可确定 μ 值。

2 结果与讨论

2.1 空中爆炸冲击波特性

表 3 为空中爆炸测试结果。A₀~A₅ 为纯乳化炸药药包, 其中 A₀ 总质量 40 g, A₁~A₅ 的质量分别为 36 g、32 g、28 g、24 g、20 g, 与含干冰药包 B₁~B₅ 中的乳化炸药质量一一对应。B₁~B₅ 为干冰-乳化炸药复合药包, 总质量均为 40 g, 干冰含量从 10% 逐级增至 50%。

表 3 不同干冰含量下空中爆炸冲击波参数对比 (含纯乳化对照组)

Table 3 Comparison of air blast parameters under different dry ice contents (with pure emulsion explosive control groups)

Group	P_m / KPa	$I^+ / \text{Pa} \cdot \text{s}$	t^+ / ms
A ₀	61.7091	13.2740	0.4836
A ₁	56.9935	12.4279	0.4678
A ₂	54.6350	11.3609	0.4535
A ₃	47.1081	9.9844	0.4498
A ₄	45.0552	9.4075	0.4426
A ₅	40.8065	7.1830	0.4350
B ₁	50.2108	11.6221	0.4535
B ₂	46.6214	9.3184	0.4425
B ₃	38.8059	6.3100	0.4350
B ₄	30.9253	6.0023	0.4268
B ₅	22.5241	3.4604	0.4175

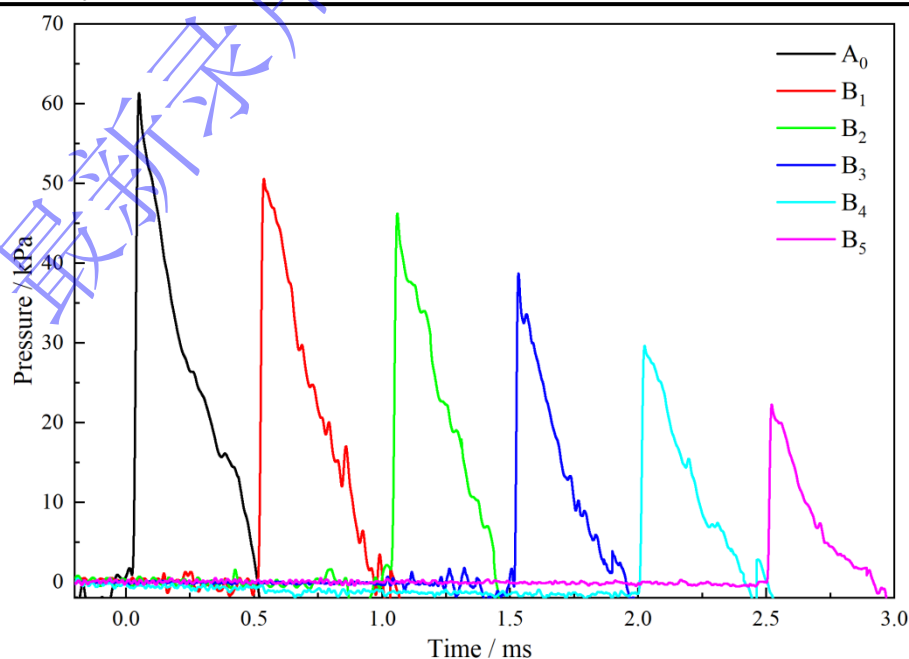


图 3 不同干冰含量下的空中爆炸压力时程曲线

Fig. 3 Pressure-time history curves of air blast for different dry ice contents

随着干冰含量从 0% 增至 50%，峰值超压 P_m 由 61.71 kPa 降至 22.52 kPa，降幅 63.5%；正压作用时间 t^+ 由 0.484 ms 缩短至 0.418 ms，降幅 13.7%；冲量 I^+ 由 13.27 Pa·s 降至 3.46 Pa·s，降幅高达 73.9%。三者的变化趋势均呈单调递减，且降幅差异显著：冲量降幅 > 峰值超压降幅 > 正压作用时间降幅。

峰值超压的下降是化学能降低、惰性稀释和热沉效应三方面共同作用的结果。首先，干冰替代了部分乳化炸药，单位质量药包中参与爆轰反应的活性物质减少，爆炸释放的化学能总量随之下降，爆热 Q 降低，冲击波初始阵面压力降低。其次，干冰本身不参与爆轰反应，相当于在药包中引入了惰性组分，降低了单位体积内的活性炸药浓度。更为关键的是第三方面——干冰的热沉效应：干冰在爆轰高温下瞬时升华，其升华潜热约为 571 kJ/kg，这一过程从爆轰产物中吸收大量热量，使爆轰产物的平衡温度 T 显著降低。爆速 D 与爆温 T 的 1/2 次方成正比，温度降低直接拉低爆速，而爆速的平方与爆压成正比，因此爆温的下降对峰值压力产生了放大性的削减效果。此外，干冰升华产生的 CO_2 气体在爆轰反应区内的存在，还可能通过稀释爆轰产物中的可燃组分进一步降低反应速率和能量释放速率。

正压作用时间 t^+ 随干冰含量增加而逐渐缩短。其物理机制可从冲击波动力学角度加以理解：正压作用时间本质上取决于冲击波阵面与爆轰产物内部稀疏波追赶之间的相对竞争。对于能量较高的药包，冲击波阵面以较高的超音速传播，稀疏波从爆轰产物中心向外追赶阵面所需时间较长，正压阶段得以维持较长时间。而当干冰含量增加时，爆轰产物初始温度和压力降低，冲击波阵面传播速度下降，更接近于声速，稀疏波追赶阵面的相对速度加快，正压阶段提前结束。另一方面，爆轰产物温度和压力的降低导致其膨胀驱动能力下降，气体在更短时间内完成膨胀减速并趋于停滞，向外推挤空气的能力随之减弱，这也是正压作用时间缩短的重要原因。

冲量 $I^+ = \int P(t)dt$ 综合反映了压力幅值与作用时间的共同贡献。本实验中，冲量降幅（73.9%）显著大于峰值超压降幅（63.5%）和正压作用时间降幅（13.7%），这是两者同步下降在积分运算中叠加所致。以 B_5 组为例，其峰值超压为 A_0 组的 36.5%，正压作用时间为 A_0 组的 86.3%，冲量仅为 A_0 组的 26.1%。

对比 A 组与 B 组数据可进一步揭示干冰的影响。当乳化炸药质量由 40 g 降至 20 g 时（ $A_0 \sim A_5$ ），峰值超压降幅为 33.9%；而当 B 组中乳化炸药质量由 36 g 降至 20 g 时（ $B_1 \sim B_5$ ），峰值超压降幅达 55.2%。在相同炸药质量下，含干冰药包的峰值超压均低于纯乳化药包，且差距随干冰含量增加而扩大。以 20 g 炸药为例， A_5 （纯乳化）峰值超压为 40.81 kPa， B_5 （20 g 炸药+20 g 干冰）仅为 22.52 kPa，降幅 44.8%。这表明干冰对冲击波的削弱不仅源于炸药质量的稀释，其热沉效应与惰性稀释对冲击波的耗散远超单纯减少炸药质量的影响。

综上所述，在空气自由场爆炸条件下，干冰的加入对药包的峰值超压、正压作用时间和冲量均产生显著的负面效应，且随干冰比例增加而持续加剧。其物理机制可能与干冰的惰性稀释、爆轰产物降温（热沉效应）及稀疏波提前追赶有关，三者共同构成从能量释放到冲击波传播的衰减过程。

2.2 水下爆炸能量输出特性

水下爆炸实验中，球形药包起爆后瞬时转化为水下冲击波与高温高压爆轰产物。其中，部分能量以冲击波形式向外传播，剩余能量则通过气泡脉动逐步释放。因此，可通过实测比冲击波能（ E_s ）、比气泡能（ E_b ）及总比爆炸能（ E_t ）来综合评价药包的水下做功能力。本实验测量了不同干冰质量分数下各组药包（总质量均为 30 g）在水下 1.0 m 和 1.2 m 测点处的冲击波压力-时程曲线，结果如图 4 所示。

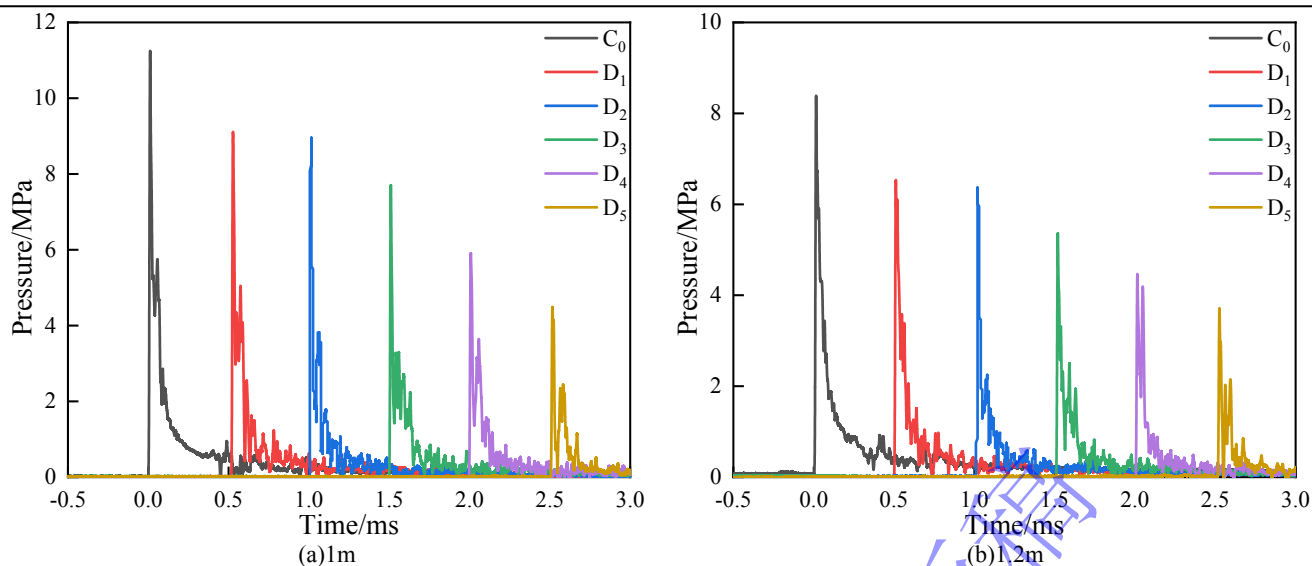


图4 不同干冰含量下的水下爆炸压力时程曲线

Fig. 4 Pressure-time history curves of underwater explosion for different dry ice contents.

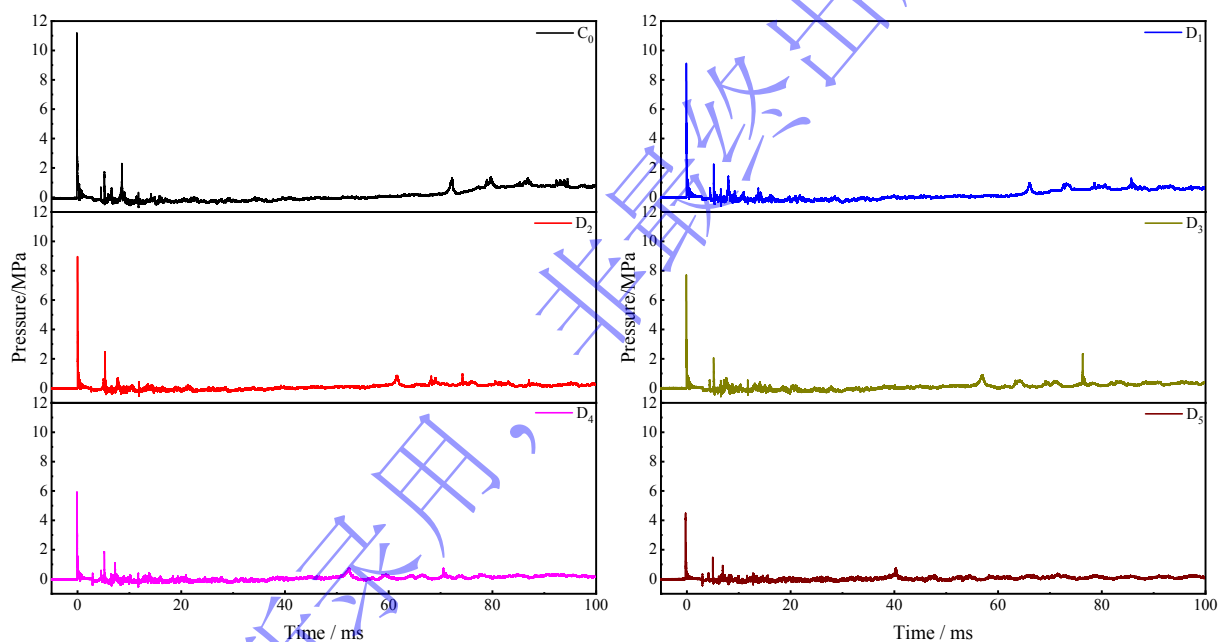


图5 不同干冰含量下 1.0 m 处水下爆炸压力时程曲线

Fig. 5 Pressure-time history curves of underwater explosion at 1.0 m for different dry ice contents.

由图4和图5可知,无论1.0 m还是1.2 m测点处,纯乳化炸药药包的冲击波峰值压力均为最大,且随干冰含量增加,各药包的峰值压力呈单调递减降趋势。这主要源于四方面因素的共同作用:首先,包覆于药球外部的干冰在爆轰高温下迅速升华,在炸药与水之间形成一层连续CO₂气层。由于CO₂气体的声阻抗远低于液态水,冲击波在穿过该气-水界面时发生显著的阻抗失配,引发强烈的反射与透射效应,部分能量被反射耗散,致使透射进入水体的冲击波能量显著降低。其次,同前述空中爆炸测试一致,峰值超压的下降是化学能降低、惰性稀释和热沉效应三方面共同作用的结果。

表 4 各组水下爆炸能量输出参数

Table 4 Energy output parameters of underwater explosion for each group

Group	R / m	$P_m / (MPa)$	$E_s / (MJ \cdot kg^{-1})$	$t_b / (ms)$	$E_b / (MJ \cdot kg^{-1})$	$E_t / (MJ \cdot kg^{-1})$
C_0	1.0	11.1208	0.8666	72.3119	1.6942	3.0721
	1.2	8.3146	0.8516	72.3365	1.6959	3.0499
C_1	1.0	10.3005	0.8380	70.0046	1.7076	3.0400
	1.2	8.1522	0.8275	69.9312	1.7022	3.0179
C_2	1.0	10.1650	0.8615	67.1179	1.6928	3.0626
	1.2	7.8849	0.8354	67.1108	1.6921	3.0204
C_3	1.0	8.5592	0.8355	64.3902	1.7077	3.0361
	1.2	6.4705	0.8459	64.4006	1.7015	3.0535
C_4	1.0	8.1086	0.8505	60.0018	1.6115	2.9638
	1.2	6.2988	0.8391	59.9687	1.6088	2.9430
C_5	1.0	8.0542	0.8224	57.5918	1.7097	3.0173
	1.2	6.2057	0.8227	57.5911	1.7096	3.0177
D_1	1.0	9.1167	0.6322	66.1953	1.4433	2.4485
	1.2	6.5364	0.6268	66.1966	1.4434	2.4400
D_2	1.0	8.9566	0.5537	63.4368	1.4287	2.3091
	1.2	6.3663	0.5297	63.4646	1.4306	2.2728
D_3	1.0	7.7063	0.5331	59.3425	1.3362	2.1838
	1.2	5.3662	0.5031	59.3361	1.3358	2.1357
D_4	1.0	5.9018	0.4687	55.1516	1.2510	1.9962
	1.2	4.4721	0.4446	55.0866	1.2465	1.9534
D_5	1.0	4.4929	0.3536	48.6591	1.0304	1.5926
	1.2	3.7160	0.3262	48.6572	1.0303	1.5490

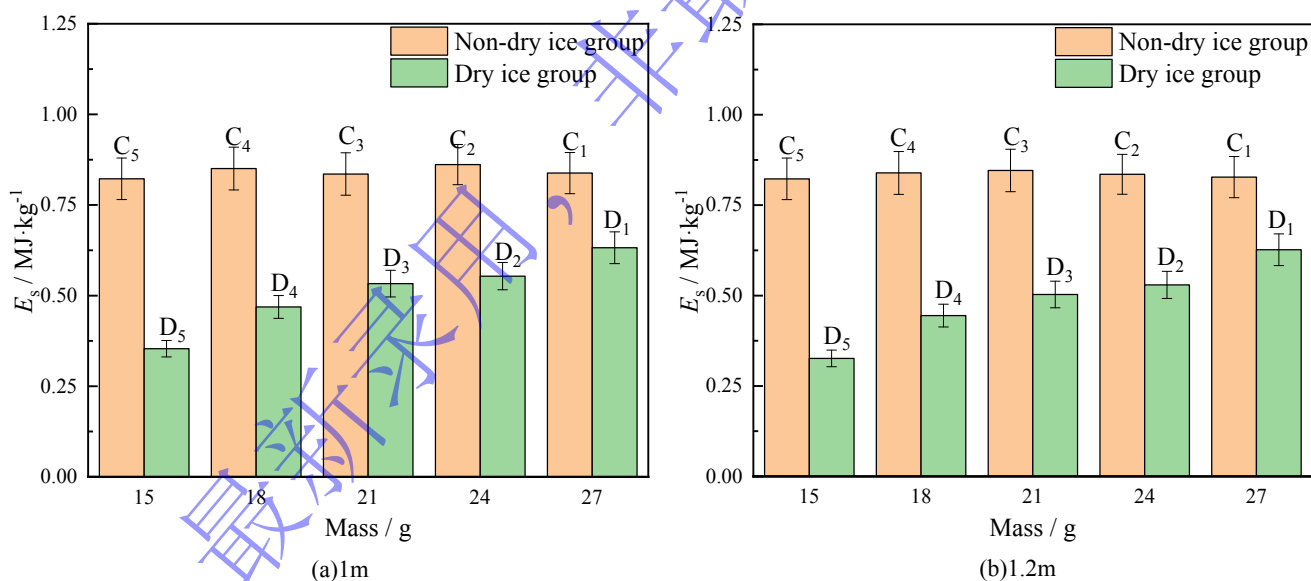


图 6 相同炸药质量下添加干冰对比冲击波能的影响

Fig.6 Effect of dry ice addition on specific shock wave energy under the same explosive mass

图 6 给出了乳化炸药质量分别为 15 g、18 g、21 g、24 g、27 g 时，纯乳化药包与干冰-炸药复合药包（总质量 30 g，干冰质量=30 g-M 炸药）在 1.0 m 和 1.2 m 测点处的比冲击波能 E_s 对比。在 1.0 m 测点处，27 g 炸药量下复合药包的 E_s 较纯乳化组下降 24.56%；当炸药量降至 15 g 时，降幅扩大至 57.00%。1.2 m 测点处呈现相同趋势。这表明干冰对冲击波能的削弱效应随其含量增加而显著增强，且该趋势在两种测距下高度一致。其机理与前述峰值压力下降的分析相符，主要源于声阻抗失配、热沉效应及惰性稀释三方面因素的协同作用。

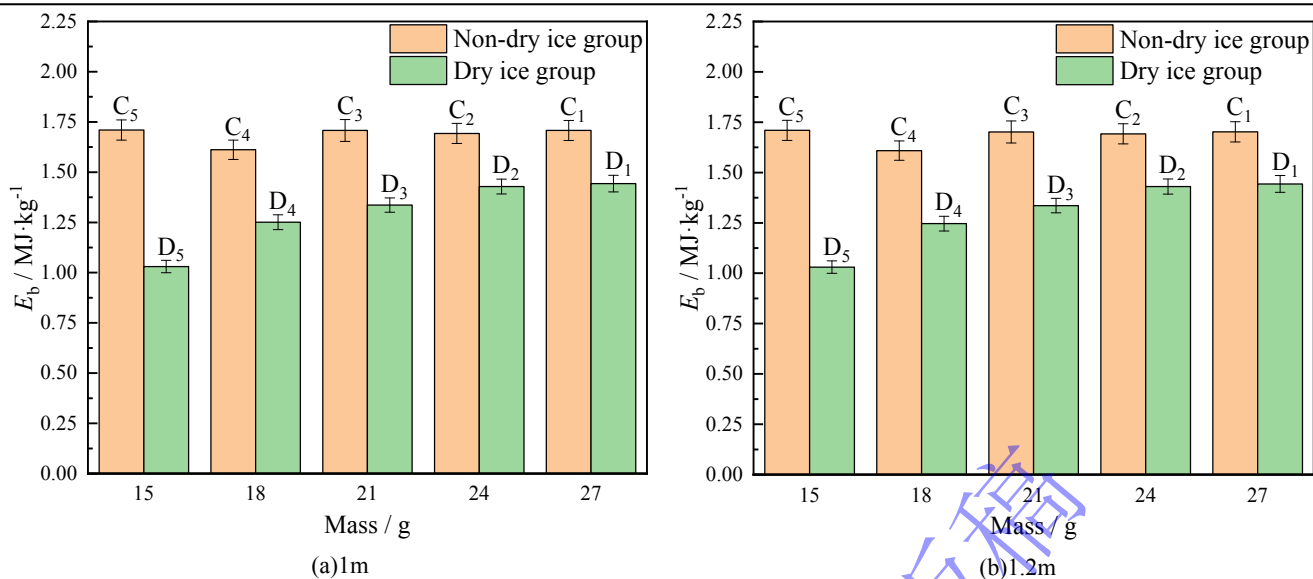


图7 相同炸药质量下干冰对比气泡能的影响

Fig.7 Effect of dry ice on specific bubble energy under the same explosive mass

图7给出了乳化炸药质量 M 分别为 15 g、18 g、21 g、24 g、27 g 时，纯乳化药包与干冰-炸药复合药包（总质量 30 g，干冰质量=30 g- M 炸药）在 1.0 m 和 1.2 m 测点处的比气泡能 E_b 对比。

纯乳化药包的 E_b 稳定在 1.60~1.70 MJ/kg 范围内，波动幅度小于 6%，与水下爆炸理论中比气泡能仅取决于炸药自身特性、与装药质量及测距无关的基本原理一致，表明本实验所用乳化炸药在 15~27 g 范围内爆轰完全，能量释放一致性良好。

在 1.0 m 测点处，27 g 炸药量下复合药包的 E_b 较纯乳化组下降 15.48%；当炸药量降至 15 g 时，降幅扩大至 39.73%。1.2 m 测点处呈现相同趋势。

比气泡能下降可从两个方面解释。一方面，干冰升华吸收大量热量，使爆轰产物初始平衡温度显著降低，气泡初始压力 P_0 随之下降，气体膨胀推动水介质做功的驱动能力减弱。另一方面，爆轰产物中的水蒸气在膨胀降温过程中可能提前液化，液态水滴对气体压力的贡献可忽略，导致实际参与膨胀做功的气相摩尔数 n 减少。此外，低温还可能使部分 CO_2 以固态微晶形式悬浮于气泡中而不贡献压力。

对比图6与图7可知，各工况下比气泡能降幅均小于比冲击波能降幅。这主要归因于干冰升华产生的大量 CO_2 气体对气泡脉动的补偿效应。以 15 g 干冰为例，其完全升华可产生约 7.5 L 气体（标准状况下），这部分气体在气泡膨胀阶段部分补偿了因降温导致的气压不足，使 E_b 的下降幅度小于 E_s 。

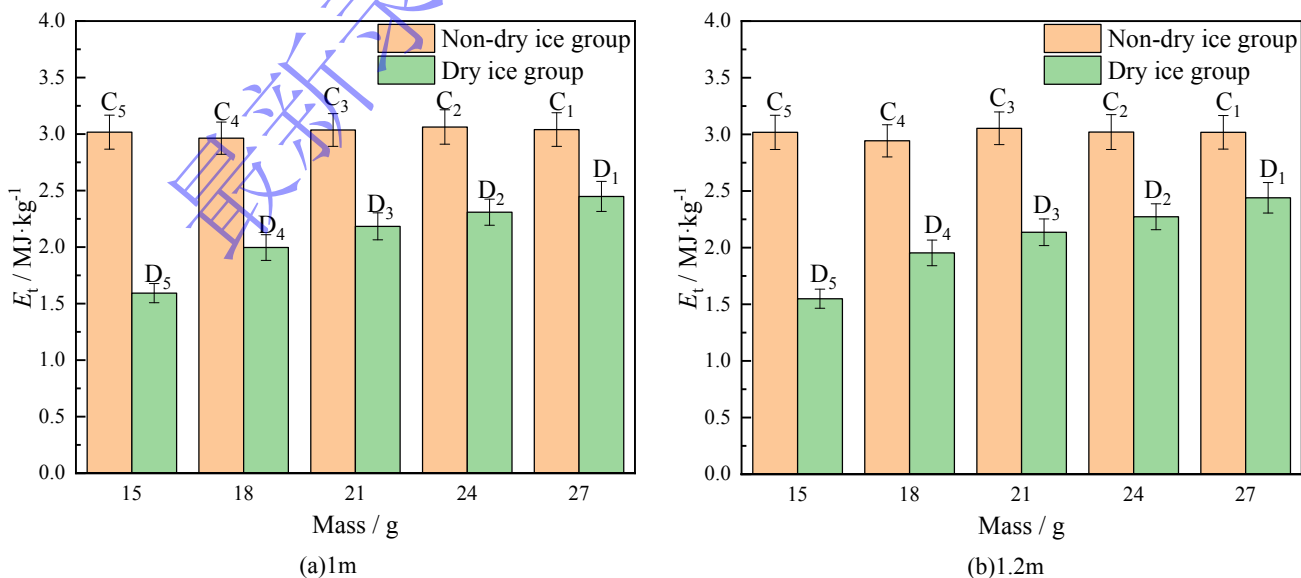


图8 相同炸药质量下干冰对总比爆炸能的影响

Fig.8 Effect of dry ice on total specific explosion energy under the same explosive mass

图 8 给出了乳化炸药质量 M 分别为 15 g、18 g、21 g、24 g、27 g 时，纯乳化药包与干冰-炸药复合药包（总质量 30 g，干冰质量=30 g- M 炸药）在 1.0 m 和 1.2 m 测点处的总比爆炸能 E_t 对比。

纯乳化药包的 E_t 稳定在 2.95~3.05 MJ/kg 范围内，波动幅度小于 3.3%，进一步验证了乳化炸药在 15~27 g 范围内爆轰完全性较好，比能量与装药总质量无关。在相同炸药质量下，复合药包的 E_t 均低于对应的纯乳化药包，且随干冰含量增加（即 M 减小）， E_t 呈单调递减趋势。

总比爆炸能的下降是冲击波能与气泡能下降的叠加结果。其机理可归纳为声阻抗失配，惰性稀释效应以及热沉效应所导致的爆轰产物温度降低。

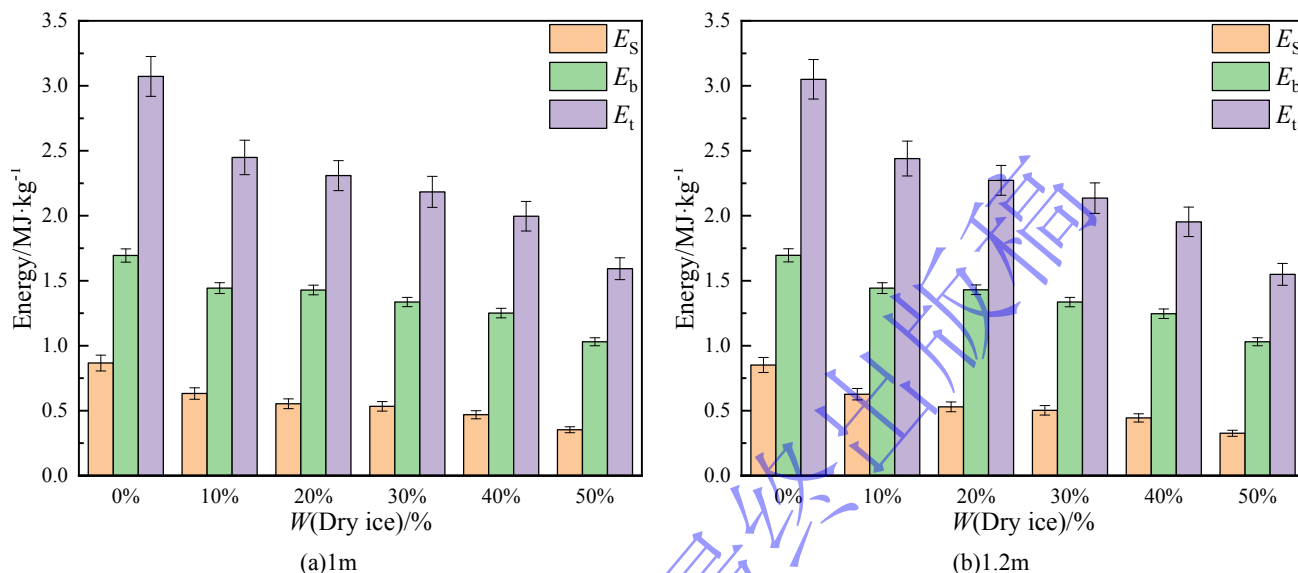


图 9 不同干冰含量下比冲击波能、比气泡能与总比爆炸能的变化

Fig.9 Variations of specific shock wave energy, bubble energy and total explosion energy with dry ice content

图 9 给出了干冰含量从 0% 逐级增至 50% 时，即 $C_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5$ 各组药包在 1.0 m 和 1.2 m 测点处的比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 及总比爆炸能 E_t 的变化趋势。

随着干冰含量从 0 增至 50%，1.0 m 处 E_s 降幅为 59.20%， E_b 降幅为 39.18%， E_t 降幅为 48.16%；1.2 m 处 E_s 降幅为 61.70%， E_b 降幅为 39.25%， E_t 降幅为 49.21%。各能量参数均呈单调递减趋势，且干冰含量越高，降幅越大，表明干冰对水下爆炸能量输出始终起削弱作用。

从能量分配角度看，随着干冰含量增加，气泡能在总能量中的占比由 55.1% 升至 64.7%（以 1.0 m 数据计），能量分配向气泡能方向偏移。这与前述干冰升华产生的 CO_2 气体对气泡脉动的补偿效应相吻合——冲击波能因界面阻抗失配和热沉效应被大幅削减，而气泡能因气体补偿获得了相对缓和的衰减。

各能量参数的下降机理已在图 6~图 8 的分析中分别论述，概括而言： E_s 的下降受界面阻抗失配、化学能降低，惰性稀释和热沉效应四重因素控制，降幅最大； E_b 的下降主要源于爆温降低导致的气体膨胀驱动力减弱和水蒸气液化减少有效气相摩尔数，但因干冰升华气体的补偿效应，降幅相对缓和； E_t 的下降是 E_s 与 E_b 下降的综合反映。

3 结论

(1) 干冰替代乳化炸药对空中爆炸冲击波参数产生显著影响。随着干冰含量从 0 增至 50%，峰值超压由 61.71 kPa 降至 22.52 kPa，降幅 63.5%；正压作用时间由 0.484 ms 缩短至 0.418 ms，降幅 13.7%；冲量由 13.27 Pa·s 降至 3.46 Pa·s，降幅 73.9%。冲量的衰减最为显著，这是峰值压力和正压作用时间同步下降在积分运算中叠加的结果。

(2) 水下爆炸条件下，随干冰含量从 0 增至 50%，比冲击波能降幅达 59.2%（1.0 m 处），比气泡能降幅为 39.2%，总能量降幅为 48.2%。冲击波能的衰减幅度明显大于气泡能，主要归因于干冰升华形成的气层在水介质中产生的额外声阻抗失配耗散。水下冲击波能降幅（59.2%）与空中峰值超压降幅（63.5%）基本相当，但水下因界面阻抗失配的存在，冲击波经历了额外的反射耗散，其衰减机制较空中更为复杂。

(3)干冰对气泡能的影响相对缓和,这得益于干冰升华产生的 CO_2 气体对气泡脉动的补偿效应。以15 g干冰为例,其完全升华可产生约7.5 L气体(标准状况下),这部分气体在气泡膨胀阶段部分弥补了因爆温降低导致的气压不足。因此,随着干冰含量增加,能量分配向气泡能方向偏移,气泡能在总能量中的占比由55.1%升至64.7%,有利于需要气体膨胀做功的破岩场景。

(4)综合考虑能量保持率与成本因素,推荐干冰替代比例为20%~30%。该范围内复合药包总能量可保留约70%~80%。干冰-乳化炸药复合药包在满足一般矿山破岩能量需求的前提下可显著降低爆破成本,具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 张建华,李佳乐,张肯,等.混装乳化炸药间隔装药技术在某露天矿山现场应用研究[J].爆破,2025,42(1):63-70.
Zhang J H, Li J L, Zhang K, et al. Field application research of spacing charging technology for mixed-loading emulsion explosive in an open-pit mine[J]. Blasting, 2025, 42(1): 63-70.
- [2] 陈红权,谢建德,朱龙龙,等.基于提高混装乳化炸药爆炸效能利用的创新爆破技术[J].现代矿业,2022,38(9):61-65.
Chen H Q, Xie J D, Zhu L L, et al. Innovative blasting technology for improving explosion energy utilization of mixed-loading emulsion explosive[J]. Modern Mining, 2022, 38(9): 61-65.
- [3] 钱旭林,陈文坤,张进涛.某露天矿山现场混装乳化炸药应用与实践[J].世界有色金属,2025,(16):99-102.
Qian X L, Chen W K, Zhang J T. Application and practice of site-mixed emulsion explosive in an open-pit mine[J]. World Nonferrous Metals, 2025, (16): 99-102.
- [4] 郑欣颖,李海涛,张弛,等.乳化炸药水下爆炸载荷输出特性实验研究[J].高压物理学报,2022,36(4):184-192.
Zheng X Y, Li H T, Zhang C, et al. Experimental study on underwater explosion load output characteristics of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4): 184-192.
- [5] 刘磊,王远,张成良,等.深水静压下化学敏化乳化炸药爆炸能量的输出特性[J].爆破器材,2022,51(3):28-32.
Liu L, Wang Y, Zhang C L, et al. Output characteristics of explosion energy for chemically-sensitized emulsion explosive under deep-water static pressure[J]. Explosive Materials, 2022, 51(3): 28-32.
- [6] 李雪交,吴勇,王琦,等.含能微球敏化乳化炸药水下爆炸能量输出特性研究[J].爆炸与冲击,2022,42(3):4-12.
Li X J, Wu Y, Wang Q, et al. Study on energy output characteristics of emulsion explosive sensitized by energetic microspheres for underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(3): 4-12.
- [7] 史锐,徐更光,刘德润,等.炸药爆炸能量的水中测试与分析[J].火炸药学报,2008,31(4):1-5.
Shi R, Xu G G, Liu D R, et al. Study on underwater measurement and analysis of explosive explosion energy[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(4): 1-5.
- [8] Wang L, Wang N, Zhang L. Study on key factors affecting energy output of emulsion explosives in underwater explosion[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2012, 37(1):83-92.
- [9] 钱海,吴红波,邢化岛,等.铝粉含量和粒径对乳化炸药作功能力的影响[J].火炸药学报,2017,40(1):40-44.
Qian H, Wu H B, Xing H D, et al. Effect of aluminum powder content and particle size on work capacity of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2017, 40(1): 40-44.
- [10] Liu X, Chen X, Liu D. Study on the influence of the change of aluminum powder content on the detonation and energy output characteristics of typical emulsion explosive[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2025, 61(3):432-449.
- [11] CHEN X, SUN Y, DU P, et al. Study on energy output characteristics of aluminized emulsion explosive[C] //3rd International Conference on Material Chemistry and Composite Materials (MCCM 2022). Zhuhai: IOP Publishing, 2023, 2539, 012002.
- [12] Yang M, Ma H, Shen Z. Effect of RDX powders on detonation characteristics of emulsion explosives[J]. Journal of Energetic Materials, 2019, 37(4): 459-474.

- [13] 程扬帆,马宏昊,沈兆武.氢化镁储氢型乳化炸药的爆炸特性研究[J].高压物理学报,2013,27(1):45-50.
Cheng Y F, Ma H H, Shen Z W. Study on explosion characteristics of magnesium hydride hydrogen-storage emulsion explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 45-50.
- [14] Fan J Y, Fang Q, Zhang Y D, et al. Experimental investigation on the TNT equivalence coefficient of a rock emulsion explosive[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10):1243-1249.
- [15] 刘赛,韩体飞,王猛,等.低温环境对乳化炸药爆炸性能的影响[J].高压物理学报,2024,38(4):139-146.
Liu S, Han T F, Wang M, et al. Effect of low-temperature environment on explosion performance of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2024, 38(4): 139-146.
- [16] 林谋金,刘畅,马宏昊,等.水浴加热对乳化炸药爆炸威力的影响[J].含能材料,2016,24(12):1214-1218.
Lin M J, Liu C, Ma H H, et al. Effect of water-bath heating on explosion power of emulsion explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(12): 1214-1218.
- [17] Wang F, Ma H H, Shen Z W. Explosion Performance of High-Temperature Degraded Emulsion Explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(11): 1325-1332.
- [18] 王尹军,李进军,方宏.乳化炸药密度对其压力减敏的影响[J].爆炸与冲击,2009,29(5):529-534.
Wang Y J, Li J J, Fang H. Effect of emulsion explosive density on its pressure desensitization[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5): 529-534.
- [19] 吴永祥,赵明生,王基禹,等.别矿斜坡面爆破孔网参数优化试验与应用[J].爆破,2022,39(02):75-80+99.
Wu Y X, Zhao M S, Wang J Y, et al. Optimization test and application of blasting hole-network parameters for slope surface in Bie mine[J]. Blasting, 2022, 39(2): 75-80+99.
- [20] 王杰,张云鹏,葛晓东,等.液态CO₂相变破岩参数及数值模拟研究[J].爆破器材,2022,51(4):16-22.
Wang J, Zhang Y P, Ge X D, et al. Study on parameters and numerical simulation of rock breaking by liquid CO₂ phase transition[J]. Explosive Materials, 2022, 51(4): 16-22.
- [21] 周盛涛,罗学东,蒋楠,等.二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J].工程科学学报,2021,43(7):883-893.
Zhou S T, Luo X D, Jiang N, et al. Research progress and prospect of carbon dioxide phase-transition fracturing technology[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893.
- [22] COLE R H. Underwater Explosions[M]. Princeton: Princeton University Press, 1948.

Effect of Dry Ice Content on Energy Release Characteristics of Emulsion Explosives Underwater and in Air

WANG Junzhe¹, WANG Quan¹, HUANG Ruiqing², HUANG Xiaoming², LI Xuejiao¹, DU Yanchun²,
LI Ye², LI Rui¹

(1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. Anhui Conch Group Co., Ltd., Wuhu 241004, Anhui, China)

Abstract: To investigate the feasibility of partially substituting dry ice for emulsion explosive in mine rock fragmentation, composite charges with dry ice mass fractions ranging from 0% to 50% were prepared. Air blast tests and underwater explosion energy tests were conducted to systematically examine the effects of dry ice content on the energy output characteristics of the composite charges. The air blast results indicate that the peak overpressure, positive pressure duration, and impulse all decrease monotonically with increasing dry ice content. At 50% dry ice content, the reductions are 63.5%, 13.7%, and 73.9%, respectively. The underwater explosion results show that the specific shock wave energy, specific bubble energy, and total specific energy decrease with increasing dry ice content, with reductions of 59.2%, 39.2%, and 48.2% at 50% content. The energy distribution shifts toward bubble energy, with the bubble energy ratio increasing from 55.1% to 64.7%. The reduction in underwater shock wave energy is significantly greater

than that in air overpressure, which is attributed to the additional acoustic impedance mismatch dissipation caused by the CO₂ gas layer formed by dry ice sublimation in the water medium. The relatively smaller reduction in bubble energy is mainly due to the compensation effect of CO₂ gas on bubble pulsation, which favors the gas expansion work required for rock fragmentation. With comprehensive consideration of energy retention efficiency and economic cost, the recommended dry ice substitution ratio is 20%–30%, corresponding to a total energy retention of about 70%–80%. Under these conditions, material costs can be reduced while still satisfying the demands of conventional rock fragmentation in mining operations, leading to substantial economic benefits.

Keywords: dry ice; emulsion explosive; underwater explosion; synergistic blasting; energy output

最新录用，
非最终出版稿