

NASA 二级轻气炮设备简介

王东方, 肖伟科, 庞宝君

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨 150080)

摘要:随着人类航天活动日益频繁,地球轨道上空间碎片总数逐年增长。航天器表面空间碎片防护工作受到各航天大国的高度重视。航天器针对毫米级空间碎片主要采用被动防护方式。超高速撞击实验是防护方案设计工作的基础。NASA 在毫米级弹丸超高速撞击实验中采用的主要发射装置为二级轻气炮。本文对美国 NASA 和相关单位二级轻气炮设备及其未来发展趋势进行简要介绍,同时对我国相关单位超高速撞击实验设备进行分析,并对发展趋势进行讨论。

关键词:超高速撞击;空间碎片;二级轻气炮;毫米级弹丸;航天器防护

中图分类号:V211.72

文献标识码:A

A brief introduction on NASA's two stage light gas guns

Wang Dongfang, Xiao Weike, Pang Baojun

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: With the increasing frequency of human spaceflight activities, space debris population is increasing year after year. Nowadays space debris impacts are more and more dangerous to astronauts doing extravehicular maneuvers and to high-pressure vessels and toxic aerospace materials carried aboard spacecraft. The protection strategy against the impact of millimeter space debris is mainly by shielding. In order to design effective shielding for spacecraft and to evaluate the risk posed by debris and meteoroids, we must be able to perform tests in the laboratory. Hypervelocity impact testing has some extreme requirements. The core of the problem is to find a way to launch projectiles at speeds more than seven times faster than the fastest bullet, to measure how fast the projectile is traveling before impact, and to take pictures of impact event that lasts only a few microseconds. Launching projectiles at velocities high enough to simulate orbital debris impacts requires some remarkable equipment called "two stage light gas gun". The technology is one of the most important factors in the improvement of experimental ability, and therefore it is considered as a significant indicator to evaluate the experimental level of a laboratory, or even a country. National Aeronautics and Space Administration (NASA), the leading agency in the aerospace area in America as well as in the world, is supported by several laboratories with the ability of performing hypervelocity impact tests, where the two stage light gas guns play a critical role. The White Sands Test Facility (WSTF), located at remote desert foothills of New Mexico, works in close partnership with NASA Johnson Space Center Hypervelocity Impact Technology Facility (HITF). HITF determines the risk of spacecraft posed by space debris, and then designs spacecraft shields based on probability of impact and spacecraft geometry. HITF also builds and sends target shields to WSTF for ballistic-limit, verification testing and accordingly analyzes the results. Other spacecraft materials and components are targeted too, as well as toxic and explosive cargo, including fuel. The WSTF Hypervelocity Impact Testing Program assesses candidate shield materials with the help of two stage light gas guns. These guns shoot projectiles at hypervelocities up to roughly six times faster than the fastest rifle bullet, and mimic the impact of real space debris traveling at even higher speeds. Some other laboratories in America also present

收稿日期: 2013-06-09;修订日期: 2013-11-27

引用格式: Wang D F, Xiao W K, Pang B J. A brief introduction on NASA's two stage light gas guns. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(4): 99-104. 王东方, 肖伟科, 庞宝君. NASA 二级轻气炮设备简介. *实验流体力学*, 2014, 28(4): 99-104.

a remarkable performance in improving the ability of two stage light gas guns, such as NASA Ames Research Center, McDonnell-Douglas Corporation, General Motor Corporation, Naval Ordnance Laboratory, and United States Naval Research Laboratory.

Key words: hypervelocity impact; space debris; two stage light gas gun; millimeter projectile; spacecraft shielding

0 引 言

自 1957 年 10 月 4 日前苏联发射第一颗人造地球卫星 Sputnik-1 以来,人类的航天活动日益频繁。50 多年来,世界各国共进行了近 5000 次的航天活动,几乎每次活动都会或多或少的产生一定数量的空间碎片。NASA 近期发布的数据显示,目前近地轨道直径小于 1cm 的空间碎片总数已过千万。

由于毫米级空间碎片尺寸小、数量多,难以逐个定轨,航天器无法实施机动策略躲避其碰撞,只能采取被动防护措施进行防护。航天器采取防护措施是需要付出代价的,增加厚度和增设屏蔽都会增加航天器的质量,提高建造和发射成本。航天器防护设计的任务是在满足航天任务可靠性需求的前提下,提出经济、安全的防护方案。防护结构设计是被动防护任务的核心技术,是航天器空间碎片防护领域的研究重点^[1]。

航天器空间碎片防护设计主要流程为:通过一系列超高速撞击地面模拟实验,收集分析实验数据;基于实验数据,建立弹道极限方程;研发航天器风险评估软件;以航天器撞击参数为输入,利用风险评估软件,评估微流星体、空间碎片对航天器造成的风险,即计算航天器在微流星体、空间碎片影响下的撞击概率与失效率^[2-3]。

其中超高速撞击实验在空间碎片防护技术中占有重要位置,其主要研究内容有:

(1) 获取航天器表面材料及结构的超高速撞击特性和损伤模式,建立相应损伤方程和防护结构的弹道极限方程;

(2) 实验验证航天器防护方案设计的有效性,以达到改进防护方案、筛选高性能防护材料和防护结构的目的;

(3) 研究物体在超高速撞击下破碎、解体模型,为空间碎片源模型的建立提供实验数据;

(4) 研究超高速碰撞理论和材料的损伤破坏特性并建立材料模型。

为支持航天事业的发展,各航天大国先后展开超高速撞击地面模拟实验技术研究,其中美国 NASA 的实验能力处于世界领先水平。美国进行毫米级弹丸超高速撞击的主要实验设备为二级轻气炮。本文

对 NASA 及相关单位二级轻气炮设备及其未来发展趋势进行简要介绍,对我国毫米级弹丸超高速撞击实验水平进行分析,并对未来发展趋势进行讨论。

1 NASA 二级轻气炮发射装置

美国 NASA 负责超高速撞击地面模拟实验的单位主要有:HVIT(Hypervelocity Impact Technology)实验室、白沙实验场(White Sands Test Facility, WSTF)和 Ames 研究中心等。其中,HVIT 负责分析空间碎片、微流星体对航天器的碰撞风险,进而开发新的防护方案及航天器构型设计,并研制先进的防护结构样本。HVIT 实验室也具有独立进行小规模超高速撞击实验技术的能力。白沙实验场对防护样本进行弹道极限测试,并分析实验结果。其研究成果在国际空间站等航天器的防护措施设计及评估中起到不可忽视的作用。Ames 研究中心在 NASA 展开的行星地质与地球物理计划、阿波罗登月计划、双子星探测器设计等方面做出突出贡献。下面分别对这些实验室的二级轻气炮发射装置进行介绍。

图 1 为 HVIT 实验室给出的典型二级轻气炮示意图。腔体底端为火药室,另一端为锥形泵管。泵管内为尼龙活塞。当火药被点燃后,产生的气体膨胀,推动活塞向前运动,压缩活塞前部泵管中的轻质气体,产生极高的气压。当轻质气体气压达到一定程度后,冲破泵管与发射管之间的膜片,这时弹丸进入发射管。发射管原本接近真空,弹丸在高压气体的推动下进一步加速,撞击靶板^[4]。

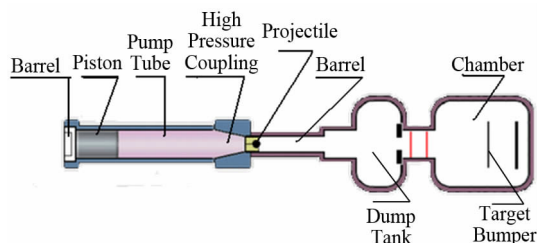


图 1 典型二级轻气炮示意图

Fig. 1 Diagram of a typical two stage light gas gun

由以上分析可知,二级轻气炮在发射过程中要承受巨大压力。研究表明,二级轻气炮关键结构最小屈服强度应为 965.52MPa,而 JSC 空间中心二级轻气炮相应结构屈服强度为 1965.52MPa,为最小屈服强

度的 2 倍^[5]。

HVIT 实验室可进行较小规模的超高速撞击地面模拟实验,其加速装置可将毫米级弹丸加速至 7.2km/s,如图 2 所示。



图 2 HVIT 实验室二级轻气炮
Fig. 2 HVIT's two stage light gas gun

白沙实验场的 RHTL (Remote Hypervelocity Test Laboratory) 服务于 NASA 约翰逊空间中心。该实验室拥有 4 台二级轻气炮,每年进行几百次超高速撞击实验,可将 $\Phi 0.05\sim 22.2\text{mm}$ 的弹丸加速至 7.5km/s 以上。弹丸形状可为球形、圆柱体、圆盘形、立方体或其它复杂形状。由于地处偏远,该实验室可对有毒或易爆的材料(如电池、航空航天流体和高压容器等)进行超高速撞击地面模拟实验,其密封靶舱可承受 2.3kg TNT 爆炸时释放的能量^[6],图 3 为白沙实验场 25.4mm 口径轻气炮。



图 3 25.4mm 口径二级轻气炮
Fig. 3 25.4mm caliber two stage light gas gun

由于大口径二级轻气炮打靶时能量较大,危险性大,因此实验设备置于偏远位置,且远离地下燃料室,如图 4 所示。

白沙实验场此类二级轻气炮相关信息如下:



图 4 WSTF 超高速撞击实验室
Fig. 4 Hypervelocity Gun Lab at WSTF

(1) 口径:25.4mm;靶舱尺寸:直径 274.32cm,长度 914.4cm;弹丸直径:0.4~25.4mm;弹丸速度:1.5~7.0km/s;弹丸完整性检验设备:X 射线闪光设备(6 个)、超高速数字成像设备;测速设备:激光时间间隔计(4 组)、光电二极管闪烁测试器(3 个)、超高速数字成像设备。

(2) 口径:12.7mm;靶舱尺寸:直径 152.4cm,长度 243.84cm;弹丸直径:0.4~11mm;弹丸速度:1.5~7.0km/s;弹丸完整性检验设备:X 射线闪光设备(3 个)、超高速数字成像设备、Cordin 超高速阴影摄像机;测速设备:激光时间间隔计、光电二极管闪烁测试器(3 个)、超高速数字成像设备、Cordin 摄像机。

(3) 口径:4.32mm;靶舱尺寸:直径 106.68cm,长度 213.36cm;弹丸尺寸:0.05~3.6mm;弹丸速度:1.5~8.5km/s;弹丸完整性检验设备:超高速数字成像设备;测速设备:激光时间间隔计(3 组)、光电二极管闪烁测试器(3 个)、超高速数字成像设备。

白沙实验场另有口径 1.778 和 4.32mm 的二级轻气炮,因相对安全,可在实验室内操作。

美国 Ames 研究中心早在 1968 年就可将 0.17g 的镁锂弹丸发射到 12.2km/s。该中心具有多座二级轻气炮发射设备,其发射管口径、发射弹丸质量及最高弹道速度如表 1 所示。

表 1 Ames 研究中心二级轻气炮弹速指标		
Table 1 Two stage light gas gun indicators of Ames		
$d(\text{mm})$	$m(\text{g})$	$v(\text{km/s})$
5.6	0.045	11.30
5.6	0.076	9.84
7.1	0.163	9.24
12.7	0.941	9.46
25.4	7.418	8.44
38.1	15.205	9.07

美国拥有二级轻气炮设备的单位另有 Douglas 道格拉斯公司、GM 通用汽车公司、NOL 海军军械研究室和 NRL 国立研究实验室等。其二级轻气炮设备发射口径、弹丸质量、最高速度及设备所在单位如

表 2 所示。这些设备开展的超高速撞击实验为美国军事及民用方面的发展做出了不可忽视的贡献。

表 2 美国其他单位二级轻气炮设备^[7]

Table 2 Two stage light gas guns in other American agencies

$d(\text{mm})$	$m(\text{g})$	$v(\text{km/s})$	设备所在单位
7.6	0.21	8.84	Douglas 道格拉斯公司
12.7	1.00	9.14	
19.1	10.0	7.62	
31.8	10.0	7.92	
31.8	25.0	7.31	
5.6	0.0533	10.80	GM 通用汽车公司
20.0	3.73	9.90	
60.0	87.0	8.90	
12.7	1.30	8.17	NOL 海军军械研究室
32.0	73.0	5.55	
50.8	82.0	6.89	
7.6	0.41	9.20	NRL 国立研究实验室
21.0	5.20	8.00	
63.5	253.0	6.16	

2 NASA 二级轻气炮测速方法

在超高速撞击实验中,为分析靶板材料防护能力,需要测量弹丸撞击靶板速度^[8]。NASA 毫米级弹丸测速装置有:激光测速装置、X 射线测速设备和超高速摄像设备等。

2.1 激光测速方法

即激光时间间隔计。在发射管处设置两处激光光幕(见图 5)。实验中测量弹丸通过两个激光幕的时间间隔 Δt ,已知两激光幕间距离为 d ,则可计算出弹丸速度 $v=d/\Delta t$ 。这种测速方法对氢气驱动的二级轻气炮不适用,因为由弹丸间隙飞到弹丸前端的氢气持续长时间发光,光电管受到发光氢气的照射,难以产生截止信号^[9]。



图 5 激光测速装置
Fig. 5 Laser diagnostic Tools

2.2 X 射线测速方法

当弹丸进入第一个 X 光射线成相区时,X 光管闪光,计时器记录弹丸投影到底片上时的闪光时间。当弹丸到达第二个成相区时,计时器再次记录闪光时

间。通过时间间隔,结合底片上记录的弹丸飞行距离,即可计算出弹丸飞行速度。

2.3 超高速摄像机测速方法

在撞击处附近设置超高速摄像机。通过测量相邻两帧相片之间弹丸位移,结合相机拍摄速度,可求得弹丸飞行速度。关于超高速摄像机下文有详细介绍。

2.4 其它常用测速方法

除以上介绍方法外,美国及其它国家超高速撞击地面实验设备中常采用的测速方法还有电探针法和磁感应法等。

电探针法:以速度 v 飞行的弹丸前端与接地探针接触,然后依次通过间距为 d 的两根探针。在弹丸碰撞板接触每根探针时,会有信号输出。通过时间间隔 Δt 即可计算出弹丸速度。该方法在一级轻气炮上有较好的应用,采用特制探针也可应用于二级轻气炮。

磁感应法^[10]:在弹丸飞行路径上设置磁环,磁环平面垂直于弹丸飞行方向。导体(弹丸)飞行时,穿过导体的磁通量发生变化,内部激发感生电流,感生电流方向与磁通量变化方向垂直。由电磁相互作用原理和场的叠加性,由感生电流产生的磁场改变原有的磁场强度,使磁环中磁通量发生变化。该变化发生的时刻即为导体通过磁环的时刻。通过在弹丸飞行路径上设置多个磁环,记录各感应信号,可计算出弹丸的飞行时间。该测量方法要求弹丸必须为导体材料,否则无法测速。这种测量方法适用于小口径二级轻气炮,此时磁环在发射过程中不易损坏,可多次重复使用。

对于大口径轻气炮,常常采用磁飞行体方法进行测速,即在弹丸内安装小磁体,同时利用普通线圈代替磁环。当弹丸通过线圈时,同样会在线圈中产生感应电信号。这种方法节约了实验成本,但这样便破坏了弹丸的整体性。

3 NASA 二级轻气炮碎片云记录

3.1 X 光闪光灯照相

超高速撞击实验中,有时会发生弹丸在发射过程中破裂的现象。X 光闪光灯照相用于检验弹丸的完整性,同时用于记录碎片云的演化过程。图 6 为 HVIT 实验室二级轻气炮上安装的 X 光闪光相机。该二级轻气炮安装了 3 个 X 射线发射装置,一个工作电压为 100kV,与弹丸飞行方向垂直,用于测量弹丸撞击前是否完整;另外 2 个工作电压为 300kV 发射装置探入撞击腔内,用于记录撞击过程^[11]。



图6 X光闪光相机

Fig. 6 Flash X-Rays

图7为白沙实验场X光闪光灯照相装置拍摄到的直径6mm弹丸撞击瞬间图像^[12]。该装置成像速度为1亿帧/s。

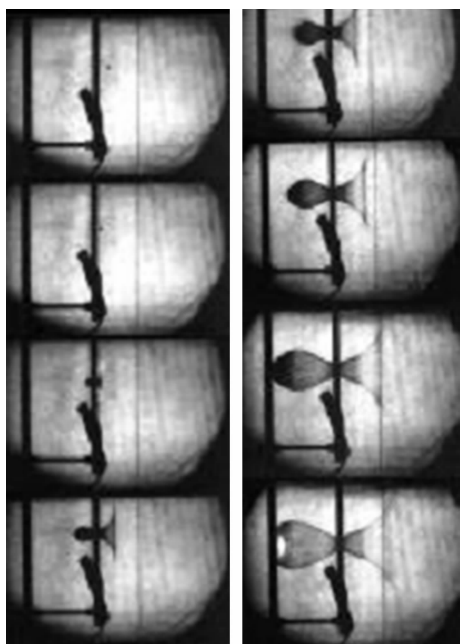


图7 X光闪光相机拍摄图像

Fig. 7 A laser-illuminated shadowgraph sequence

3.2 超高速摄像机

超高速摄像机成像速度可达数百万帧/s。由于胶卷数量或存储空间的限制,超高速摄像机往往只能连续拍照几十张。但超高速撞击过程往往发生在几毫秒内,因此这样的拍摄时间是足够的。白沙实验场超高速摄像机共有3种: Cinema相机,拍摄速度可达一百万帧/s;红外相机,拍摄速度可达二百万帧/s;数码相机,拍摄速度可达2亿帧/s。

基于以上实验设备, NASA JSC 空间中心进行了大量的超高速撞击地面模拟实验,在美国ISS、航天飞机、EMU(Extravehicular Mobility Unit)和长期在轨暴露设备(Long Duration Exposure Facility)等的防护方案设计中起到了重要作用。

NASA目前正在对载人飞船登陆火星的可行性进行评估,此项任务中需要对速度未知的微流星体对

航天器构成的威胁进行分析。据估计太阳系中微流星体速度可达70km/s,而来自宇宙深空的微流星体速度可达240km/s。其研究人员希望能对这样的超高速撞击情况进行分析。因此在未来的研究中, NASA将继续发展超高速撞击地面模拟实验能力,从而为其航天任务的发展奠定基础。

4 我国毫米级弹丸超高速撞击实验技术发展

随着我国航天事业的飞速发展,航天器安全防护工作的重要性日益凸现^[13]。航天器防护层设计及防护能力的评估需要依靠深入的超高速撞击现象基础研究提供支持,提高超高速撞击实验水平成为不可回避的问题。

轻气炮是目前国内外最为常用的超高速发射设备。与其他发射技术相比,该技术对所发射的弹丸质量、尺寸、形状和材料的限制较弱,并且弹丸能够在较低的加速度和较小的应力下获得较高的速度。因此,二级轻气炮成为非常有效和实用的超高速实验设备。

近年来,我国超高速撞击地面模拟实验能力不断加强,中国空气动力研究与发展中心、北京中科院力学所、中国工程物理研究院、四川大学、西北核技术研究所、哈尔滨工业大学以及中国空间技术研究院等多家单位陆续拥有二级轻气炮等超高速撞击地面模拟实验设备。我国二级轻气炮发射口径大多在7.6~50mm之间,发射速度一般在8km/s以下^[14]。然而目前我国超高速撞击实验设备与国外有较大差距,尚需进一步完善。超高速撞击实验能力有待提高。

根据当前的工程需求, cm/mm 尺寸空间碎片的航天器防护工作是今后空间碎片防护技术的中心任务^[15]。近年来,我国毫米级弹丸发射技术和测速技术稳步提升,测速手段也取得了较大进步。在未来发展中,我国应对现有的二级轻气炮进行改进,通过优化设计提高轻气炮的发射性能,旨在将其稳定发射速度提高至8.5km/s;开展大尺寸、速度10km/s以上弹丸发射技术研究;研制三级炮加载技术。配合超高速发射,同步发展诊断测试技术。研究对超高速弹丸形状、姿态和速度等的测量技术^[16]。

5 结论

随着人类航天活动日益频繁,空间碎片总数持续增长,航天器防护方案设计受到进一步重视。其中,二级轻气炮实验技术的研究对提高地面超高速撞击实验能力有着重要作用。作为国际航天事业前沿单

位,NASA 的实验能力处于该领域领先地位。对 NASA 二级轻气炮设备进行调研分析,可为我国相关单位的发展提供重要参考价值。

参考文献:

- [1] Christiansen E, Achilles C, Hyde J, et al. MMOD impacts on ISS airlock shields[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2011, 15(3): 5-6.
- [2] 童靖宇. 我国空间环境试验的现状与发展建议[J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(3): 237-242.
Tong Jingyu. A review on spacecraft environment experiments in China and some proposals[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2008, 25(3): 237-242.
- [3] 龚自正, 杨继运, 张文兵, 等. 航天器空间碎片超高速撞击防护的若干问题[J]. *航天环境工程*, 2007, 24(3): 125-130.
Gong Zizheng, Yang Jiyun, Zhang Wenbing, et al. Spacecraft protection from the hypervelocity impact of space meteoroid and orbital debris[J]. *Spacecraft environment engineering*, 2007, 24(3): 125-130.
- [4] 田慧. 小口径二级轻气炮设计与发射技术研究[D]. 南京理工大学, 2008.
Tian Hui. Study on launching technique and design of small two stage light gas gun[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [5] http://www.nasa.gov/centers/wstf/pdf/342062main_R2K307FeatureNASALow.pdf[OL]
- [6] <http://www.nasa.gov/centers/wstf/home/index.html>[OL]
- [7] 李贇. 测控技术在超高速撞击实验中的研究与应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2007.
Li Zhan. Research and application of measurement and control technology in hypervelocity impact experiment[D]. Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] 邓云飞. 二级轻气炮超高速撞击实验测控系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2008.
Deng Yunfei. Research of measurement and control system in two-stage light gas gun hypervelocity impact experiment[D]. Harbin Institute of Technology, 2008.
- [9] 杨继运. 二级轻气炮模拟空间碎片超高速碰撞试验技术[J]. *航天器工程*, 2006, 23(1): 16-22.

Yang Jiyun. Simulation of space debris hypervelocity impact using two stage light gas gun[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(1): 16-22.

- [10] 张文兵. 地基模拟空间碎片速度测试技术[J]. *航天器环境工程*, 2006, 23(3): 138-149.
Zhang Wenbing. Dynamic geomagnetic field simulator on MEO/LEO[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2006, 23(3): 138-149.
- [11] 柳森, 谢爱民, 黄洁, 等. 超高速碰撞碎片云的激光阴影照相技术[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(2): 35-39.
Liu Sen, Xie Aimin, Huang Jie, et al. Laser shadowgraph for the visualization of hypervelocity impact debris cloud[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(2): 35-39.
- [12] <http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/GunsofnasaALL.pdf>[OL]
- [13] 郑伟, 庞宝君, 彭科科, 等. 超高速正撞击溅射物实验与仿真研究[J]. *高压物理学报*, 2012, 26(6): 621-626.
Zheng Wei, Pang Baojun, Peng Keke, et al. Hypervelocity impact experiment and simulation for ejecta[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(6): 621-626.
- [14] 都亨, 张文祥, 庞宝君, 等. 空间碎片[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007: 88-91.
Du Heng, Zhang Wenxiang, Pang Baojun, et al. Space debris[M]. Beijing: Chinese Astronautic Publishing House, 2007: 88-91.
- [15] Shannon Ryan, Eric L. Christiansen. Hypervelocity impact testing of advanced materials and structures for micrometeoroid and orbital debris shielding[J]. *Acta Astronautica*, 2013: 216-231.
- [16] 龚自正, 杨继运, 代福, 等. CAST 空间碎片超高速撞击试验研究进展[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(4): 301-307.
Gong Zizheng, Yang Jiyun, Dai Fu, et al. M/OD hypervelocity impact tests carried out in CAST[J]. *Spacecraft environment engineering*, 2009, 26(4): 301-307.

作者简介:



王东方(1989-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士。研究方向:航空宇航科学与技术。通信地址:黑龙江省哈尔滨市哈尔滨工业大学科学园 2C 栋(150080)。E-mail:779208564@qq.com

(编辑:杨 娟)