



航天科技图书出版基金资助出版

强激光对飞行器的 毁伤效应

Damage Effects of Vehicles
Irradiated by Intense Lasers

李清源 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

强激光对飞行器的毁伤效应

Damage Effects of Vehicles Irradiated by Intense Lasers

李清源 编著



中国宇航出版社

· 北 京 ·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

强激光对飞行器的毁伤效应=Damage Effects of Vehicles Irradiated by Intense lasers/李清源编著. -- 北京: 中国宇航出版社, 2012.8

ISBN 978-7-5159-0278-4

I. ①强… II. ①李… III. ①激光损伤-飞行器 IV. ①V47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 195379 号

责任编辑 马 航 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号 邮 编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230 开 本 1/32

印 张 13.75 字 数 38.3 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0278-4

定 价 98.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登陆中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

前 言

自 1960 年梅曼 (T. Maiman) 发明世界上第一台红宝石激光器以来, 激光的单色性、相干性、方向性和高能量密度等优良特性就受到世人的极大关注。尤其是在发明之初, 梅曼就演示了聚焦激光束烧穿刀片的效能, 这就预示了激光束在材料加工和国防军事领域以及其他科技领域应用的巨大潜力。

冷战期间, 美国和苏联为了争霸世界, 在作为定向能武器之一的激光武器的研制开发方面展开了激烈的竞争。从 1962 年开始, 美国国防高级研究设计局 (DARPA) 就开始了激光的军事应用研究。1983 年 3 月 23 日美国正式提出了“战略防御创新”(SDI) 计划, 即所谓“星球大战”计划。SDI 计划是一项旨在夺取 21 世纪军事优势并同时带动国家科技、经济腾飞的战略性高技术计划。随后美国不断进行各种静态和动态的演示性激光打靶试验, 来显示实力以达到威慑战略之目的。1985 年 9 月 6 日用氟化氙化学激光辐照美国的洲际弹道导弹大力神 I 型助推器贮箱约 2 秒钟使之爆炸。20 世纪 70—80 年代是美国 (与世界上一些国家) 激光辐照效应研究工作广泛和深入发展的时期, 尤其是激光武器杀伤机理的探索研究取得了突破性进展, 反过来它又对激光器提出新要求, 促进激光武器本身的改进与发展。

我国的激光辐照效应研究工作始于 1964 年, 可以说起步较早。开展了一些实验室内与外场的激光辐照效应试验以及理论研究和分析工作, 取得了一批初步结果, 摸索了经验。改革开放以来, 在国家 863 计划的支持下, 国内有关研究所和院校进行了较为系统的基

础性和应用性研究,在系列性的学术会议上发表了大量论文,另外,有关方面也进行过外场的激光动态打靶试验,这些工作都推动了激光辐照效应研究工作的发展。

在研究激光辐照效应时,不同作者对同一问题的研究可能会得出不同的结论或见解。例如,充内压圆筒壳在激光辐照下出现萌生裂纹的地点,一个可能点是处在光斑中心,另一个可能点是处在过斑心母线与光斑边缘交点附近等。其原因很多。再例如,材料同为铝合金,由于表面状况(包括热处理)不同,吸收率就不同,平均能量密度相同,但激光空间分布(如高斯分布、均匀分布或其他)或时间分布不同,或光斑尺寸(相对于试样尺度)不同,试验条件与测量方法不完全相同,物理/力学模型中的假设与选取的参数值不同等,也会引起温度场及应力场与毁伤模式不同,最终导致毁伤阈值不同。为此,本书在论述试验与理论时,尽可能详细地说明试验条件与测量手段、建模的前提假设与选用的参数值,以便读者明了产生结论的根据与条件。或者说,读者在运用本书提供的数据或结论时要注意试验条件或前提假设。

定向能强激光武器与其辐照引起的毁伤效应是一项复杂、多学科、跨世纪的系统工程,随着科学技术的进步,会不断交替出现新的对抗措施、反对抗措施。所以,它也是一项周期长、耗资多、难度大、风险高的事业,有许多问题仍在不断发展、不断完善之中,需要我们做出坚持不懈的努力。

强激光辐照效应是个涉及多个学科的课题,从材料对辐照的吸收、加热、软化、熔化或热解、升华、汽化、焦化、等离子体到材料成坑、穿孔、热断裂与炸裂,结构的热屈曲、热振动、热冲击引起壳体菱形凹陷断裂、层裂或层间分离、机械剥蚀、延迟损伤、热爆裂和易损性评估与抗激光加固等,内容覆盖面广,且前沿性强。

编著本书的目的是紧密结合航天飞行器结构的特点,力图对国内外相关的激光辐照效应研究工作进行比较系统的整理与总结,即以航天飞行器结构常用的典型材料与结构元部件为研究对象,借助

于试验数据与理论分析、模型,研讨材料和结构在激光辐照下的毁伤模式、毁伤机理与毁伤阈值,并评估其生存能力与加固技术途径。

从工程实用的角度出发,根据结构力学与热力学的概念,本书还提出了激光辐照试验缩比相似准则——II定律。

本书共分10章。第1章简要介绍了美国战略防御政策从“以核反核”到“非核反核”的多层防御政策之演变、激光武器发展概况与前景,并给出了激光对目标之杀伤能力判别方式。第2章、第3章介绍了材料对激光的吸收与反射、材料的热效应与热/力学损伤。第4章阐述了简单结构在激光辐照下的响应与毁伤,以及轴压圆筒壳的试验缩比相似准则——II定律。第5章介绍了陶瓷材料断裂强度(和断裂韧性)的随机性、抗热震特性与抗热震能力、断裂统计强度以及激光辐照下的断裂机理。第6章专门讨论脉冲激光辐照引起的喷射冲量及其分别对无内压圆筒壳和充内压圆筒壳产生的菱形凹陷—断裂破坏与爆炸毁伤。第7章介绍了激光辐照下复合材料及其结构产生的多种热/力学响应模式,如热解喷射冲量、烧蚀、层间分离、机械剥蚀、纵向断裂、壳体外压失稳、延时损伤等。第8章研讨了激光辐照引起充内压圆筒壳的多种破坏模式及其相应的破坏机理与毁伤阈值,以及试验缩比相似准则——II定律。第9章简述板壳结构在激光辐照下的热弹性运动,即板的热弹性弯曲运动、充压圆筒壳的振动特性和无内压圆筒壳的振动特性。第10章介绍了导弹类航天飞行器的结构易损性评估,以充压圆筒壳的爆裂毁伤模式为例,计算了筒壳的爆裂概率。

由于强激光的毁伤效应跨越多个学科,而笔者才疏学浅,经验不足,又加上时间仓促而定稿心切,所以文笔比较粗糙。无论是学术观点、内容重复、文字修辞,还是在物理与力学的符号、术语的名称、法定计量单位统一等方面,未能精心推敲,错误或不妥之处在所难免,敬祈读者批评指正。若本书能起到抛砖引玉的作用,对促进本领域事业发展能尽微薄之力,则甚感欣慰。

本书在编写过程中,得到了北京强度环境研究所所长龚知明、

副所长王梦魁、副总师荣克林的关心、指导和所里的财政资助，作者所在部门的同仁们也给予了大力支持，他们的支持是写成本书的关键，没有他们的帮助（包括繁重的书稿打印、制图工作），此书面世是不可能的。在此，表示诚挚的感谢。本书在写作过程中，得到了中国运载火箭技术研究院研发中心王基祥研究员热心提供的图片，本书的制图工作由我单位庞勤同志负责，在此一并深表谢意。

本书可供从事强激光辐照效应与抗激光加固/突防技术领域研究的工程技术人员和应用人员、高等院校有关专业的师生阅读与参考，也可供决策层与管理人员阅读与参考。

李清源

2012年7月

北京强度环境研究所

目 录

第 1 章 美国战略防御概念的演变	1
1.1 引言	1
1.2 “卫兵”反导系统回顾（以核反核）	1
1.3 星球大战计划（SDI）是核均势的产物	3
1.4 星球大战计划（SDI）的多层防御方案	4
1.5 激光武器的优越性	6
1.6 激光武器的发展——从神话逐步走向现实	8
1.6.1 天基激光武器（SBL）反导反卫发展概况	8
1.6.2 机载激光武器（ABL）发展概况	9
1.6.3 舰载激光武器发展概况	12
1.6.4 地基激光武器（GBL）发展概况	13
1.6.5 车载激光武器发展概况	14
1.7 激光杀伤能力判别式	15
1.7.1 几个常用术语	15
1.7.2 激光杀伤能力判别式	18
参考文献	20
第 2 章 激光与材料的相互作用	21
2.1 引言	21
2.2 材料对激光吸收的一般规律	22
2.3 影响材料吸收率的因素	25

2.3.1	温度对金属光学特性的影响	25
2.3.2	波长对吸收率的影响	27
2.3.3	熔化对吸收率的影响	28
2.3.4	激光功率密度对材料吸收率的影响	29
2.3.5	材料表面状况对吸收率的影响	30
2.4	激光与材料的热耦合——等离子体效应	37
2.4.1	空气击穿的激光阈值估算	37
2.4.2	激光诱发等离子体——LSAW	38
2.4.3	CO ₂ 激光同材料的热耦合	40
2.4.4	钽玻璃激光同金属的热耦合	43
2.4.5	HF 激光与金属的热耦合——等离子体吸收增强与屏蔽 效应	45
2.4.6	HF 辐照下金属的等离子体引燃时间	50
2.4.7	激光的等离子点燃阈值	50
参考文献		52
第 3 章 激光辐照对材料的加热与损伤		54
3.1	概述	54
3.2	热传导方程的一般形式	55
3.3	半无限厚物体的温度场	56
3.4	无限大的有限厚度平板的温度场	59
3.5	激光辐照引起的材料熔化和汽化	61
3.5.1	一维平面传热情况	61
3.5.2	烧穿时间估算	64
3.5.3	切向气流对激光辐照平板温度的影响	68
3.5.4	切向气流对烧穿时间的影响——毛细柱/液珠迁移 机理	70
3.5.5	重力引起熔质的迁移与熔穿	79

3.6 激光辐照下的材料力学性能	80
3.6.1 激光辐照下材料的热软化现象	81
3.6.2 激光辐照下材料力学性能的下降	82
参考文献	92
第4章 激光辐照下简单结构的响应与毁伤	94
4.1 概述	94
4.2 激光辐照下薄圆钢板的热应力损伤	95
4.3 预应力板在激光辐照下的强度下降——理论与试验	98
4.4 预应力铝板在激光辐照后的剩余强度	102
4.5 预应力对激光辐照下板断裂时间的影响及预应力重新分配	104
4.6 激光辐照与横向压力联合作用下圆板的几种失效模式	107
4.7 激光辐照下的压杆屈曲试验	108
4.8 单向拉伸铝板在激光辐照下的两种破坏模式	110
4.9 轴压圆筒壳在 CW 激光辐照下的屈曲失效	112
4.10 轴压圆筒壳在激光辐照下的试验相似准则——II 定律	116
参考文献	120
第5章 陶瓷材料的破裂强度及其激光损伤	121
5.1 引言	121
5.2 陶瓷材料对激光的吸收与反射	122
5.3 陶瓷材料的热物理性能	124
5.3.1 熔点	124
5.3.2 陶瓷材料的热容	126
5.3.3 陶瓷材料的热膨胀	128

5.3.4 陶瓷材料的热传导	134
5.4 陶瓷材料的力学性能	143
5.4.1 弹性性能与弹性模量	143
5.4.2 陶瓷材料的强度与断裂韧性	149
5.4.3 影响陶瓷材料强度的因素	152
5.5 陶瓷材料的热稳定性	156
5.5.1 热应力	157
5.5.2 第一抗热震 (TSR) 因子	158
5.5.3 第二抗热震因子	159
5.5.4 热环境对抗热震因子的影响	163
5.5.5 第三抗热震因子	166
5.5.6 热震损伤理论 (thermal shock damage theory)	167
5.5.7 抗热震统一理论	168
5.5.8 提高抗热震能力的措施	169
5.6 断裂强度的统计特性——Weibull 分布	169
5.6.1 Weibull 分布函数	169
5.6.2 Weibull 函数中的 m 和 σ_0 的求法	172
5.6.3 断裂强度的体积效应	173
5.7 激光辐照下陶瓷的损伤机理与破坏阈值	174
5.7.1 石英玻璃的激光损伤机理	175
5.7.2 熔融硅的激光损伤阈值	177
5.7.3 微爆炸损伤理论	179
5.7.4 熔融硅在激光辐照下的微坑生成与定标关系	183
5.7.5 应力松弛引起的破坏	185
5.7.6 天线窗材料蓝宝石的热断裂统计强度	186
参考文献	190

第 6 章 激光辐照引起的喷射冲量与冲击效应	192
6.1 引言	192
6.2 激光辐照引起的层裂破坏	193
6.3 冲量耦合系数	197
6.3.1 1.06/10.06 μm 激光的冲量耦合系数	197
6.3.2 0.694 μm 激光的冲量耦合系数	200
6.3.3 2.8 μm 激光的冲量耦合系数	201
6.3.4 2.8/3.8 μm 激光的冲量耦合系数	205
6.3.5 0.532 μm 激光的冲量耦合系数	207
6.3.6 0.35 μm 激光的冲量耦合系数	210
6.3.7 0.308 μm 激光的冲量耦合系数	213
6.3.8 冲量耦合系数的定标律	215
6.4 喷射冲量引起的结构毁伤	218
参考文献	226
第 7 章 激光辐照下复合材料与其结构的热/力学响应	228
7.1 概述	228
7.2 有效烧蚀热 Q^* 的定义	232
7.3 烧蚀型复合材料的有效烧蚀热 Q^*	234
7.3.1 ATJ 和 C/Ph 的有效烧蚀热	234
7.3.2 圆柱形 ATJ 石墨的有效烧蚀热	236
7.3.3 人造石墨的有效烧蚀热	237
7.3.4 碳/碳复合材料有效烧蚀热的理论值	238
7.4 结构型复合材料在激光辐照下的烧蚀特性	239
7.4.1 环氧树脂在激光辐照下的热学特性	239
7.4.2 C/E 复合材料在 RPL 辐照下的烧蚀热特性	242
7.4.3 烧蚀前 K/E 对 1.06 μm 激光的吸收特性	245
7.4.4 K/E 和 C/E 对 CW COIL 辐照的烧蚀阈值与吸收	

特性	247
7.4.5 K/E 和 C/E 与 CW COIL 辐照时耦合特点之差异	251
7.4.6 K/E 和 Gr/E 之吸收率与烧蚀热	252
7.4.7 K/E 复合材料的有效烧蚀热	255
7.4.8 复合材料的层裂与剥蚀	257
7.4.8.1 玻璃钢和 K/E 复合材料的有效烧蚀热	257
7.4.8.2 C/Ph 的机械剥蚀阈值功率密度	258
7.5 物理/力学/数学模型	261
7.5.1 概述	261
7.5.2 聚合物基体复合材料热解膨胀的一维数学模型	263
7.5.3 控制体积法——体积烧蚀的物理/力学模型	267
7.5.4 热解炭化材料的膨胀模型与其试验技术	270
7.5.5 C/Ph 复合材料烧蚀过程的一维热应力分析	277
7.5.6 激光局部加热下复合材料的热/机械行为	280
7.5.7 复合材料圆筒壳结构在外部均匀加热下的热/机械破坏行为	291
7.6 复合材料的高温物理性能	298
7.6.1 三向编织 C/C 的热物理性能	298
7.6.2 三维 C/C 复合材料的热物理性能试验	299
7.6.3 ATJ 石墨的热物理性能	303
7.6.4 C/Ph 复合材料的热物理性能	303
7.6.5 AS/3501-6 复合层板在激光辐照下的热物理性能	305
7.6.6 复合材料与金属热物理性能的比较	309
7.6.7 AS4/3501-6 在太阳炉热辐照下的热物理性能试验	

.....	312
7.7 复合材料的高温力学性能	314
7.7.1 烧蚀相变过程中几种材料的高温力学性能理论预示 结果	314
7.7.2 Gr/E 高温力学性能下降	319
7.7.3 三种复合材料的 CW 激光辐照试验结果——拉伸强度 下降	320
7.7.4 K/E 受激光辐照的损伤机理	321
7.7.5 复合材料的湿度效应	323
7.7.6 预应力 Gr/E 复合层板在高温下的失效 (Gr/E 复合 材料的高温力学性能)	323
7.7.7 AS/3501-6 (Gr/E) 层板的高温性能 (试验与分析)	326
7.7.8 热解损伤与烧蚀损伤的比较	329
参考文献	338
第 8 章 激光辐照下充压圆筒壳的毁伤效应	342
8.1 概述	342
8.2 高能激光摧毁大力神 I 导弹壳体的试验	342
8.3 激光辐照下充压筒壳试验的缩比准则—— Π 定律	344
8.4 充压铝圆筒壳受激光辐照的爆裂破坏试验	348
8.5 光斑中心是最易萌生裂纹的地方	351
8.6 充压钢制圆筒壳激光辐照试验与结果分析——多种 破坏模式	355
8.7 激光辐照下充压筒壳动态爆裂的数值模拟	364
8.7.1 最大径向位移失效准则	364
8.7.2 光斑中心外鼓/裂纹现象理论解释	366
8.7.3 动态爆裂过程的数值模拟——临界内压	367

8.7.4 激光空间均匀分布与高斯分布的影响	369
8.7.5 确定裂纹萌生部位与裂纹萌生条件的比环向 应力方法	372
8.7.6 三维离散元法——动态破坏的全过程处理	376
参考文献	379
第9章 激光辐照引起的板壳动响应	381
9.1 引言	381
9.2 激光辐照下厚板的热弹性弯曲运动	381
9.3 脉冲激光辐照引起充压圆筒壳的动态响应	387
9.4 激光辐射下圆筒壳振动特性的变化	394
参考文献	401
第10章 结构易损伤评估	402
10.1 引言	402
10.2 导弹弹体结构的生存能力	403
10.3 实例——激光辐照下充压筒壳的爆裂概率	405
10.3.1 激光束/筒形表面的耦合	406
10.3.2 受照壳壁的温升	408
10.3.3 受辐照壳壁材料的强度下降与韧性增强	410
10.3.4 受辐照筒壳壁的外凸和裂纹萌生	413
10.3.5 裂纹增长扩展成临界裂纹长度	414
10.3.6 筒壳爆裂条件(准则)	415
10.3.7 筒壳的爆裂概率	416
10.3.8 算例	417
10.4 抗激光加固技术途径	421
参考文献	424

第 1 章 美国战略防御概念的演变

1.1 引言

本章介绍了美国战略防御由“面防御到点面结合以点防御为主”的“以核反核”概念演变为以动能武器和定向能武器实施多层次的“非核反核”概念，论述了激光武器的优越性与发展概况。最后，推导出激光杀伤能力判别式。

1.2 卫兵反导系统回顾（以核反核）^[1.1-1.4]

20 世纪 60 年代，美苏两个超级大国凭借当时的尖端技术（地对空导弹）和“以核反核”概念，先后建立了反弹道导弹武器系统。美国的反导武器系统称为卫兵反导弹防御系统，苏联的称为橡皮套鞋反导系统。

美国的反弹道导弹的研究经历了从面防御到点面结合以点防御为主的过程。从整个发展过程来看，美国对洲际弹道导弹的防御思想是力图实现高空远程拦截，即在本土以外用高空远程拦截武器将来袭弹头摧毁，并尽量在诱饵释放之前或诱饵扩散范围不大时摧毁来袭弹头及诱饵所形成的目标群集物。

高空拦截导弹斯巴坦（Spartan）是个三级导弹，其射程 180～960 km，射高 150 km 以上，可以在 150 km 以上高空作战，防御面积为 960 km×1 440 km。斯巴坦导弹采用核弹头实施拦截，当量 200 万吨，杀伤半径 ≥ 8 km；另一说法为当量 400 万吨，杀伤半径 9.6 km。它利用 X 射线使敌方弹头防热层发生层裂破坏（spallation），并在