DOI：10.11883/bzycj-2026-0274

Ni/Al 活性弹丸高速撞击半无限花岗岩靶开坑效应研究 *

耿恒恒[1]，熊玮[1]，刘闯[1]，马路遥[1]，陈学秒[2]，韩明海[3]，张先锋[1]

(1. 南京理工大学机械工程学院，江苏 南京 210094；
2. 冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室，四川 绵阳 621900
3. 重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘 要： 为研究 Ni/Al 活性弹丸高速撞击花岗岩时的开坑效应，开展了 1200~1800m/s 下 Ni/Al 活性弹丸和 Cu 弹丸高速撞击半无限花岗岩靶对比试验，结合高速录像和三维扫描技术分析了弹靶作用过程、喷射物扩展行为及撞击坑几何特征；基于 Holsapple 开坑标度理论，结合 Ni/Al 反应动力学方程和反应能诱导的等效强度退化思想，建立了考虑化学反应的归一化坑径预测经验模型。结果表明：两类弹丸形成的喷射羽流均表现出不同的扩展特征。随着撞击速度增加，Ni/Al 弹丸撞击时喷射羽流边缘与靶面之间的夹角逐渐减小，而 Cu 弹丸的夹角逐渐增加；相同撞击速度下，Ni/Al 弹丸产生的喷射羽流轴向和径向扩展速度均高于 Cu 弹丸，说明反应释放的化学能能够加速喷射羽流的扩展。两类弹丸形成的撞击坑均由中心瞬态坑和外围浅层层裂剥落区组成，其成坑体积均随撞击速度增大而增加。Cu 弹丸成坑体积的增长主要由中心瞬态坑扩展控制，Ni/Al 弹丸在高速度阶段的层裂体积显著增加，在 1518~1748 m/s 范围内提高约 3.7 倍，成为最终坑体积快速增长的主要来源，反应释能主要表现为对近靶面层裂剥落的促进作用。通过对比试验数据，模型计算结果误差均小于 10%，表明该模型能够合理地描述 Ni/Al 活性弹丸高速撞击花岗岩过程中的动能侵彻与化学释能耦合开坑效应。

关键词：活性材料；花岗岩靶；冲击诱导化学反应；成坑形貌；喷射特征

中图分类号：O346.3　　**国际学科代码：**13015　　**文献标志码：**A

Cratering Effects of High-Velocity Ni/Al Reactive Projectiles on Semi-Infinite Granite Targets

GENG Hengheng[1]，XIONG Wei[1]， LIU Chuang[1]，MA Luyao[1]，CHEN Xuemiao[2]，HAN Minghai[3]，ZHANG Xianfeng[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China
2. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Mianyang 621900, China
3. Chongqing Hongyu Precision Industry Group Co. Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: To investigate the cratering behavior of Ni/Al reactive projectiles impacting granite at high velocities, comparative impact experiments were conducted using Ni/Al reactive projectiles and inert Cu projectiles against

录用稿件，非最终出版稿

* **基金项目：**冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室开放基金(2025JCJQLB10404)；国家自然科学基金资助（12141202，12372359）
第一作者：耿恒恒（1998－ ），男，博士研究生，冲击动力学，E-mail：ghh121288@163.com；
通信作者：张先锋（1978－ ），男，博士，教授. E-mail：lynx@njust.edu.cn。

semi-infinite granite targets at impact velocities of 1200~1800 m/s. High-speed imaging and three-dimensional scanning techniques were employed to characterize the projectile-target interaction, ejecta plume evolution, and crater geometry. Based on Holsapple's crater scaling theory, an empirical model for predicting normalized crater diameter was developed by incorporating Ni/Al reaction kinetics and reaction-energy-induced degradation of effective target strength to account for chemical energy release. The results show that the ejecta plumes generated by the two projectile types exhibit distinct expansion characteristics. With increasing impact velocity, the angle between the ejecta plume boundary and the target surface gradually decreases for Ni/Al projectiles, whereas it increases for Cu projectiles. At comparable impact velocities, the axial and radial expansion velocities of the ejecta plumes generated by Ni/Al projectiles are both higher than those produced by Cu projectiles, indicating that chemical energy release promotes ejecta plume expansion. The impact craters formed by both projectile types consist of a central transient crater and a surrounding shallow spallation zone, with the final crater volume increasing with impact velocity. For Cu projectiles, the increase in crater volume is primarily dominated by the expansion of the central transient crater. In contrast, the spallation volume produced by Ni/Al projectiles increases markedly at higher impact velocities, rising by approximately 3.7-fold over the velocity range of 1518~1748 m/s and becoming the dominant contributor to the rapid increase in final crater volume. This suggests that the contribution of chemical energy release to crater formation is primarily manifested in enhanced near-surface spallation. Comparison with experimental data shows that the prediction errors of the proposed model are below 10% for both projectile types, demonstrating its capability to reasonably describe the coupled effects of kinetic-energy-driven penetration and chemical energy release on crater formation during high-velocity impacts of Ni/Al reactive projectiles on granite.

Keywords: Reactive materials; granite target; shock-induced chemical reaction; crater morphology; ejection characteristics.

小行星撞击地球引发过 10 次以上不同程度的生物灭绝事件，是人类长期共同面临的重大潜在威胁[1-3]。动能撞击具有适用性广、技术简单、成熟性高、效果明显等特点而成为近地小行星主动防御的首选拦截方式。美国于 2022 年实施的“双小行星重定向测试”(Double Asteroid Redirection Test，DART)任务成功改变了双小行星系统的轨道周期，首次在轨验证了动能撞击偏转小行星的可行性[4-8]，受到国内外学者的广泛关注。动能撞击的偏转效果不仅取决于撞击器直接传递的动量，还与撞击过程中喷射物产生的反冲动量密切相关。对于岩质小行星，撞击冲击波在岩石介质中的传播及卸载作用可引起局部压碎、裂纹扩展和层裂剥落，进而影响成坑形貌及喷射物的质量与速度分布。因此，研究岩质小行星在高速撞击下的开坑、层裂及喷射响应，对于认识动能撞击过程中的靶体破坏与喷射物反冲机制具有重要意义。

在撞击器质量和撞击速度受到工程条件限制的情况下，传统惰性撞击器主要依靠自身动能实现靶体破坏和物质喷射，其作用效果受到弹靶材料性质及撞击条件等因素制约。活性材料具有常态下惰性，强冲击载荷作用下能够发生化学反应并释放大量能量的特点[9-11]，有望在机械冲击基础上进一步促进岩石破碎、层裂剥落及物质喷射，为增强撞击作用下的喷射响应提供新的途径。目前，活性材料超高速撞击效应研究主要集中于混凝土类材料，张学朋[12]和肖建光[13]等开展了 Al 基活性材料超高速侵彻半无限类混凝土类试验，证明了超高速侵彻下活性材料能够显著增大侵彻成坑尺寸并扩大靶体破坏范围。苏成海等[14]开展了活性射流侵彻复合混凝土结构动态毁伤研究，表明活性射流爆炸增强毁伤可在动能侵彻毁伤基础上，分别对侵孔直径和破坏区直径增大 116%和 59.7%，能够大幅提升对复合混凝土结构破坏效果。而张甲浩[15]、郭萌萌[16]等发现 Al 基活性横向效应弹丸侵彻有限厚混凝土靶具有明显的扩孔增强行为，相比于惰性弹丸，混凝土的开坑直径提升 24.3%。上

录用稿件，非最终出版稿

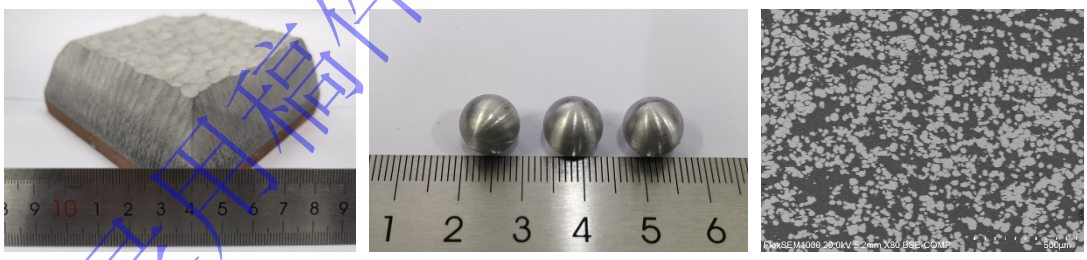
述研究表明活性材料附加的化学能能够增大混凝土靶体的开坑尺寸和破坏区域。然而，现有研究主要聚焦于混凝土类靶体，针对活性材料超高速撞击岩石介质的成坑与喷射机制仍缺乏系统研究。

动能撞击是典型的弹丸撞击半无限靶问题。由于天然小行星材料很难获得，对于致密岩质类小行星，花岗岩因具有相近的密度（约 2.63 g/cm³），较低的孔隙率（<3 %），以及脆性断裂、冲击压碎和卸载层裂等相似的破坏特征，常被用作研究此类小行星撞击开坑效应的替代靶材[17-19]。本文开展了 Ni/Al 活性弹丸与 Cu 惰性弹丸撞击半无限花岗岩靶的对比试验，分析了活性弹丸反应释能对喷射行为和成坑特征的影响；进一步结合活性材料反应动力学与靶体等效强度退化模型，建立考虑化学反应的归一化坑径经验模型。

1 试验方法

1.1 试验弹丸

Ni/Al 活性材料由摩尔比 1:1 的 Ni/Al 球形粉末(99.9%)通过冷喷涂设备(Impact 5/11，德国)制备，其中 Ni 粉和 Al 粉的平均粒径分别为 20 μm 和 25 μm。使用氮气作为加载气体，在 350 ℃、 42 MPa 条件下以 100 $m^3 \cdot h^{-1}$ 的气体流量输送 Ni/Al 粉末沉积在紫铜基板表面，最终得到尺寸 100 mm×100 mm×30 mm 的块状 Ni/Al 活性材料，如图 1(a)所示。随后通过机械加工获得直径 12 mm 的球形弹丸，见图 1(b)。借助扫描电子显微镜(JSM7200FEBSD，日本)获得 Ni/Al 活性材料的微观结构，图 1(c)的块体 Ni/Al SEM 图片显示黑色为 Al 相，白色为 Ni 相，Ni/Al 块体无明显的孔洞和缺陷。喷涂后混合粉末中 Al 颗粒发生剧烈的塑性变形，Ni 颗粒的强度和硬度较高，变形程度相对较小。大变形量 Al 颗粒在材料中充当连续的基体相，将 Ni 颗粒紧密包裹。此外，为了分析高速撞击过程 Ni/Al 弹丸反应释放的化学能对花岗岩开坑行为的影响，选取相同质量的 Cu 弹丸作为惰性参照，主要考虑到 Cu 高速撞击下不发生化学反应，相同速度下具有相同的初始动能，能够用于对比分析活性材料与惰性材料的撞击响应特征。但由于两者的材料密度和直径不同，弹靶界面冲击压力及迎弹面积上的能量输入存在差异，因此并非严格控制单一变量的对照试验。两类弹丸的主要参数见表 1。



(a) Ni/Al ESMs produced by cold spray　(b)spherical projectile　(c)SEM images of Ni/Al ESMs

图 1 Ni/Al 活性材料

Fig. 1 Ni/Al energetic structural materials

表 1 球形弹丸参数

Table 1 Parameters of spherical Ni/Al projectiles

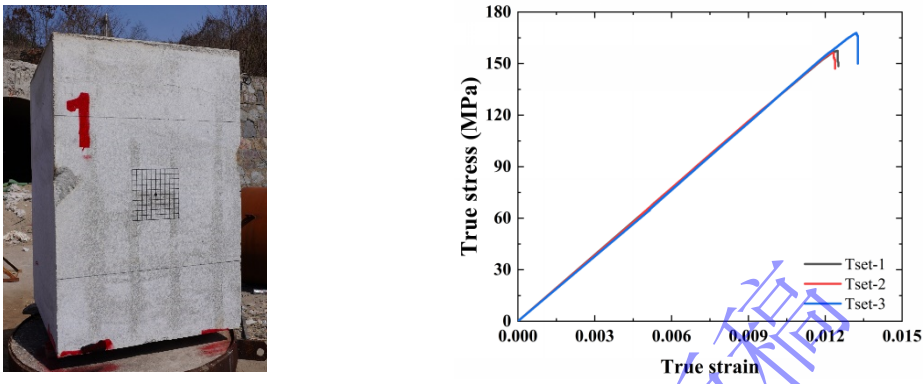
材料	直径 (mm)	质量 (g)	密度 (g·cm^{-3})
Ni/Al	12.0	4.2	4.75
Cu	9.6	4.0	8.96

1.2 试验靶标

试验靶标采用天然花岗岩，岩样取自安徽合肥，外观呈灰白色，花岗岩密度和孔隙率分别为 2.63 g/cm³ 和 1%。岩块经切割、端面打磨后，加工成尺寸为 800 mm × 800 mm×

录用稿件，非最终出版稿

1200 mm 的长方体靶标，如图 2(a)所示。为获得靶体材料的基本力学参数，从同一批花岗岩中加工标准试样，开展 3 次准静态压缩试验。图 2(b)为花岗岩准静态压缩真应力-真应变曲线，3 组试样的应力-应变曲线重复性较好，准静态加载下平均抗压强度为 161MPa。



(a) Granite (b) Quasi-static compression true stress–strain curve

图 2 半无限花岗岩靶

Fig. 2 Granite target

1.3 试验原理

Ni/Al 活性弹丸高速撞击半无限岩石靶试验布局如图 3 所示，试验系统主要由口径为 14.5 mm 的弹道枪、弹托回收装置、高速录像系统和花岗岩靶等组成。Ni/Al 球形弹丸装配于分瓣式弹托内，通过弹道枪发射出膛后，弹托借助空气阻力自动分离并由弹托回收装置回收，以避免弹托对撞击坑形貌产生干扰。试验过程中，通过调节药筒内发射药装药量控制弹丸初始速度。高速录像布置于靶体侧前方，垂直于弹丸飞行轴线，视场对准靶面撞击区域，用于测量弹丸撞击速度，并记录弹丸侵彻以及喷射物飞溅过程。试验采用 Phantom VEO710 高速相机，拍摄帧率为 21000 fps。试验结束后，使用精度为 0.1 mm 的高分辨率三维激光扫描仪(EinScan Pro 2X V2)对开坑区域进行三维扫描，获取撞击坑轮廓及其特征尺寸。

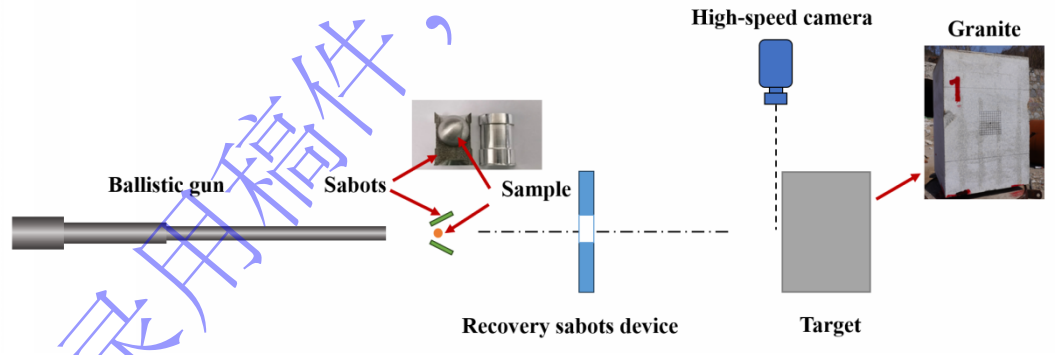


图 3 试验布局示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

2 结果讨论与分析

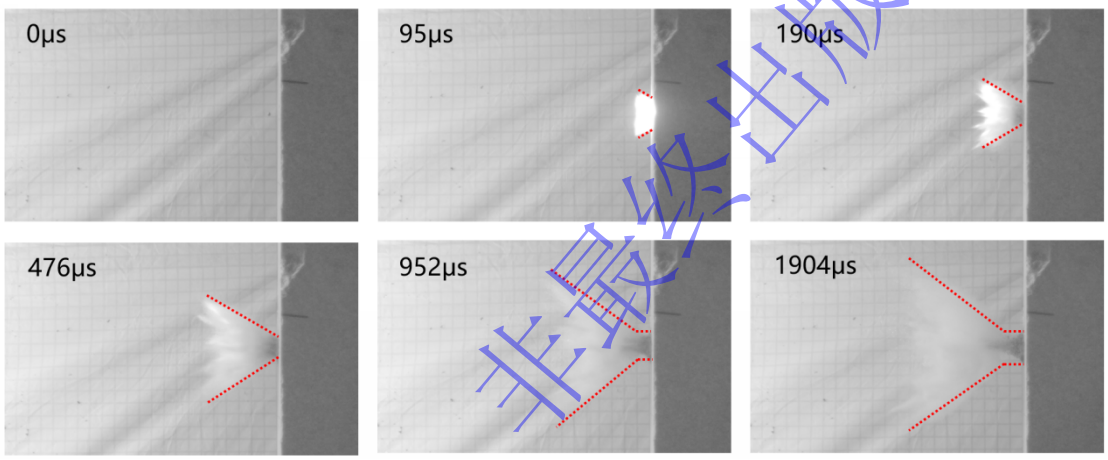
2.1 冲击开坑过程

为分析 Ni/Al 弹丸高速撞击花岗岩开坑过程中化学反应对喷射物飞溅行为的影响， 图 4 给出了 1700m/s 下 Cu 弹丸和 Ni/Al 弹丸撞击花岗岩靶体的典型高速录像图像。对于 Ni/Al 活性弹丸，在 95 μs 时撞击点附近出现明显火光，并伴随初始喷射物形成；190~476 μs 内，发光区域进一步扩大，喷射羽流以一定锥角增长向外快速扩展，并逐渐形成完整的锥形结

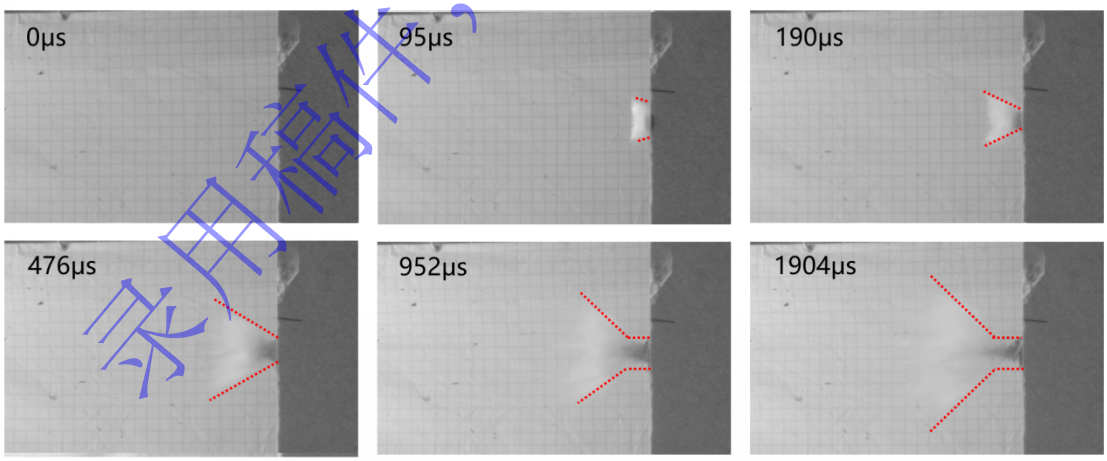
录用稿件，非最终出版稿

构。由图像可知，明显火光持续时间为 381 μs，说明 Ni/Al 弹丸在撞击早期发生了持续反应释能。952~1904 μs 时，喷射羽流进一步扩大，羽流边界逐渐模糊，整体进入扩散衰减阶段。基于课题组前期研究结果[11]，Ni/Al 活性材料的冲击反应阈值压力约为 10.38 GPa。而 1748 m/s 撞击速度下，弹靶界面冲击压力约为 14.72 GPa，明显高于反应阈值。同时，高速录像观察到撞击区域出现持续且明显的发光现象。结合冲击压力分析与高速录像结果，可以判断 Ni/Al 活性材料在撞击过程中发生了冲击诱导化学反应。

相比之下，95 μs 时，Cu 弹丸撞击点附近出现灰白色初始喷射物，但未观察到类似 Ni/Al 弹丸的明显火光；190~476 μs 内喷射物逐渐形成锥形羽流，但其亮度、厚度和扩展范围均小于 Ni/Al 弹丸。952~1904 μs 时，喷射羽流继续扩展，羽流边界逐渐模糊，整体进入扩散衰减阶段，如图 4 所示。Cu 弹丸撞击花岗岩的喷射过程主要受动能作用控制，喷射物羽流范围较小，而 Ni/Al 活性弹丸撞击时动能和化学能联合作用，撞击早期 Ni/Al 材料释放的化学能量提高了喷射羽流的扩展速度。因此，Ni/Al 弹丸形成的喷射羽流亮度更高、扩展范围更大，表明活性材料反应释能对花岗岩靶体喷射羽流扩展具有增强作用。



(a)Ni/Al，1748m/s



(b)Cu，1700m/s

图 4 不同材料撞击花岗岩喷射物飞溅演化过程

Fig. 4 Evolution of ejecta during impacts of different materials on granite

为定量分析 Ni/Al 弹丸撞击反应释能对喷射羽流扩展行为的影响，基于高速录像图像选取撞击后连续 10 帧作为统计区间，分别测量了喷射羽流轴向平均速度 v_{ex}、径向平均速度 v_{ey} 以及喷射羽流边缘与靶面之间的夹角θ，示意图如图 5 所示，统计结果见表 2。随撞击速度的增加，Cu 弹丸对应的θ由 58°增加至 69°，而 Ni/Al 弹丸则由 60°降低至 54°，两类弹丸

录用稿件，非最终出版稿

表现出不同的喷射羽流几何特征。对于 Cu 惰性弹丸，其作用过程主要由撞击动能控制。随着撞击速度提高，弹靶界面压力和能量沉积深度增加，中心压碎及轴向抛射逐渐增强，因此喷射羽流的轴向扩展分量增长较明显，喷射锥相对于靶面的夹角逐渐增大。而对于 Ni/Al 活性弹丸，当撞击速度低于反应阈值速度其作用主要受动能控制。当速度超过反应阈值后，随着速度的增加，Ni/Al 化学反应程度逐渐增大，附加的化学能能够有效促进近自由表面的材料破碎及沿靶面的横向喷射，使羽流边界呈现向靶面方向扩展的趋势，进而喷射羽流边缘与靶面的夹角减小。在相同撞击速度下，Ni/Al 弹丸产生的轴向和径向羽流扩展速度均高于 Cu 弹丸。因此，Ni/Al 反应释能不仅提高了喷射羽流的整体扩展速度，而且其附加作用在沿靶面径向方向上更为显著，使羽流形态趋于扁平化和径向扩展。

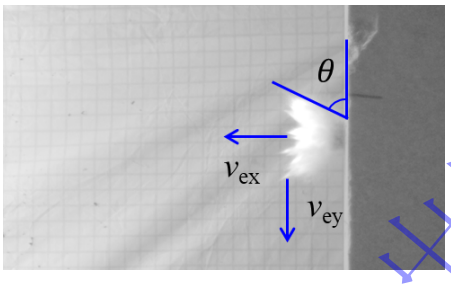


图 5 喷射物飞溅速度示意图

Fig. 5 Schematic of ejecta splash

表 2 喷射物数据统计结果

Table 2 Statistical results of ejecta characteristics

材料	v(m·s^{-1})	θ(°)	v_{ex}(m·s^{-1})	v_{ey}(m·s^{-1})
Cu	1202	58	292	101
	1612	68	347	146
	1700	69	403	190
Ni/Al	1210	60	378	210
	1518	57	438	222
	1748	54	488	246

2.2 成坑形貌特征

试验中两种球形弹丸撞击花岗岩靶的撞击坑形貌如图 6 所示，具有相同的破坏特征，即撞击坑由碗状中心坑(撞击坑白色区域)和浅层剥落区(撞击坑灰色区域)组成。碗状中心坑由早期靶体材料冲击压碎和开坑抛射形成，而浅层剥落区由冲击波与稀疏波在自由表面的相互作用导致材料发生拉伸破坏形成。由于花岗岩具有典型的脆性材料特征，抗拉强度较低，难以承受高强度的拉伸应力波，且岩石类材料的均断裂破坏具有随机性。因此，剥落具有不均匀性，进而形成的撞击坑呈现出不太规则的圆周边界。

录用稿件，非最终出版稿

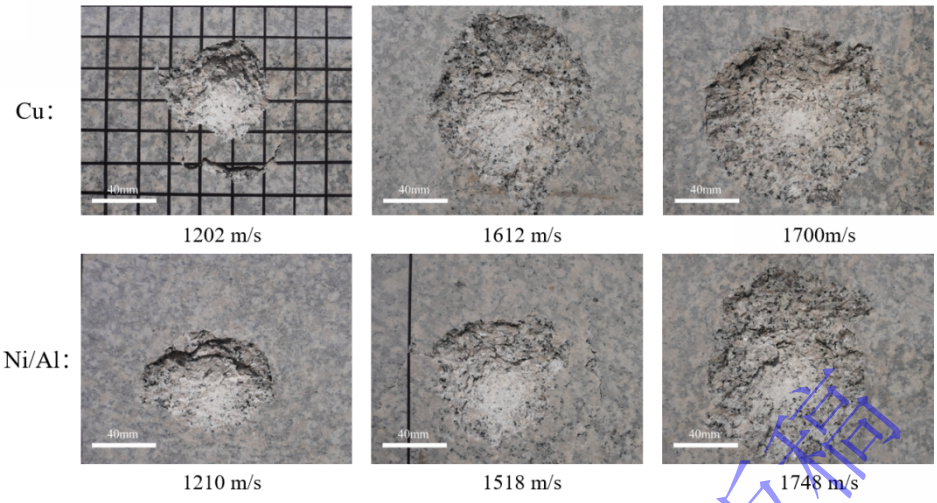


图 6 花岗岩撞击坑形貌

Fig. 6 Impact craters in granite

为了能够精确获得撞击坑直径、深度和体积等尺寸参数，使用三维扫描仪对岩石破坏区域进行扫描，扫描结果如图 7 所示。对不同撞击速度下的撞击坑等效直径 D 、深度 P 和体积 V 进行测量，结果如表 3 所示，其中撞击坑等效直径 D 通过公式(1)计算：

$$D = 2\sqrt{S/\pi} \tag{1}$$

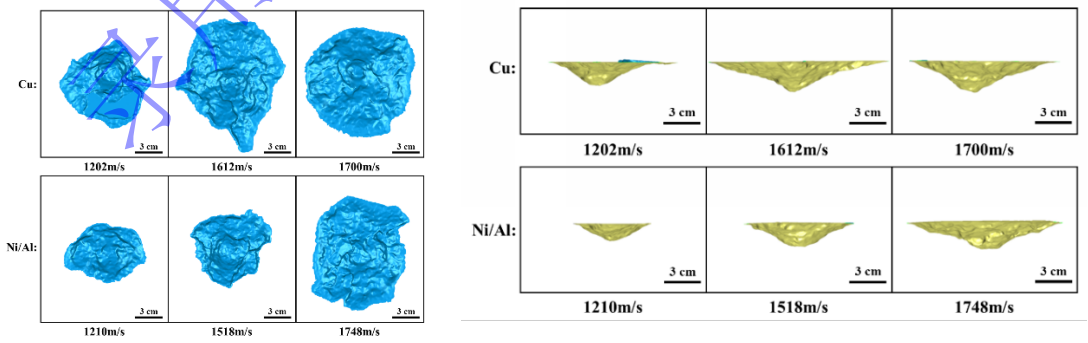
式中：S 为撞击坑横截面积。

图 7(b)所示为铜弹丸和 Ni/Al 弹丸撞击坑剖面形貌，能够反映撞击坑的内部结构。从图中可以看出，撞击坑中央位置存在一个凹坑。随着撞击速度增加，撞击坑底部逐渐变得平坦。与铜弹丸撞击坑相比，相同速度下 Ni/Al 弹丸撞击坑更加平坦。

表 3 成坑结果统计

Table 3 Impact crater results

材料	v_0/(m·s^{-1})	S/mm^2	D/mm	P/mm	V/mm^3	D/d	P/d	V/V_p	P/D
Cu	1202	6224	89.0	17.5	23370	9.28	1.82	50.45	0.20
Cu	1612	9214	108.3	23.0	71094	11.29	2.40	153.48	0.21
Cu	1700	9999	112.9	24.8	76472	11.76	2.58	165.09	0.22
Ni/Al	1210	3491	66.7	14.7	19851	5.56	1.23	21.94	0.22
Ni/Al	1518	4451	75.3	18.2	33104	6.28	1.52	36.59	0.24
Ni/Al	1748	8742	105.5	21.7	63694	8.79	1.81	70.40	0.21



(a) Impact Crater Morphology (b) Impact Crater Profile

图 7 3 维扫描获得的成坑形貌

Fig. 7 Crater morphology obtained from 3D scanning

为了有效对比分析不同速度下 Cu 弹丸和 Ni/Al 活性弹丸的成坑几何差异，减小弹丸

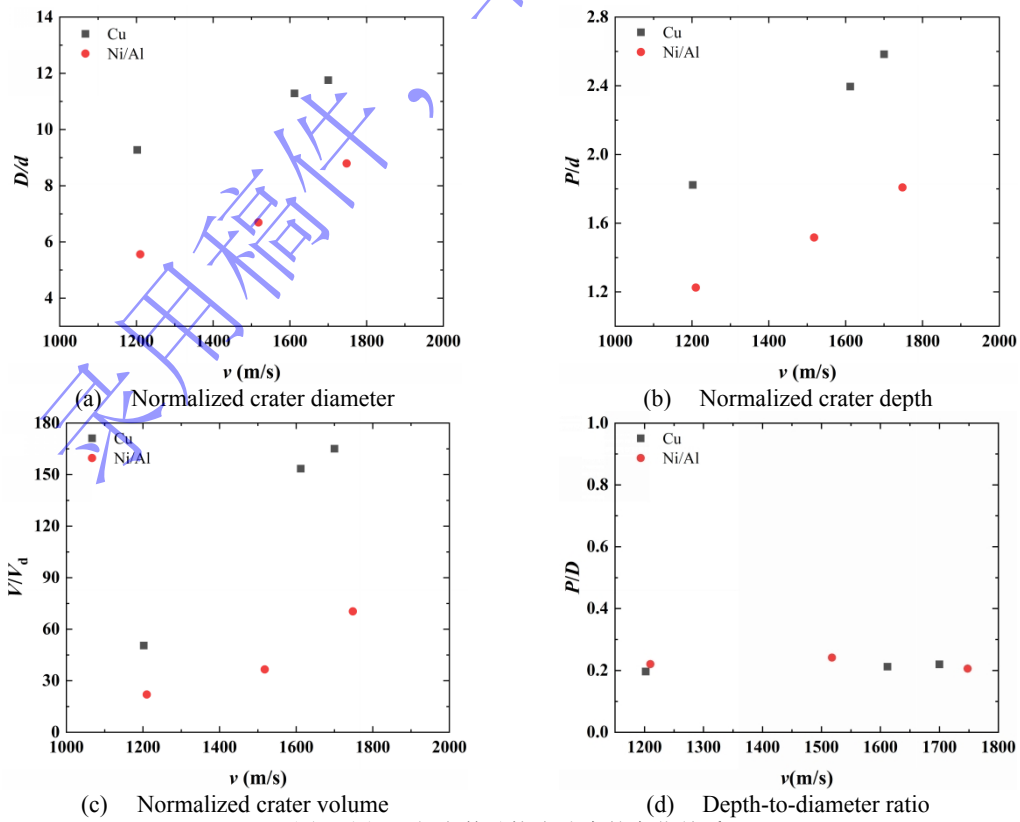
录用稿件，非最终出版稿

尺寸差异对成坑参数的影响，采用归一化坑径 D/d、归一化坑深 P/d、归一化坑体积 V/V_d 和及坑深径比 P/D 表征成坑几何特征，其随撞击速度的变化如图 8 所示。由图 8(a)~(c)可知，随着撞击速度增加，两类弹丸的归一化坑径、坑深和坑体积均呈增大趋势。

对于 Cu 弹丸，当撞击速度由 1202 m/s 增加至 1700 m/s 时，D/d 由 9.28 增大至 11.76，P/d 由 1.82 增大至 2.58，V/V_d 由 50.45 增大至 165.09。Ni/Al 弹丸在 1210 m/s 增加至 1748 m/s 范围内，D/d 由 5.56 增大至 8.79，P/d 由 1.23 增大至 1.81，V/V_d 由 21.94 增大至 70.40。在相近撞击速度下，Cu 弹丸的归一化成坑参数整体高于 Ni/Al 弹丸。原因在于 Cu 弹丸撞击花岗岩时的弹靶界面压力更高，能够在靶体内部形成更强的冲击波，并在自由表面形成更强的卸载拉伸波，从而促进撞击区石压碎、裂纹扩展和层裂剥落。相比之下，Ni/Al 弹丸虽然在高速撞击过程中发生反应释能，但其对总体成坑尺寸的提升作用相对有限。

另外，当 Ni/Al 弹丸撞击速度由 1518 m/s 增至 1748 m/s 时，D/d 增长约 40.0%，而 P/d 仅增长 19.1%，V/V_d增加约 92.4%，表明高速度阶段撞击坑的径向扩展更加显著。一方面随着撞击速度提高，弹靶界面压力变大，冲击波强度及其在靶体内的作用范围增大，撞击区石压碎、裂纹扩展区域增加，近自由表面受到的卸载拉伸作用增强，促进外围浅层岩体的层裂剥落；另一方面，高速度下 Ni/Al 活性材料的反应释能增加，其产生的附加应力扰动能够进一步促进已有裂纹的扩展与贯通。两者共同作用，使撞击坑的径向扩展更加显著。

由图 8(d)可见，Cu 弹丸形成的 P/D 约为 0.20~0.22，Ni/Al 弹丸形成的 P/D 约为 0.21~0.24，二者差异较小，且随撞击速度变化不明显。这表明在本文试验速度范围内，撞击速度升高主要表现为开坑整体尺度的放大，坑径和坑深基本保持同步增长，开坑形貌仍以浅碗状为主，未发生由表层开坑向深侵彻坑的明显转变。综合来看，Cu 弹丸主要表现为惰性侵彻损伤特征，而 Ni/Al 活性弹丸在高速度条件下表现出反应释能诱导的径向破坏增强效应，但该效应并未显著改变开坑的整体几何形态。



(a) Normalized crater diameter (b) Normalized crater depth

(c) Normalized crater volume (d) Depth-to-diameter ratio

图 8 成坑几何参数随撞击速度的变化关系

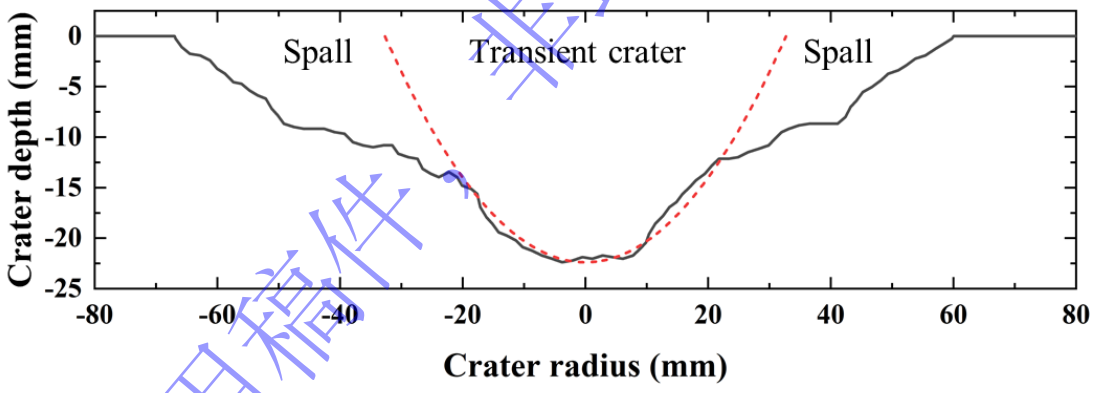
录用稿件，非最终出版稿

Fig. 8 Variation of crater geometric parameters with impact velocity

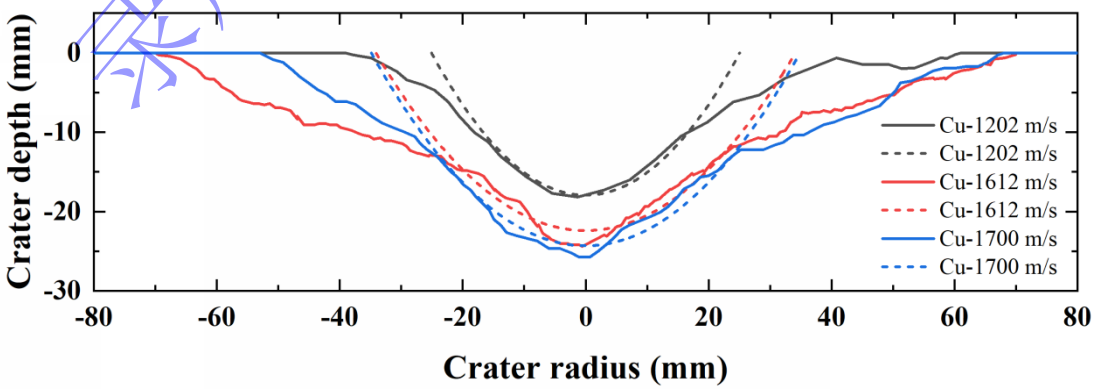
为分析成坑体积随撞击速度的变化规律，基于图 7 三维扫描结果对撞击坑进行几何重构和数字化处理，结果如图 9 所示。参考 Dufresne 等的工作[20]，首先以三维扫描得到的未损伤靶面作为零高程面，确定撞击中心并提取径向剖面；中心连续、光滑且呈单调碗状变化的区域定义为瞬态坑主体，并采用最小二乘抛物线进行拟合。沿径向向外，当实测轮廓开始持续偏离中心抛物线趋势，同时出现明显坡度/曲率转折并过渡为浅层剥落平台时，将该位置确定为瞬态坑与层裂区的分界。由拟合瞬态坑曲面与原始靶面围成的体积定义为瞬态坑体积 V_{tr}，浅层剥落区与原始靶面围成的体积定义为层裂体积 V_{sp}。

图 10 给出了不同速度下最终坑体积 V_{fi} 、瞬态坑体积 V_{tr} 和层裂体积 V_{sp} 的变化规律。对于 Cu 弹丸，三者均随撞击速度增大而增加，其中 V_{tr} 的增长对最终坑体积增加的贡献大于 V_{sp}。当撞击速度由 1612 m/s 增至 1700 m/s 时，V_{tr}继续增大，而 V_{sp}增长趋缓，表明 Cu 弹丸的成坑体积增长主要表现为碗状中心坑的进一步扩大。这主要与冲击波作用下岩石的局部压碎及后续材料挖掘抛射机制有关。

相比之下，Ni/Al 弹丸的 V_{tr} 随速度升高近似线性增加，而 V_{sp} 在高速度阶段显著增大。当撞击速度由 1518 m/s 增至 1748 m/s 时，V_{fi} 由 33104 mm³增至 63694 mm³，增长约 92.4%，其中 V_{sp} 由约 0.6×10^4 mm³增至约 2.6×10^4 mm³，其增量约占最终坑体积增量的 65%，表明外围层裂剥落是该阶段成坑体积快速增加的主要来源。这是由于随着撞击速度提高，冲击压力增大，自由表面卸载形成的拉伸波增强，促进近自由表面的拉伸损伤，使层裂剥落范围明显扩大。在此基础上，随着速度的增加，Ni/Al 活性材料的撞击反应释放的附加化学能变大，其通过局部应力扰动促进已有裂纹的扩展与贯通，从而进一步扩大浅层层裂剥落范围。

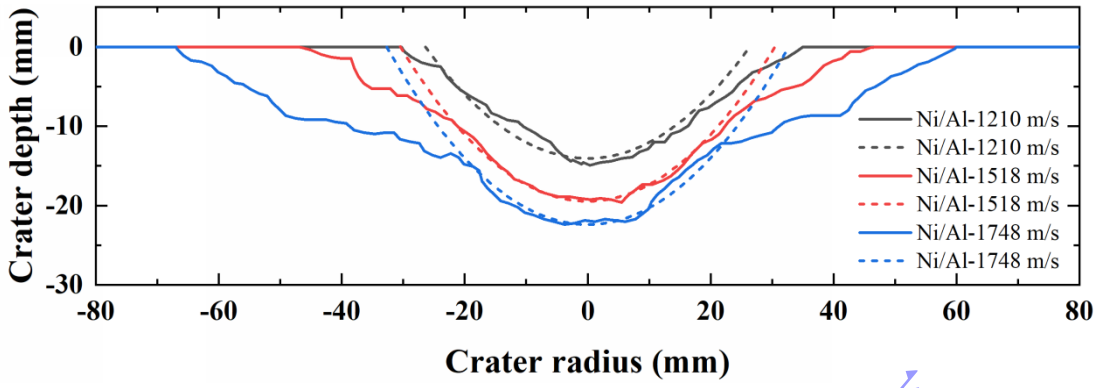


(a) Typical crater morphology



(b) Cu

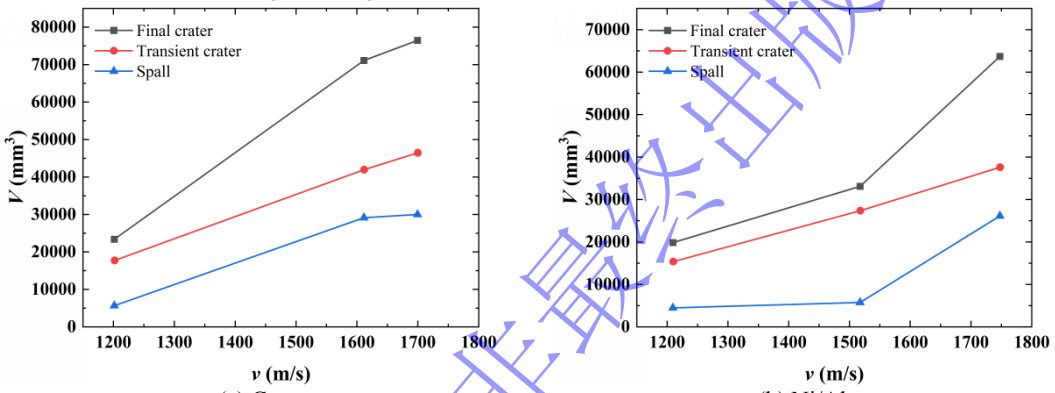
录用稿件，非最终出版稿



(c) Ni/Al

图 9 数字化重构的成坑剖面

Fig. 9 3D digital reconstruction of the crater cross-section



(a) Cu (b) Ni/Al

图 10 成坑体积与撞击速度的关系

Fig. 10 The dependence of crater volume on impact velocity

2.3 开坑直径理论分析

球形弹丸高速撞击岩石类材料的开坑过程涉及复杂的物理机制，难以建立统一的理论解析模型。量纲分析为研究高速撞击成坑规律提供了有效途径，研究人员通过大量的半无限目标高速/超高速碰撞实验，建立了多种成坑尺寸经验公式 [21-23]。其中，Holsapple 等[22]综合考虑能量和动量机制，提出了统一的成坑尺寸理论，该理论被广泛应用于高速及超高速撞击开坑问题。

为描述 Ni/Al 活性弹丸高速撞击花岗岩靶的开坑直径响应，基于 Holsapple 理论[22]，综合考虑撞击速度、弹丸尺寸、弹靶密度以及靶体等效强度等因素，通过引入反应释能引起的靶体强度退化效应，建立考虑化学反应影响的球形弹丸撞击半无限岩石靶的开坑直径经验模型。模型建立基于以下假设：

（1）球形弹丸垂直撞击靶板；

（2）撞击压力远高于弹/靶材料强度；

（3）撞击过程弹/靶材料未出现熔化、汽化及相变。

撞击速度直接影响弹丸动能、弹靶界面冲击压力及 Ni/Al 化学反应程度；对于球形弹丸，其质量由弹丸直径和密度共同决定，因此模型通过弹丸尺寸及密度参数间接体现质量的影响。而靶体等效强度用于表征岩石抵抗开坑破坏的能力，对于不同强度的岩石，可在相应材料参数及标度关系适用的条件下进行开坑预测。

基于点源相似理论，选取成坑直径 D、撞击速度 v_{imp}、弹丸直径 d、重力加速度 g、靶体等效强度 Y、弹丸密度 ρ_{p} 和靶体密度 ρ_{t} 作为基本变量，可以推导出四个独立的无量纲参

录用稿件，非最终出版稿

数（π_{D}、π_2、π_3 和 π_4）：

$$\pi_{\mathrm{D}} = D\left(\frac{\rho_{\mathrm{t}}}{M_{\mathrm{p}}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2}$$

$$M_{\mathrm{p}} = \frac{\pi}{6}\rho_{\mathrm{p}} d^3 \tag{3}$$

$$\pi_2 = \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{1/3}\frac{gd}{v_{\mathrm{imp}}^2} \tag{4}$$

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho_{\mathrm{t}} v_{\mathrm{imp}}^2} \tag{5}$$

$$\pi_4 = \frac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{p}}} \tag{6}$$

式中：M_{P} 是球形弹丸的质量，Y 为靶体的等效强度，π_{D} 为无量纲直径、π_2 重力项、π_3 和 π_4 分别为无量纲强度项和密度比。

基于 Holsapple 等[24]工作，可以得到无量纲直径 π_{D} 与其他变量之间的函数关系：

$$\pi_{\mathrm{D}} = K_1\left[\pi_2\pi_4^{\frac{\mu+2-6\upsilon}{3\mu}} + \left(\pi_3\pi_4^{-\frac{2-6\upsilon}{3\mu}}\right)^{\frac{\mu+2}{2}}\right]^{\frac{-\mu}{\mu+2}} \tag{7}$$

式中：K_1 是弹靶材料有关的系数，μ 为速度标度指数，反映了撞击过程中能量标度与动量标度的相对贡献，花岗岩为 0.55[22]，υ 为密度标度指数，用于描述弹丸与靶体之间密度差异对开坑尺寸的影响，花岗岩为 0.33[22]。

式(7)为无量纲直径的一般形式，能够同时描述重力控制和强度控制两种极限情形。当撞击坑尺寸较大、重力塌陷占主导时，π_2 项起主要作用；当撞击坑尺寸较小或靶体强度效应显著时，π_3 项起主要作用。对于本文所研究的花岗岩靶高速撞击开坑问题，撞击坑尺度较小，重力效应相对于靶体强度效应可忽略，因此可采用强度控制区近似。此时式(7)可化简为：

$$\pi_{\mathrm{D}} = K_1\pi_3^{-\frac{\mu}{2}}\pi_4^{\frac{1-3\upsilon}{3}} \tag{8}$$

式(8)对弹丸直径进行归一化处理，得到强度控制下归一化坑径一般表达式：

$$\frac{D}{d} = K_1\left(\frac{Y}{\rho_{\mathrm{t}} v_{\mathrm{imp}}^2}\right)^{-\mu/2}\left(\frac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)^{(1-3\nu)/3}\left(\frac{\pi\rho_{\mathrm{p}}}{6\rho_{\mathrm{t}}}\right)^{1/3} \tag{9}$$

当活性弹丸撞击靶板的冲击压力达到反应阈值压力时，活性材料发生化学反应，释放附加化学能会导致靶体损伤加剧，使靶体等效强度降低。不同冲击压力下活性弹丸的化学反应程度不同，导致释放的化学能对靶额外损伤也不同。因此，等效强度 Y 转化冲击压力相关的等效强度 $Y_{\mathrm{eff}}(P)$。

Ni/Al 活性弹丸撞击花岗岩靶体时，根据弹靶的阻抗匹配关系确定冲击压力 P:

$$P = \rho_{\mathrm{t}}\left(c_t + s_t u_p\right)u_p \tag{10}$$

录用稿件，非最终出版稿

$$U_S = c + su_p \tag{11}$$

$$\rho_t \left(c_t + s_t u_p\right) u_p = \rho_p \left[c_p + s_p \left(v_{\text{imp}} - u_p\right)\right]\left(v_{\text{imp}} - u_p\right) \tag{12}$$

式中：v_{imp}为撞击速度，u_{p}为靶体侧粒子速度，ρ、c、s 分别为材料密度和 Hugoniot 参数，下标 t 和 p 分别表示靶体和弹丸。

Ni/Al 弹丸的化学反应程度通过冲击压力对应的 Hugoniot 终态温度确定。基于 Mie-Grüneisen 状态方程和热力学关系建立比容-压力-温度关系：

$$P_{\text{H}}(V) = \frac{\dfrac{V}{\gamma(V)} P_{\text{C}}(V) + E_{\text{C}}}{\dfrac{V}{\gamma(V)} - \dfrac{1}{2}(V_0 - V)} \tag{13}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}V} = \frac{1}{2C_{\text{V}}}\left[(V_0 - V)\frac{\mathrm{d}P_{\text{H}}}{\mathrm{d}V} + P_{\text{H}}\right] - \frac{\gamma}{V}T \tag{14}$$

式中：V_0为初始比容，C_{V}为定容比热，V为冲击压缩后的比容，$\gamma(V)$为 Grüneisen 系数，P_{C}和 E_{C}分别为冷压和冷能。

利用 Arrhenius 反应动力学方程[25,26]，获得冲击温度 T-反应度 y 的变化关系：

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}y} = \frac{R_u T^2}{E_a}\left[\frac{1}{2y} - \frac{n\ln(1-y) + n - 1}{n(1-y)\left[-\ln(1-y)\right]}\right] \tag{15}$$

式中：R_{u}为气体常数，E_{a}为表观活化能，n为反应级数。

由式(10)~(15)可得速度控制下的反应度：

$$y\left(v_{\text{imp}}\right) = y\left[T(v_{\text{imp}})\right] \tag{16}$$

反应度 y 是根据初始弹靶界面冲击压力，结合 Hugoniot 温升关系及 Arrhenius 反应动力学方程计算得到。该计算采用简化假设，未考虑弹丸侵彻过程中的冲击压力衰减、不同位置反应条件的差异及热耗散效应，作为建立半经验模型的反应激活表征量。当 Ni/Al 活性弹丸冲击压力低于反应阈值压力时，材料不发生化学反应，超过反应阈值压力后发生化学反应，释放的化学能会作用于靶体破坏过程，引起花岗岩额外损伤。岩石破坏过程本质上伴随能量耗散，耗散能可用于表征内部裂纹扩展、颗粒破碎和不可逆损伤演化。因此，Ni/Al 反应释放的附加能量可视为促进靶体损伤发展的外加能量输入。参考 JH-2 脆性材料动态损伤本构中强度由完整状态向残余状态退化的思想[27]，本文引入无量纲反应能强度参数 $\Phi(v_{\text{imp}})$，用于描述 Ni/Al 反应释能对花岗岩等效强度的削弱作用：

$$\Phi\left(v_{\text{imp}}\right) = \eta \frac{\rho_{\text{t}} y\left(v_{\text{imp}}\right) Q}{Y} \tag{17}$$

式中：η 表示强度退化耦合系数，Q 为 Ni/Al 单位质量反应热，7.096kJ/g[11]。

考虑到岩石破碎后仍具有残余承载能力，定义花岗岩等效强度退化关系为：

$$Y_{\text{eff}}\left(v_{\text{imp}}\right) = Y_{\text{res}} + \frac{Y - Y_{\text{res}}}{1 + \Phi\left(v_{\text{imp}}\right)} \tag{18}$$

录用稿件，非最终出版稿

$$Y_{\mathrm{res}}=\alpha Y \tag{19}$$

式中：Y_{eff}为反应释能作用后的等效强度，Y_{res}为残余强度，α为残余强度比例系数。He 等[28]在花岗岩动态破坏研究中采用的破碎强度系数与完整强度系数之比为 0.3。在压力效应占主导的条件下，上述系数比可用于近似表征岩石破碎前后的强度比例。因此，本文将残余强度比例系数取为 0.3，以近似描述 Ni/Al 反应释能引起的花岗岩极限强度退化效应。

当撞击压力低于反应阈值压力时，Ni/Al 活性弹丸的化学反应尚未被触发，此时反应度 y=0，Y_{eff}=Y，表示靶体未受到反应释能削弱。Ni/Al 活性材料发生化学反应，释放的化学能作为附加能量输入促进靶体损伤演化。随着反应度逐渐增大，靶体等效强度 Y_{eff}逐渐降低并趋近于 Y_{res}，表明 Ni/Al 反应释放的化学促进靶体损伤发展，使其承载能力发生退化。

最终获得 Ni/Al 活性弹丸归一化开坑直径预测公式：

$$\frac{D}{d}=K_1\left(\frac{Y_{\mathrm{eff}}\left(v_{\mathrm{imp}}\right)}{\rho_{\mathrm{t}}v_{\mathrm{imp}}^2}\right)^{-\mu/2}\left(\frac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)^{(1-3\nu)/3}\left(\frac{\pi\rho_{\mathrm{p}}}{6\rho_{\mathrm{t}}}\right)^{1/3} \tag{20}$$

该公式能够将撞击速度、弹靶密度、靶体等效强度、化学反应程度和开坑直径联系起来，用于描述 Ni/Al 活性弹丸高速撞击花岗岩过程中的动能侵彻与化学释能耦合开坑效应。

表 4 材料参数[29]

Table 4 Impact crater results

材料	ρ/(g·cm^{-3})	C_0/m·s^{-1}	s
Cu	8.93	3973	1.49
Ni/Al	4.75	4014	1.56
花岗岩	2.63	3680	1.15

表 5 Ni/Al 反应动力学参数[11]

Table 5 Reaction kinetic Parameters of the Ni/Al

材料	R_{u}	C_{V}/(J·kg^{-1})·K^{-1}	E_{a}/ (kJ/mol)	n
Ni/Al	8.314	588	57.015	1.49

基于本文试验数据，获得的 Cu 弹丸和 Ni/Al 弹丸开坑直径预测公式：

$$\frac{D}{d}=1.81\left(\frac{Y}{\rho_{\mathrm{t}}v_{\mathrm{imp}}^2}\right)^{-0.275}\left(\frac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)^{0.0033}\left(\frac{\pi\rho_{\mathrm{p}}}{6\rho_{\mathrm{t}}}\right)^{1/3} \tag{21}$$

$$\frac{D}{d}=1.30\left(\frac{Y}{\rho_{\mathrm{t}}v_{\mathrm{imp}}^2}\right)^{-0.275}\left(\frac{\rho_{\mathrm{t}}}{\rho_{\mathrm{p}}}\right)^{0.0033}\left(\frac{\pi\rho_{\mathrm{p}}}{6\rho_{\mathrm{t}}}\right)^{1/3}\left(0.3+\frac{0.7}{1+0.2\dfrac{\rho_{\mathrm{t}}y\left(v_{\mathrm{imp}}\right)Q}{Y}}\right)^{-0.275} \tag{22}$$

表 6 列出了不同弹丸归一化坑径的计算值与试验值。在 1200~1800m/s 范围内，Cu 弹丸和 Ni/Al 弹丸计算值与试验值吻合较好，误差均低于 10%。这表明所建立的模型能够较好地预测惰性 Cu 弹丸撞击花岗岩的成坑直径；通过引入反应度表征 Ni/Al 活性弹丸的化学释能效应，模型同样能够合理预测活性弹丸的成坑直径，表明该模型对惰性及活性弹丸均具有较好的适用性。值得注意的是，撞击速度从 1518 m/s 增加至 1748 m/s，反应度仅从 0.0047 增加到 0.039，但是归一化坑径坑径显著增加。对于 Ni/Al 较低反应度下开坑直径显著增加的现象，可从化学释能的相对大小及岩石损伤演化特征两个方面进行分析。从能量贡献来看，对于质量为 4.2 g 的 Ni/Al 活性弹丸，当撞击速度为 1518 m/s 时，反应度为

录用稿件，非最终出版稿

0.0047，化学反应释能约为 0.14 kJ，占弹丸初始动能（4.84 kJ）的 2.9%；当撞击速度增至 1748 m/s 时，反应度增大至 0.039，化学反应释能约为 1.16 kJ，占初始动能（6.42 kJ）的 18.1%。随着撞击速度提高，反应释放的化学能及其相对于初始动能的比例均显著增加，其对靶体破坏的潜在影响不容忽视。从破坏机理来看，花岗岩属于典型的脆性材料，脆性材料接近完全损伤时，少量附加载荷可对应较明显的宏观破坏扩展。撞击过程中，靶体首先在冲击波作用下发生局部压碎和微裂纹扩展，随后冲击波在自由表面反射形成拉伸波，进一步加剧近自由表面的拉伸损伤，使部分区域接近动态拉伸失效状态。由于 Ni/Al 活性材料的冲击诱导化学反应存在一定延迟[30]，其化学能释放滞后于初始冲击波作用。附加化学能通过局部应力扰动，进一步促进已损伤区域内裂纹的扩展与贯通，从而扩大浅层层裂剥落范围。因此，反应释能并非独立主导成坑过程，而是在机械冲击损伤的基础上进一步促进靶体破坏。即使附加化学能所占比例相对有限，也可能使局部已接近失效的岩体发生进一步破坏。当撞击速度为 1518 m/s 时，化学反应释能占比较低，开坑过程主要由动能主导，附加化学能对层裂区域扩展的促进作用相对有限；当撞击速度增至 1748 m/s 时，化学反应释能占比提高至 18.1%，其引起的局部应力扰动能够促进花岗岩靶高损伤区域的裂纹扩展与层裂剥落，从而与增强的动能作用共同促进撞击坑的径向扩展。

表 6 不同弹丸归一化坑径计算结果和试验结果对比

Table 6 Comparison of calculated and experimental normalized diameters for different projectiles

材料	v_0/(m·s^{-1})	P/GPa	y	D/d		*Error*/%
				Exp.	Cal.	
Cu	1202	11.34	/	9.28	9.53	2.73
Cu	1612	16.19	/	11.29	11.20	0.77
Cu	1700	17.29	/	11.76	11.54	1.91
Ni/Al	1210	9.45	0	5.56	5.56	0
Ni/Al	1518	12.29	0.0047	6.28	6.51	3.59
Ni/Al	1748	14.72	0.039	8.79	8.40	9.70

图 11 和图 12 给出了不同弹丸归一化坑径的计算结果及 Ni/Al 弹丸反应程度随撞击速度的变化规律。由图 10 可知，Cu 弹丸和 Ni/Al 弹丸的归一化坑径均随撞击速度增大而增加，说明动能是影响开坑扩展的主要因素。对于 Ni/Al 弹丸，未考虑反应效应时计算结果明显偏低；引入反应释能修正后，计算曲线与试验点吻合较好，表明反应释能对开坑扩展具有明显促进作用。由图 11 可知，Ni/Al 弹丸反应程度与归一化坑径均随速度升高而增大，但二者变化趋势并不完全一致。低速阶段，撞击速度低于反应阈值（1321 m/s）[11]，弹丸主要表现为惰性侵彻特征，开坑扩展主要受动能控制；当速度进入反应激活区间后，反应程度逐渐提高，化学释能增强了弹丸-靶板作用区的局部损伤，使开坑直径增大；在较高速度下，反应程度快速上升并逐渐趋于饱和，但由于部分化学能消耗于产物升温、碎片飞散和热耗散等过程，并未完全转化为径向扩展开坑能量，因此开坑直径的增长并不与反应程度呈线性对应关系。

录用稿件，非最终出版稿

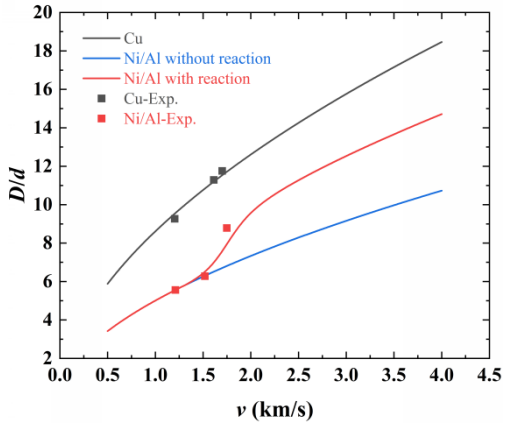


图 11 不同弹丸归一化坑径的计算结果与试验结果对比

Fig. 11 Comparison between calculated and experimental normalized crater diameters for different projectiles

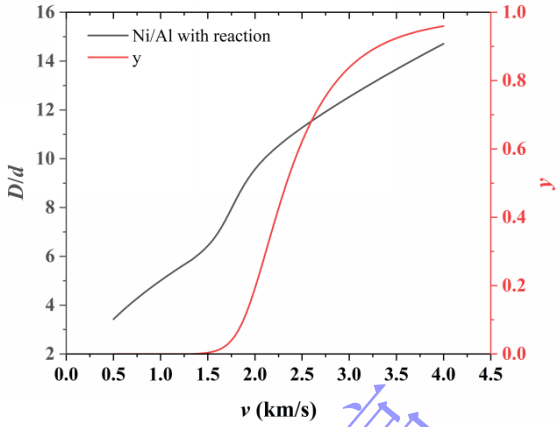


图 12 Ni/Al 弹丸归一化坑径与反应程度随撞击速度的变化

Fig. 12 Variation of normalized crater diameter and reaction degree of Ni/Al projectile with impact velocity

实际小行星动能撞击速度通常为数 km/s，弹靶界面冲击压力远高于材料强度，撞击响应主要表现为冲击波作用下的压碎、裂纹扩展及近自由表面层裂剥落。尽管本文试验速度仅为 1200~1800 m/s，但该速度范围内 Ni/Al 和 Cu 弹丸撞击花岗岩时的界面冲击压力约为 9~18 GPa，远高于 Ni/Al 和 Cu 弹丸的抗压强度（分别为 200 MPa 和 210 MPa）[11]及花岗岩的准静态抗压强度（约 161 MPa），表明该速度范围内的弹靶作用同样具有明显的强冲击响应特征。因此，本文试验虽未达到实际小行星动能撞击的速度水平，但对于研究强冲击条件下的开坑、层裂及喷射机制，以及 Ni/Al 反应释能对上述过程的影响仍具有一定参考价值。需要指出的是，当撞击速度进一步提高，导致弹靶材料发生显著熔化、汽化或相变时，Ni/Al 活性材料的冲击反应行为及靶体破坏机制可能发生变化。

3 结论

本文开展了 Ni/Al 活性弹丸与 Cu 惰性弹丸高速撞击半无限花岗岩靶的对比试验，分析了喷射羽流扩展及成坑特征，并建立了考虑化学反应的归一化坑径模型，得到以下结论：

(1) 两类弹丸形成的喷射羽流均表现出不同的扩展特征。随着撞击速度增加，Ni/Al 弹丸撞击时喷射羽流边缘与靶面之间的夹角逐渐减小，而 Cu 弹丸的夹角逐渐增加。相同撞击速度下，Ni/Al 弹丸形成的喷射羽流扩展范围更大，轴向和径向速度更高，表明反应释能对喷射羽流具有加速作用。

(2) Cu 弹丸和 Ni/Al 弹丸形成的撞击坑均呈浅碗状形貌，并由中心瞬态坑和浅层剥落区组成，其成坑体积均随撞击速度增大。相同撞击速度下，Cu 弹丸形成的撞击坑整体尺寸更大。Cu 弹丸的成坑体积增长主要来自中心瞬态坑的扩大，而 Ni/Al 弹丸在高速度下的层裂体积明显增加，说明反应释能可能促进靶体表层的破碎与剥落。

(3) 基于 Holsapple 开坑标度理论，结合 Ni/Al 反应动力学和等效强度退化模型，建立了考虑化学反应影响的归一化坑径经验模型，计算结果与试验结果吻合较好，各工况下的计算误差均小于 10%。

参考文献

[1] 吴伟仁, 龚自正, 唐玉华, 等. 近地小行星撞击风险应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 140-151. DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.02.015.

WU W R, GONG Z Z, TANG Y H, et al. Response to Risk of Near-Earth Asteroid Impact[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 140-151. DOI 10.15302/J-SSCAE-2022.02.015.

[2] 龚自正, 宋光明, 陈川, 等. 我国应对近地小行星撞击风险和动能撞击偏转研究的若干进展[J]. 上海航天, 2024, 41(5): 11-23. DOI:10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.05.002.

GONG Z Z, SONG G M, CHENG C, et al. China Response to Risk of NEA and Kinetic Energy Impact Deflection Researches: Retrospect and Prospect[J]. Aerospace Shanghai. 2024, 41(5): 11-23. DOI:10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.05.002.

[3] PALMER C. DART Mission Shows Potential for Planetary Defense by Smashing Asteroid into New Orbit[J]. Engineering, 2023, 24: 7-9. DOI:10.1016/j.eng.2023.03.002.

[4] CHENGA F, AGRUS H F, BARBEE B W, et al. Momentum transfer from the DART mission kinetic impact on asteroid Dimorphos[J]. Nature, 2023, 616(7957): 457-460. DOI:10.1038/s41586-023-05878-z.

[5] DALY R T, ERNST C M, BARNOUIN O S, et al. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence[J]. Nature, 2023, 616(7957): 443-447. DOI:10.1038/s41586-023-05810-5.

[6] LI J Y, HIRABAYASHI M, FARNHAM T L, et al. Ejecta from the DART-produced active asteroid Dimorphos[J]. Nature, 2023, 616(7957): 452-456. DOI:10.1038/s41586-023-05811-4.

[7] THOMAS C A, NAIDU S P, SCHEIRICH P, et al. Orbital period change of Dimorphos due to the DART kinetic impact[J]. Nature, 2023, 616(7957): 448-451. DOI: 0.1038/s41586-023-05805-2.

[8] GRAYKOWSKI A, LAMBERT R A, MARCHIS F, et al. Light curves and colours of the ejecta from Dimorphos after the DART impact[J]. Nature, 2023, 616(7957): 461-464. DOI: 10.1038/s41586-023-05852-9.

[9] WANG H F, XIE J W, GE C, et al. Experimental investigation on enhanced damage to fuel tanks by reactive projectiles impact[J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 599-608. DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.017.

[10] IDRICI D, GOROSHIN S, LOISEAU J, et al. Imaging pyrometry of metal fragments initially generated during the supersonic impact of reactive metal projectiles[J]. Journal of Applied Physics, 2025, 137(2): 024903. DOI: 10.1063/5.0233987.

[11] GENG H H, WANG J, XIONG W, et al. Dynamic behavior and shock-induced energy release characteristics of Ni/Al energetic structural materials prepared by cold spray additive manufacturing[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 7393-7404. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.03.073.

[12] 张雪朋, 肖建光, 余庆波, 等. 活性药型罩聚能装药作用混凝土靶毁伤效应[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(12): 1211-1215. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0527.

ZHANG X P, XIAO J G, YU Q B, et al. Demolition Effect of Reactive Material Liner Shaped Charge Against Concrete Target[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(12): 1211-1215. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0527.

[13] 肖建光. 活性聚能侵彻体作用混凝土结构靶毁伤效应研究[D]. 北京理工大学, 2018.

[14] 苏成海, 王中, 马红兵, 等. 活性射流作用复合混凝土结构动态毁伤特性[J]. 兵工学报, 2024, 45(S1): 135-146. DOI: 10.12382/ bgxb.2024.0630.

SU CH, WANG Z, MA HB, et al. Dynamic Damage Characteristics of Composite Concrete Structure Subjected to Reactive Jet. ACTA ARMAMENTARII, 2024, 45(S1): 135-146. DOI: 10.12382/ bgxb.2024.0630.

[15] 张甲浩, 王海福, 葛超, 等. 活性 PELE 侵彻钢筋混凝土靶扩孔增强行为[J]. 兵工学报, 2025, 46(3): 131-146. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0307.

ZHANG J H, WANG H F, GE C. Enhanced Opening Behavior of Reactive PELE Penetrating into Reinforced Concrete Target[J]. ACTA ARMAMENTARII, 2025, 46(3): 131-146. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0307.

[16] 郭萌萌, 王海福, 张甲浩, 等. 活性横向效应增强弹侵彻钢筋混凝土毁伤效应仿真研究[J]. 兵工学报, 2024. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0527.

录用稿件，非最终出版稿

GUO M M, WANG H F, ZHANG J H. et al. Simulation Research on Damage Effect of Reactive Materials PELE Penetrating Reinforced Concrete. ACTA ARMAMENTARII, 2024. DOI: 10.12382/bgxb.2024.0527.

[17] 刘文近, 张庆明, 龙仁荣, 等. 动能撞击偏转近地小天体研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(1): 9-24. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.01.002.

LIU W J, ZHANG Q M, LONG R R, et al. Review of kinetic impact deflection of near-Earth objects [J]. Journal of Astronautics, 2023, 44(1): 9-24. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.01.002. (in Chinese)

[18] WALKER J D, CHOCRON S, DURDA D D, et al. Momentum enhancement from aluminum striking granite and the scale size effect[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 56: 12-18. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.08.003.

[19] LIU Y, JIANG Q, HU Z, et al. Crushing characteristics of granite during ultra-high speed penetration: experiments and simulations[J]. Acta Mechanica Sinica, 2026, 42(4): 124260). DOI: 10.1007/s10409-025-24260-x.

[20] DUFRESNE A, POELCHAU M H, KENKMANN T, et al. Crater morphology in sandstone targets: The MEMIN impact parameter study[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2013, 48(1): 50-70. DOI: 10.1111/maps.12024.

[21] LI L, ZHU Q, LI S, et al. Study on the attenuation pattern of stress wave in granite impacted by 30CrMnSiA alloy steel projectiles at 1.5-5.5 km/s[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(10). DOI: 10.1063/5.0226917.

[22] 刘文近, 张庆明, 马晓荷, 等. 近地小天体对地撞击成坑模型研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(12): 119-134. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0255.

LIU W J, ZHANG Q M, MA X H, et al. A review of the models of near-Earth object impact cratering on Earth [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(12): 121404. DOI: 10.11883/bzycj-2021-0255. (in Chinese)

[23] KUROSAWA K, TAKADA S. Impact cratering mechanics: A forward approach to predicting ejecta velocity distribution and transient crater radii[J]. Icarus, 2019, 317: 135-147. DOI: 10.1016/j.icarus.2018.06.021.

[24] HOLSAPPLE K A, HOUSEN K R. A crater and its ejecta: An interpretation of Deep Impact[J]. Icarus, 2007, 191(2): 586-597. DOI: 10.1016/j.icarus.2006.08.035.

[25] ZHANG X F, SHI A S, QIAO L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of multifunctional energetic structural materials[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(8): 083508. DOI: 10.1063/1.4793281.

[26] XIONG W, ZHANG X, TAN M, et al. The Energy Release Characteristics of Shock-Induced Chemical Reaction of Al/Ni Composites[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2016, 120(43): 24551-24559. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b06530.

[27] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials[C]//AIP Conference Proceedings: Vol. 309. Colorado Springs, Colorado (USA): AIP, 1994: 981-984. DOI: 10.1063/1.46199.

[28] HE C, YANG J. Dynamic crack propagation of granite subjected to biaxial confining pressure and blast loading [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2018, 15(6): 1-18. DOI: 10.1590/1679-78254463.

[29] LIU W, ZHANG Q, LONG R, et al. Effects of projectile parameters on the momentum transfer and projectile melting during hypervelocity impact[J]. Defence Technology, 2024, 32: 89-103. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.012.

[30] BEASON M T, GUNDUZ I E, SON S F. The role of fracture in the impact initiation of Ni-Al intermetallic composite reactives during dynamic loading[J]. Acta Materialia, 2017, 133: 247-257. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.05.042.

录用稿件，非最终出版稿