

# CVD - SiC反射镜制备过程中热应力变形的研究

陈道勇<sup>1</sup> 张剑寒<sup>2</sup> 张宇民<sup>3</sup>

(1 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

(2 清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室,北京 100084)

(3 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所,哈尔滨 150001)

**文 摘** 采用 CVD工艺在反应烧结碳化硅(RB - SiC)反射镜坯体上沉积了一层致密的碳化硅薄膜作为反射镜镜面。CVD - SiC和 RB - SiC热物理性能上的差异引起的热残余应力和热变形,在很大程度上影响反射镜的质量,本文采用有限单元法计算了沉积过程中反射镜的温度场、应力场和热变形,采用 X射线衍射方法测试了薄膜表面的残余应力。分析结果表明,薄膜存在较大的残余应力,包括热应力和本征应力,两者量值相当,热变形很小。

**关键词** 碳化硅,反射镜,有限元,热应力,热变形

## Thermal Stress and Displacement in Process of Producing CVD - SiC Mirror

Chen Daoyong<sup>1</sup> Zhang Jianhan<sup>2</sup> Zhang Yumin<sup>3</sup>

(1 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(2 Department of Mechanical Engineering, Key Lab of Advanced Materials Processing Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084)

(3 Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract** The compact SiC film was deposited on the reaction bonded silicon carbon (RB - SiC) mirror by chemical vapor deposition (CVD) process. Because of the difference of the thermo-physical properties between CVD - SiC and RB - SiC, thermal residual stress and thermal displacement appeared. This would affect the quality of the mirror to a large extent. In this paper, temperature field, stress field and thermal displacement of the mirror were analyzed by finite element method in the course of deposition process. The residual stress of the CVD - SiC film surface was tested by X-ray diffraction method. Results show there is a larger residual stress in the film. Residual stress is comprised of thermal stress and essential stress, and their magnitude is equivalent. Thermal displacement of mirror surface is small.

**Key words** SiC, Mirror, Finite element, Thermal stress, Thermal displacement

### 1 引言

SiC具有优异热性能和力学性能,比如热导率高、热稳定性好、比模量大等<sup>[1]</sup>。反应烧结工艺制造 SiC材料具有低成本、能够制造大尺寸复杂形状零件等优点,但是反应烧结 SiC材料(RB - SiC)存在 Si/SiC两相组织,在磨削加工中,高硬度的 SiC很难被磨掉,而较低硬度的硅则很容易被磨掉,导致这种材料很难被加工到很高的表面精度;而采用 CVD工艺制备的 SiC是完全的单相组织,致密均匀,面形精度非

常高,本文采用 RB - SiC制备反射镜的坯体,在坯体表面采用 CVD工艺生成一层致密的 SiC薄膜作为镜面,然后通过后续的机械加工手段制备出满足光学要求的反射镜。因为 RB - SiC和 CVD - SiC的热物理性能存在着一定的差异,导致制备的 SiC反射镜镜面存有残余热应力和热变形,这直接影响到后续的机加工工艺和成品反射镜的质量,因此分析 CVD过程中产生的热应力和热变形十分重要<sup>[2]</sup>。本文通过有限元方法,分析了 CVD过程中温度场、热应力场和热变

收稿日期:2008 - 12 - 26

作者简介:陈道勇,1977年出生,硕士,主要从事于难熔合金抗氧化涂层等方面的研究工作, E-mail: cdy1977614@sina.com

http://www.yhclgy.com 宇航材料工艺 2009年 第6期

— 51 —

形,并采用 X射线衍射方法测试了 CVD - SiC薄膜表面的残余应力,通过对比考察计算结果和测试结果的可靠性。

## 2 SiC反射镜样品制备及计算模型

RB - SiC反射镜坯体的制备工艺如下:首先通过颗粒级配的方法精选出一组两种不同粒径的 SiC粉末,加入酚醛树脂、稀释剂和固化剂,混料后浇注入模具,干燥,开模;再将坯料和一定量的 Si粉放置入真空烧结炉中,通过一定的温度烧结,同时 Si粉末熔化渗入零件中和碳发生反应生成完全致密的 SiC反射镜坯体。SiC薄膜的制备工艺是采用 CVD,成膜物质为三氯甲基硅烷 ( $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$ ),采用  $\text{H}_2$ 作为催化剂。化学反应方程式为:



沉积温度为 1 573 K,然后随炉冷却,冷却过程中的温度是可控的,冷却温度曲线如图 1所示。

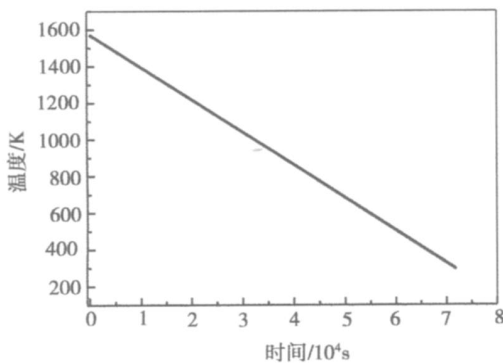


图 1 SiC反射镜气相沉积冷却温度曲线

Fig 1 Temperature curve of cooling process for CVD - SiC mirror

图 2是 SiC反射镜的示意图。反射镜直径为 250 mm,厚度为 30 mm,正面为圆形平面面板,背面是六角形蜂窝状加强筋结构。坯体材料为 RB - SiC,镜面材料为一层厚度为 0.02 mm的 CVD - SiC薄膜。RB - SiC和 CVD - SiC材料相应计算参数为弹性模量、泊松比、线胀系数和热导率<sup>[3]</sup>。采用四节点四面体单元,单元总数为 29 317个,节点 52 403个,有限元模型如图 3所示。考虑到沉积温度为 1 573 K,此时沉积炉内温度场均匀,反射镜无内应力,因此设定在 1 573 K作为参考温度;在冷却过程中控制炉内温度保持均匀下降,因此计算的边界条件是反射镜所有外表面均按照图 1所示温度曲线均匀下降;在沉积过程中,反射镜镜体背面为放置面,正面是沉积面,因此设定放置面在 z方向上的自由度为 0,而 x、y两个方向可以自由移动。由于材料的计算参数随温度变化,并且热应力场也是随温度变化而变化的,因此采用非线性

分析,最后计算获得冷却过程中反射镜内部的温度场、应力场和热变形。

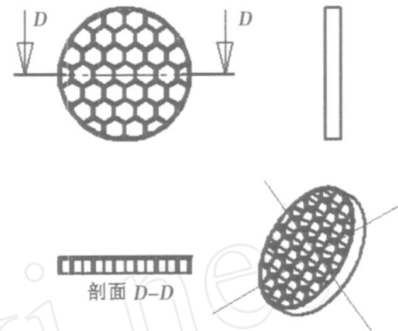


图 2 SiC反射镜示意图

Fig 2 Schedule drawing of SiC mirror

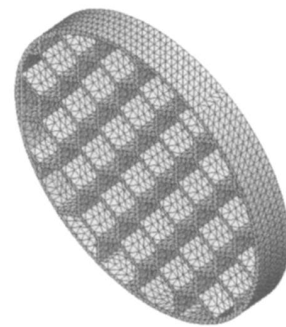
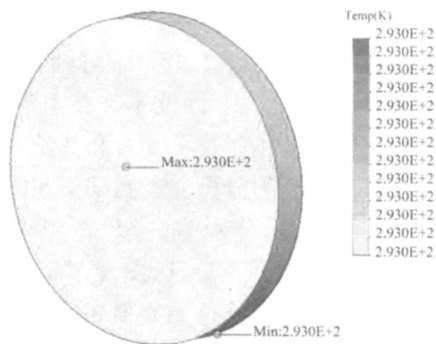


图 3 SiC反射镜有限元模型

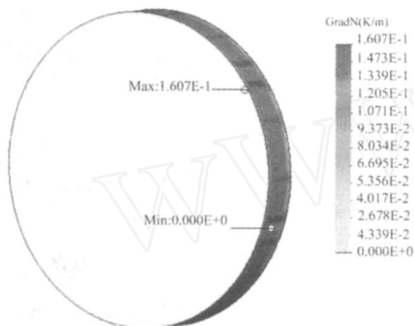
Fig 3 Finite element model of SiC mirror

## 3 结果与讨论

根据图 1的工艺曲线,反射镜冷却达到室温后, SiC反射镜的温度场如图 4所示。可见,由于 SiC具有良好的热导率,并且冷却速率较低,因此在室温下反射镜的温度场非常均匀,温度梯度小。室温状态下的应力场如图 5所示。图 5中示出了 VonMises应力、x轴方向应力、y轴方向应力以及反射镜沿着直径方向剖开后的局部应力分布。可以发现, SiC薄膜整体上应力都比较大,越接近于表面应力越大,越接近于基体应力越小,最大应力为 224.7 MPa,位于薄膜表面;RB - SiC反射镜坯体大部分的应力较低,但是和薄膜相结合的部分应力很大,在 100 MPa左右,随着和薄膜距离的增加应力逐渐减小,距离薄膜超过 2 ~ 3 mm以后,应力迅速下降到 1 MPa以下,反射镜坯体的剩余部分应力分布均匀而且数值很小。而从薄膜的角度看,薄膜内部热应力差别不大,均在 100 MPa以上。反射镜最大计算应力为 224.7 MPa,这虽然明显小于 SiC的抗压强度,但是接近于 RB - SiC的弯曲强度。



(a) 温度分布

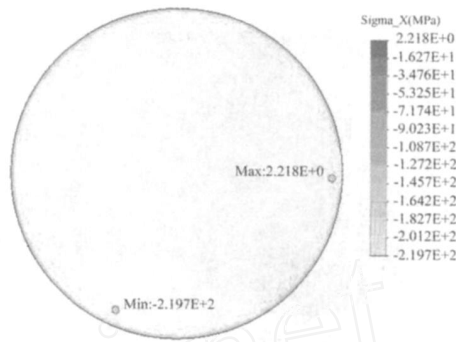


(b) 温度梯度分布

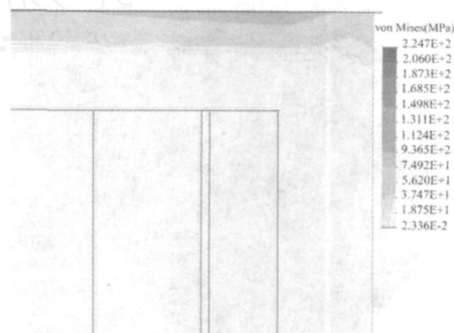
图 4 SiC反射镜室温下温度场

Fig 4 Temperature distribution of

SiC mirror at room temperature



(c) y轴方向

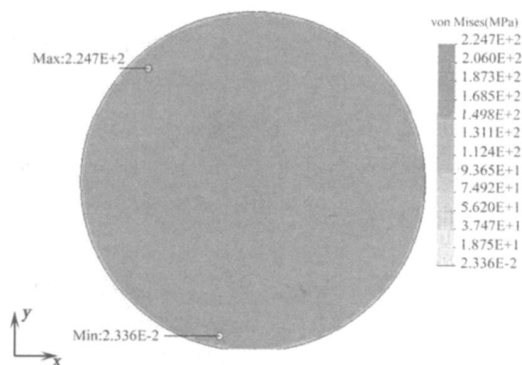


(d) 局部分布

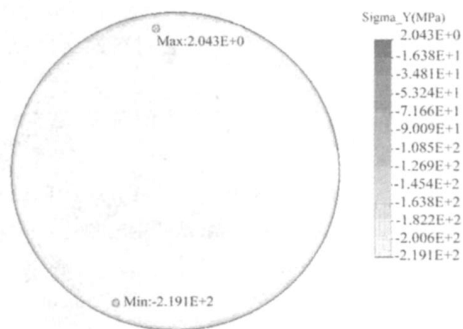
图 5 SiC反射镜室温下应力场

Fig 5 Residual stress distribution of

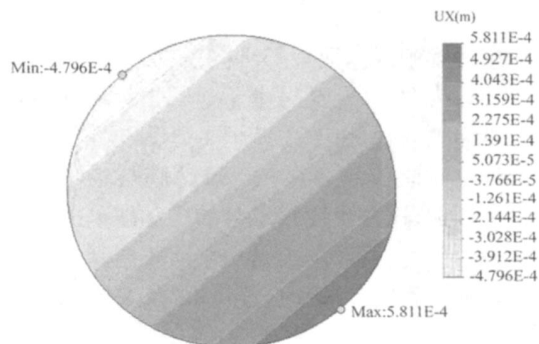
SiC mirror at room temperature



(a) Von-Mises应力

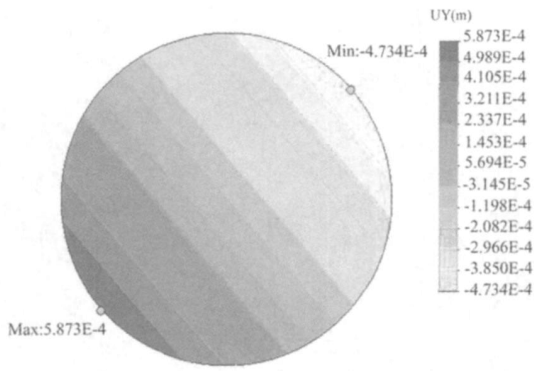


(b) x轴方向

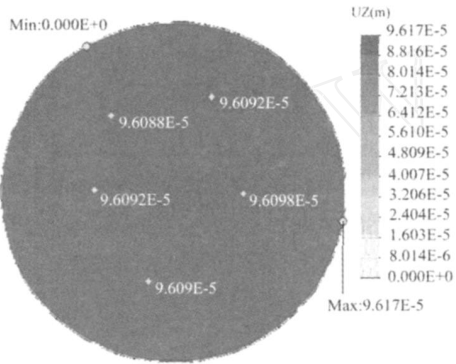


(a) x轴方向变形

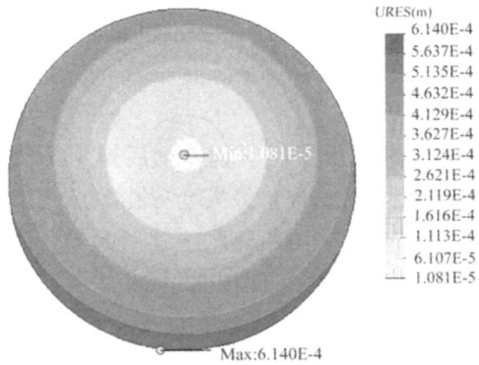
图 6分别列出了反射镜冷却后  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向和整体的变形。可以看出,最大变形在零点几毫米范围内,并且是整体均匀的由热胀冷缩引起的变形。而最重要的是反射镜镜面平面扭曲很小,如图 6(c)所示,在反射镜镜面上五个点  $z$ 轴方向变形分别为  $9.6092 \times 10^{-5}$ 、 $9.6088 \times 10^{-5}$ 、 $9.6092 \times 10^{-5}$ 、 $9.6098 \times 10^{-5}$ 、 $9.609 \times 10^{-5}$  m,而反射镜镜面平面的 PV 值为  $1.8 \times 10^{-7}$  m,这说明反射镜镜面平面基本上是整体移动,平面的扭曲很小。因此可以很容易通过后期的机械加工来修正这种变形同时不会破坏反射镜薄膜。



(b) y轴方向变形



(c) z轴方向变形



(d) 整体变形

图 6 CVD - SiC反射镜室温状态下的热变形

Fig 6 Thermal displacement of CVD - SiC mirror at room temperature

考察薄膜中残余应力的来源可以发现,薄膜残余应力主要分为两类,一类是由于薄膜生长过程中某种结构的不完整或者缺陷(如杂质、空位、位错、层错和晶粒边界等)、表面能的存在以及薄膜与基体界面间的晶格不匹配,这种由薄膜本身结构和缺陷所引起的应力称为本征应力;另一类是由于薄膜与基体材料之间线胀系数的不同,成膜时环境的温度又不同于测量

应力时的环境温度,由此而产生薄膜热应变而导致的应力称之为热应力,另外成膜过程中基体温度的不均匀分布也会导致热应力<sup>[4]</sup>。因此本文在室温下测量得到反射镜的残余应力为本征应力和热应力之和。文献[5]采用x射线衍射分析方法测试了SiC反射镜镜面的平面残余应力,分别为-359、-437、-864 MPa。通过和计算结果对比,可以发现薄膜表面应力为压应力,测试结果与计算结果差值较大,前者大于后者,这是因为残余应力中除了热应力之外,还有本征应力。差值表明,本征应力和热应力的大小在同一数量级上,降低成膜温度以减小热应力、改善沉积工艺以减小本征应力同等重要,都是减小反射镜残余应力的有效手段。

#### 4 结论

采用有限单元法计算了SiC反射镜在CVD过程中的温度场、热应力场和热变形。结果表明,由于SiC材料具有优异的热物理性能,因此在冷却过程中,SiC反射镜整体温度分布均匀,温度梯度很小。在室温状态下,SiC反射镜的薄膜部分存在均匀的、100 MPa以上的残余应力;反射镜坯体和薄膜相结合的部分存在100 MPa左右热应力,而坯体的其他部分应力均小于1 MPa。坯体的应力分布规律是随着和薄膜的距离的增大,热应力迅速下降。反射镜整体结构的热应力随着温度的下降而增大。通过X射线衍射方法测试了薄膜表面残余应力,测试结果大于计算结果,原因是残余应力除了包含热应力以外,还包含本征应力,本征应力在数量级上与热应力相当。SiC反射镜的热变形小,可以通过后续的磨削加工消除这种变形,同时不会破坏反射镜镜面的薄膜。

#### 参考文献

- 1 韩杰才,张宇民,赫晓东.大尺寸轻型SiC光学反射镜研究进展.宇航学报,2001;22(6):124~132
- 2 Goela Jitendra S,Desai Hemant D, Taylor Raymond L et al Thermal stability of CVD - SiC lightweight optics SPIE,1995;2543:38~48
- 3 姚旺.Si/SiC光学反射镜复合材料性能研究.哈尔滨工业大学博士论文,2003
- 4 周志烽,范玉殿.薄膜热应力的研究.真空科学与技术.1996;9:347~348
- 5 Zhang Jianhan, Zhang Yumin, Han Jiecai He et al Study of CVD SiC thin film for space mirror SPIE,2006;6034:60340X

(编辑 任涛)