快反镜在高功率连续激光辐照下的热性能分析

兰 硕[1,2,5],李新南[1,4],武春风[3],李梦庆[2],韩西萌[2]

(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042; 2. 中国航天科工集团第九总体设计部,湖北 武汉 430040; 3. 中国航天科工集团第四研究院,湖北 武汉 430040; 4. 中国科学院天文光学技术重点实验室,江苏 南京 210042; 5. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:为了研究高功率连续激光辐照过程中快反镜的热性能变化问题,文中利用多物理场仿真分析软件建立了融凝石英(fused silica)、微晶(zerodur)、碳化硅(SiC)三种材料制作的快反镜传热学和结构力学耦合非稳态模型,通过泽尼克多项式算法对高功率激光辐照快反镜热应力下的光学波前进行拟合。研究结果表明:在同等激光功率辐照条件下,微晶材料制作的快反镜温升最小,形变最小。根据仿真结果优选微晶作为快反镜镜体材料,基于泽尼克多项式对快反镜波前热畸变进行仿真分析,计算得到波前热像差以活塞、球差、离焦等为主导,可为波前校正工程应用提供理论参考。

关键词:高功率连续激光; 快反镜; 热畸变; 有限元分析

中图分类号:TN249 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1020003

Analysis on thermal performance of fast steering mirror irradiated by high power CW laser

Lan Shuo[1,2,5], Li Xinnan[1,4], Wu Chunfeng[3], Li Mengqing[2], Han Ximeng[2]

(1. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 2. The 9th Designing Deportment of China Aerospace Science and Industry Corporation, Wuhan 430040, China; 3. The 4th Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, Wuhan 430040, China; 4. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the thermal characteristic of fast steering mirror during the working process of high power CW laser, a time-dependent fast steering mirror model coupled with heat transfer and structure mechanic was established to calculate the distribution of temperature, thermal deformation and thermal stress by finite element software, and the material was fused silica, zerodur and sic respectively. The wave front of fast steering mirror was fitted by Zernike polynomial algorithms. The results indicate that under the same laser power irradiation conditions, the minimum temperature rising and thermal distortion of the three material is zerodur. By comparison, zerodur material is optimized as fast steering mirror, and its dominant thermal aberration are piston, spherical aberration and defocus, which can provide wavefront correction to theoretical reference in the field of engineering application.

Key words: high power CW laser; fast steering mirror; thermal distortion; finite element analysis

收稿日期:2018-05-10; **修订日期**:2018-06-20

作者简介:兰硕(1987-),女,高级工程师,博士生,主要从事激光光学系统设计加工检测及热效应分析方面的研究。Email: slan@niaot.an.cn

导师简介:李新南(1963-),男,研究员,博士生导师,硕士,主要从事大口径光学技术应用方面的研究。Email:xnli@niaot.ac.cn

0 引 言

快反镜作为发射光源与接收端之间控制光束传播方向的精密光学仪器,集光、机、电技术于一体,具有响应快、精度高、分辨力大等突出优点,已被广泛应用于自适应光学、高精度激光操控、复合轴精密跟踪等领域[1]。

在高功率激光光路中，快反镜膜层能量吸收和基底镜体内热扩散会使反射镜的温升及热应力越加明显,而快反镜在加持工况下,材料本身热膨胀,必然导致镜面产生随时间和空间变化的热形变分布,从而引起的波前热像差使光束质量劣化，严重影响系统的使用效能[2-5]。文中针对快反镜常用的镜体材料在高功率激光作用下的热性能展开分析，建立快反镜传热学与结构力学非稳态计算模型，利用多物理场仿真软件计算 10 kW 连续激光平均功率密度作用下、作用时间为 60 s 过程中,背板固定夹持方式下的快反镜的热变形和热应力，综合分析不同材料下的光学性能，并通过泽尼克多项式分析了快反镜的波前热像差。

1 理论基础

1.1 热变形数学模型

当快反镜受到高功率连续激光辐照时，镜体吸收能量其内部温度会产生不均匀变化，且镜体材料本身热膨胀产生线应变。由于反射镜膜层受热应力场机理较为复杂,文中进行模简化,忽略膜层对反射镜热效应的影响。在快反镜处于固定约束条件下,边界约束或温度变化不均匀会导致镜体内产生热应力。

连续激光照射引起的快反镜温度场分布可表示为[2]:

$$\begin{cases} \nabla^2 T(r,\ t)=\dfrac{1}{a}\dfrac{\partial T(r,\ t)}{\partial t} \\ -k\dfrac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=0}=\eta I(r,\ t)-hT\big|_{z=0} \\ T\big|_{t=0}=T_0 \\ T\big|_{z=z_1}=T_0 \\ T\big|_{r=r_1}=T_0 \\ I(r,\ t)=\dfrac{2I(r,\ t)}{\pi\varpi^2}\exp\left(-\dfrac{r^2}{\varpi_0^2}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中:$T(r,\ t)$为变形镜内($(r,\ z)$点 t 时的温升值;$a=k/\rho c$ 为快反镜介质的热扩散率,k 为热导率,c 为比热容,ρ 为密度;η 为热吸收因子;h 为空气对流散热因子;$I(r,\ t)$为快反镜镜薄膜内入射激光光强功率密度分布函数;w_0 为入射激光束腰;w 为入射激光光斑半径;T_0 为初始温度。

根据热弹性力学中三个基本方程：平衡微分方程、位移几何方程和本构方程,热应力-应变直接关系可表示为[5]:

$$\begin{cases} \sigma_r=\dfrac{E}{1+\mu}\left(\dfrac{\partial\mu_r}{\partial r}+\dfrac{\mu}{1-2\mu}(\varepsilon_r+\varepsilon_\theta+\varepsilon_z)\right)-\dfrac{\alpha}{1-2\mu}T \\ \sigma_\theta=\dfrac{E}{1+\mu}\left(\dfrac{\mu_r}{r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\mu_\theta}{\partial\theta}+\dfrac{\mu}{1-2\mu}(\varepsilon_r+\varepsilon_\theta+\varepsilon_z)\right)-\dfrac{\alpha}{1-2\mu}T \\ \sigma_z=\dfrac{E}{1+\mu}\left(\dfrac{\partial\mu_z}{z}+\dfrac{\mu}{1-2\mu}(\varepsilon_r+\varepsilon_\theta+\varepsilon_z)\right)-\dfrac{\alpha}{1-2\mu}T \\ \tau_{r\theta}=\dfrac{E}{2(1+\mu)}\left(\dfrac{\partial\mu_\theta}{\partial r}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\mu_r}{\partial\theta}-\dfrac{\mu_\theta}{r}\right) \\ \tau_{zr}=\dfrac{E}{2(1+\mu)}\left(\dfrac{\partial\mu_r}{\partial z}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial\mu_z}{\partial r}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中:E 为镜体材料的杨氏模量;μ 为镜体材料的泊松比;α 为线膨胀系数。通过求解(1)、(2)两个方程组可以得到温度场、应力场合热变形的关系。文中利用多物理场仿真软件建立快反镜有限元模型，用数值法求解快反镜在高功率连续激光辐照下的温度场、应力场和热变形。

1.2 波前相位数学模型

描述波前相位有多种形式，其中泽尼克多项式是在圆域上表征径向变量和角度变量的函数，且具有正交性,对于复杂波前的分析精度较高。由于内光路通道受热产生的波前像差随时间而变化，与光学系统的固定像差显著不同,因此,可利用泽尼克多项式的变化特性定量研究热效应对成像质量的影响。泽尼克多项式是两个实变量 X,Y 的多项式 $V_n^l(X,Y)$,用极坐标($X=\rho\sin\theta,Y=\rho\cos\theta$)表示时,其形式为[6]:

$$V_n^l(\rho\sin\theta,\rho\cos\theta)=R_n^l(\rho)\mathrm{e}^{il\theta} \tag{3}$$

式中:$l\neq 0$ 并且 $n\geqslant 0$,均为整数,$n\geqslant|l|$,而 $n-|l|$是偶数。其正交性和归一化性质则由下列公式表示:

$$\iint\limits_{X^2+Y^2\leqslant 1} V_n^{l*}(X,Y)V_{n'}^{l'}(X,Y)\mathrm{d}X\mathrm{d}Y=\frac{\pi}{n+1}\delta_{ll'}\delta_{nn'} \tag{4}$$

式中：δ_{ij}为克罗内克符号；星号表示复共轭。径向函数 $R_n^l(\rho)$是 ρ 的多项式，由 ρ^n，ρ^{n-2}，…$\rho^{|l|}$各次幂组成。

像差造成的相位畸变可以通过泽尼克多项式描述，其位相因子为[6]：

$$\varphi(x,y)=\exp[-iC_jZ_j(x,y)]$$

式中：$Z_j(x,y)$为泽尼克系数；C_j为像差系数。

2 快反镜热性能仿真及结果分析

2.1 仿真模型及边界条件

国内外用于制造快反镜的材料有融凝石英、微晶玻璃、碳化硅等，其中，融凝石英、微晶玻璃是传统的反射镜材料，碳化硅是 20 世纪 80 年代发展起来的一种相对新型的反射镜材料。材料的参数对比见表 1[7]。从表 1 中的数据对比结果可以看出，融凝石英作为传统反射镜材料，其制作工艺较为成熟；微晶玻璃由于其热膨胀吸收小，其热稳定系数较高；碳化硅材料具有较小的密度和较高的弹性模量，从而使其比刚度较高。不同材料的品质各有优缺点，为了综合考虑连续激光辐照下热性能，需要进行仿真量化分析。

表 1 材料物理参数

Tab.1 Physical parameters of some materials

Parameters	Fused silica	Zerodur	SiC CVD
Density/g·cm^{-3}	2.19	2.53	3.21
Young′s model/GPa	73	91	465
Linear expansion coefficient/℃$^{-1}$	0.5×10^{-6}	0.05×10^{-6}	2.40×10^{-6}
Thermal conductivity/W·cm^{-1}·℃$^{-1}$	1.4	1.64	198
Poisson′s ratio	0.17	0.24	0.21
Specific heat/J·kg^{-1}·℃$^{-1}$	750	821	733

图 1 为激光辐照下快反镜热变形物理模型，快反镜主要由快反镜镜体、支撑基座及驱动器组成，其中支撑基座为铟钢，驱动器材料为铝，驱动器面板四个螺孔为固定约束。在工作状态下，激光照射到快反镜体表面，由驱动器驱动镜体支撑结构完成快反镜对光束传播方向的控制。

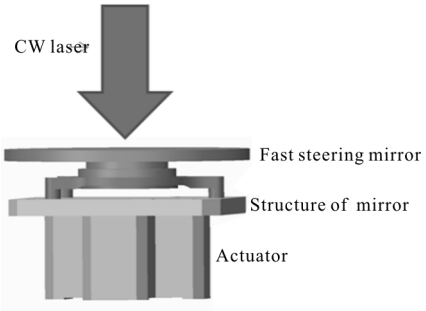

图 1 激光辐照下快反镜热变形物理模型示意图

Fig.1 Physical model diagram of laser irradiated fast steering mirror

图 2 为利用软件建立的快反镜有限元模型，为保证计算精度，快反镜模型共计 87 006 个单元，平均单元质量为 0.663。假定快反镜物理口径为 150 mm，厚度为 7 mm；激光为基模高斯分布，激光辐照时间 60 s。快反镜材料参数见表 1，边界条件见表 2，快反镜加持方式为背板固定。采用非稳态求解激光辐照 60 s 过程中的热性能。

图 2 快反镜有限元模型

Fig.2 Finite element analyses model for fast steering mirror

表 2 边界条件参数

Tab.2 Parameters of boundary condition

Parameters	Value
Initial temperature/℃	20
Radius/mm	75
Thickness/mm	7
Reflectance	0.97%
Laser power/kW	10
Laser waist radius/mm	30
Irradiation time/s	60
Convection heat transfer factor/W·m^{-2}·℃$^{-1}$	3

2.2 仿真模型验证

为验证模型准确性，在实验室条件下将一定功

率激光加载到微晶为基底材料的反镜镜面上，反射镜直径为 25 mm,厚度为 3 mm(如图 3 所示)。受高功率条件下在线检测镜面面形安全性限制，文中采用红外热像仪监测镜面最大温升的方法验证模型的准确性。由图 4 可以看出实测温升曲线与模型仿真结果比较一致性较好,表明文中所述模型合理。

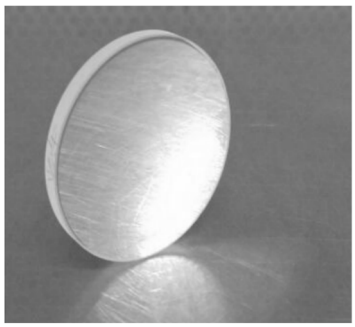

图 3 微晶玻璃制作的反射镜

Fig.3 Mirror made by Zerodur

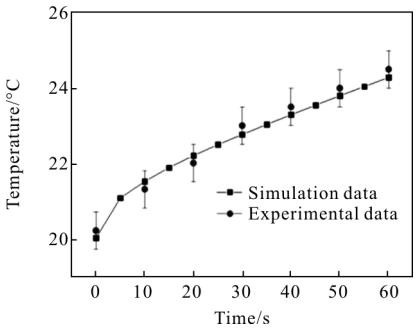

图 4 实测温升与模型仿真比较图

Fig.4 Temperature comparison of experiment and simulation

2.3 快反镜热性能分析

在连续激光辐照 60 s 过程中，融凝石英、微晶玻璃、碳化硅为镜体材料的快反镜径向温度上升情况见图 5。从图 5 中可以看出,在激光辐照 60 s 过程中,最高温度点位于镜体中心,与高斯光源能量分布趋势一致。根据分析结果,计算得到三种材料的最大温升分布见图 6。从图 6 中可以看出，在激光辐照 60 s 过程中,快反镜温度保持上升趋势,初始阶段温度上升较快,之后温度上升速度降低,三种材料最大温升分别为 38.44 ℃、31.61 ℃与 33.35 ℃。根据三种材料的导热系数，在相同温度梯度下热量传导能力从优到劣依次为碳化硅、微晶玻璃与融凝石英,而由密度与比热容的乘积可知，升高相同温度所需热量由大到小依次为碳化硅、微晶玻璃与融凝石英,而热扩散率最终决定了三种材料的温度变化传播能力。因此,融凝石英温度上升最快,微晶玻璃温度上升最慢。

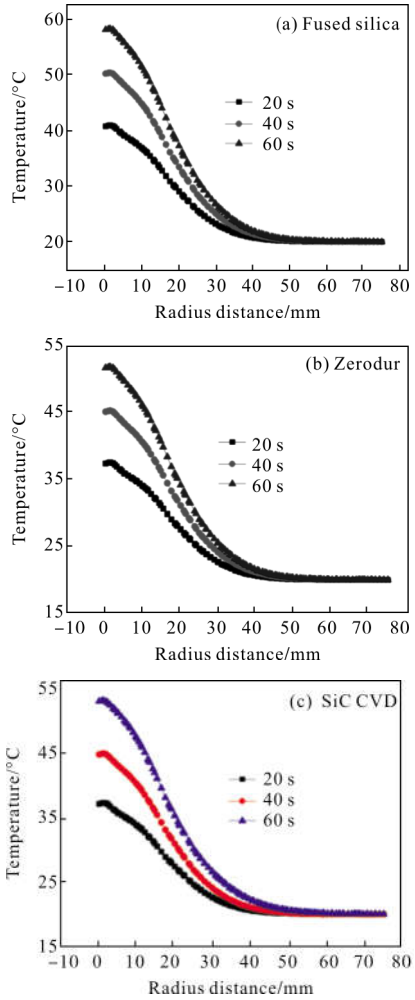

图 5 60 s 激光辐照下快反镜镜面径向温度分布

Fig.5 Temperature distribution of fast steering mirror along the radial under 60 s laser irradiation

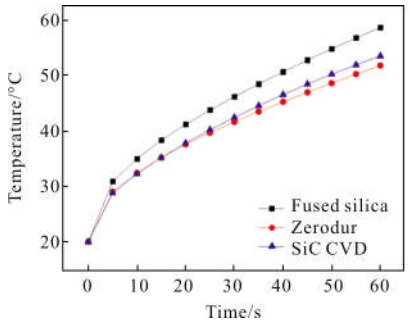

图 6 融凝石英、微晶玻璃、碳化硅为镜体材料的快反镜在连续激光辐照 60 s 过程中的温升结果

Fig.6 Temperature rising result of fast steering mirror made by fused silica, Zerodur and SiC CVD after 60 s irradiation

激光辐照过程中，受背板加持基座限制镜体不能自由膨胀，镜体内出现明显的变形，如图 7 所示为快反镜镜面的热应变分布，三种材料的最大热变形均处于激光入射面，其中微晶玻璃形变由于线膨胀系数比融凝石英和碳化硅低，其热形变也小于融凝石英和碳化硅，三种材料的最大变形为 0.430、0.017、1.558 μm。因此从降低温升及形变角度考虑，应用于高功率激光辐照下背板夹持形式的快反镜，微晶玻璃为优选镜体材料。

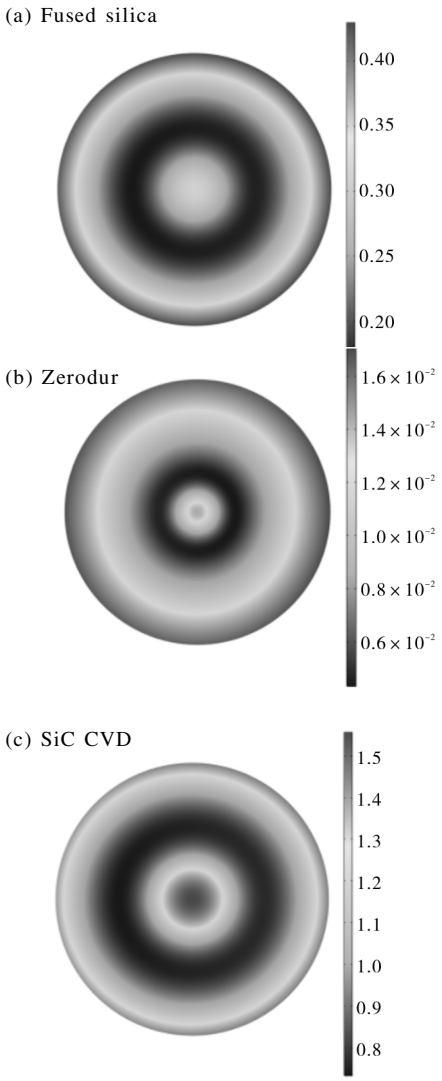

图 7 60 s 激光辐照下快反镜热变形分布(单位：μm)

Fig.7 Displacement distribution of fast steering mirror under 60 s laser irradiation (Unit: μm)

根据热分析仿真结果，优选微晶为快反镜体材料，对不同反射率条件下背板加持方式的快反镜热性能进行仿真分析，如表 2 所示。计算得到激光辐照 60 s 时镜片最高温升及最大面形，从数据可以得出反射率每降低 0.01%，最高温度升高 10 ℃，镜面变形变化越来越恶劣，在反射率 99.94%条件下最大面形变化量高出 99.98%时两个数量级。考虑镜面差与波面差的二倍关系，计算了热效应引起的光程差对波前畸变的影响，数量级与热变形量级一致。

表 2 不同反射率条件下快反镜热性能分析结果(辐照时间：60 s)

Tab.2 Analysis on thermal performance of fast steering mirror under different reflectance (Irradiation time：60 s)

	99.98%	99.97%	99.96%	99.95%	99.94%
Temperature rise/℃	21.23	31.61	41.83	51.92	61.89
Displacement/μm	0.003	0.017	0.040	0.073	0.116
Wave aberration (rms)/μm	0.006	0.024	0.056	0.102	0.162

为进一步更直观且量化分析热效应引起的波前相位影响，以激光辐照时间 60 s、镜面反射率 99.97%为例，对镜面波前相位进行泽尼克多项式分解，得到前 36 项系数如图 8 所示。从图 8 计算结果表明在高功率激光辐照条件下，活塞、球差和离焦占主导为主导热像差。

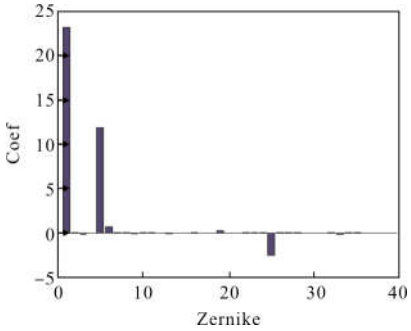

图 8 60 s 条件下泽尼克系数

Fig.8 Zernike coefficient under 60 s

3 结 论

文中建立了快反镜非稳态热力学耦合模型，对融凝石英、微晶玻璃、碳化硅三种材料为镜体的快反镜在高功率连续激光作用下的温度、热变形和热应变分布进行了数值分析，结果表明微晶材料在高功率应用中具有相对优势。因此，对微晶材料制作的快反镜进行波前相位分析，受激光功率高斯分布影响，

波前像差以球差、离焦等为主导热像差,可考虑通过调焦方法校正补偿上述像差。文中采用有限元方法对快反镜进行多物理场分析,可以有效预测快反镜在激光热载荷作用下的光学性能变化,使研究人员在设计阶段从光机热一体化角度对快反镜进行合理设计和评价,为快反镜热效应像差补偿等工作提供参考。

参考文献:

[1] Wang Hengkun, Zhang Guoyu, Guo Lihong, et al. High performance fast steering mirror for beam controI of vehicular high energy laser system [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2012, 20(12): 336–341. (in Chinese)
王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(12): 336–341.

[2] Qi Weizong, Huang Wei, Zhang Bin, et al. Finite element analysis of thermal distortion of infrared CW laser reflectors [J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2004, 16(8): 953–956. (in Chinese)
齐文宗, 黄伟, 张彬, 等. 红外连续激光反射镜热畸变的有限元分析[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(8): 953–956.

[3] Zhang Yaoping, Fan Junqi, Long Guoyun, et al. Finite element simulation of thermal distortions of deformable mirror with laser irradiation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(11): 1136002. (in Chinese)
张耀平, 樊峻棋, 龙国云, 等. 变形镜在激光辐照下热畸变有限元模拟 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1136002.

[4] Liu Wenguang, Rao Peng, Hua Weihong, et al. Effects of thermal distortion of Si mirror irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. ***High Powe Laser and Particle Beams***, 2008, 20 (10): 1615–1619. (in Chinese)
刘文广, 饶鹏, 华卫红, 等. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20 (10): 1615–1619.

[5] Zhang Kuo, Chen Fei, Li Ruolan, et al. Analysis on thermal performance of output window in high power CO2 laser [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(2): 0205005. (in Chinese)
张阔, 陈飞, 李若澜, 等. 大功率 CO_2 激光器输出窗口热性能分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0205005.

[6] Born, Wolf. Principles of Optics [M]. 7th ed. Yang Xiasun, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013. (in Chinese)
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. 光学原理[M]. 第七版. 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[7] Xu Huaizhi. Infrared Optical Material [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
徐怀之. 红外光学材料[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2015.