第37卷第5期　　河北科技大学学报　　Vol. 37, No. 5
2016年10月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　Oct. 2016

文章编号:1008-1542(2016)05-0431-10　　doi:10.7535/hbkd.2016yx05002

碳化硅零件氧化辅助抛光超精密加工的研究现状

沈新民，涂群章，张晓南，殷　勤，王　东

(解放军理工大学野战工程学院，江苏南京　210007)

摘　要:通过等离子体氧化、热氧化、电化学氧化在碳化硅基材上获得软质氧化层，利用软磨粒抛光实现氧化物的快速去除，有利于提高材料去除效率、提升加工表面质量。研究发现，通过等离子体氧化辅助抛光，表面粗糙度RMS和Ra分别达到0.626 nm和0.480 nm；通过热氧化辅助抛光，表面粗糙度RMS和Ra分别达到0.920 nm和0.726 nm；在电化学氧化中，基于Deal-Grove模型计算得到的氧化速度为5.3 nm/s，电化学氧化辅助抛光后的表面粗糙度RMS和Ra分别是4.428 nm和3.453 nm。氧化辅助抛光有助于烧结碳化硅加工工艺水平的提升，促进碳化硅零件在光学、陶瓷等领域的应用。

关键词:特种加工工艺；烧结碳化硅；氧化辅助抛光；表面粗糙度；材料去除效率

中图分类号:TH164；TB332　　**文献标志码:**A

Research status in ultra-precision machining of silicon carbide parts by oxidation-assisted polishing

SHEN Xinmin, TU Qunzhang, ZHANG Xiaonan, YIN Qin, WANG Dong

(College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: Oxidation-assisted polishing is an important machining method for obtaining SiC parts with high precision. Through plasma oxidation, thermal oxidation, and anodic oxidation, soft oxide can be obtained on the RS-SiC substrate. With the assistance of abrasive polishing to remove the oxide rapidly, the material removal rate can be increased and the surface quality can be improved. The research results indicate that the surface roughness root-mean-square (RMS) and roughness-average (Ra) can reach 0.626 nm and 0.480 nm by plasma oxidation-assisted polishing; in thermal oxidation-assisted polishing, the RMS and Ra can be 0.920 nm and 0.726 nm; in anodic oxidation, the calculated oxidation rate is 5.3 nm/s based on Deal-Grove model, and the RMS and Ra are 4.428 nm and 3.453 nm respectively in anodic oxidation-assisted polishing. The oxidation-assisted polishing can be propitious to improve the process level in machining RS-SiC, which would promote the application of SiC parts in optics and ceramics fields.

Keywords: non-traditional machining; RS-SiC; oxidation-assisted polishing; surface roughness; material removal rate

---

收稿日期:2015-12-10;修回日期:2016-01-22;责任编辑:陈书欣
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802903);国家自然科学基金(51505498);江苏省自然科学基金(BK20150714)
作者简介:沈新民(1985—),男,河南南阳人,讲师,博士,主要从事光学超精密加工与测量方面的研究。
E-mail:shenxmjfjlgdx2014@163.com

沈新民，涂群章，张晓南，等.碳化硅零件氧化辅助抛光超精密加工的研究现状[J].河北科技大学学报，2016，37(5):431-440.
SHEN Xinmin, TU Qunzhang, ZHANG Xiaonan, et al. Research status in ultra-precision machining of silicon carbide parts by oxidation-assisted polishing[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(5): 431-440.

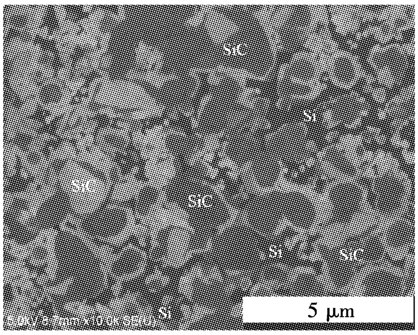
随着空间技术的不断发展，大口径、轻量化、高精度反射镜成为侦察监视系统、激光雷达系统、大型天文望远镜的关键部件，空间应用的特殊性对镜面材料提出了严格的要求。烧结碳化硅（RS-SiC）由于具有机械硬度高、化学稳定性强、尺寸稳定性好、表面质量高、比刚度大、热变形系数小、抗辐照性能好、成本低等优点，成为制作空间反射镜和大型地基反射镜的理想材料，目前以碳化硅为主体材料的镜面已经在美国、欧州各国、日本和中国的许多空间光学系统中得到应用[1-4]。随着碳化硅烧结工艺的不断改进和制造成本的不断下降，其应用从小批量专门化的镜面材料向大批量规模化的陶瓷部件扩展，轴承、阀片、内衬、喷嘴、轮机叶片、热偶套管等碳化硅零件已经应用于机械、冶金、石油、化工等工业部门[5-7]。

RS-SiC作为典型的难加工材料，首先是因为其材料硬度大，加工去除效率低[4]。表1是常见材料的莫氏硬度对比，可以发现RS-SiC的硬度次于金刚石，高于常用的抛光材料，因此其加工过程中材料去除效率低，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[8]。RS-SiC难加工还因为其构成组分多，导致加工表面质量差[4]。RS-SiC的制备工艺是在陶瓷先驱体中反应活性的碳与熔融硅反应生成新的碳化硅，新的碳化硅原位结合先驱体中原有的碳化硅颗粒，多余的硅填充其间的气孔，在1 500～1 600 ℃条件下最终形成100%致密的坯体。由烧结制备工艺可知，RS-SiC包含碳化硅和硅两相[9]，图1 a)和图1 b)分别是用扫描电子显微镜（SEM）观测到的表面形貌和透射电子显微镜（TEM）观测到的截面形貌。由于碳化硅相与硅相的性质存在差异，直接加工RS-SiC难以获得满足空间光学应用要求的高质量表面。

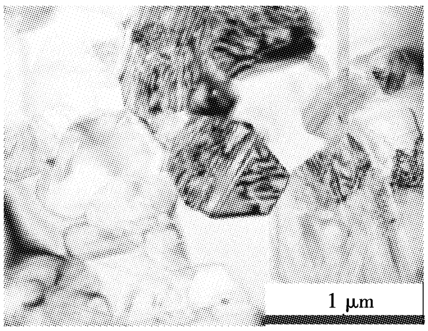
表1　常见材料的莫氏硬度对比

Tab.1　Comparison of the Mohs hardness of normal materials

材料	金刚石	RS-SiC	Al_2O_3	WC	SiO_2	Si	CaF_2
莫氏硬度	10	9	9	9	7	7	4



a) 表面形貌



b) 截面形貌

图1　基于SEM和TEM的烧结碳化硅组分分析

Fig.1　Composition analysis of RS-SiC based on SEM and TEM

随着对RS-SiC零件数量需求的增大和质量要求的提高，以氧化辅助抛光为代表的化学机械抛光技术成为研究领域的热点。根据氧化方法的不同，国内外学者先后开发了等离子体辅助抛光[10]、热氧化辅助抛光[11]、电化学辅助抛光[12-13]、催化剂辅助蚀刻[14]、紫外线辅助抛光[15]等加工技术。相对于传统的磁流变抛光[16]、单点金刚石车削[17]、在线电解修整磨削[18]、离子束加工[19]、等离子体化学气化加工[20]、反应等离子体技术[21]等碳化硅零件加工方法，氧化辅助抛光具有系统结构简单、效率易控可调、表面光滑平顺等优势，促进了碳化硅零件在光学、半导体、陶瓷等领域的应用[4]。

本研究针对RS-SiC的氧化辅助抛光过程，从RS-SiC的可氧化性和氧化层的可抛光性两方面验证了RS-SiC氧化辅助抛光的可行性，分析了RS-SiC氧化表面的形貌特征，研究了RS-SiC氧化辅助抛光的表面质量，并尝试通过第一性原理计算[22]和分子动力学模拟[23-25]对碳化硅零件氧化辅助抛光加工机理开展研究，利用人工神经网络智能算法[26]对关键工艺参数进行组合优化，拟解决RS-SiC氧化辅助抛光加工过程中的关键技术问题。

1　氧化辅助抛光技术

作为超精密加工技术的一个分支，氧化辅助抛光是在传统化学机械抛光技术的基础上发展而来，主要是针对超硬难加工材料，利用等离子体氧化[10]、热氧化[11]、电化学氧化[12-13]、催化剂辅助氧化[14]、紫外线照射氧化[15]等方法在材料表面获得软质氧化层，通过抛光氧化层的方式提高材料去除效率、改善零件表面质量。

1.1　原理

氧化辅助抛光加工超硬材料的机理是首先通过等离子体氧化、电化学氧化、热氧化或其他氧化方法，在材料表面获得硬度较低的氧化层，然后用与氧化层硬度差不多的磨料将氧化层抛光掉，由于抛光颗粒的硬度比基底材料低，抛光过程中不会对基底产生残余应力和亚表面损伤，而且氧化层去除后新露出的表面不影响原材料的物理、化学、热学、电学性质，是针对超硬材料开发的一种加工新技术[4]，加工过程如图 2 所示。

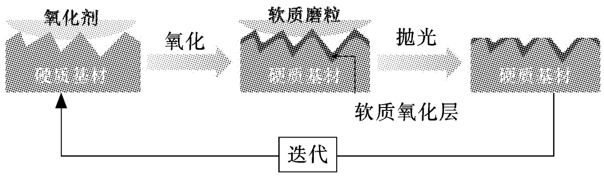


图 2　氧化辅助抛光硬质材料的加工过程示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the machining process of hard materials in oxidation-assisted polishing

1.2　适用性

从氧化辅助抛光技术的机理可以看出，该技术主要适用于可氧化且氧化层硬度低的材料，通过氧化有助于提高材料去除效率、提升表面质量，常见的适用对象如图 3 所示。目前，氧化辅助抛光技术研究日益成熟，部分加工技术已应用于碳化硅、金刚石、氮化镓、蓝宝石等超硬难加工材料的加工中[4,27]。

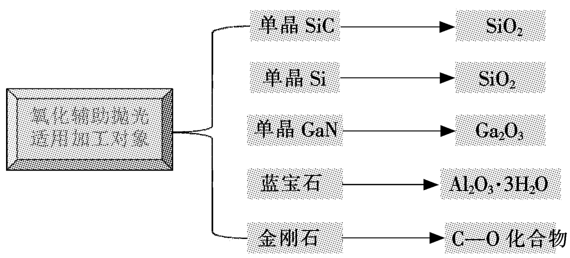
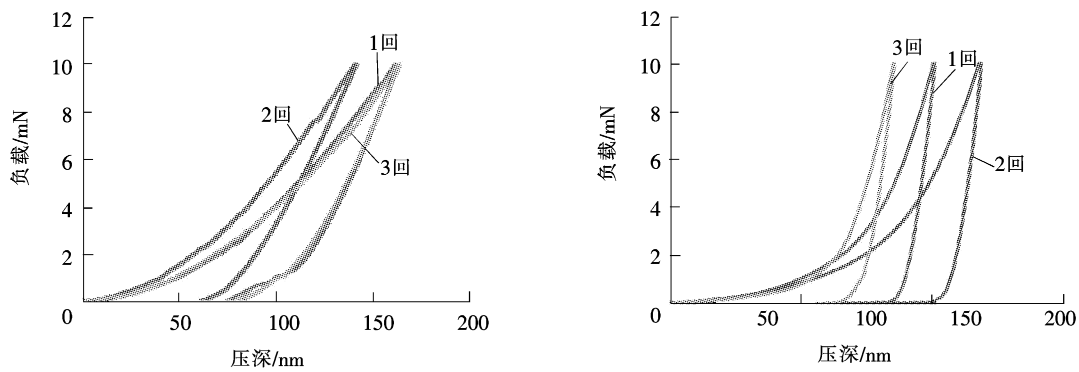


图 3　氧化辅助抛光技术的适用材料及其氧化物

Fig. 3　Suitable materials and their oxides in oxidation-assisted polishing technique

通过氧化辅助抛光机理分析和 RS-SiC 难加工原因分析可以看出，氧化辅助抛光技术特别适合 RS-SiC 的加工[4]。利用纳米压痕仪测得 RS-SiC 初始表面和电化学氧化表面的硬度对比如图 4 所示，计算得到氧化层的平均硬度为 2.9 GPa，这是 RS-SiC 表面硬度 26.46 GPa 的 1/9，软质氧化层有利于提高后续抛光过程中的去除效率。

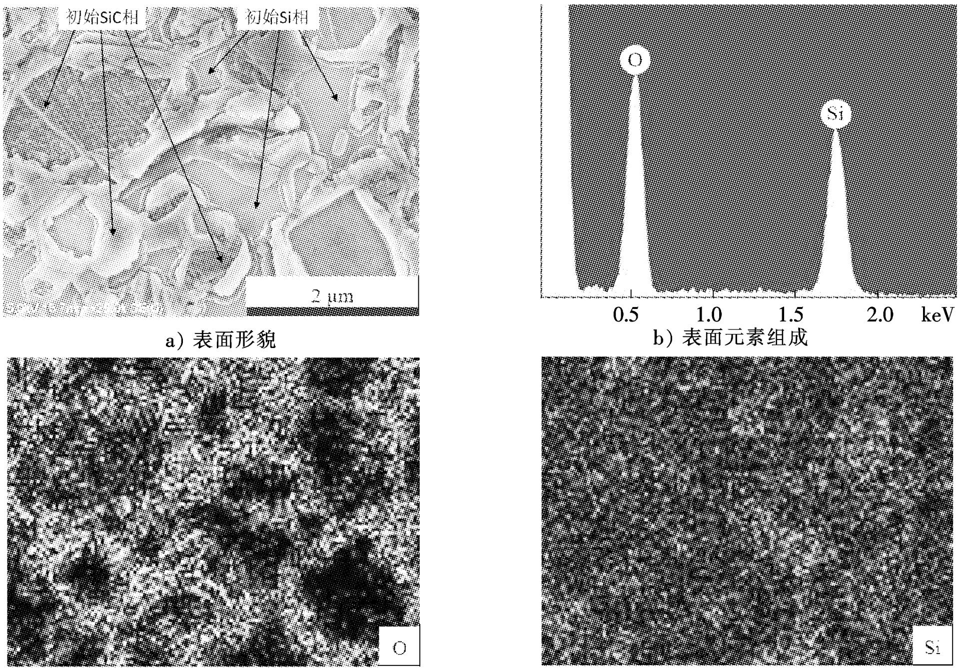


a) 初始表面　　　　b) 电化学氧化表面

图 4　基于纳米压痕仪的 RS-SiC 氧化前后表面硬度对比

Fig. 4　Comparison of surface hardness of RS-SiC before and after oxidation based on Nano-indenter

另一方面，从图 3 可以看出，碳化硅和硅的氧化物都是 SiO_2，说明通过氧化可以将 RS-SiC 中的碳化硅相和硅相统一为氧化物 SiO_2，表面成分趋于一致，有助于在后续抛光中获得高质量表面。扫描电子显微镜配合能量弥散 X 射线探测器（SEM-EDX）分析 RS-SiC 电化学氧化表面的结果如图 5 所示，从图 5 b)可以发现氧化后表面没有再发现 C 元素，说明 RS-SiC 表面已经完全被氧化。



a) 表面形貌　b) 表面元素组成

c) O 元素分布　d) Si 元素分布

图 5　烧结碳化硅电化学氧化表面的 SEM-EDX 分析结果

Fig. 5　Comparison of surface hardness of RS-SiC before and after oxidation based on Nano-indenter

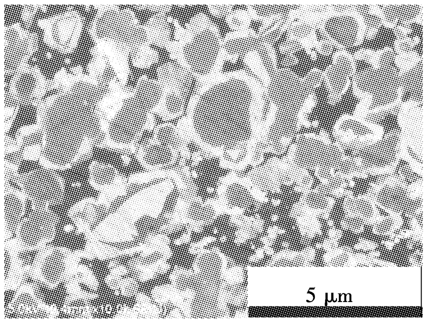
2　氧化层特性分析

2.1　氧化层表面形貌分析

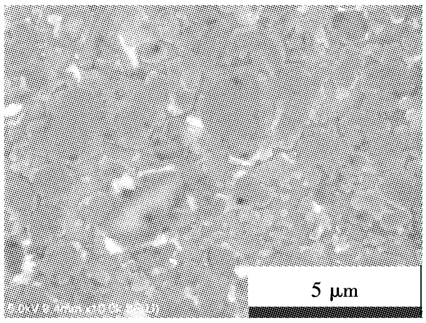
氧化层的表面形貌特征影响着抛光的效率和质量，这对于 RS-SiC 的氧化辅助抛光尤为重要，因为其中碳化硅颗粒和无定形硅两种成分的氧化速度和氧化特征不一样。RS-SiC 等离子体氧化前后、热氧化前后和电化学氧化前后的扫描电子显微镜对比测试结果如图 6 所示，实验结果表明[4]：等离子体氧化过程中，在氧化初始阶段硅相氧化速度比碳化硅相快，一段时间后两相氧化速度基本一致，最终形成的氧化深度相同，氧化过程中整个氧化表面都平坦光滑，氧化后表面粗糙度略有改善；热氧化过程中，硅相氧化速度始终比碳化硅相快，碳化硅相和硅相形成的氧化表面都平坦光滑但是有高度差，因此氧化表面形成台阶状结构，氧化后表面粗糙度变差；电化学氧化过程中，碳化硅相的氧化速度比硅相快，不同碳化硅颗粒的氧化速度不一样，单个碳化硅颗粒的边缘氧化速度比中间快，硅相的氧化速度均匀，不同晶相氧化速度的差异导致电化学氧化表面有裂痕和突起，使电化学氧化后表面粗糙度变差。在不同的氧化过程中 RS-SiC 氧化表面呈现不同的形貌特征，这是由于不同的氧化方法有不一样的氧化机理。目前基于扩散原理 Deal-Grove 模型[28]研究碳化硅零件氧化机理，只能从宏观层面上解释氧化过程，没有揭示氧化剂的微观作用机理，也不能掌握氧化反应的准确过程。本研究在定性分析氧化表面形貌的基础上，拟依据第一性原理计算和分子动力学模拟，构建由基材、氧化层、氧化物、生成物、氧化氛围组成的氧化模型，从微观层面研究氧化过程中氧化剂的作用机理，对 RS-SiC 在各种氧化方法中呈现不同的表面形貌和厚度分布进行分析，揭示氧化过程的本质，分析氧化物的物理化学特性。

2.2　氧化层抛光特性研究

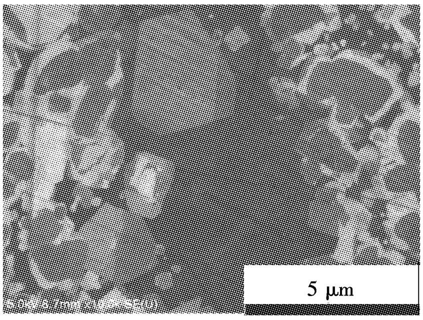
氧化层的抛光过程是实现材料去除的重要步骤，RS-SiC 等离子体氧化表面、热氧化表面、电化学氧化表面的抛光表面质量随时间的变化规律如图 7 所示，实验结果表明[4,27]：等离子体氧化表面的抛光过程可以分为加工氧化层、抛光 RS-SiC 2 个阶段，在抛光 40 min 时表面粗糙度达到最优，RMS 和 Ra 分别达到 0.626 nm 和 0.480 nm；去除量控制在氧化层以内时都可以得到 1 nm 以下的表面粗糙度；热氧化表面的抛光过程可以分为去除台阶层、去除硅相形成氧化物、抛光 RS-SiC 3 个阶段，抛光 60 min 时表面粗糙度达到最优，RMS 和 Ra 分别为 0.920 nm 和 0.726 nm，获得高精度表面需要精确地控制加工深度；电化学氧化表面的



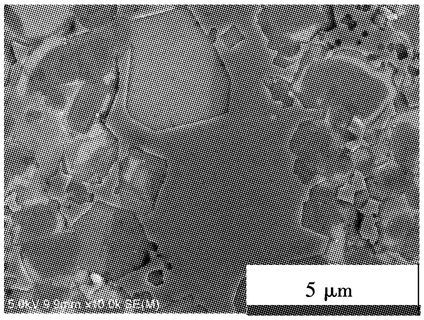
a) 等离子体氧化前



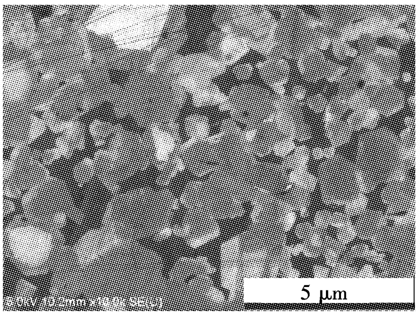
b) 等离子体氧化后



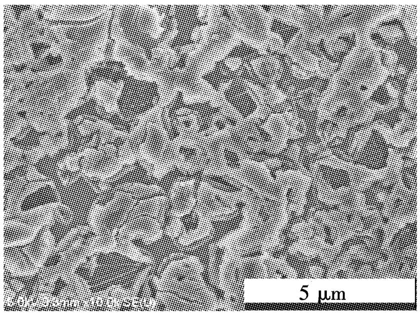
c) 热氧化前



d) 热氧化后



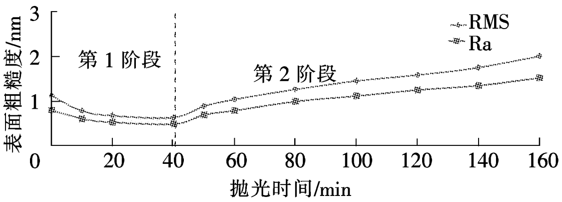
e) 电化学氧化前



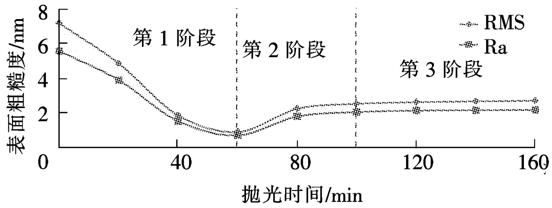
f) 电化学氧化后

图 6　基于 SEM 的 RS-SiC 氧化前后的表面形貌对比

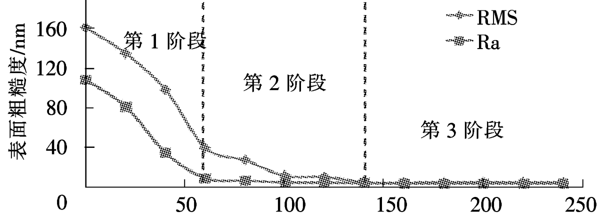
Fig. 6　Comparison of surface morphologies of RS-SiC before and after oxidation based on SEM



a) 等离子体氧化表面的抛光过程



b) 热氧化表面的抛光过程



c) 电化学氧化表面的抛光过程

图 7　RS-SiC 表面质量随氧化层抛光时间增加的演变

Fig. 7　Evolvement of RS-SiC surface quality along with the increasing of time in polishing of oxide layer

抛光过程可以分为去除突起、去除裂纹、过抛光 3 个阶段，能够获得的表面粗糙度 RMS 在 4～5 nm 之间，在氧化层完全去除后继续加工对表面质量影响不大，由于电化学氧化 RS-SiC 总是会在表面产生突起和裂痕，抛光难以获得超光滑表面。目前针对氧化层抛光机理的研究都是将碳化硅的氧化物看作是二氧化硅，将氧化层的抛光过程等同于二氧化硅的抛光过程，并且认为加工过程中主要是磨粒的机械剪切力使材料被去除。但是氧化物与二氧化硅在硬度、化学稳定性等方面还不尽相同，而且常用磨浆氧化铈抛光二氧化硅的材料去除过程中不仅有机械切削作用，还有氧化铈与二氧化硅间的化学复合作用。本研究在现有实验结果的基础上，拟建立由基材、氧化层、抛光磨粒、抛光氛围组成的抛光模型，从微观层面研究氧化层的抛光机理，分析氧化铈磨料抛光二氧化硅薄膜过程中的摩擦化学固相反应，揭示碳化硅零件氧化辅助抛光获得超光滑无损伤表面的原因。

3 工艺参数优化

氧化辅助抛光过程中影响加工效果的工艺参数多，对材料去除效率和表面质量的影响也不是线性的，如何构建合适的工艺参数优化模型是提高碳化硅零件超精密加工工艺水平的难题。本研究在现有定性分析和半定量分析的基础上，拟通过建立基于人工神经网络的优化模型[26]来提高工艺参数优化的效率，氧化辅助抛光工艺参数优化的人工神经网络算法流程如图 8 所示。优化模型将以抛光参数和氧化参数为分析对象，以材料去除效率和表面质量为优化目标，以现有氧化辅助抛光实验数据通过删选、变换处理、特征参数提取构造为网络的样本集，通过对模型的训练和实验验证，提高模型的准确度。

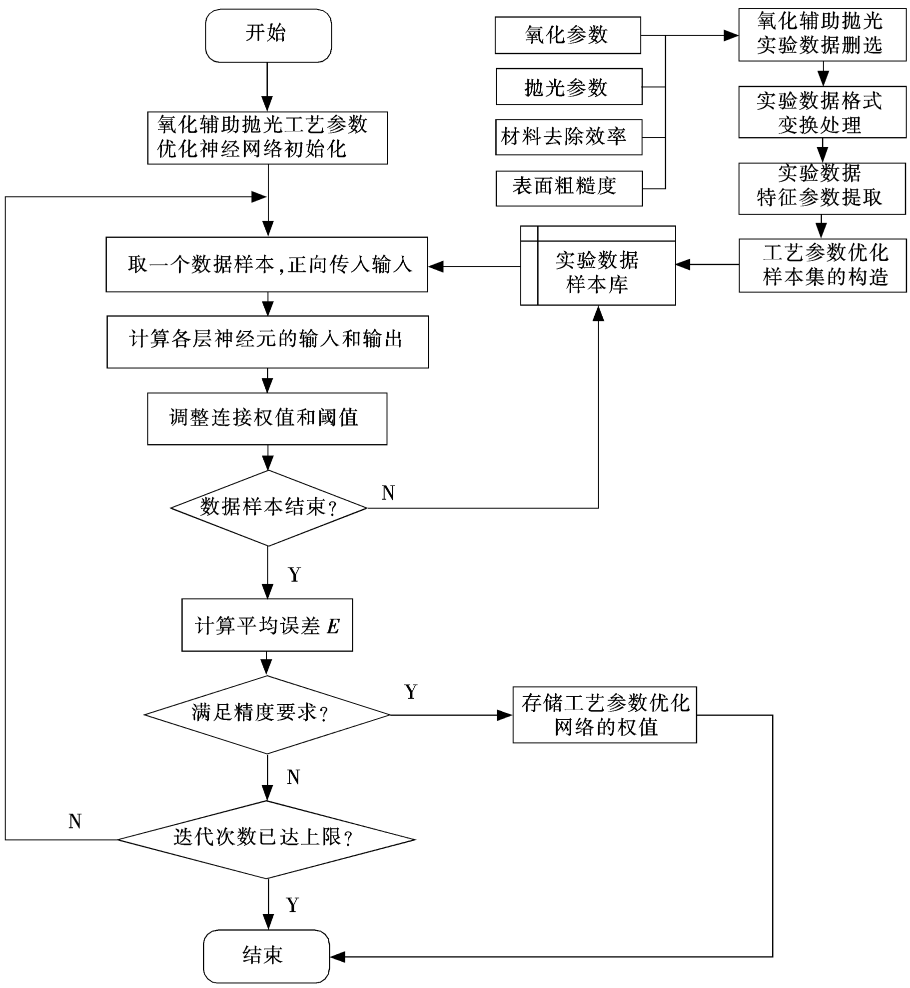


图 8 氧化辅助抛光工艺参数优化的人工神经网络算法流程图

Fig. 8 Flow chart of the artificial neural network arithmetic in optimizing process parameters of oxidation-assisted polishing

以 RS-SiC 等离子体氧化辅助抛光过程为例，如图 9 所示，模型的输入包括氧化参数和抛光参数 2 部分，其中氧化参数主要为电源功率、水蒸气含量、气体流速、占空比、氧化时间，抛光参数主要为抛光液浓度、负载、磨粒粒径、转速、进给速度、抛光时间；模型的输出为材料去除效率和表面粗糙度。输入参数与输出参数构成模型的样本集，利用现有实验数据对模型进行训练和验证，获得烧结碳化硅等离子体氧化辅助抛光工艺参数优化模型，并利用新的实验数据样本对优化模型不断地进行修正，以提高模型的准确度和适用性。

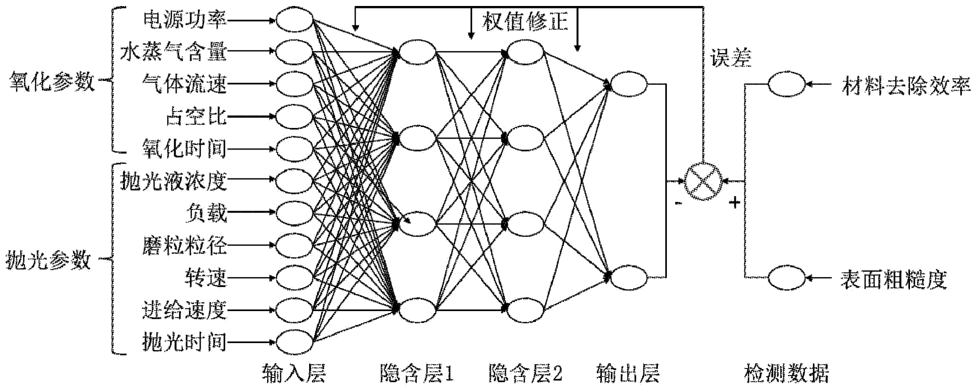
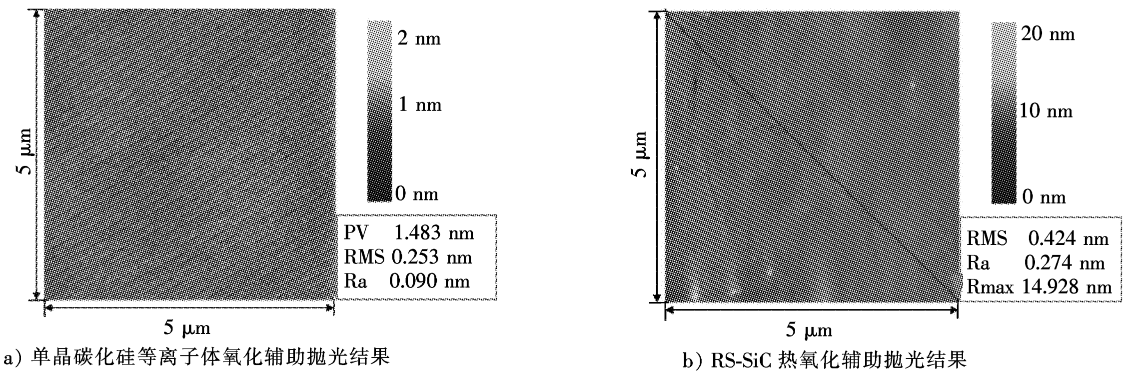


图 9　RS-SiC 等离子体氧化辅助抛光工艺参数优化的人工神经网络结构

Fig. 9　Artificial neural network structure in optimizing process parameters of plasma oxidation-assisted polishing of RS-SiC

4　实验验证

氧化辅助抛光加工碳化硅零件可以获得超光滑表面[4]，利用原子力显微镜检测加工后表面的结果如图 10 所示，单晶碳化硅通过等离子体氧化辅助抛光可以获得原子级超光滑表面，表面粗糙度 Ra 达到 0.090 nm[28-29]；烧结碳化硅通过热氧化辅助抛光可以获得高精度表面，表面粗糙度 Ra 达到 0.274 nm[11]。



a) 单晶碳化硅等离子体氧化辅助抛光结果　　b) RS-SiC 热氧化辅助抛光结果

图 10　碳化硅零件氧化辅助抛光获得超光滑表面的实验结果

Fig. 10　Experimental results of ultrasmooth surface obtained in oxidation-assisted polishing of SiC parts

通过扫描白光干涉仪(SWLI)对比检测 RS-SiC 氧化前后的表面，可以计算得到氧化速度。实验结果表明电化学氧化速度高[12-13]，在如表 2 所示的实验条件下，测得的实验结果如图 11 所示。将氧化深度数据按照经典的 Deal-Grove 模型进行拟合[4,30]，得到的氧化深度 x(nm)与氧化时间 t(s)的关系式如下：

$$t=0.01x^2+0.19x。\tag{1}$$

基于线性 Deal-Grove 模型[4,30]，在氧化初始阶段，RS-SiC 的氧化速度可以达到 5.3 nm/s(忽略式(1)中平方项，则 $5.3\approx1/0.19$)。电化学氧化辅助抛光后的表面粗糙度 RMS 和 Ra 分别是 4.428 nm 和 3.453 nm。如果采用电化学氧化同步抛光的形式，控制加工参数，保证氧化层的抛光效率高于 RS-SiC 的氧化速度，就可以实现 0.318 μm/min 的材料去除效率，可以提高加工 RS-SiC 的材料去除效率。

表 2 RS-SiC 电化学氧化实验参数

Tab. 2 Experimental parameters in electrochemical oxidation of RS-SiC

参数	数值	参数	数值
氧化电压/V	9.8(恒定电压)	电解液	H_2O : H_2O_2(30%) : HCl(35%)= 200 g : 50 g : 5 g
阴极	铂丝(Pt)		
参比电极	银/卤化银(Ag/AgCl)	阳极	RS-SiC 样品

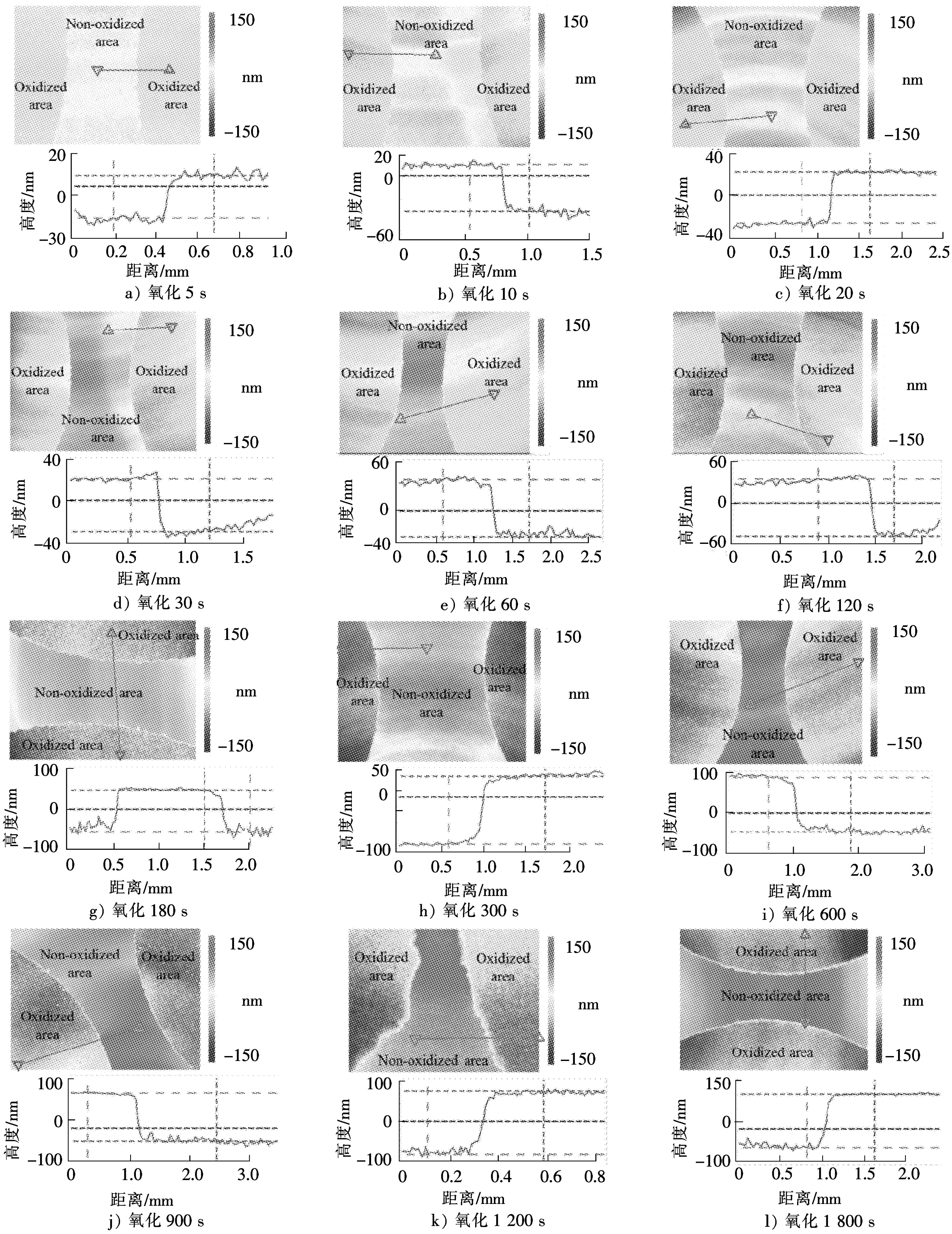


图 11 基于扫描白光干涉仪的电化学氧化深度计算结果

Fig. 11 Calculation of the electrochemical oxidation depth based on SWLI measurement

3 结　语

高精度碳化硅零件在工业领域有着较好的应用前景，氧化辅助抛光技术是一种有效提高材料去除效率、提升表面质量的碳化硅零件超精密加工方法[4]。通过氧化在碳化硅基材上获得软质氧化层，利用软磨粒抛光实现氧化物的快速去除，有利于提高材料去除效率、提升加工表面质量。实验结果表明，等离子体氧化辅助抛光和热氧化辅助抛光可以获得超光滑表面，而电化学氧化辅助抛光可以获得较高的材料去除效率。

但是，对碳化硅零件氧化辅助抛光技术的研究尚处于起步阶段，还存在一系列关键技术问题亟待解决。顾及碳化硅零件的应用需求，本研究将利用第一性原理计算和分子动力学模拟研究氧化辅助抛光加工机理，构建碳化硅氧化模型和氧化层抛光模型，促进了对碳化硅氧化辅助抛光过程的掌控；基于人工神经网络智能算法建立以抛光参数和氧化参数为分析对象、以提高材料去除效率和提升表面质量为优化目标的工艺参数优化模型，利用现有实验数据对模型进行训练和验证，改善工艺参数优化的效率和精度，解决碳化硅零件氧化辅助抛光加工过程中的关键技术问题，在碳化硅零件氧化辅助抛光加工机理与关键工艺研究上取得创新性研究成果，提升碳化硅零件氧化辅助抛光超精密加工工艺水平。

参考文献/References：

[1] SAYANO A，SUTOH C，SUYANA S，et al. Development of a reaction-sintered silicon carbide matrix composite[J]. Journal of Nuclear Materials，1999，271/272：467-471.

[2] TOBIN E，MAGIDA M B，KISHNER S J，et al. Design，fabrication and test of a meter-class reaction bonded SiC mirror blank [J]. SPIE，1995，2543：12-21.

[3] ZHANG Yumin，ZHANG Jianhuan，HAN Jiecai，et al. Large-scale fabrication of lightweight Si/SiC ceramic composite optical mirror [J]. Materials Letters，2004，58(7/8)：1204-1208.

[4] 沈新民. 烧结碳化硅光学零件的氧化辅助抛光机理研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2014.
SHEN Xinmin. Study on the Mechanism in Oxidation Assisted Polishing of Reaction Bonded Silicon Carbide Optical Parts[D]. Changsha：National University of Defense Technology，2014.

[5] HERRMANN M，SEMPF K，SCHNEIDER M，et al. Electrochemical corrosion of silicon carbide ceramics in H_2SO_4[J]. Journal of the European Ceramic Society，2014，34(2)：229-235.

[6] JI Renjie，LIU Yonghong，ZHANG Yanzhen，et al. Machining performance of silicon carbide ceramic in end electric discharge milling [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials，2011，29(1)：117-122.

[7] DING Shuqiang，ZHU Sumin，ZENG Yuping，et al. Fabrication of mullite-bonded porous silicon carbide ceramics by in situ reaction bonding[J]. Journal of the European Ceramic Society，2007，27(4)：2095-2102.

[8] NOVI A，BASILE G，CITTERIO O，et al. A new generation of large SiC telescopes for space applications[J]. SPIE，2004，5528：83-95.

[9] KIM Y W，MITOMO M，EMOTO H，et al. Effect of initial α - phase content on microstructure and mechanical properties of sintered silicon carbide[J]. Journal American Ceramic Society，1998，81(12)：3136-3140.

[10] SHEN Xinmin，TU Qunzhang，DENG Hui，et al. Mechanism analysis on finishing of reaction-sintered silicon carbide by combination of water vapor plasma oxidation and ceria slurry polishing[J]. Optical Engineering，2015，54(5)：055106.

[11] SHEN Xinmin，DAI Yifan，DENG Hui，et al. Ultrasmooth reaction-sintered silicon carbide surface resulting from combination of thermal oxidation and ceria slurry polishing[J]. Optics Express，2013，21(12)：14780-14788.

[12] TU Qunzhang，SHEN Xinmin，ZHOU Jianzhao，et al. Efficient processing of reaction-sintered silicon carbide by anodically oxidation-assisted polishing[J]. Optical Engineering，2015，54(10)：105113.

[13] JIANG G L，SHEN X M，TANG J，et al. Oxidation characteristic and machining performance of reaction-sintered silicon carbide ceramic in anodically oxidation-assisted polishing[J]. International Journal of Electrochemical Science，2016，11(2)：1512-1529.

[14] KUBOTA A，YAGI K，MURATA J，et al. A study on a surface preparation method for single-crystal SiC using an Fe catalyst[J]. Journal of Electronic Materials，2009，28(1)：159-163.

[15] ISHIMARU D，TOUGE M，MUTA H，et al. Burr suppression using sharpened Pcd cutting edge by ultraviolet-ray irradiation assisted polishing[J]. Procedia CIRP，2012，1(1)：184-189.

[16] SHOREY A B. Mechanisms of the Material Removal in Magnetorheological Finishing (MRF) of Glass[D]. Rochester：University of Rochester，2000.

[17] GEOL S，LUO X C，REUBEN R L. Molecular dynamics simulation model for the quantitative assessment of tool wear during single point diamond turning of cubic silicon carbide[J]. Computational Materials Science，2011，51(1)：402-408.

[18] OHMORI H，DAI Y，LIN W. Force characteristics and deformation behaviors of sintered SiC during an ELID grinding process[J]. Key Engineering Materials，2003，238(2)：65-70.

[19] SHANBHAG P M，FEINBERG M R，SANDRI G，et al. Ion beam machining of millimeter scale optics[J]. Applied Optics，2000，39(4)：599-611.

[20] MORI Y，YAMAUCHI K，YAMAMURA K，et al. Development of plasma chemical vaporization machining[J]. Review of Scientific Instruments，2000，71(12)：4627-4632.

[21] OBRIEN W J. Characterisation and Material Removal Properties of the RAPTM Process[D]. Cranfield：Cranfield University，2011.

[22] WANG Junjie，ZHANG Litong，ZENG Qingfeng，et al. The rate-limiting step in the thermal oxidation of silicon carbide[J]. Scripta Materialia，2010，62(9)：654-657.

[23] 任世伟，杜雄杰，侯春旺，等. 硅团簇拉伸/压缩性能的分子动力学模拟[J]. 河北科技大学学报，2010，31(5)：399-402.
REN Shiwei，DU Xiongjie，HOU Chunwang，et al. Molecular dynamics simulation of tension/compression properties of Si cluster[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2010，31(5)：399-402.

[24] 张成军，阴妍，鲍久圣，等. 多源信息融合故障诊断方法研究进展[J]. 河北科技大学学报，2014，35(3)：213-221.
ZHANG Chengjun，YIN Yan，BAO Jiusheng，et al. Research progress in fault diagnosis methods based on multi-source information fusion[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2014，35(3)：213-221.

[25] 陈帅帅，程延海，徐金龙，等. 铁基换热面 $CaCO_3$ 析晶污垢结合力分子动力学模拟[J]. 河北科技大学学报，2014，35(3)：286-290.
CHEN Shuaishuai，CHENG Yanhai，XU Jinlong，et al. Molecular dynamics simulation of $CaCO_3$ crystallization fouling adhered on iron-based material surface[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2014，35(3)：286-290.

[26] XIE L J，SCHMIDTA J，SCHMIDTA C，et al. 2D FEM estimate of tool wear in turning operation[J]. Wear，2005，258(10)：1479-1490.

[27] SHEN X M，DAI Y F，DENG H，et al. Comparative analysis of oxidation methods of reaction-sintered silicon carbide for optimization of oxidation-assisted polishing[J]. Optics Express，2013，21(22)：26123-26135.

[28] DENG H，UEDA M，YAMAMURA K. Chemical and morphological analysis of 4H-SiC surface processed by plasma assisted polishing[J]. Key Engineering Materials，2012，516：186-191.

[29] YAMAMURA K，TAKIGUCHI T，UEDA M，et al. High-integrity finishing of 4H-SiC (0001) by plasma-assisted polishing[J]. Advanced Materials Research，2010，126/127/128：423-428.

[30] DEAL B E，GROVE A S. General relationship for the thermal oxidation of silicon[J]. Journal Applied Physics，1965，36(12)：3770-3778.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文15篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此，本编辑部特向这些专家表示敬意，对他们的辛勤劳动表示感谢。本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列)：

陈国华　陈小安　程久龙　丁志荣　丁智平　段彦栋

方修睦　高　航　高　凯　高学文　何　明　华常春

瞿雄伟　李建武　李文斌　刘京雷　罗　勇　罗玉涛

马崇启　马正月　彭小强　石　磊　王立新　王　泉

禹海涛　袁　昉　张　峰　张桂香　祝长生　钱斯日古楞

(本刊编辑部)