

汽车爆炸毁伤特征的实验研究

徐维森¹, 刘宇思¹, 张冀峰², 石 屹², 邓小良¹, 姬广富¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 绵阳 621000;
2. 公安部物证鉴定中心, 北京 100032)

摘 要: 汽车爆炸在涉爆案事件中越来越常见. 为有效打击国内外恐怖分子, 支持汽车爆炸案预防、刑侦与破案工作, 本文针对轿车车型进行了爆炸毁伤特征的现场实验研究. 实验分别在汽车底部中心, 后备箱中心, 驾驶座下引爆炸药. 爆炸过程中两个高速摄影通道记录爆炸毁伤动态过程, 同时利用冲击波超压测试系统分析外场不同方向的超压分布规律, 并进行了车身壁面压力测试. 实验获得大量汽车爆炸毁伤图像及碎片落点数据, 得到较为准确的超压分布数据和部分车身壁面超压状态. 本研究获得了不同炸点位置对汽车爆炸毁伤的影响, 以及超压分布等信息, 可有效支撑汽车爆炸案事件的现场还原和侦破工作.

关键词: 汽车爆炸; 公共安全; 毁伤特征; 冲击波超压; 反恐

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.054004

Experimental research on the damage features of vehicle under explosion

XU Wei-Sen¹, LIU Yu-Si¹, ZHANG Ji-Feng², SHI Yi², DENG Xiao-Liang¹, JI Guang-Fu¹

(1. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China; 2. Institute of Forensic Science of China, Beijing 100032, China)

Abstract: Vehicle explosion is becoming more and more common in explosion-related incidents. In order to combat domestic and foreign terrorists, and to support the criminal investigation and prevention about vehicle explosions, experimental research on the damage features of car under blast loading has been performed in this paper. In our experiments, explosives were detonated in the center of the bottom of the car, backup box center and under the driver's seat respectively. The dynamic process of experiments was recorded by two high-speed photographic channels. Free field overpressure distributions in different directions were analyzed by using the shock wave overpressure test system, and the overpressure on the car body was obtained as well. A large number of automobile damage images and debris distribution data were achieved by camera. The effects of different explosion positions on blast damage features as well as the overpressure distribution of vehicles were obtained in the experiments, which are of significance to the scene restoration and detection of car explosion cases.

Keywords: Vehicle explosion; Public safety; Damage features; Shock wave overpressure; Counter-terrorism

收稿日期: 2021-01-26
基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803800)
作者简介: 徐维森(1990—), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 研究方向为工程力学. E-mail: jackxws@live.cn
通讯作者: 刘宇思. E-mail: lylcbef@126.com; 邓小良. E-mail: xiaoliangdeng@163.com

1 引 言

爆炸杀伤面积大,造成财产损失多,是国内外恐怖分子实施刑事犯罪的重要手段之一. 目前全球发生了多起由汽车炸弹制造的恐怖袭击,国内汽车爆炸案也时有发生^[1]. 由于现代互联网发展,爆炸案特别是汽车爆炸作案手段出现多样化和复杂化趋势,这对相关案件的预防和侦破工作提出了更高的要求. 随着爆炸实验检测技术的成熟和计算仿真能力的提升,现场爆破实验结合计算爆炸力学的定量评估,对爆炸案件现场研判和快速侦破显得越来越重要.

目前已有部分对汽车爆炸的实验与理论研究. 实验方面,针对汽车炸弹的毁伤效果 James 等^[2]研究了汽车炸弹在不同距离处对建筑物的冲击影响并建立了可定量计算的对策模型, Rich 等^[3]进一步报道了一种可自动检测大型汽车炸弹识别炸药种类的系统. 从安全防护角度出发, Wu 等^[4]通过研究防爆墙在不同汽车炸弹威胁下的安置方式,给出了多种解决方案. 为解决实际案件中汽车爆炸现场还原的相关问题, 佐建君等^[5]与张彦春等^[6-7]对不同车型不同药量进行了还原爆炸现场的实验研究,分析了炸点位置,药类药量,得到了超压分布规律并进行了高速运动分析. 理论方面,一种混凝土柱对抗汽车炸弹的分析方法由 Sun 等^[8]通过理论建模构建起来,并充分举例证明了该分析方法的可靠性. 为了与爆炸现场真实环境对应,王立军等^[9]建立了真实环境下的汽车爆炸有限元模拟,获得车内压力分布和典型位置压力速度历程曲线. 智丽娜等^[10]补充了汽车爆炸在车辆周边环境的压力分布和冲击波传播规律. 而高轩能等^[11]从真实案件出发,建立了爆炸案建筑场景在汽车爆炸作用下的数值计算模型,并结合实际破坏情况进行了比较分析. 上述针对汽车爆炸的研究多集中于爆炸冲击波对周围建筑的破坏及相对应的防护对策分析,而爆炸对汽车本身造成的毁伤状态少有讨论.

汽车毁伤状态的定量评估可反推炸药当量、爆点位置等重要信息,对案件侦破帮助很大. 本文针对轿车车型在多爆点位置进行了爆炸实验,对现场进行详细拍照记录留存了被试品的爆炸毁伤效应图像,采用自由场冲击波超压传感器测试了到爆炸中心不同距离处的冲击波到达时间和超压峰值,并用高速摄影记录了爆炸及飞散物抛起的动态过程. 这些信息对深入理解汽车爆炸毁伤规律有重要

意义.

2 实验方法

本实验共使用两种炸药,分别为 2 号岩石乳化炸药和 TNT 炸药. 2 号岩石乳化炸药每件尺寸为 $\Phi 32\text{ mm}\times 320\text{ mm}$,质量 300 g. 炸药的基本性能详见表 1.

表 1 2 号岩石乳化炸药性能
Tab. 1 Physical parameters of 2# rock emulsified explosive

项目	殉爆距 离/cm	猛度 /cm	爆速 /cm	作功能 力/cm	药卷密度 /(g/cm ³)	爆炸后毒气 含量/(L/kg)
性能	≥3	≥3	≥3	≥3	1.05~1.20	≤50

实验用 TNT 炸药为 SR 77 mm 的 TNT 半球(质量 1.5 kg)2 件和 SR 67 mm 的 TNT 半球(质量 1.0 kg)1 件. 实验均采用 26 # 雷管起爆,并通过 $\Phi 26\text{ mm}\times 26\text{ mm}$ 的 PETN 传爆药柱起爆 2 号乳化炸药或 TNT 炸药. 共进行汽车爆炸实验 3 发,各发实验的爆轰序列及爆炸状态见表 2.

表 2 各发实验设计参数
Tab. 2 Design parameters for each experiment

发次	起爆雷管	传爆药	主炸药	炸点位置
1	26 # 雷管	PETN	2 号乳化炸药	车底中心
		$\Phi 26\text{ mm}\times 26\text{ mm}$	6 kg (20×300 g)	
2	26 # 雷管	PETN	TNT 炸药	后备箱中心
		$\Phi 26\text{ mm}\times 26\text{ mm}$	3 kg (2 件 SR 77 mm)	
3	26 # 雷管	PETN	TNT 炸药	驾驶座前
		$\Phi 26\text{ mm}\times 26\text{ mm}$	1 kg (SR 67 mm)	

实验中使用高速摄影记录爆炸时汽车破坏、碎片飞散的动态过程及爆炸后汽车的毁伤效果,使用自由场压力传感器测试车身外的冲击波超压,使用壁面压力传感器测量车身典型位置的壁面压力,并在车外不同位置布置玻璃窗、垃圾桶等常见物品作为简单效应物.

依据实验场地高速摄影机位条件,实验中两个高速摄影机位分别布置于被测车辆左侧和后方. 实验中使用一块预先浇筑的水泥板放置在实验场地中心,模拟车底硬化地面,水泥板长、宽和厚度分别为 3、3 和 0.15 m. 实验场地基本布局如图 1 所示. 所进行的 3 发实验中,第 1 发未设置玻璃窗,3 发实验中作为爆炸毁伤效应物的垃圾桶具体位置也有所不同,具体见表 3.

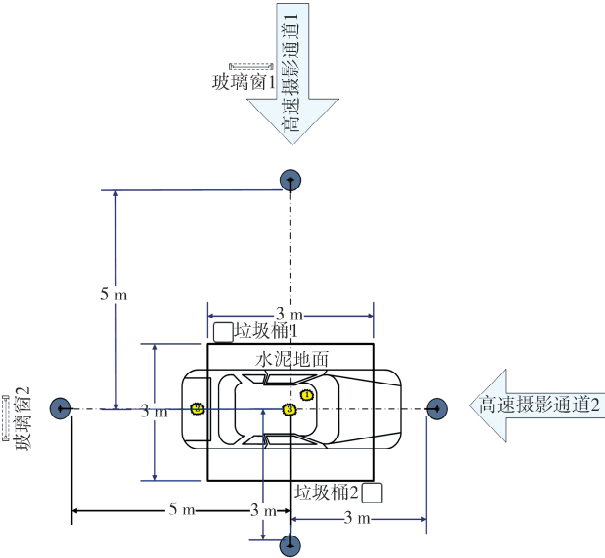


图 1 汽车爆炸毁伤实验布局
Fig. 1 Experimental layout of vehicle explosion

3 汽车爆炸实验结果分析

3 发汽车爆炸实验获得了爆炸前后汽车及简单效应物毁伤变化的丰富图片资料记录,测得了爆炸中汽车外部距汽车中心 3 m 和 5 m 处的自由场冲击波参数,部分车身典型位置的壁面压力参数,以及高速摄影观测记录的爆炸过程中典型飞散物的抛飞动态影像.

3.1 毁伤特征描述

由于汽车爆炸毁伤后可分析的要素较多,本文分为两个部分进行描述:(1)汽车爆炸毁伤后的整体形貌特征,主要针对于汽车车体框架如何破坏的描述,也是汽车毁伤特征的主要方面,见表 4. (2)针对汽车零部件、车窗玻璃及车外效应物的毁伤特征描述,总结了零部件抛飞距离范围和形貌以及车玻璃和效应物的破坏程度,见表 5.

表 3 各发实验效应物设置

Tab. 3 Arrangement of effector in each experiment

发次	玻璃窗 1	玻璃窗 2	垃圾桶 1	垃圾桶 2
1	—	—	车身左侧 7 m	车头右前方 7 m
2	距车中心 12 m	距车中心 15 m	车身左前侧 贴水泥板	车身右后侧 贴水泥板
3	距车中心 9 m	距车中心 9 m	车身左后侧 贴水泥板	车身右前侧 贴水泥板

表 4 汽车结构框架爆炸毁伤特征

Tab. 4 Explosion damage features of vehicle structural frame


实验序号	炸点位置	车身框架毁伤特征	炸药位置与爆炸后破坏效果图	
1	车底中心	汽车整体呈现从中间膨胀断裂的形态,底盘中心形成与车身等宽的炸洞,车顶横梁断开. 侧面骨架包括车底、车顶纵梁、三对立柱、车门框架等结构呈现从中间部位向外弯折,变形较严重但均未断裂.		
2	后备箱中心	汽车尾部完全炸毁,车头机舱结构基本完整,车顶横梁断开,底盘后部炸毁,后轴往前部分扭曲变形. 两侧框架 C 柱往前部分未断裂,从尾部向外张开,框架严重变形.		
3	驾驶座前	汽车整体呈现从驾驶室炸开状态,车顶横梁、左侧 A 柱和底盘纵梁断裂,与 B 柱、左后门一起被向后翻出,左前门脱落飞离,右侧梁柱弯曲变形明显,但未有断裂.		

表 5 车体零件、车窗玻璃和效应物的爆炸毁伤特征

Tab. 5 Blast damage characteristics of auto parts, window glass and effectors

实验序号	爆炸位置	车体零件	车窗玻璃	效应物
1	车底中心	大部分蒙皮及座舱内非结构性零部件脱落飞散,低强度的非金属部件严重破碎,底盘中心区域钢质零部件严重破碎并飞散. 较小的非金属碎片大部分落在车身左、右两侧 10 m 范围内,较大的铁蒙皮多落在 10~30 m 范围. 左前轮轮毂及轮胎脱落且分离,右前轮轮胎脱落轮毂未脱落,左后、右后轮胎与轮毂脱落但未分离.	车窗玻璃完全粉碎,场地中未发现大块玻璃碎片.	2 个效应垃圾桶均未倒落或移动. 桶身上向着汽车一面有少量碎片撞击的凹痕,但都未击穿. 2 号垃圾桶盖子被掀开.
2	后备箱中心	除机舱外大部分蒙皮脱落飞散,部分金属碎片飞散在距车身 10 m 范围内,较大的铁蒙皮多落在 10~30 m 范围. 非金属件部分破碎抛散,主要在车身后左右“十”字区域. 车顶、车门铁蒙皮飞落在周围距车身 15 m 到 20 m 的范围. 各轮毂、轮胎均未脱落.	汽车侧窗、后窗玻璃完全粉碎,前挡风玻璃破碎但仍由夹层粘连在一起,整体飞落在场地左侧 12 m 处.	1 号垃圾桶向前方倒落. 2 号垃圾桶飞落在侧面约 20 m 处的沙场外,未倒落;桶盖飞脱,桶身严重变形并有破裂. 两个效应玻璃窗均完好.
3	驾驶座前	车身周围飞散的碎片较少,大部分小碎片落在 5 m 范围内. 机舱盖掉落在车头右前方约 10 m 处,弯曲变形,车顶蒙皮落在车后约 10 m 处,呈折叠状态. 左前门落在车身左后方 15 m 处,窗框扭曲未断开. 前后保险杠垂直掉落地面. 四个轮胎、轮毂未见明显破坏.	前挡风玻璃飞落车前 30 m 外,由夹层粘连呈整体状态. 其余玻璃完全破碎,实验场地内未发现大块玻璃碎片.	2 个效应垃圾桶平倒在地地上,1 号垃圾桶在车身附近,2 号垃圾桶飞离车身约 5 m. 2 个效应玻璃窗均完好.

另外,在车底中心爆炸实验中,直接放置在混凝土板上的炸药包爆炸使混凝土板上形成了炸坑. 炸坑坑口近圆形,直径约 20 cm,坑深约 10 cm.

从上述实验结果可以推测,当炸点位置在汽车底部时,爆炸压缩冲击波从车底部作用于整个车体,车底部受到压缩作用,同时车顶部将受到拉伸作用,从而车体在宏观上呈现膨胀拉伸断裂的形态. 另外,由于爆炸冲击波直接作用于车底部以及放置车体的路面,因此,在车底部和路面均形成炸坑. 当炸点位置在汽车后备箱时,冲击波致使车体从后向前压缩,并整体膨胀拉伸,越靠近炸点位置,车身撕裂越严重. 机舱由于距离炸点较远得以保存较好. 当炸点位置在汽车驾驶室时,冲击波经由反射加强从前座位置向上方扩散,致使立柱和纵梁受到强烈拉伸进而断裂,进而车顶蒙皮高抛且剧烈弯曲呈折叠状.

3.2 车外自由场超压测试结果

除驾驶室爆炸实验中处于后方 5.6 m 处的传感器未记录到有效数据外,3 发实验中的自由场超压传感器均成功探测记录到了每发实验的测点到爆炸点实际距离和相应的冲击波到达时间、超压峰值等参数.

车体各部位结构不规则且均为多层不同材料组成,这种多介质、多界面、不规则形状等因素对炸药爆炸产物的膨胀、冲击波的形成与传播的影响非常复杂,无法有效给出理论预估. 但通过实验得到了车身外部典型位置的冲击波到达时间及超压值,

可以为数值模拟提供实测数据支持.

为进一步探究车体界面对爆炸冲击波产生的影响,本文计算了炸药在相同位置爆炸的自由场理论超压值,与实际测得超压值对比可一定程度上定性推测车体如何影响爆轰波的传播. 详见表 6.

后备箱爆炸实验和驾驶室爆炸实验由于炸点位置距离地面有一定高度,故对比采用了空爆理论超压公式进行理论值的计算. 车底爆炸实验由于炸药放置在混凝土板上,故适用刚性地面的贴爆理论超压公式进行理论值计算.

我国国防工程设计规范中规定的空爆冲击波超压计算公式^[12]:

$$\Delta P=0.084\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)+0.27\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^2+0.7\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^3$$

(1)

其中,ΔP 是冲击波超压值,单位 MPa; W 是炸药的 TNT 当量,单位 kg; R 是爆炸中心的距离,单位 m.

适用刚性地面的冲击波超压公式:

$$\Delta P=0.102\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)+0.399\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^2+1.26\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^3$$

(2)

另外,车底爆炸实验使用了 2 号岩石乳化炸药,其 TNT 当量系数为 0.609^[13],W = 0.609×6 kg = 3.654 kg,故 6 kg 的 2 号岩石乳化炸药其 TNT 当量相当于 3.654 kg.

由公式(1)(2)及 TNT 当量换算,可计算得出炸药在不同距离下的理论超压值,见表 6.

表 6 车外自由场冲击波超压测试结果

Tab. 6 Test results of the free field shock wave overpressure outside of the car

炸药类型及用量	爆炸处	测试项目	测试值			
		位置	前 3.4 m	右 3.4 m	后 5.2 m	左 5.2 m
6 kg 乳化炸药	车底爆炸	到达时间/ms	3.15	3.047	4.864	7.091
		超压峰值/kPa	179.1	184.7	138.4	66.7
		地面贴爆理论超压值/kPa	245.2	245.2	98	98
		位置	前 3.9 m	右 3.4 m	后 4.0 m	左 5.2 m
3 kg TNT	后备箱爆炸	到达时间/ms	8.638	6.311	5.935	10.51
		超压峰值/kPa	63.5	80.3	80.6	27.2
		空爆理论超压值/kPa	103.4	137.6	98.2	59
		位置	前 3.7 m	右 3.5 m	后 5.6 m	左 4.7 m
1 kg TNT	驾驶室爆炸	到达时间/ms	6.782	7.926	12.47	11.15
		超压峰值/kPa	20	34.1	/	9.3
		空爆理论超压值/kPa	56.2	62.4	27.6	36.8

从表 6 可看出,由于冲击波受到车体约束,几乎所有实验所得超压值都小于空爆计算所得理论值,只有车底爆炸实验中,后方传感器记录的超压值大于空爆超压值.

在车底爆炸实验中,后方传感器记录的超压值大于空爆超压值的现象,可能是由于在爆炸初期冲击波将轿车底盘略微抬起,前置驱动的轿车重心靠前,导致抬起时轿车后部上翘高度较前部更高,汽车底盘与地面不再平行,爆炸冲击波受到约束向后方产生了一定的汇聚作用使得车后方冲击波衰减较小,最终导致了这一现象. 车底爆炸实验的超压值结果整体上最接近空爆理论值,而后备箱与驾驶室爆炸的超压值结果与空爆理论值差距较明显. 这是由于车底爆炸的冲击波只在上下方向受到约束,但在四周所受到的车身约束较少,而后备箱与驾驶室爆炸的冲击波则被车身完全包裹,导致在各个方向受到的约束都较大,冲击波超压的衰减也更为明显,其中后备箱爆炸时后方的障碍约束只有一层车皮,故其冲击波衰减较其他方向更慢,更接近

空爆理论值,实验数据也符合这一情况. 因此,与自由场空气冲击波超压预测值相比,汽车车体本身能够增大或减少超压值. 在汽车爆炸案事件现场研判过程中,要充分考虑上述因素对空气冲击波超压值的具体影响.

3.3 车身壁面压力测试结果

实验中在每辆被试汽车的四个车门中部、车顶中心各布置了一个壁面压力传感器,以期测定爆炸形成的车内壁面压力值. 然而在车底爆炸实验中,未能测得可处理的有效冲击压力信号. 经分析,我们认为一方面由于爆炸导致的车身振动剧烈,振动沿车身的传播速度快,导致振动信号将冲击的壁面压力信号掩盖;另一方面由于车内存在座椅、仪器等复杂结构环境,导致爆炸在车内的产生的压力场结构非常复杂混乱,无法有效识别典型的冲击压力脉动. 实验所测得的部分可识读的壁面冲击压力的到达时间与峰值如表 7 所列,但由于车体、车内的复杂结构,数据仅供参考.

表 7 车身壁面压力测试结果

Tab. 7 Test results of pressure on the car body wall

TNT 炸药量	炸点位置	测试内容	左前门	左后门	右前门	右后门	车顶
3 kg	后备箱爆炸	峰值时间/ms	2.102	1.165	2.57	3.98	0.088
		超压峰值/MPa	4.8	2.7	1.5	4.4	2.5
1 kg	驾驶室爆炸	峰值时间/ms	1.665	0.87	1.567	1.695	2.648
		超压峰值/MPa	10.8	1.2	4.6	7.8	5.8

注:由于技术原因,车底爆炸实验的车身壁面压力测试结果缺失.

4 总 结

本文针对轿车爆炸的不同爆点位置展开实验研究,获得了丰富的轿车毁伤图像和碎片飞散落点位置数据,并记录了动态过程,揭示了炸药在轿车不同位置爆炸引起的典型毁伤形态,可作为炸点位置判断的重要依据. 同时展开的外场冲击波超压测试及车身壁面压力测试,定量地给出了爆炸冲击波在不同方向上的毁伤趋势,并通过分析爆轰波传播趋势解释了车底爆炸实验中后方冲击波超压值比公式计算理论值更高的现象. 由于车底爆炸的冲击波只在上下方向受到约束,但在四周所受到的车身约束较少,而驾驶室爆炸的冲击波在各个方向受到的约束都较大,衰减明显,所以计算得到车底爆炸实验整体上的超压值结果最接近理论值,后备箱与驾驶室爆炸的超压值结果与理论值差距较大. 实验结果可以为汽车爆炸案的刑侦工作提供一定的指导,同时也为今后的理论模拟研究提供数据支撑.

致谢:感谢国家重点研发计划(2017YFC08 03800)对本工作的支持,感谢中国工程物理研究院流体物理研究所张远平、龚宴青、薛洪、张永强等人在实验方面提供的支持.

参考文献:

[1] 刘延敏,刘伟. 长春“4·26”爆炸汽车杀人案[J]. 中国刑事警察,1997(5): 65.

[2] James J W, Wood T M, Kruse E M, *et al.* Vehicle bomb blast effects and countermeasures [C]//Proceedings IEEE 35th Annual 2001 International Car-

nahan Conference on Security Technology (Cat. No. 01CH37186). Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 68.

[3] Rich B G, Vandrish G, Pomalis R. An automated detection system for large vehicle-bombs [C]//Proceedings IEEE 34th Annual 2000 International Car-nahan Conference on Security Technology (Cat. No. 00CH37083). Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 201.

[4] Wu J, Liu J, Du Y. Failure distances for the build-ings and setting of the blast resistant wall under ve-hicle bombs [J]. Int J Mod Phys B, 2008, 22: 1325.

[5] 佐建君,张光雄,杨军. 汽车爆炸的超压分布规律实验研究[J]. 安全与环境学报,2006, 6: 31.

[6] 张彦春,白春华,张忠良. 汽车爆炸现场实验研究[J]. 中国刑警学院学报,2006(4): 27.

[7] 张彦春,白春华,张忠良. 汽车爆炸现场实验研究[J]. 中国人民公安大学学报:自然科学版,2006 (4): 71.

[8] Sun J, Li G, Liu C, *et al.* Research on analysis method for concrete column to resist vehicle bomb [M]// Yuan Y, Cui J, Mang H A. Computational structural engineering. Dordrecht: Springer, 2009: 669.

[9] 王立军,孙树德. 公共汽车内 TNT 炸药爆炸的有限元模拟[J]. 大连海事大学学报,2012, 38: 69.

[10] 智丽娜,刘玉存,袁俊明. 公共汽车内简易爆炸装置爆炸冲击波传播规律研究[J]. 火工品,2012 (5): 25.

[11] 高轩能,刘颖,杨维英. 马场坪收费站汽车爆炸破坏的数值模拟分析[J]. 振动与冲击,2012, 31: 184.

[12] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992.

[13] 范俊余,方秦,张亚栋. 岩石乳化炸药 TNT 当量系数的试验研究[J]. 兵工学报,2011, 32: 1243.

引用本文格式:

中 文: 徐维森,刘宇思,张冀峰,等. 汽车爆炸毁伤特征的实验研究[J]. 四川大学学报:自然科学版,2021, 58: 054004.

英 文: Xu W S, Liu Y S, Zhang J F, *et al.* Experimental research on the damage features of vehicle under explosion [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 054004.