

学 术 著 作 丛 书

*Supersonic Free-vortex Aerowindow
and its Optical Quality*

超声速自由旋涡气动窗口
及其光学质量

易仕和 侯中喜 赵玉新 著

国防科技大学出版社

国防科技大学
学术著作专项经费
资助出版

超声速自由旋涡气动窗口 及其光学质量

易仕和 侯中喜 赵玉新 著

国防科技大学出版社
·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

超声速自由旋涡气动窗口及其光学质量/易仕和,侯中喜,赵玉新著. —长沙:国防科技大学出版社,2005.9

(学术著作丛书)

ISBN 7-81099-182-5

I. 超… II. ①易… ②侯… ③赵… III. 激光器—输出窗—关系—激光—光能 IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 045664 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:徐飞 责任校对:文慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.75 字数:305千

2005年9月第1版第1次印刷 印数:1-1200册

ISBN 7-81099-182-5/TN·16

定价:29.00元

序

气动激光器或化学激光器光腔的工作压强与环境压强相差颇大。对于低强度激光，在输出窗口处加上透明的晶体或玻璃制成的隔板，就可将光腔密闭起来；而对于强激光，由于窗口隔板的光吸收引起热变形甚至碎裂，难以满足使用要求。气动窗口的工作原理是利用气体流动产生的压差来补偿光腔内外的压差，激光束只需穿过流动的气体就能输出腔外。由于气体吸收系数较固体低得多，即便吸收使气体升温，升温后的气体亦随之流走。因此，激光束对气体的加热不会损害气动窗口补偿压差的能力。

气动窗口研究的基本目标可分为两方面：一是探求所需压差的优化流场；二是降低气动窗口对输出光的干扰作用。

本书对多种形式的气动窗口给出了简短的评述，对显露较强实用性的自由旋涡气动窗口重点加以论述。当前，有关剪切层、喷流、激波、旋涡尤其是湍流流动等

复杂流场对激光束的干扰效应的分析和数值预计都存在各自的局限,使得气动窗口降低输出光质量问题变得相当复杂与困难。本书内容研究解决了这一问题。此外,本书还给出了相关的基础知识。

本书是一本关于强激光气动窗口的引论性著作,对强激光的研究人员与使用人员有所助益。

中国科学院院士

俞鸿儒

2005.7.30

内 容 简 介

气动窗口是高能气动激光器和化学激光器中关键的组成部分，它的气动密封性能和光学性能直接决定了高能激光器的光学质量。气动窗口涉及空气动力学、光学工程、气动光学等学科领域的交叉前沿研究课题，本书是这个综合技术科学领域的基础性、前沿性的专著。

本书系统地论述了超声速自由旋涡气动窗口的基本原理、理论计算、工程设计、实验测试和光学质量的优化等内容，既讨论了射流、剪切层与激光束的相互作用等基础问题，同时又将这些基础研究的成果应用于气动窗口的设计和性能优化，以解决自由旋涡气动窗口的实际难题。本书可作为空气动力学、气动光学及相关专业的研究生教材以及教学、科研人员的参考书。

前 言

高能激光武器又称强激光武器，俗称“死光”，其激光能量一般几十千瓦甚至几兆瓦，可直接作为摧毁飞机、导弹或卫星的高能武器。20世纪60年代以来，美、前苏联等国就先后着手高能激光武器的研究，已先后成功发展了多种高能激光武器系统。高能激光武器系统是美国原“星球大战”导弹防御计划的重要组成部分，也是目前国家导弹防御计划的核心组成部分之一。

高能气动激光器或高能化学激光器的激光工作介质是气体，而且激光腔内外存在压强差，激光束的输出窗口必须“密封”。由于激光束的输出窗口晶体材料不可避免的部分吸收作用，当激光输出功率很高，晶体窗口就会产生热聚集、热畸变甚至炸裂或击穿，从而影响输出光束质量或使激光器根本无法工作。这样就出现了一个难题：对于高能激光的输出窗口不可能采用晶体窗口，而如果去掉晶体窗口，则由于激光腔内外压差的存在，外界大气会进入光腔而使激光器实际上无法运行。这样，晶体窗口成为了限制高能激光器功率进一步提高和光束质量进一步优化的“瓶颈”。

为了解决以上难题，可利用空气动力技术设计的某种射流来取代晶体窗口，用射流来达到密封激光腔的目的。选择对激光输出波长没有吸收的气体，利用气动方法来维持光腔与环境大气之间的压差，这就是所谓气动窗口。超声速自由旋涡气动窗口是利用流体微团作圆周运动的离心力来平衡大气与光腔压力差，以此作为高能激光束的输出窗口。

在 高能激光器发展初期，美国、前苏联等国就开始了气动窗口方面的研究，提出并研制了许多种不同的气动窗口实验装置，日、德等国在 20 世纪 70 年代末以来也开展了高能激光方面的研究工作。从目前的研究现状来看，可把气动窗口分为纵向式气动窗口和横向式气动窗口两种形式。

当输出激光束方向与气动窗口的工作气体运动方向平行时称为纵向式气动窗口。纵向气动窗口，容易实现极低的激光腔压，这是其优点。但激光输出时，激光束经过气动窗口的气路较长，即光程较大，这样增大了气动窗口气体折射率的不均匀性导致的光束质量的退化，所以它对光束质量的影响比较大，而且目前引射式带抽吸的纵向气动窗口一般也只适用于小口径聚焦输出。另外，由于真空装置的存在，对激光武器的小型化是不利的。

当输出激光束方向与气动窗口的工作气体运动方向大体垂直时则称为横向式气动窗口。在膨胀式横向气动窗口中，沿激光束传输通道上存在普朗特—迈耶膨胀波系，利用这一点可以平衡激光腔与外界的压力。膨胀波导致的大的密度梯度致使轴向的激光产生扰动偏折，会影响激光质量。在压缩式的横向气动窗口中，斜激波的存在导致的大的密度梯度使激光产生扰动偏折，从而影响激光束的质量。横向式气动窗口的膨胀压缩联合式窗口是以上两种方式的结合，与以上两种形式的气动窗口一样，仍不能避免激波或膨胀波的存在对激光束质量的影响。

自由旋涡气动窗口实际上是一种横向气动窗口，但它从原理上与以上提及的横向气动窗口不同，它不是依靠激波或膨胀波来平衡大气与光腔压力差，而是利用流体微团作自由旋涡运动的离心力来平衡大气与光腔压力差。在理想的设计状态使用时，由于超声速非对称喷管出口端面上内、外侧的压强分别与激光腔压和外界大气压相等，且流向角是光滑变化，不会有激波或膨胀波产生，因而，不会引起输出激光波前大的畸变。

气动窗口的研究涉及流体力学和光学工程两个学科领域，是一个典型的多学科交叉的研究领域。在这一研究领域内，既涉及到流体力学问题，又涉及到激光在超声速流体中传播以及射流剪切层与激光相互作用等问题。在超声速自由旋涡气动窗口的研究方面，目前还没有已发表的相关专著，这本书反映了作者在这一研究领域的最新成果，并且具有很好的系统性和完整性，对这一领域的研究和工程应用应该是十分有益的。

本书系统地论述了超声速自由旋涡气动窗口的基本原理、理论计算、工程设计、实验测试和光学质量的优化等内容。全书共分为八章。第一章介绍了高能激光在军事上和工业上的重要性以及气动窗口在高能激光系统中的关键作用，介绍了国内外气动窗口的研究概况，分析了气动窗口研究可能遇到的气动问题和光学问题。第二章介绍了与气动窗口相关的气体动力学基础和光学基础理论。第三章对高能激光辐射透过超声速射流剪切层进行了研究，给出了研究结果。第四章根据自由旋涡气动窗口剪切层的实际情况确定了超声速剪切层的研究对象和参数，采用数值方法研究了光束退化的位相差与超声速剪切层结构的关系。研究的剪切层包括气动窗口中可能用到的在大气中的空气射流剪切层，以及 He、Ar、 N_2 射流剪切层和 He/Ar 混合气体射流剪切层。在第五章中，对超声速自由旋涡气动窗口的原理和结构、自由旋涡射流的设计方法和设计过程、对扩压器的压力恢复等进行了分析和研究。在第六章中研究了超声速自由旋涡喷管的设计方法，用特征线方法讨论了这种自由旋涡喷管的设计过程，对几种典型的自由旋涡喷管的壁面型线进行了设计，对设计的自由旋涡喷管流场和自由旋涡射流流场进行了数值研究。第七章对超声速自由旋涡气动窗口流场的气动光学性能进行了研究，对光线在自由旋涡流场中的传播轨迹进行了计算，分析了自由旋涡气动窗口对透射的光束产生的气动透镜效应，提出了超声速自由旋涡射流的压力匹配

和折射率匹配剪切层的设计方法，设计了用于气动窗口的两种类型的折射率匹配剪切层。第八章对超声速自由旋涡气动窗口进行了工程设计和实验研究，建立了一套超声速自由旋涡气动窗口的实验装置和配套的参数测量系统，对气动窗口的自由旋涡喷管、扩压器的结构以及各部件的相对位置进行了实验研究，对设计的气动窗口的气动结构、密封性能、启动性能、光学质量等进行了实验测试和分析。

在完成本书的过程中，得到了中国科学院俞鸿儒院士和国防科技大学王承完教授的指导和帮助，作者深表感谢！感谢瞿章华教授、李桦教授、常熹钰副教授、刘天华博士和程忠宇博士，他们的热心帮助使作者受益非浅！感谢王振国教授、周进教授、刘泽金教授、姜宗福教授给予的宝贵支持和帮助！同时也感谢本人指导的几位博士研究生和硕士研究生在本书撰写出版工作中所作出的努力！

由于作者才疏学浅，缺点和错误在所难免，敬请专家、读者批评指正。

易仕和
2005年8月

目 录

第一章 概 述

§ 1.1 高能激光的发展及其对气动窗口的需求	(1)
§ 1.2 射流剪切混合层光学性质研究	(4)
1.2.1 超声速剪切层研究进展	(4)
1.2.2 剪切层光学技术研究的进展	(6)
1.2.3 剪切层光学技术的主要应用	(8)
1.2.4 剪切层透射光远场光强对波长的依赖	(11)
§ 1.3 气动窗口的研究现状与发展趋势	(13)
§ 1.4 本书研究的基本思路和主要内容	(18)
1.4.1 本书相关研究的基本思路	(18)
1.4.2 本书的主要研究内容	(20)

第二章 气动窗口相关理论基础

§ 2.1 气体动力学	(24)
2.1.1 热力学基础	(25)
2.1.2 气体的分类	(29)
2.1.3 等熵流基础	(31)
2.1.4 理想气体的一维定常流	(33)
2.1.5 超声速流场中的波系结构	(37)

§ 2.2 光 学	(48)
2.2.1 光束在变折射率介质中传播的控制方程	(49)
2.2.2 气体介质的折射率及光程差	(53)
2.2.3 强激光辐射对介质的影响	(54)
§ 2.3 计算流体力学	(57)
2.3.1 控制方程	(57)
2.3.2 数值格式与算法	(63)
§ 2.4 计算流动图像	(65)

第三章 射流光学性能初探

§ 3.1 数值格式的 PIV 实验验证	(70)
§ 3.2 射流及其光学性能研究	(74)
3.2.1 研究对象与参数设置	(75)
3.2.2 射流马赫数与光程差的关系	(76)
3.2.3 压力不匹配射流的光学性能	(82)
3.2.4 非空气射流流场结构与光学性能	(95)
§ 3.3 强激光与自由射流相互作用初探	(106)
3.3.1 研究对象与参数设置	(107)
3.3.2 不同辐射加热吸收功率对自由射流的影响	(109)
3.3.3 辐射吸收生成的波系结构	(112)
3.3.4 辐射吸收对不同出口工况自由射流的影响	(115)

第四章 剪切混合层光学性能的数值分析与预测

§ 4.1 “空气—空气”剪切混合层及其光学性能	(123)
4.1.1 计算参数	(123)
4.1.2 计算结果	(124)
4.1.3 气动性能和光学性能分析	(133)

§ 4.2 “空气—非空气”多组分剪切混合层及其光学性能	(137)
4.2.1 计算参数	(138)
4.2.2 计算结果	(141)
4.2.3 气动性能和光学性能分析	(177)
§ 4.3 超声速剪切层引起的随机光学畸变及其预测	(182)
4.3.1 剪切层引起的随机光学畸变	(182)
4.3.2 预测剪切层对激光束退化畸变的传统方法	(183)
4.3.3 预测超声速剪切层随机光学畸变采用的理论模型	(184)
4.3.4 超声速剪切层随机光学畸变的预测	(186)
§ 4.4 计算结果的分析和讨论	(191)

第五章 自由旋涡气动窗口的原理与参数计算

§ 5.1 自由旋涡气动窗口的原理	(195)
§ 5.2 超声速自由旋涡气动窗口流场参数的计算	(201)
§ 5.3 自由旋涡射流的设计过程	(204)
§ 5.4 扩压器的压力恢复	(208)
§ 5.5 小 结	(214)

第六章 超声速自由旋涡喷管的设计及其 流场的数值验证

§ 6.1 自由旋涡喷管非对称段的设计	(217)
6.1.1 只有一个简单波区的自由旋涡喷管非对称段的 设计方法	(219)
6.1.2 双简单波区的自由旋涡喷管非对称段的设计方法	(224)

§ 6.2	自由旋涡喷管超声速对称段	(227)
6.2.1	弯曲声速线的最短长度喷管	(228)
6.2.2	直声速线的最短长度喷管	(231)
6.2.3	两种喷管设计方法和设计结果的比较	(235)
§ 6.3	对称段设计的进一步优化	(236)
6.3.1	喷管设计的优化	(236)
6.3.2	收缩段的设计与喷管型线的粘性修正	(241)
§ 6.4	自由旋涡喷管的设计结果	(241)
6.4.1	喷管非对称段两种方法设计结果的比较	(242)
6.4.2	超声速自由旋涡喷管型面	(245)
6.4.3	理想自由旋涡喷管的流场结构	(246)
§ 6.5	自由旋涡喷管流场的数值验证	(248)
6.5.1	基本控制方程、算法与网格	(248)
6.5.2	计算结果	(252)
§ 6.6	自由旋涡气动窗口流场的数值研究	(254)
6.6.1	网格与计算条件	(254)
6.6.2	计算结果	(256)
§ 6.7	小 结	(259)

第七章 气动窗口的气动光学特性及其 折射率匹配技术

§ 7.1	无粘情况下自由旋涡气动窗口流场光学特性	(262)
7.1.1	理想自由旋涡喷管出口的参数分布	(263)
7.1.2	自由旋涡射流光程差的分布	(265)
7.1.3	光线在理想自由旋涡射流中的传播特性	(268)

§ 7.2	自由旋涡射流气体的选择方法	(273)
§ 7.3	自由旋涡气动窗口剪切层光学性能的优化设计 ...	(274)
7.3.1	选用加热的干燥空气作为工作气体	(275)
7.3.2	选用非加热的气体作为工作气体	(276)
7.3.3	压力匹配和折射率匹配剪切层的设计	(277)
§ 7.4	小 结	(280)

第八章 超声速自由旋涡气动窗口的实验研究

§ 8.1	气动窗口的实验装置及其设计参数	(283)
8.1.1	自由旋涡气动窗口设计参数的确定	(283)
8.1.2	可变结构的自由旋涡气动窗口实验装置	(285)
8.1.3	自由旋涡气动窗口的参数测量系统	(289)
§ 8.2	气动窗口光束质量的评价参数及其测量方法	(290)
8.2.1	衡量气动窗口光学性能的参数	(290)
8.2.2	差分干涉仪及其干涉条纹的处理	(293)
8.2.3	用差分干涉仪测量 Strehl 比	(296)
8.2.4	用激光透射法测量 Strehl 比	(297)
§ 8.3	自由旋涡气动窗口的气动性能实验	(298)
8.3.1	自由旋涡气动窗口的启动性能和密封性能	(298)
8.3.2	自由旋涡射流的马赫数分布和压力分布测量 ...	(302)
§ 8.4	自由旋涡气动窗口的光学性能实验	(308)
8.4.1	自由旋涡射流光学性能的干涉测量	(308)
8.4.2	气动窗口的 Strehl 比($\bar{R}_s$)测量	(310)
8.4.3	气动窗口流场的纹影显示	(311)
8.4.4	自由旋涡气动窗口流场对透射激光束的影响 ...	(313)

§ 8.5	自由旋涡气动窗口的边界层防漏技术	(316)
8.5.1	自由旋涡气动窗口的边界层渗漏问题	(316)
8.5.2	防漏片的设计方法	(316)
8.5.3	防漏片对气动窗口气动性能的影响	(318)
8.5.4	防漏片对气动窗口光学性能的影响	(320)
§ 8.6	扩压器的结构及其对密封性能和启动性能的影响	(322)
8.6.1	扩压器的气动设计与结构设计	(322)
8.6.2	扩压器的结构对气动窗口密封性能的影响	(324)
§ 8.7	超声速自由旋涡流场的 PIV 测试	(332)
8.7.1	粒子图像速度场(PIV)测试系统	(332)
8.7.2	粒子图像速度场(PIV)试验技术	(335)
8.7.3	自由旋涡流场的激光片光流动显示	(337)
8.7.4	超声速自由旋涡射流诱导流动的 PIV 测量	(341)
8.7.5	超声速自由旋涡射流速度场的 PIV 测量	(343)
§ 8.8	大压力比的自由旋涡气动窗口的设计	(344)
8.8.1	大压力比气动窗口设计可能遇到的问题及对策	(344)
8.8.2	大压力比的自由旋涡气动窗口的设计	(346)
§ 8.9	小 结	(347)
参考文献		(352)

第一章 概 述

§ 1.1 高能激光的发展及其对气动窗口的需求

自从 20 世纪 60 年代第一台激光器问世以来, 激光技术在军事上已获得了广泛应用。激光武器有低功率激光武器和高能激光武器之分。前者包括激光测距、激光制导、激光干扰、激光致盲、激光引信等等; 而后者就是强激光武器, 俗称“死光”, 其激光能量一般几十千瓦甚至几兆瓦。高能激光武器可直接作为摧毁飞机、导弹或卫星的高能武器。

20 世纪 60 年代以来, 美国和前苏联等国就先后着手高能激光武器的研究, 并取得了很大的进展。70 年代以来, 美国已先后成功发展了多种高能激光武器系统, 比较典型的有以下几种^{[1][2][3][4]}:

- 海军舰载近程高能激光武器系统 (HELWS);
- “鸚鵡螺” 战术高能激光武器系统 (THEL);
- 地基反卫星高能激光武器系统 (GBL);
- 机载高能激光武器系统 (ABL);
- 地区防御综合反导通用高能激光武器系统 (GARDIAN);