

微纳制造的基础研究学术著作丛书

国家重点基础研究发展计划（973计划）项目

“空间光学先进制造基础理论及关键技术研究”（2011CB013200）资助

M i c r o N a n o M a n u f a c t u r i n g

碳化硅光学反射镜 超精密加工的基础理论与方法

李圣怡 戴一帆 康念辉 彭小强 等 著



科学出版社

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目
“空间光学先进制造基础理论及关键技术研究”
(2011CB013200)资助

微纳制造的基础研究学术著作丛书

碳化硅光学反射镜 超精密加工的基础理论与方法

李圣怡 戴一帆 康念辉 彭小强 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍碳/碳化硅(C/SiC)、硅/碳化硅(Si/SiC)两相涂层、化学气相沉积碳化硅(CVD SiC)、反应烧结碳化硅(RB SiC)和烧结碳化硅(S SiC)等5种典型国产SiC光学材料光学面形加工的基础理论和工艺。全书分为8章,主要介绍了5种典型SiC光学材料的机械特性、显微结构与力学行为特性,C/SiC、RB SiC与S SiC3种坯体材料在非球面磨削过程中的去除机理,碳化硅反射镜研磨工艺参数对材料去除率、表面粗糙度和亚表面裂纹深度的影响规律,SiC光学材料的传统抛光、芬顿辅助抛光、磁流变抛光与离子束抛光的加工特性,以及一些加工实例。

本书可供从事空间光学设计与制造,光学加工、超精密加工与测量,光学精密仪器等精密工程领域研究的科技人员参考,也适合高等院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

碳化硅光学反射镜超精密加工的基础理论与方法/李圣怡等著. —北京:科学出版社,2014

(微纳制造的基础研究学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-039110-0

I. ①碳… II. ①李… III. ①碳化硅-光学材料-反射镜-超精加工
IV. ①TH744

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第269315号

责任编辑:余 丁 金 蓉 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:234 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《微纳制造的基础研究学术著作丛书》编委会

顾问：姚建年、解思深、熊有伦、钟掘、温诗铸、李同保、田中群

主编：卢秉恒

副主编：王国彪、雒建斌、黎明

编委：(按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

丁玉成(西安交通大学)

刘 冲(大连理工大学)

刘 明(中国科学院微电子研究所)

孙立宁(苏州大学)

孙洪波(吉林大学)

朱 荻(南京航空航天大学)

张其清(中国医学科学院)

李圣怡(国防科学技术大学)

李志宏(北京大学)

苑伟政(西北工业大学)

姜 澜(北京理工大学)

段吉安(中南大学)

夏善红(中国科学院电子学研究所)

郭东明(大连理工大学)

顾长志(中国科学院物理研究所)

崔 铮(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所)

黄文浩(中国科学技术大学)

董 申(哈尔滨工业大学)

蒋庄德(西安交通大学)

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

随着人们认识世界尺度的微观化,制造领域面临着面向极小化的挑战,其基础研究正经历着从可视的厘米、毫米尺度向基于分子、原子的纳米制造技术过渡。纳米制造科学是支撑纳米科技走向应用的基础。国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”瞄准学科发展前沿、面向国家发展的重大战略需求,针对纳米精度制造、纳米尺度制造和跨尺度制造中的基础科学问题,探索制造过程由宏观进入微观时,能量、运动与物质结构和性能间的作用机理与转换规律,建立纳米制造理论基础及工艺与装备原理。重点研究范围包括基于物理/化学/生物等原理的纳米尺度制造、宏观结构的纳米精度制造、纳/微/宏(跨尺度)制造、纳米制造精度与测量、纳米制造装备新原理等。本重大研究计划旨在通过机械学、物理学、化学、生物学、材料科学、信息科学等相关学科的交叉与融合,探讨基于物理/化学/生物等原理的纳米制造新方法与新工艺,揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的尺度效应、表面/界面效应等,阐明物质结构演变机理与器件的功能形成规律,建立纳米制造过程的精确表征与计量方法,发展若干原创性的纳米制造工艺与装备原理,为实现纳米制造提供坚实的理论基础,并致力提升我国纳米制造的源头创新能力。正如姚建年院士指出的那样:该重大研究计划意义重大,通过原始创新性研究,旨在推动机械工程学科在基础性、前沿性等方面不断进展,在国际上取得重要地位,在某一领域形成中国学派。同时,他强调了纳米制造研究内容的创新性、学科交叉性、项目实施的计划性等,并期望在基础研究领域产生重大突破,取得重大成果。

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》是科学出版社依托基金委“纳米制造的基础研究”重大研究计划项目,经过反复论证之后组织、出版的系列学术著作。该丛书力争起点高、内容新、导向性强,体现科学出版社“三高三严”的优良作风。丛书作者都曾主持过重大研究计划“纳米制造的基础研究”项目或国家自然科学基金其他相关项目,反映该研究中的前沿技术,汇集纳米制造方面的研究成果,形成独特的研究思路和方法体系,积累丰富的经验,具有创新性、实用性和针对性。

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》涉及近几年来我国围绕纳米制造科学的国际前沿、国家重大制造工程中所遇到的基础研究难题等方面所取得的主要创新研究成果,包括表面纳米锥的无掩模制造及光电特性,光刻物镜光学零件纳米精度制造基础研究,铜互联层表面的约束刻蚀化学平坦化新方法,大尺度下深纹纳米结构制造方法与机理表征,基于为加工技术的微纳集成制造原理及方法研

究,微纳流控系统跨尺度兼容一体化集成制造基础研究,微/纳光学阵列元件的约束刻蚀剂层加工技术与系统的基础研究,等等。

毫米制造技术的应用,带动了蒸汽工业革命,推动了英国的振兴;微米制造技术的发展,带来了信息工业革命,带领美国的崛起;纳米制造技术也必将引领第三次工业革命的浪潮,我国的纳米制造业若能把握住历史的机遇,必将屹立于浪潮之巅,为实现中华民族的伟大复兴贡献出强劲的力量。

作为基金委重大研究计划项目“纳米制造的基础研究”的指导专家组组长,我深信《微纳制造的基础研究学术著作丛书》的及时出版,必将推动我国纳米制造学科的深入发展,在难题攻克、人才培养、技术推动等方面发挥显著作用。同时,希望广大读者提出建议和指导,以促进丛书的出版工作。



2013年10月28日

前 言

长期以来,反射镜的材料多采用光学玻璃。然而,现代光学工程的发展,要求光学系统能在更加多样化的环境中工作,而材料科学的技术进步又给光学工程带来了新的驱动力。从 20 世纪 80 年代初开始,美国、苏联、德国、法国、日本等国家开始针对空间低温反射镜、高能激光器反射镜等的需求,进行新的碳化硅(SiC)光学材料及反射镜结构的研究。90 年代,在 SiC 镜坯制作、研磨和抛光方面的研究也取得了较大进展,使得 SiC 反射镜逐步得到了运用并取得了很好的效益。

空间光学元件一般是指空、天环境下的机载和星载的平面、球面和非球面光学元件。这类光学系统要在太空的失重、极低温度和大温度梯度的环境中工作,还受运输、安装和发射升空等条件的苛刻限制。SiC 光学材料热膨胀系数低,又有良好的导热性能,有利于消除镜体中的温度梯度,实现温度平衡;它还具有密度低、抗辐照性能好、热学性能稳定、比强度和比刚度高等特点,既可以制成蜂窝型中空结构镜体,也可以制成超薄型镜体,大大降低了光学主镜的重量,这是迄今为止最理想的超轻主镜的镜体材料之一。可以预见, SiC 光学材料将取代光学玻璃材料,成为 21 世纪空间光学系统反射镜以及其他光学系统的首选材料。随着 SiC 光学材料价格的不断下降,用 SiC 光学材料取代玻璃光学材料成为必然趋势。

但是,相比于传统光学玻璃, SiC 光学材料存在着硬度大、多组分等特性,因而难以实现 SiC 反射镜的高效、高精度与超光滑加工。特别是大型、轻质、薄型、异形非球面镜的空间光学元件加工,精度高、难度大、周期长,是世界光学制造界的研究热点。因此,深入研究 SiC 光学材料的加工机理与工艺,进而制订 SiC 反射镜的高效、高精度、超光滑加工工艺路线,是 SiC 反射镜大规模应用的前提和关键。

国防科学技术大学精密工程研究室成立于 1981 年。30 多年来,开展了诸如超精加工机床研制、超精密磨削、光学研磨抛光、大中型和微型光学零件制造、微机电与微系统等领域的研究工作。在 2004~2009 年期间承担了 973 计划项目,针对大中型光学非球面镜的制造和检测新技术的基础理论进行了研究,取得了许多成果。从 2011 年开始,又承担了 973 计划项目“空间光学先进制造基础理论及关键技术研究”。这个项目与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海技术物理研究所、大连理工大学、哈尔滨工业大学、上海交通大学、苏州大学等单位联合进行,针对 SiC 光学材料大型反射镜制造的基础理论及关键技术进行系统研究。本书是研究的阶段性成果,内容偏重于 SiC 光学材料反射镜制造,包括最基础的加工机理和模型、基本的实验方法和结果,以及磁流变和离子束

抛光等新技术对 SiC 材料加工适应性的研究。

本书是对 5 种国产 SiC 光学材料的制造理论和工艺研究成果全面汇总的第一本专著。针对 5 种典型 SiC 光学材料如碳/碳化硅(C/SiC)、硅/碳化硅(Si/SiC)两相涂层、化学气相沉积碳化硅(CVD SiC)、反应烧结碳化硅(RB SiC)以及烧结碳化硅(S SiC),从其显微结构与力学行为出发,对碳化硅反射镜的磨削、研磨、传统抛光与可控柔体加工中的材料去除机理与相关工艺进行了深入研究。这些成果都是制订适用于 SiC 反射镜的高效、高精度、超光滑加工工艺路线,并加工出大型、轻质、薄型、异形非球面镜的空间光学元件的理论和工艺基础。我们期望本书内容能对我国光学制造科学的研究起到抛砖引玉的作用,能对我国光学行业的技术进步及经济发展起到一定的作用。

本书分为 8 章,主要内容如下:

第 1 章主要介绍国内外有关 SiC 光学材料及 SiC 光学反射镜的研究、应用现状与发展趋势。通过对 SiC 光学材料超精密加工的基础理论与一些新的加工技术进行详细论述,展示出 SiC 反射镜的高效、高精度加工技术发展的脉络。

第 2 章主要介绍 5 种典型 SiC 光学材料的机械、显微结构与力学行为特性。内容包括:利用 X 射线衍射仪、金相显微镜与扫描电镜等仪器,对各种 SiC 光学材料的组分与显微结构进行分析;基于纳米印压与刻划试验,研究 CVD SiC、S SiC、RB SiC 以及 Si/SiC 两相涂层这 4 种具有代表性的 SiC 光学材料在印压与刻划作用下的力学行为等。

第 3 章主要介绍 SiC 反射镜坯体的非球面磨削机理与工艺。内容包括:基于单颗磨粒磨削行为来分析 C/SiC、RB SiC 与 S SiC 3 种坯体材料在非球面磨削过程中的去除机理;采用“角度抛光法”研究 3 种坯体材料磨削亚表面裂纹深度与工艺参数之间的关系;采用“X 射线衍射法”与“逐层抛光法”测量 C/SiC 反射镜坯体的磨削表面残余应力沿深度分布规律;综合考虑磨削精度与亚表面损伤的大口径 SiC 反射镜坯体的非球面磨削工艺路线及加工试验等。

第 4 章主要介绍 SiC 光学材料的研磨去除机理与工艺。内容包括:基于压痕断裂力学与统计学理论对研磨过程中的单颗磨粒受力的计算,结合 SiC 光学材料的力学行为特性和表面形貌的演变来分析其研磨材料去除机理;工艺参数对 CVD SiC 研磨亚表面裂纹深度的影响规律,以及 CVD SiC 研磨亚表面裂纹深度与表面粗糙度的经验公式;工艺参数对 5 种碳化硅光学材料材料去除率与表面粗糙度的影响规律研究。

第 5 章主要介绍 CVD SiC、S SiC、RB SiC 与 Si/SiC 的传统抛光机理与工艺。内容包括:基于弹塑性力学理论与统计学理论,建立抛光过程中单颗磨粒的受力模型与划痕深度模型、抛光表面粗糙度理论模型与材料去除率模型;研究 SiC 复合光学材料,分析多组分之间的高差平衡机制与影响;研究 CVD SiC 与 S SiC 的

抛光去除机理与表面粗糙度理论模型;研究 RB SiC 和 Si/SiC 材料表面形貌的演变过程和对表面粗糙度影响,以及抛光效率的对比等。

第 6 章主要介绍 SiC 光学材料芬顿辅助抛光机理与工艺研究。内容包括:芬顿试剂与 SiC 光学材料化学作用机制和对 SiC 光学材料机械特性的影响;芬顿辅助抛光液的配制;SiC 光学材料芬顿辅助抛光材料去除机理;SiC 光学材料芬顿辅助抛光基本工艺特性和加工工艺流程。

第 7 章主要介绍 SiC 光学材料磁流变抛光(MRF)与离子束抛光(IBF)加工特性。内容包括:以 MRF 和 IBF 为典型代表的可控柔体加工技术对 SiC 光学材料的加工可行性;MRF 工艺参数对 CVD SiC 和 S SiC 的材料去除率和表面粗糙度的影响规律;IBF 对 CVD SiC 表面粗糙度与表面形貌的衍变规律等。

第 8 章主要介绍 SiC 反射镜超精密加工工艺路线与应用实例。内容包括:根据典型 SiC 反射镜的结构与制备工艺特点,制订加工工艺路线;综合利用各种加工方法的优势,对加工工艺路线进行优化;运用制订的 SiC 反射镜加工工艺对典型的 SiC 反射镜进行加工试验,包括平面超薄镜以及中小口径复合材料 SiC 平面反射镜的加工实例,以验证工艺方法的正确性与可行性。

本书主要在前面所述两个 973 项目支持下,由科研团队老师和学生的研究成果与论文整理而成,也总结了前人的大量论文,虽然力求在参考文献中详细给出,但可能不甚全面,在这里对有关作者表示歉意。同时,作者水平有限,而 SiC 光学反射镜超精密加工的新方法与新理论发展很快,很多新技术我们尚未涉及,一些新技术和研究进展不便录入,对此也深表遗憾。我们的 973 项目还在继续进行中,本书的内容只是一个阶段性成果的总结,相信今后还会有进一步的技术进步和突破,将在今后的著作中予以体现。

最后,还要特别感谢我们研究室的所有老师以及毕业和在读的研究生,正是他们辛勤的劳动才使本书内容形成了体系。

感谢 973 项目及项目团队中各个单位同行的大力支持,在他们的大力支持下本书才得以顺利出版。

作者

2013 年 3 月

目 录

《微纳制造的基础研究学术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 碳化硅反射镜的应用优势与制造过程中存在的难点	1
1.1.1 碳化硅反射镜的应用优势	1
1.1.2 碳化硅反射镜制造过程中存在的难点	2
1.2 碳化硅光学材料的研究与应用现状	3
1.2.1 碳化硅光学材料研究现状	3
1.2.2 碳化硅光学材料的应用现状	4
1.2.3 国内在碳化硅光学材料制备方面的研究进展	7
1.3 碳化硅光学材料超精密加工的基础理论	7
1.3.1 基于机械作用的相关基础理论	7
1.3.2 基于化学、机械效应联合作用的相关基础理论	14
1.3.3 基于原子间作用的相关基础理论	14
1.4 碳化硅反射镜的加工技术	15
1.4.1 传统研抛	15
1.4.2 超精密磨削	16
1.4.3 计算机控制确定性研抛	17
参考文献	19
第 2 章 碳化硅光学材料特性与力学行为研究	27
2.1 碳化硅光学材料的制备工艺与特性分析	27
2.1.1 碳化硅光学材料的制备工艺	27
2.1.2 碳化硅光学材料的机械特性	28
2.1.3 碳化硅光学材料的组分与显微结构分析	29
2.2 碳化硅光学材料的力学行为试验研究	31
2.2.1 CVD SiC 的印压试验与刻划试验研究	31
2.2.2 S SiC 的刻划试验研究	37
2.2.3 碳化硅复合光学材料的刻划试验研究	38
参考文献	41

第3章 碳化硅反射镜坯体的非球面磨削机理与工艺	42
3.1 碳化硅反射镜坯体非球面磨削的材料去除机理	42
3.1.1 非球面磨削方式	42
3.1.2 单颗磨粒最大磨削厚度计算	43
3.1.3 典型碳化硅坯体材料的磨削机理	47
3.2 碳化硅反射镜坯体材料磨削的亚表面损伤	49
3.2.1 碳化硅坯体材料磨削亚表面损伤的研究方法	49
3.2.2 典型磨削工艺参数下的亚表面裂纹深度	53
3.2.3 C/SiC 磨削表面残余应力研究	54
3.3 碳化硅反射镜坯体非球面磨削的精度控制	57
3.3.1 非球面磨削误差建模	58
3.3.2 面形误差传递函数	59
3.3.3 误差源辨识算法	60
3.3.4 碳化硅反射镜坯体非球面磨削误差补偿实例	60
3.4 大口径碳化硅反射镜坯体非球面磨削工艺	62
3.4.1 非球面磨削工艺路线的制订	62
3.4.2 加工结果	63
参考文献	63
第4章 碳化硅光学材料研磨去除机理与工艺	65
4.1 碳化硅光学材料研磨加工的基础理论	65
4.1.1 研磨过程中单颗磨粒的载荷计算	66
4.1.2 研磨效率模型	70
4.1.3 研磨亚表面裂纹深度模型	70
4.2 碳化硅光学材料研磨加工的材料去除机理	71
4.2.1 研磨条件下单颗磨粒受力分析	71
4.2.2 典型碳化硅光学材料的研磨机理分析	72
4.3 碳化硅光学材料研磨加工的亚表面裂纹研究	76
4.3.1 研究方法	76
4.3.2 碳化硅光学材料的研磨亚表面裂纹构型	77
4.3.3 工艺参数对于 CVD SiC 亚表面裂纹深度的影响规律	79
4.4 碳化硅光学材料研磨加工的去除率与表面粗糙度研究	81
4.4.1 工艺参数对于材料去除率的理论分析	81
4.4.2 工艺参数对于材料去除率与表面粗糙度的试验研究	83
4.5 碳化硅光学材料研磨加工的工艺参数选择	88

参考文献	89
第 5 章 碳化硅光学材料传统抛光机理与工艺	90
5.1 碳化硅光学材料传统抛光的基础理论	90
5.1.1 均质碳化硅光学材料传统抛光的理论分析	91
5.1.2 多组分碳化硅光学材料传统抛光高差平衡机制分析	99
5.2 CVD SiC 光学材料的超光滑抛光	100
5.2.1 超光滑抛光表面形貌衍变及材料去除机理	100
5.2.2 超光滑抛光表面粗糙度影响因素研究	101
5.2.3 CVD SiC 超光滑抛光实例	106
5.3 S SiC 光学材料的超光滑抛光	107
5.3.1 S SiC 抛光表面形貌衍变与材料去除机理	107
5.3.2 超光滑抛光表面粗糙度的影响因素研究	108
5.3.3 S SiC 超光滑抛光实例	111
5.4 碳化硅复合光学材料的超光滑抛光	111
5.4.1 RB SiC 超光滑抛光表面形貌分析及粗糙度变化规律	112
5.4.2 Si/SiC 两相涂层超光滑抛光表面形貌分析及粗糙度变化规律	115
5.4.3 RB SiC 与 Si/SiC 两相涂层抛光过程中的局部磨损	118
5.5 碳化硅光学材料传统抛光效率研究	122
5.5.1 工艺参数对于 CVD SiC 抛光材料去除率的影响	122
5.5.2 其他碳化硅光学材料的去除率研究	125
5.5.3 基于表面粗糙度与抛光效率的工艺参数选择方法	126
参考文献	127
第 6 章 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光机理与工艺研究	128
6.1 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光机理研究	128
6.1.1 芬顿反应理论概述	128
6.1.2 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光机理研究	130
6.2 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光材料去除机理分析	135
6.2.1 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光去除机理	135
6.2.2 碳化硅光学材料芬顿辅助抛光材料去除率仿真	136
6.3 芬顿辅助抛光液配制工艺研究	138
6.3.1 芬顿辅助抛光液配制方法	138
6.3.2 芬顿辅助抛光去除函数稳定性	139
6.4 碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光基本工艺特性研究	141
6.4.1 田口实验方法设计	141

6.4.2	工艺参数对去除率的影响	142
6.4.3	工艺参数对表面质量的影响	143
6.4.4	碳化硅光学材料芬顿辅助抛光工艺特性对比研究	145
6.5	碳化硅光学材料的芬顿辅助抛光加工工艺流程及实例	148
6.5.1	碳化硅光学材料芬顿辅助抛光加工工艺流程	149
6.5.2	碳化硅光学材料芬顿辅助抛光加工实例	150
	参考文献	152
第7章	碳化硅光学材料的可控柔体加工特性研究	154
7.1	碳化硅光学材料的磁流变抛光特性研究	154
7.1.1	磁流变抛光机理	154
7.1.2	碳化硅光学材料的磁流变抛光适应性研究	156
7.1.3	碳化硅光学材料磁流变抛光的影响因素分析	159
7.2	碳化硅光学材料的离子束加工	162
7.2.1	离子束加工材料去除机理概述	162
7.2.2	碳化硅光学材料离子束加工适应性研究	162
7.2.3	CVD SiC 离子束加工的效率研究	170
	参考文献	170
第8章	碳化硅反射镜超精密加工工艺路线与应用实例	172
8.1	典型碳化硅反射镜加工工艺路线的制订与优化	172
8.1.1	典型碳化硅反射镜的加工工艺路线	172
8.1.2	碳化硅反射镜的加工工艺路线优化	175
8.2	碳化硅反射镜加工实例	177
8.2.1	口径 180mm f/1.6 CVD SiC 抛物面镜的加工	177
8.2.2	口径 202mm×10mm S SiC 平面反射镜的加工	180
8.2.3	口径 93mm S SiC 超薄镜的加工	182
8.2.4	碳化硅复合光学材料的加工	184
	参考文献	185

第 1 章 绪 论

1.1 碳化硅反射镜的应用优势 与制造过程中存在的难点

1.1.1 碳化硅反射镜的应用优势

空间天文光学、卫星遥感技术、大型地基光学系统的迅猛发展,对光学系统的工作波段、成像分辨率、热稳定性、系统质量等指标提出了越来越严格的要求,这决定了光学系统必然往反射式、大口径、轻量化方向发展^[1~6]。在其他条件一致的情况下,选择合适的反射镜材料对满足这些指标具有重要意义。考虑到空间光学系统的制造、发射、运行成本、工作环境,空间用反射镜材料的选择必须考虑以下几个方面:

(1) 各向同性,尺寸稳定。

(2) 镜体材料可以抛光,并能镀高反射率膜层。良好的可抛光性则是反射镜材料的基本要求,尤其是用于可见光侦查时,可抛光性是决定反射镜性能的重要指标。

(3) 抗辐射,在空间辐射条件下反射镜面形保持不变。在空间工作环境下镜体会不断受到宇宙高能射线的辐射,辐射后反射镜应在形状和物理性质方面保持稳定;一般来说,原子系数低的材料辐射稳定性较好^[6]。

(4) 选择比刚度大和热变形系数小的材料。比刚度大,则反射镜的径厚比可以增大,从而能够减少镜体以及框架的质量,此外,比刚度越大则轻量化率越高,从而能有效降低镜面的温度梯度,保证面形精度的稳定性^[7];热变形系数小,则能有效降低对于热控系统的要求,减少热控系统的质量与功耗。

图 1.1 对典型反射镜材料的比刚度与热稳定性进行了比较^[8],从图中可以看出:就比刚度而言,Be 和 SiC 远优于其他材料;而 SiC 材料的热稳定性又远优于 Be。Be 加工时有毒,为防止在加工过程中其毒性给人体健康带来影响,需要采取一系列的防护措施,这就增加了制造成本;另外,Be 反射镜^[6]的加工处理面积较大,尽管新近开发的近净成形(near net shape, NNS)热等静压(hot isostatic pressing, HIP)制造工艺和新型 Be 合金的出现大大降低了制造成本,但目前仍比 SiC 高出数倍。综

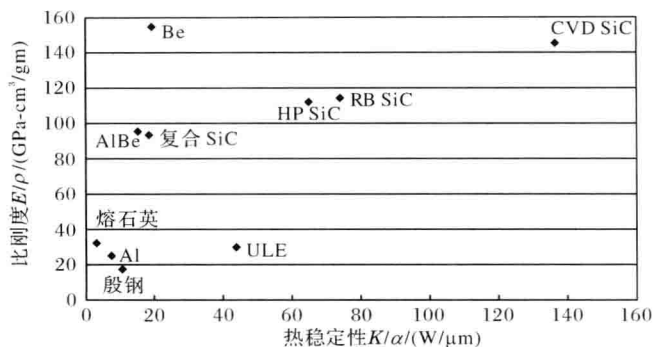


图 1.1 典型反射镜材料的比刚度与热稳定性比较

上所述, SiC 材料是制作空间反射镜、大型地基反射镜的最佳材料。

1.1.2 碳化硅反射镜制造过程中存在的难点

空间光学系统与大型地基光学系统中往往需要大型、异形、轻质非球面镜^[9~17], 传统的手工研抛方法难以同时保证加工效率、精度与表面质量^[5,6], 因此必须采用确定性研抛(deterministic lapping and polishing)工艺才能满足这类反射镜的加工要求。经过国内外众多单位和学者数十年的努力, 目前确定性研抛工艺中的一些关键问题, 如获取高效稳定的去除函数、驻留时间求解算法、面形误差的定量检测, 已经基本得到解决, 并有一大批确定性研抛机床问世, 展示了良好的应用前景^[14,15,18~22]。然而, 具体到碳化硅反射镜, 其加工依然存在着如下难点:

(1) 碳化硅光学材料种类多样, 不同碳化硅材料之间的加工机理与特性存在很大差别, 因此针对不同材料的碳化硅反射镜需要开发不同的工艺路线。

(2) 碳化硅光学材料中以 SiC 相为主要组分, 其硬度高, 加工效率低, 尤其是在抛光阶段, 由于不存在水解作用, 其加工效率往往低于玻璃的 1/10。

(3) 大多数碳化硅光学材料存在着多种组分, 这种显微结构特性使碳化硅光学材料(除 CVD SiC 外)难以实现亚纳米级超光滑表面。因此, 深入研究碳化硅光学材料在抛光过程中的材料去除机理、影响因素, 对拓展其应用范围具有重要意义。

(4) 工艺衔接与优化。碳化硅反射镜的加工往往是一个材料制备与加工工艺相互穿插、相互迭代的过程^[5,12], 如何规划各阶段(包括材料制备与加工阶段)的工艺要求, 以保证反射镜的最终面形精度和表面质量, 都是值得深入研究的课题。例如, 如何根据亚表面损伤来合理规划加工余量? 如何根据反射镜的技术指标, 结合各种加工方法的特点来优化工艺路线? 这些工作的深入研究, 将为碳化硅反射镜的高效、高精度、超光滑加工提供有益参考。

目前,国内对于碳化硅反射镜的制造还处于边研究边加工的阶段,其材料制备工艺与反射镜加工工艺均未完全成熟。作为光学加工人员,必须结合碳化硅光学材料的显微结构与力学特性,深入研究碳化硅反射镜在各加工阶段的材料去除机理、材料去除率以及表面/亚表面质量,从而为碳化硅反射镜各工艺阶段的参数选择提供理论与试验依据,并综合利用传统工艺和各种先进制造方法的工艺优点,制订出碳化硅反射镜的高精密、超光滑加工工艺路线,为实现碳化硅反射镜的大规模应用作出贡献。

1.2 碳化硅光学材料的研究与应用现状

1.2.1 碳化硅光学材料研究现状

碳化硅是典型的共价晶体^[23],常见的碳化硅有两种晶型: α -SiC 和 β -SiC,前者属于六方结构,后者属于面心立方结构^[5]。碳化硅作为光学材料的研究始于 20 世纪 70 年代,它既可作为反射镜镜体材料,也可制备反射镜支撑结构,并且可以进行轻量化结构设计。表 1.1 对目前常用的 6 种碳化硅光学材料的优缺点进行了综合比较。从比较结果来看,单一碳化硅及其复合材料很难同时满足高分辨率遥感系统对反射镜轻量化结构与表面质量的要求。因此,碳化硅反射镜通常采用“坯体+光学镜面”的双层结构形式,坯体的作用是支撑和定位镜面,使镜面具有稳定的面形精度,主要考虑材料的力学性能、热学性能、与镜面涂层材料的热匹配性能、轻量化结构;镜面的作用是保证某一波段电磁波的反射,常以镀膜或涂层的形式出现,主要考虑材料的光学性能,同时还要兼顾与坯体热性能的匹配。双层结构的设计,使反射镜制备在材料和工艺的选择上具有更大的自由度,从而为提高综合性能指标、缩短研制周期、降低成本提供了更为广泛的实现途径^[24,25]。

表 1.1 6 种典型碳化硅光学材料的性能比较

碳化硅材料种类	优点	缺点
化学气相沉积碳化硅 (CVD SiC)	具有优异的机械特性与热特性, 可抛光性好	成本高,速度慢, 尺寸有限,难加工
化学气相复合碳化硅 (CVC SiC)	具有优异的机械特性与热特性, 可抛光性好,沉积速度较高	成本高,尺寸有限, 难加工
无压烧结碳化硅 (S SiC)	具有良好的机械特性, 可制备大尺寸零件	后续加工周期长, 可抛光性一般
反应烧结碳化硅 (RB SiC)	工艺周期短,可制备大尺寸零件, 可实现复杂产品的近净成型	可抛光性一般

续表

碳化硅材料种类	优点	缺点
C/SiC 复合材料 (C/SiC)	密度小,比刚度高,近净尺寸成型, 快速低成本加工,可制备大尺寸零件, 具有优异的轻量化设计能力	可抛光性差
Si/SiC 两相涂层 (Si/SiC)	成本低,厚度大, 与 C/SiC 坯体匹配性很好	可抛光性一般

当然,双层结构设计使得碳化硅反射镜的制备与加工工艺相互穿插,降低了碳化硅反射镜的制造效率。为了改善这一情况,一些国家和地区着手开发新兴的碳化硅材料,使其兼具制备效率高和加工工艺好的优点。例如,日本东芝公司^[12,26]最近开发出一种新型反应烧结碳化硅(new-technology silicon carbide, NT-SiC),其抗弯强度可以达到其他反应烧结碳化硅或烧结碳化硅材料的 2 倍。采用传统方法对其进行加工,表面粗糙度 RMS(均方根)值可达 1nm 以下,有望直接用于红外和可见光领域。

1.2.2 碳化硅光学材料的应用现状

碳化硅反射镜主要应用于低温反射镜、对地观测、大型地面光学系统以及激光反射镜,下面分别予以介绍。

1. 在低温反射镜中的应用

在宇宙学与天体物理学的研究当中,往往需要测量或记录红外射线,这就必须使反射镜本身的射线达到最低程度。将光学仪器和探测器冷却到很低的温度可以实现这个目的,这使低温反射镜的研制和生产成了一个应用方向。制造低温反射镜的主要困难是,在常温下加工的光学表面,在低温工作环境下会发生热变形。若选用 SiC 作为低温反射镜材料,由于其高比刚度、高热稳定性以及良好的光学性能,光学系统具有最大的尺寸、温度稳定性以及最小的散射率。图 1.2 给出了低温反射镜系统 Astro-F^[10] 的一块实验镜(口径 160mm)的面形误差测试结果,当环境温度从 290K 降低到 6K 时,反射镜面形精度 RMS 值从 0.051λ ($\lambda = 632.8\text{nm}$, 波长)变化到 0.055λ ,变化率小于 10%。

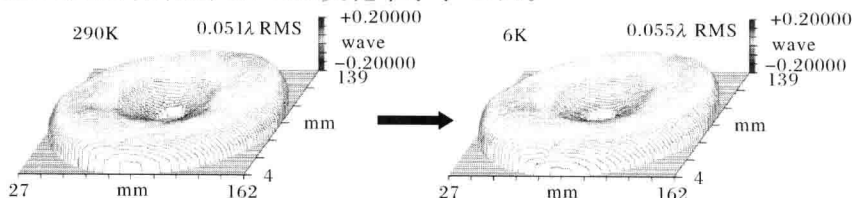


图 1.2 环境温度变化条件下 160mm 实验镜的面形误差测试结果