

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.020

水下消聚能爆破柔性垫层厚度优化及工程验证^{*}

李勇海¹, 钱峰^{2a,2b}, 钱有伟¹, 何理^{2a,2b}, 施炎坤¹, 牛草原¹, 钟冬望^{2a,2b}, 司剑峰³

(1. 中铁四局集团有限公司, 合肥 230023; 2. 武汉科技大学 a. 理学院;

b. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065; 3. 中铁四院集团工程运维有限责任公司, 武汉 430061)

摘要: 针对深水钻孔爆破基岩损伤难以有效控制的问题, 依托西堠门公铁两用大桥深水基础爆破工程, 结合消聚能装药结构多界面波阻抗理论模型, 联合室内模型试验与数值计算, 系统研究水下消聚能爆破条件下, 不同柔性垫层厚度对孔底基岩损伤的影响机理, 从损伤形态、损伤半径及损伤深度等方面揭示其随垫层厚度变化的演化规律。结果表明: 消聚能结构可显著削弱孔底冲击波强度, 使孔底损伤由集中型破坏转变为分散型分布; 随着柔性垫层厚度的增加, 孔底损伤半径与损伤深度逐渐减小并趋于稳定; 垫层厚度为 20 cm 时孔底损伤半径为 27 cm, 相比常规装药结构降幅约 48%, 充分考虑损伤与根底控制, 选择 40 cm 为最优垫层厚度。工程实际应用表明, 采用 40 cm 柔性垫层可有效控制建基面损伤与不平整度, 满足深水基础施工精度要求。研究成果可为深水钻孔爆破基岩损伤控制提供科学依据。

关键词: 水下爆破; 爆破损伤; 消聚能结构; 垫层厚度; 数值计算

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2026)03-0198-11

Optimization and Engineering Validation of Flexible Cushion Thickness for Underwater Energy-relief Blasting

LI Yong-hai¹, QIAN Feng^{2a,2b}, QIAN You-wei¹, HE Li^{2a,2b}, SHI Yan-kun¹,
NIU Cao-yuan¹, ZHONG Dong-wang^{2a,2b}, SI Jian-feng³

(1. China Railway No. 4 Engineering Group Co., Ltd., Hefei 230023, China; 2. a. College of Science;
b. Hubei Intelligent Blasting Engineering Technology Research Center, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 3. China Railway Fourth Institute Group Engineering Operation and Maintenance Limited Liability Company, Wuhan 430061, China)

Abstract: To address the challenge of controlling bedrock damage in deep-water blasting operations, this investigation utilized the Xiyoumen Road-rail Bridge's deep-water foundation blasting project as a case study. The research employed a multi-interface wave-impedance model for energy-relief charge structures, combining scaled laboratory experiments with numerical simulations. This study systematically examined the mechanism by which flexible cushion thickness affects bedrock damage at borehole bottoms during underwater energy-relief blasting operations, quantita-

收稿日期 (Date of reception): 2025-12-25

网络首发日期 (Published online): 2026-02-09

作者简介: 李勇海 (1983-), 男, 正高级工程师, 从事桥梁与隧道工程方面的研究, (E-mail) 443101140@qq.com。

通信作者: 钱峰 (2003-), 男, 硕士研究生, 从事振动预测方面的研究, (E-mail) qianfeng@wust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52274136, 51904210); 湖北省自然科学基金项目 (2024AFB766); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (P2022G054); 安徽省新型爆炸材料与爆破技术工程研究中心开放基金 (AHBP2023A-03)

About the author: LI Yong-hai (1983-), male, professorate senior engineer, mainly engaged in research on bridge and tunnel engineering, (E-mail) 443101140@qq.com.

Corresponding author: QIAN Feng (2003-), male, master degree candidate, mainly engaged in vibration prediction, (E-mail) qianfeng@wust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52274136, 51904210), National Science Foundation of Hubei Province (2024 AFB766), Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co., Ltd. (P2022G054), Open Fund of the Anhui Engineering Research Center for New Explosive Materials and Blasting Technology (AHBP2023A-03)

tively analyzing the evolutionary laws of fracture characteristics, damage radius, and penetration depth across different cushion-thickness configurations. The results demonstrate that the energy-relief structure significantly attenuates shock-wave intensity at the borehole bottom, transforming the damage from localized, concentrated failure to a dispersed fracture distribution. Both the damage radius and penetration depth decrease, then stabilize as the thickness of the flexible buffer layer increases. With a 20 cm buffer thickness, the damage radius measures 27 cm, representing a 48% reduction compared to a conventional charge structure. Based on a comprehensive evaluation of damage mitigation and foundation specifications, 40 cm is determined as the optimal buffer thickness. Field applications confirm that this 40 cm flexible buffer effectively regulates bedrock damage and surface roughness while satisfying the precision requirements for deep-water foundation construction. These findings establish a scientific framework for bedrock damage control in deep-water drilling and blasting operations.

Key words: underwater blasting; blasting damage; energy-relief structure; flexible cushion thickness; numerical simulation

水下爆破因其施工效率高、破岩能力强,在桥梁基础、港口航道及水工建筑物开挖中得到广泛应用。然而,爆炸产生的高强度冲击波会直接作用于孔底岩体,使建基面发生裂隙扩展、岩体破碎等损伤现象,严重影响基础平整度与结构稳定性^[1]。为减小孔底破坏,传统工程中通常在建基面上方预留一定厚度的保护层,其厚度需根据钻孔工艺、装药结构、岩体力学性质及水深条件等因素综合确定,通常采用3~6 m,再通过小孔径爆破及人工清理进行二次开挖^[2],但该方法效率低、成本高,且孔底岩体损伤难以有效控制^[3];水平光面爆破与预裂爆破虽然可改善成型质量,但由于钻孔困难、施工效率低等原因,难以在深水环境中推广。近年来,工程中开始尝试在孔底设置柔性垫层的小梯段微差爆破方式,以期削弱冲击波能量,但受限于垫层材料与结构性能,缓冲效果仍不足,孔底损伤依然较为显著,且爆后基岩表面凹凸不平,需进行二次修整,影响施工效率。特别是在深水环境下,由于高水压抑制裂纹扩展与岩体抛掷,需要增加装药量才能满足破岩要求,而这又进一步加剧了孔底损伤^[4];吴新霞等提出采用大孔径垫层爆破技术以减少不必要的能量集中^[5];卢文波等在炮孔底部布置高波阻抗装置并配合柔性垫层^[6],通过多界面反射削弱孔底方向的冲击波,实现消能爆破效果;胡浩然等通过配备冲击反射装置来减少爆破振动对周围结构的破坏^[7];刘振宇等揭示了柔性垫层爆破能够显著降低爆源冲击能量对建基面的破坏程度^[8];李伟等采用柔性垫层爆破法^[9],提高了现场施工效率并降低了建基面岩体受爆破振动的影响;马萌濛等通过试验研究验证了保护层复合消聚能爆破可在一次开挖中兼顾削弱爆源集中能量与提高破岩效率^[10],实现对基底岩体的有效保护与成型控制;陈育权等通过数值模拟构建较完整的硬质岩消聚能爆破模型^[11],系统揭示其对爆

破能量分布和岩体损伤控制的优化机制;赵银超通过复合消能现场试验^[12],对检测数据分析,验证了建基面开挖采用复合消能爆破的可行性并确定了爆破开挖参数;熊伟利用压电波动法监测水下条件下的岩体损伤状态^[13],进一步揭示了消能爆破的有效性;李腾飞等利用数值模拟分析不同复合结构参数对应力波传播规律及能量分布差异^[14];司剑峰等揭示了爆炸荷载在复杂介质中的反射与耗散机理^[15,16];Wan等系统总结了水下爆破压力场的时空演化特征^[17],指出不同介质界面的反射与透射效应对冲击波能量分配具有关键影响;胡英国等揭示了爆破压力波在岩体表面产生的高梯度冲击作用是导致岩石局部破坏的主要诱因^[18];秦桂芳等结合HJC本构模型对光面爆破过程中的岩体损伤规律进行了数值模拟^[19],证明改变介质参数可显著影响爆破损伤分布;张天成等结合现场数据^[20],拟合得出了适用于特定区域水下爆破的冲击波传递规律的经验公式参数;杨洋等针对水下钻孔爆破冲击波衰减规律进行了系统研究^[21],为水介质中冲击波的控制与缓冲提供了重要实验依据。

消聚能结构虽能有效削弱孔底能量,但现有研究多集中于消聚能结构本身,对其在水下条件下与柔性介质协同作用的研究相对较少,尤其缺乏针对柔性垫层厚度的定量设计方法及其对消能效果影响规律的系统分析。不同垫层厚度条件下孔底基岩损伤特征的演化规律及最优垫层厚度的确定,仍缺乏可量化的研究依据。针对水下钻孔爆破中孔底基岩损伤控制问题,本文在消聚能结构基础上引入柔性垫层,形成消聚能结构与柔性介质协同作用的复合孔底防护机制,结合多界面波阻抗理论模型,通过水下消聚能爆破模型试验与数值模拟,系统研究不同柔性垫层厚度条件下孔底损伤程度的变化规律,并依托甬舟铁路西堠门大桥深水基础爆破工程,对该

复合消聚能结构的工程适用性进行验证。本文研究成果可为深水环境下爆破损伤控制及消聚能结构参数设计提供理论参考。

1 消聚能爆破理论分析模型

炸药爆炸后产生的高压冲击波在传播过程中会受到不同介质波阻抗差异的影响,在界面上产生反射与透射。消聚能结构通过高阻抗消能球与低阻抗柔性垫层的组合,使入射冲击波在多个界面之间多次反射、折射和衰减,从而显著降低传入孔底岩体的能量峰值,实现对基岩的保护。该结构由爆炸产生

的爆生气体、消能球、柔性垫层、岩体组成,其装药结构如图1所示。当爆炸冲击波到达炸药—消能球界面时,由于消能球波阻抗远大于气体介质,大部分能量被反射回孔内,对孔底进行纵向消能;同时对孔壁进行横向聚能,用于增强孔间岩体破碎效果;透射入消能球的部分能量继续向下传播,并在其内部分散。当冲击波到达消能球—柔性垫层界面时,波阻抗出现明显突降,冲击波在该界面进行二次反射,仅有少量透射波进入柔性垫层,进而能量在颗粒摩擦、孔隙压密等机制作用下被进一步损耗,最终实现对炮孔底部基岩损伤的控制。

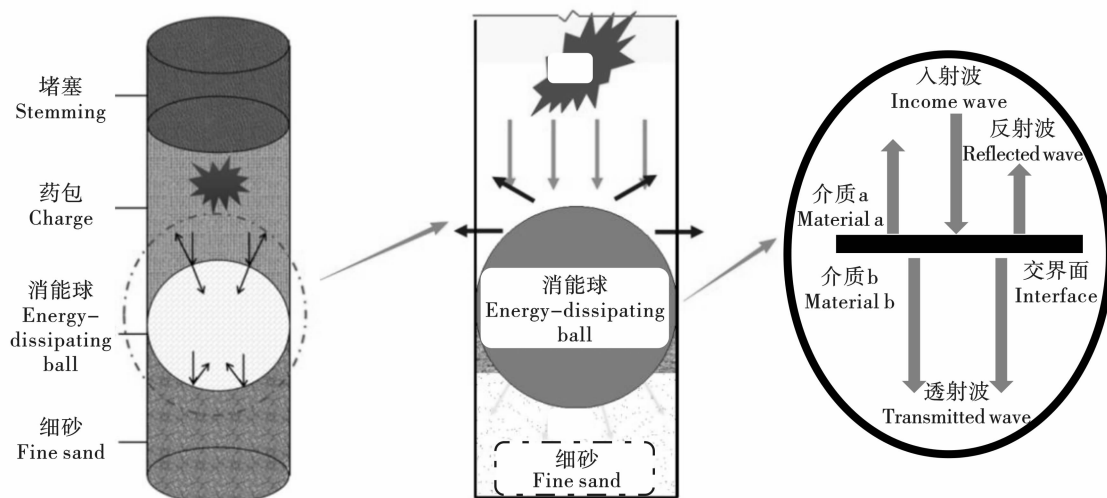


图1 消聚能爆破结构的装药结构与应力波反射透射示意图

Fig. 1 Schematic of the charge configuration and stress-wave reflection-transmission in the energy-relief blasting structure

根据应力波传播理论,当一种介质中的应力波传播到另一种介质中时,在界面处将发生反射和透射导致应力波幅值发生改变,其反射系数和透射系数可用下式表示

$$R = \frac{\rho_b(C_p)_b - \rho_a(C_p)_a}{\rho_a(C_p)_a + \rho_b(C_p)_b} \quad (1)$$

$$T = \frac{2\rho_b(C_p)_b}{\rho_a(C_p)_a + \rho_b(C_p)_b} \quad (2)$$

式中: R 为反射波强度; T 为透射波强度; ρ 为介质密度; C_p 为纵波波速; ρC_p 为介质的波阻抗。当反射系数越大时,透射系数越小,所以波阻抗差异越显著,界面对应力波的削弱越有效。消聚能结构基于低—高—低的波阻抗梯度,使入射能量在两个界面经历多次反射与透射,从而显著削弱作用于孔底基岩的能量,有效降低了孔底岩体的损伤。

2 消聚能爆破试验研究

2.1 探索试验

为研究消聚能结构对基岩损伤防护的效果,并

为后续水下消聚能爆破模型试验的试件选型与测试方法提供依据,分别对有机玻璃试件和混凝土圆柱体试件进行陆地条件下的探索性爆破试验。试验共分为两组,对照组采用常规水下钻孔爆破方案;试验组采用消聚能结构进行爆破。对试件均预留直径为10 mm,深度为100 mm的炮孔,通过对比不同装药结构条件下试件的破坏形态、裂纹分布特征及孔底完整性变化,分析消聚能结构对孔底损伤特征的影响规律,试验效果如图2所示。

由图2可知,在常规水下钻孔爆破方案下,有机玻璃试件内部产生了明显的裂纹,整体结构完整性显著降低;采用消聚能结构后,试件孔底仅出现局部裂纹,裂纹数量及扩展范围明显减小。对于混凝土圆柱体试件,采用消聚能结构后,孔底裂纹较少,损伤主要集中于孔底局部区域,裂纹形态清晰,孔底平整度优于常规爆破方案。对比两类试件发现,有机玻璃试件爆后边界效应显著,破碎程度较大,难以对孔底损伤程度进行量化分析;而混凝土试件在消聚

能结构作用下,损伤集中于孔底局部区域,裂纹形态清晰。因此该试验不仅验证了消聚能爆破结构在减弱孔底损伤方面的有效性,同时表明混凝土试件更

适用于后续开展水下消聚能爆破损伤特征的定量测试研究。

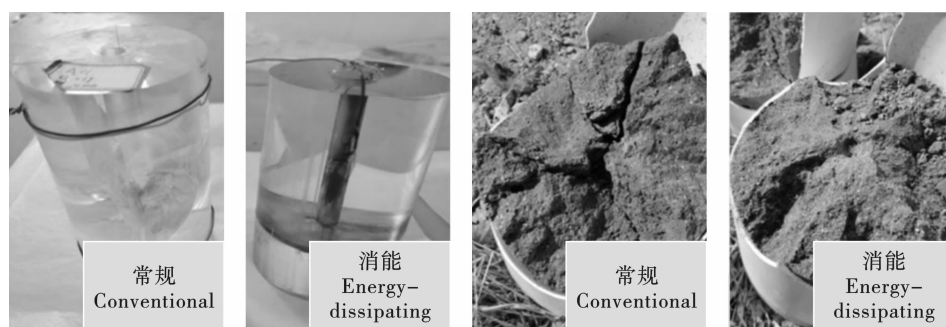


图2 爆后模型图

Fig. 2 Post-blast model

2.2 水下岩石基础模型爆破试验

在露天试验基础上,为进一步验证消聚能爆破技术在水下的可行性并获得可量化的结论,同时保证损伤测试点具有良好的平面条件,选用两个混凝土立方体试件进行试验,试件尺寸均为 $245\text{ mm} \times 245\text{ mm} \times 300\text{ mm}$,并在其顶部中心预留直径为 12 mm ,高为 100 mm 的炮孔。其中试件1采用消聚能爆破技术装药,炮孔内依次铺设一层厚度为 10 mm 的细砂,再布置直径为 10 mm 的消能球,该消能球为轴承钢珠;试件2采用常规装药,在与试件1相同的孔底高度位置直接进行装药。基于露天试验结果,孔底区域能够形成稳定且可识别的损伤特征,同时避免整体破坏,有利于孔底损伤差异的对比分析。因此,为保证试验起爆条件和能量输入一致、避免起爆差异对试验结果的干扰,两个试件炮孔内均装入1发雷管与 2 g 太安炸药,并将试件放入如图3所示的水介质爆炸容器中以模拟 40 m 水深工况。



图3 水介质爆炸容器

Fig. 3 Underwater explosion vessel

为研究消聚能爆破技术对水下基岩的损伤防护效果,采用基于压电陶瓷技术的岩体损伤主动监测方法,如图4所示,在试件侧面布置20个测点,相邻

测点间距为 5 cm ,测试起爆前后试件的压电陶瓷信号,起爆前后试件1、2的各个测点的压电信号峰值变化如图5所示,试件爆破后的效果如图6所示。

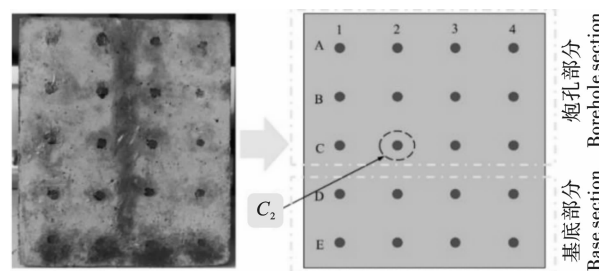


图4 压电陶瓷损伤测点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of piezoceramic damage monitoring points

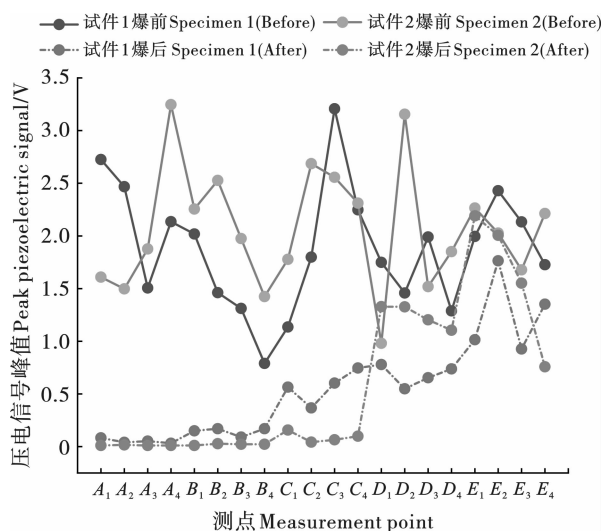


图5 试件1、2起爆前后各测点压电陶瓷信号峰值变化图

Fig. 5 Variation of peak piezoceramic signal values at monitoring points of Specimens 1 and 2 before and after detonation

式中: $C_0 = C_2 = C_3 = C_5 = C_6 = 0$; $C_1 = 2.02 \text{ GPa}$;
 $\mu = \rho/\rho_0$; ρ, ρ_0 分别为初始与当前的材料密度, 初始
相对体积 $V_0 = 0.999845$ 。

消聚能结构中, 柔性垫层采用砂土、消能球采用
铸铁、岩体采用花岗岩的材料参数取值, 各材料参数
取值见表 2。

表 1 炸药相关参数
Table 1 Explosive-related parameters

密度 Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速 Detonation velocity/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1200	3200	7.1	210	0.18	4.2	1	0.3

表 2 模型材料物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of model materials

相关材料 Related materials	密度 Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	动弹性模量 Dynamic elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio
消能球 Energy-relief ball	7850	210.00	0.30
岩体 Rock mass	2200	20.00	0.25
堵塞 Stemming	2000	15.00	0.28
柔性垫层 Flexible cushion layer	1500	0.18	0.30

3.3 孔底损伤形态

为研究消聚能结构对孔底岩体的影响, 对比分析无消聚能结构与采用 20 cm 厚度柔性垫层的消聚能结构时的损伤云图, 如图 8、图 9 所示。

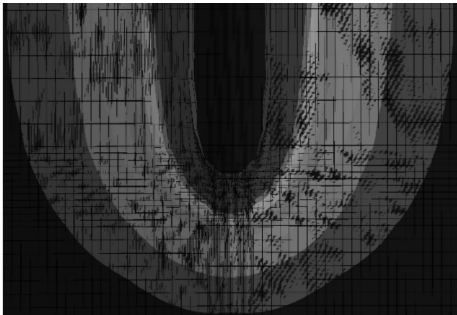


图 8 无消聚能结构孔底损伤云图
Fig. 8 Damage contour of the borehole bottom without energy-relief structure

由图可知, 无消聚能结构时孔底区域存在明显的高损伤区, 其沿孔底向下并向两侧扩展, 说明爆炸压力波在缺乏缓冲层的情况下直接作用于岩体底部, 使得孔底区域产生严重破坏与能量集中; 对于 20 cm 柔性垫层的消聚能结构, 孔底高损伤区显著缩小, 其从孔底中心逐渐转向外围并趋于分散, 压力波在垫层与岩体界面处发生多次反射与衰减, 使能

量在进入岩体前得到有效耗散, 从而孔底岩体的受力更加均匀, 损伤集中现象得到明显缓解。

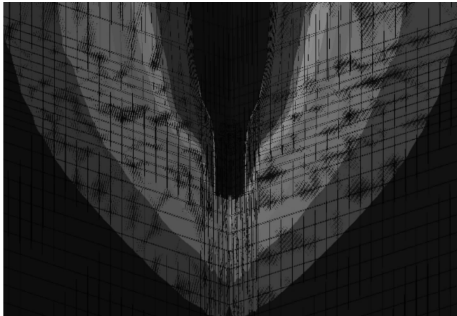


图 9 20 cm 柔性垫层消聚能结构孔底损伤云图
Fig. 9 Damage contour of the borehole bottom with a 20 cm flexible cushion energy-relief structure

柔性垫层能够有效削弱爆炸冲击波对孔底岩体的作用, 并改变了冲击波的传播路径, 使孔底损伤区域从集中转变为分散状态。与无柔性垫层相比, 20 cm 垫层在削减孔底损伤范围与降低损伤强度方面均表现出明显优势, 验证了消聚能结构在缓冲冲击能量与保护岩体完整性方面的有效性。

3.4 孔底损伤半径演变规律

对于 HJC 本构模型, 其损伤以岩石的等效塑性应变和岩石的塑性体积应变的累积来表示, 损伤演

化过程由式(6)表示

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (6)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 为等效塑性应变; $\Delta \mu_p$ 为塑性体积应变; D_1 、 D_2 为材料常数; P^* 为材料所能承受的最大压力; T^* 为材料所能承受的最大拉伸应力。在考虑损伤的最不利因素的情况下,认为爆破前后岩体的密度和泊松比没有改变,可建立式(6)中损伤因子 D 与声波减少率 η 的相互关系

$$D = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (7)$$

式中: D 为损伤变量; η 为爆破前后岩体纵波速度变化率。中国《水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范》(SL47—2020)中规定,当岩体纵波速度变化率 $\eta > 10\%$ 时,即判定岩体发生损伤,其对应的岩体损伤因子阈值为 $D = 0.19$ 。

为对比不同厚度的柔性垫层对孔底区域的损伤程度的影响,在炮孔底部周围均匀选取 25 个单元测点,相邻测点间距为 10 cm,测点的位置分布如图 10 所示,并将炮孔底部各测点所采集的损伤因子绘制成如图 11 所示的 3 维矩阵图。

将炮孔底部各测点所采集的损伤因子绘制成如图 11 所示的 3 维矩阵图。由图 11 可知,消聚能装药结构条件下孔底损伤因子整体低于常规爆破工况,与模型试验中得到的孔底损伤削弱趋势一致;未采用消聚能结构时,孔底区域的损伤因子整体水平

较高,最大损伤因子接近 1,说明孔底岩体发生了严重的塑性破坏,孔底的损伤半径约为 52 cm;当垫层厚度增加至 20 cm 时,孔底损伤范围明显收缩,损伤因子整体下降,孔底中心处损伤因子约为 0.62,边缘区域快速衰减至 0.19 以下,说明柔性垫层的缓冲作用使得冲击波在岩体中的能量传递大幅减弱;相比于无垫层情况,损伤半径由 52 cm 降至 27 cm,降低幅度约 48%;当柔性垫层增厚至 40 cm 时,孔底损伤区进一步缩小,损伤因子均小于 0.19,该厚度下的损伤因子分布显示出良好的能量耗散效果;而超过 40 cm 后继续增加垫层厚度,损伤削弱效果趋于饱和。

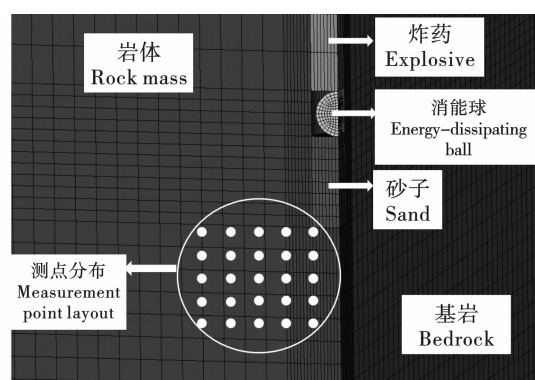


图 10 单元损伤因子测点示意图

Fig. 10 Schematic diagram of damage factor monitoring elements

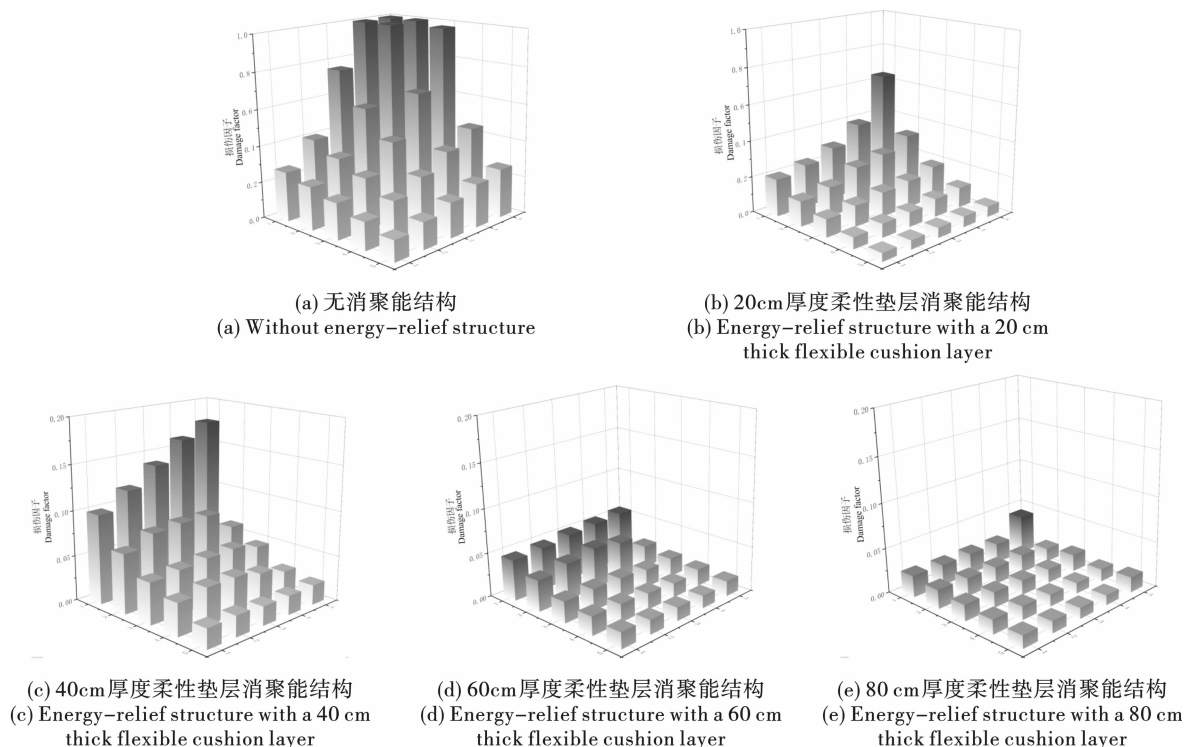


图 11 不同消聚能结构下孔底各测点损伤情况

Fig. 11 Damage conditions at monitoring points at the borehole bottom under different energy-relief structures

3.5 孔底损伤深度分布规律

为研究不同柔性垫层厚度对孔底损伤深度的影响,模拟建立了一组无消聚能结构与四组分别有20、40、60、80 cm厚度柔性垫层的消聚能结构模型。如图12所示,于孔底轴线上自底部起每隔5 cm设置15个测点,用于监测不同深度岩体的损伤因子分布情况。

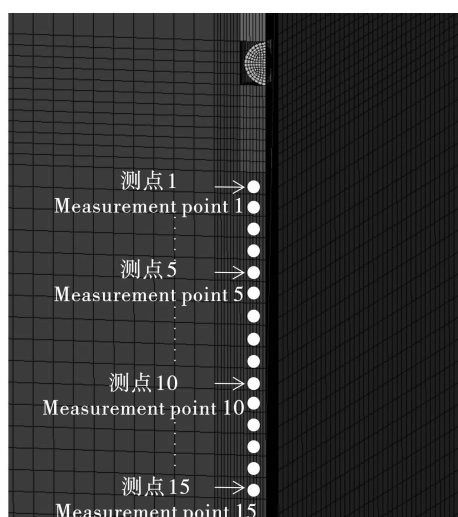


图12 测点示意图

Fig. 12 Schematic diagram of monitoring points

如图13所示,在未采用消聚能结构时,孔底区域损伤显著,20 cm范围内的岩体完全破坏,随着深度增加,损伤逐渐衰减,在65 cm范围内损伤因子仍大于0.19,说明孔底基岩在该范围内已发生明显损伤;当采用20 cm厚度柔性垫层时,孔底损伤深度明显减小,孔底岩石损伤深度范围缩小至约40 cm。随着垫层厚度的进一步增加,孔底岩体损伤显著降低,在40 cm、60 cm与80 cm三种工况下,所有测点的损伤因子均小于0.19,说明孔底基岩未达到工程损伤判定标准,其中40 cm工况下的最大损伤因子约为0.17,孔底应力分布均匀,岩体完整性良好;然而当垫层厚度增加到60 cm与80 cm时,孔底基岩在不同深度的损伤因子与采用40 cm厚度柔性垫层时的损伤因子相差不大,说明柔性垫层采用40 cm厚度柔性垫层对基岩具有良好的防护效果,再增加柔性厚度对孔底基岩的防护效果影响较小。

如图14所示,随着柔性垫层厚度的增加,孔底平均损伤因子呈显著下降趋势,在40 cm时达到最小值,之后变化趋于平缓。说明垫层厚度在20~40 cm区间内对冲击波能量的削弱效果最为明显;而超过40 cm后,继续增厚对降低损伤的贡献有限,并可能会造成下部岩体爆破不充分,导致根底残留

问题。所以在控制炮孔底部损伤深度的同时并尽可能降低柔性垫层厚度,由此确定最优垫层厚度为40 cm。

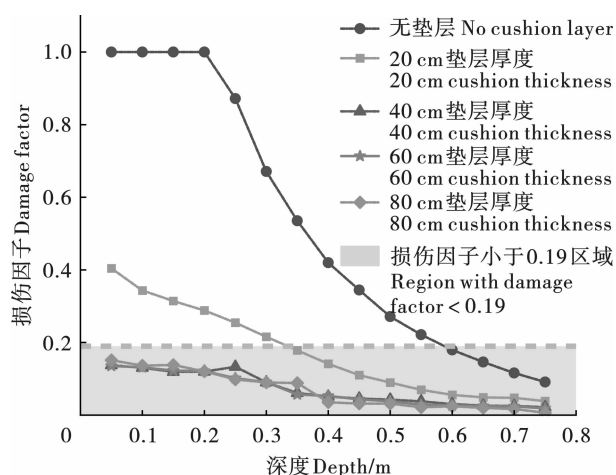


图13 不同厚度垫层的孔底基岩损伤因子

Fig. 13 Damage factor of borehole-bottom bedrock with different cushion thicknesses

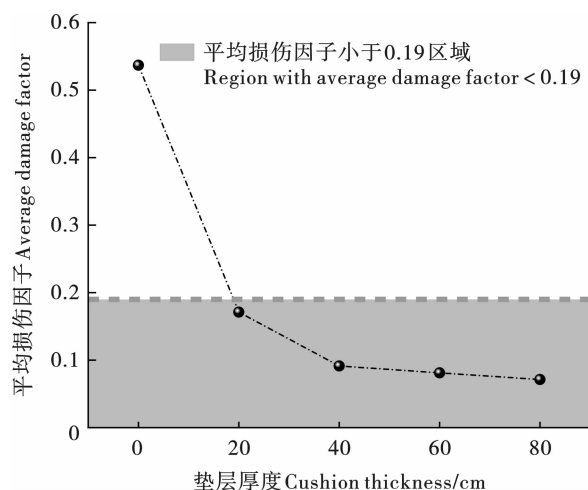


图14 垫层厚度与平均损伤因子关系图

Fig. 14 Relationship between cushion thickness and average damage factor

4 工程应用

甬舟铁路西堠门公铁两用大桥位于浙江省舟山群岛海域,是世界首座采用嵌入式钢沉井基础结构的跨海大桥。桥址水深约40 m,施工条件十分严苛。为保证主塔沉井基础的平整度与稳定性,工程采用了基于如图15所示的消聚能结构的水下精细爆破技术,对海底岩体进行精准开挖。

现场施工中,钻爆船按沟槽布置,每排布置5个炮孔,孔距2.0 m、排距1.5 m,共10排,炮孔直径115 mm,孔底下超深2 m以布置粗砂垫层厚度为

40 cm 的消聚能装药结构,采用防水电子雷管分段微差起爆。为了解爆后建基面平整度,利用水下声呐海床扫描设备对爆后的建基面进行扫描,结合多

波束测深和 GPS-RTK 技术获取爆后地形数据,统计了海底扫测关键点的标高,最终统计结果如表 3 所示,并构建如图 16 所示的基坑三维形貌。



图 15 消聚能结构

Fig. 15 Energy-relief structure

表 3 基坑爆区最终标高

Table 3 Final elevations in the blasted foundation pit area

区域 Zone	设计标高 Design elevation/m	最小标高 Minimum elevation/m	最大标高 Maximum elevation/m	平均标高 Average elevation/m
留台 Bench	-25	-25.8	-24.7	-25.4
基坑 Foundation pit	-33	-33.6	-32.8	-33.2

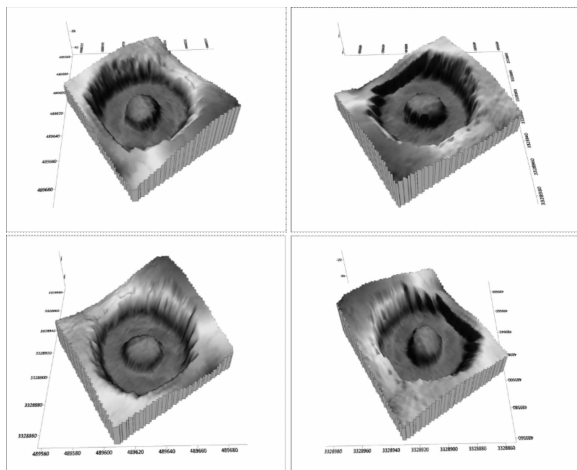


图 16 基坑三维模型图

Fig. 16 3D model of foundation pit

通过对留台和基坑平整度进行量化分析,留台标高为 $-25.8 \sim -24.7$ m,直径约为 30 m;基坑整体深度为 $-33.6 \sim -32.8$ m,直径约为 60 m,基底整体平整度在 $+30 \sim -50$ cm 范围内,基础建基面最终平整度满足设计要求,同时基坑中间预留圆台壁面平整,临近圆台周边光面、预裂效果良好,但对于局部超挖区域,岩体内部可能存在一定程度的爆破损伤。建基面平整度及几何成型质量常作为水下爆破施工效果及后续结构安装可行性的重要工程

评价指标,综合分析表明,采用消聚能爆破技术后,基坑成型质量良好,能够满足沉井施工及结构安装要求。2024 年 3 月 2 日,设置沉井由 1 艘主拖船和 5 艘辅拖船共同拖带下,最终到达西堠门公铁大桥 4 号墩墩位处,4#主塔设置钢沉井定位、安装顺利,各项指标参数均满足设计、规范要求,缩短了施工工期 30 d,保证了施工安全。见图 17。



图 17 设置钢沉井托运与安装

Fig. 17 Transportation and installation of the steel caisson

5 结论

本文围绕 40 m 水深条件下消聚能结构柔性垫层厚度对孔底损伤特征展开研究,结合 LS-DYNA 数值模拟,系统评估了不同垫层厚度的消聚能效果,并结合工程应用进行了验证,得到以下结论:

(1) 消聚能结构可显著削弱孔底冲击波强度,改善损伤分布特征。无消聚能时,冲击波能量在孔底直接集中,形成明显的高损伤区;设置消聚能结构

后,孔底损伤区域由集中转为分散,压力峰值大幅降低,显著提高了孔底岩体受力均匀性;

(2) 柔性垫层对孔底损伤半径的削弱效果显著,且存在明显的有效区间。无消聚能结构时孔底损伤半径约 52 cm;垫层厚度为 20cm 时,损伤半径缩小至 27 cm,减少约 48%,削弱效果最为明显;继续增加垫层厚度,损伤半径缓慢减小,损伤削弱效果趋于饱和;

(3) 随着柔性垫层厚度的增加,孔底损伤深度逐渐减小并趋于稳定,但继续增加垫层厚度可能导致下部岩体爆破不充分,导致根底存在;在 40 m 水深工况下,40 cm 为最优垫层厚度。

(4) 现场应用表明,采用消聚能装药结构,爆后基坑标高整体控制在 +30 ~ -50 cm 区间,满足基础建基面不平整度设计要求,用于水下钻孔爆破轮廓面精细控制切实可行。

参考文献 (References)

- [1] 赵根,黎卫超.水下爆破技术发展[J].爆破,2020,37(1):1-12. DOI: 10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2020. 01. 001.
- [1] ZHAO Gen, LI Wei-chao. Development of underwater blasting technology [J]. Blasting, 2020, 37 (1) : 1-12. DOI: 10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2020. 01. 001. (in Chinese)
- [2] FAN Qi-xiang, et al. Study on deformation and control measures of columnar jointed basalt for Baihetan super-high arch dam foundation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51 (8) : 2569-2595. DOI: 10. 1007/s00603-017-1378-9.
- [3] 李启月,李夕兵,范作鹏,等.深孔爆破一次成井技术与应用实例分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4):664-670. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6915. 2013. 04. 003.
- [3] LI Qi-yue, Li Xi-bing, FAN Zuo-peng, et al. Analysis of deep-hole blasting one-time hole forming technology and application cases[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (4) : 664-670. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6915. 2013. 04. 003. (in Chinese)
- [4] 白杨.水深对岩石爆破炸药量影响的研究[D].武汉:武汉科技大学,2015.
- [4] BAI Yang. Study on the influence of water depth on explosive charge in rock blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [5] 吴新霞,赵根,张正宇,等.复合垫层理论研究及计算机优化设计[J].爆破器材,2000(4):8-11. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-8352. 2000. 04. 002.
- [5] WU Xin-xia, ZHAO Gen, ZHANG Zheng-yu, et al. The foundation of self-sensitization theory and its experimental research for expanded ammonium nitrate [J]. Explosive Materials, 2000 (4) : 8-11. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-8352. 2000. 04. 002. (in Chinese)
- [6] 卢文波,胡浩然,严鹏,等.垂直孔复合消能爆破技术及其在建基面开挖中的应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3143-3152. DOI: 10. 13722/ji. cnki. jrme. 2017. 1051.
- [6] LU Wen-bo, HU Hao-ran, YAN Peng, et al. Vertical bore-hole shock-reflection blasting technique and its application in foundation excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (S1) : 3143-3152. DOI: 10. 13722/ji. cnki. jrme. 2017. 1051. (in Chinese)
- [7] HU Hao-ran, et al. A Vibration - Isolating Blast Technique with Shock - Reflection Device for Dam Foundation Excavation in Complicated Geological Conditions [J]. Shock and Vibration, 2018, 2018 (1) : 8029513. DOI: 10. 1155/2018/8029513
- [8] 刘振宇,罗志敏.柔性垫层爆破在丰满重建工程开挖技术中的应用[J].水利水电技术(中英文),2021,52(S1):200-204. DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2021. S1. 037.
- [8] LIU Zhen-yu, LUO Zhi-min. Application of flexible cushion blasting in excavation technology of Fengman reconstruction project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52 (S1) : 200-204. DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2021. S1. 037. (in Chinese)
- [9] 赵银超.辉长岩基坑开挖复合消能爆破技术[J].水电与新能源,2022,36(11):8-13. DOI: 10. 13622/j. cnki. cn42-1800/tv. 1671-3354. 2022. 11. 003.
- [9] ZHAO Yin-chao. Composite energy-dissipating blasting technology for excavation of peridotite foundation pits [J]. Hydro-power and New Energy, 2022, 36 (11) : 8-13. DOI: 10. 13622/j. cnki. cn42-1800/tv. 1671-3354. 2022. 11. 003. (in Chinese)
- [10] 马萌濛,郑嘉惟,杜浩亮,等.保护层复合消-聚能一次开挖爆破技术试验研究[J].人民珠江,2025,46(1):88-96. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9235. 2025. 01. 010.
- [10] MA Meng-meng, ZHENG Jia-wei, DU Hao-liang, et al. Experimental study on single-excavation compound shock-reflection blasting technology of protective layer [J]. Pearl River, 2025, 46 (1) : 88-96. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-9235. 2025. 01. 010. (in Chinese)
- [11] 陈育权,李大中,李明泽,等.较完整硬质岩消聚能爆破数值模拟及应用[J].爆破,2025,42(2):88-96. DOI: 10. 3963/j. issn. 1001 -487X. 2025. 02. 011.
- [11] CHEN Yu-quan, LIU Guang-xin, KE Chang-jia, et al. Numerical simulation and application of energy dissipation blasting for relatively intact hard rock [J]. Blasting,

- 2025, 42 (2): 88-96. DOI: 10. 3963/j. issn. 1001 - 487X. 2025. 02. 011. (in Chinese)
- [12] 李 伟,索 超,王建军. 柔性垫层爆破法在大石峡水利枢纽趾板基础开挖中的应用[J]. 水利水电快报,2023,44(S2):43-45. DOI:10. 15974/j. cnki. slsdlb. 2023. S2. 012.
- [12] LI Wei,SUO Chao,WANG Jian-jun. Application of flexible cushion blasting method in the excavation of toe slab foundation of Dashixia hydropower hub[J]. Water Resources and Hydropower Engineering Express, 2023, 44(S2):43-45. DOI:10. 15974/j. cnki. slsdlb. 2023. S2. 012. (in Chinese)
- [13] 熊 伟. 基于消能爆破技术的水下钻孔爆破损伤控制研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2021.
- [13] XIONG Wei. Research on damage control of underwater drilling blasting based on energy relief blasting technique [D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology,2021. (in Chinese)
- [14] 李腾飞,钟冬望,司剑峰,等. 基于复合消能爆破技术的海底基坑开挖数值模拟研究[J]. 爆破,2023,40(1):139-146. DOI:10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2023. 01. 019.
- [14] LI Teng-fei,ZHONG Dong-wang,SI Jian-feng, et al. Numerical simulation research on submarine foundation pit excavation based on energy dissipation blasting technology[J]. Blasting, 2023, 40 (1): 139-146. DOI:10. 3963/j. issn. 1001-487X. 2023. 01. 019. (in Chinese)
- [15] SI Jian-feng,ZHONG Dong-wang,XIONG Wei. Piezoceramic-based damage monitoring of concrete structure for underwater blasting [J]. Sensors 2020, 20 (6): 1672. DOI:10. 3390/s20061672.
- [16] 司剑峰,钱 博,钟冬望,等. 基于压电信号的水下钻孔爆破损伤监测试验[J]. 金属矿山,2022(7):128-135. DOI:10. 19614/j. cnki. jsks. 2022. 07. 017.
- [16] SI Jian-feng,QIAN Bo,ZHONG Dong-wang, et al. Underwater drilled hole blasting damage monitoring experiment based on piezoelectric signals [J]. Metal Mine, 2022(7):128-135. DOI:10. 19614/j. cnki. jsks. 2022. 07. 017. (in Chinese)
- [17] WAN Yu,LI Wen-jie,DU Hong-bo, et al. Investigation of shock wave pressure transmission patterns and influencing factors caused by underwater drilling blasting [J]. Water, 2022, 14 (18): 2837. DOI:10. 3390/w14182837.
- [18] 胡英国,饶 宇,柴朝政,等. 岩体结构面对爆破块度的影响机制研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(9):1870-1879. DOI:10. 11779/CJGE20230410.
- [18] HU Ying-guo,RAO Yu,CHAI Chao-zheng, et al. Influence mechanism of rock joints on blasting fragmentation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46 (9): 1870-1879. DOI:10. 11779/CJGE20230410. (in Chinese)
- [19] 秦桂芳,曾 灿,徐间锋,等. 基于 HJC 损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证[J]. 爆破器材,2022,51(6):45-51. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-8352. 2022. 06. 008.
- [19] QIN Gui-fang,ZENG Can,XU Jian-feng, et al. Numerical simulation and engineering verification of smooth blasting in limestone tunnels based on HJC damage constitutive model[J]. Blasting Materials,2022,51(6):45-51. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-8352. 2022. 06. 008. (in Chinese)
- [20] 张天成,陈光添,田海天力,等. 水下钻孔爆破冲击波压力及衰减规律研究[J]. 中国水运(下半月),2023,23(10):86-87,160.
- [20] ZHANG Tian-cheng,CHEN Guang-tian,TIAN Hai-tian-li, et al. Study on pressure and attenuation law of shock waves from underwater drilled hole blasting[J]. China Water Transport (Second Half of the Month), 2023, 23(10):86-87,160. (in Chinese)
- [21] 杨 洋,卢文波,王 洋,等. 水下钻孔爆破激发水中冲击波的机制研究[J]. 振动与冲击,2025,44(12):269-278. DOI:10. 13465/j. cnki. jvs. 2025. 12. 028.
- [21] YANG yang,LU Wen-bo,WANG Yang, et al. Research on the mechanism of underwater drilling blasting to excite shock waves in water[J]. Journal of Vibration and Shock,2025,44(12):269-278. DOI:10. 13465/j. cnki. jvs. 2025. 12. 028. (in Chinese)

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。