

# 旋转条件下 SiC 单晶片锯切力建模研究

王肖焯<sup>1,2</sup> 李言<sup>1</sup>

(1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

(2 宝鸡文理学院机电工程系,宝鸡 721007)

**文 摘** 通过理论分析和实验研究相结合的方法,对工件旋转条件下电镀金刚石线锯切割 SiC 单晶片锯切力进行了分析。依据磨削和动态切削理论,分析了线锯与工件运动模型、单颗金刚石磨粒的切向和法向锯切力,建立了金刚石线锯锯切力模型;进行了工件旋转条件下 SiC 单晶切割实验,对理论分析结果进行验证,重点对线锯速率、工件进给速率、工件旋转速率及工件未切割直径等工艺因素对切向锯切力的影响进行分析。结果表明理论分析和实验结果相对误差不大于 5.2%,验证了所建模型的正确性,为探索 SiC 单晶片的切削机理和参数优化提供依据。

**关键词** 工件旋转, SiC 单晶片, 锯切力, 建模研究

## Modeling of SiC Wafer Sawing Force Under Rotating Condition

Wang Xiaoye<sup>1,2</sup> Li yan<sup>1</sup>

(1 Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

(2 Mechanical Engineering Department, Baoji University of Arts and Science Electronic, Baoji 721007)

**Abstract** In this paper, theoretical analysis and experiment verification were combined to analyze the sawing force of SiC wafer cut with electroplated diamond wire saw under workpiece rotating condition. Based on the grinding and dynamic cutting theory, the motion model of wire saw and workpiece, the radial and tangential force of a single diamond grain were analyzed, and then the SiC wafer sawing force model was built. The SiC wafer sawing experiments with workpiece rotating were carried out to verify the theoretical analysis, the influence of wire saw velocity, workpiece feeding, workpiece rotating and the uncut part of the workpiece on the tangential force were emphatically analyzed. The results show that the relative error between the theoretical analysis and experimental result is no more than 5.2%, thus the correctness of the established model is verified, which will provide basis for exploring the SiC wafer cutting mechanism and parameter optimizing.

**Key words** Workpiece rotate, SiC wafer, Sawing force, Modeling study

### 0 引言

SiC 单晶片是一种重要的半导体衬底材料,被广泛应用于各种微电子及照明领域。一般情况下,工业用 SiC 单晶片要经历生长、切割、研磨、抛光、检测等多道工序后方能使用,其中切片加工是极为重要的一道工序,其成本占了总加工成本的 50% 以上。锯切力不仅可以反映整个切割过程中线锯和 SiC 单晶的相互作用,而且在一定程度上可对加工表面质量及损伤层进行预测和评价。因此,研究锯切力对分析 SiC

单晶的锯切机理和锯切过程有重要的理论价值和实际意义。

锯切力同磨削力一样,目前还缺乏准确、切实可行的计算公式。近年来,这方面的研究逐渐成为热点,有学者利用往复式电镀金刚石线锯进行了硅晶体的切割,建立了线锯的受力模型<sup>[1-2]</sup>,还有学者利用往复摇摆式金刚石线锯分别对木材、泡沫陶瓷和 SiC 单晶进行了切割,研究了线锯寿命以及工艺参数对切割力、力比和加工表面粗糙度的影响<sup>[3-4]</sup>,文献[5-6]

收稿日期:2011-01-25

基金项目:陕西省机械制造及装备重点实验室项目(08JZ46);陕西省教育厅重点实验室建设基金(09JS099);陕西省科技攻关项目(2010K09-1);宝鸡文理学院院级重点项目(ZK06117)

作者简介:王肖焯,1975 年出生,博士研究生,主要从事精密加工及特种新工艺加工技术研究,E-mail:xiaoyewang221@163.com

利用环形电镀金刚石线锯分别进行了花岗岩和单晶硅、LT55 陶瓷的切割,建立了锯切力模型。上述锯切力模型均是在工件不转情况下通过实验获得的经验公式。然而,本文作者前期的实验结果表明,切割 SiC 单晶片时附加工件的旋转运动不仅可以降低锯切力而且当转速由 0 增加到 12 r/min 时,切片表面粗糙度由 1.532  $\mu\text{m}$  降到 0.513  $\mu\text{m}$ 。

本文试图通过理论分析和实验研究相结合的方法,建立工件旋转条件下电镀金刚石线锯切割 SiC 单晶时锯切力的数学模型,并对其影响因素及其规律进行分析和研究,为探索 SiC 单晶片的切削机理和参数优化提供依据。

## 1 旋转条件下切割 SiC 单晶时锯切力数学模型

### 1.1 线锯与工件几何运动模型

线锯与工件的几何运动模型如图 1 所示。其中,  $v_s$  为线锯往复运动速率,  $v_x$  为工件进给速率,  $n_w$  为工件转速,  $d_1$  为某时刻工件未切割直径,  $r_s$  为线锯半径。

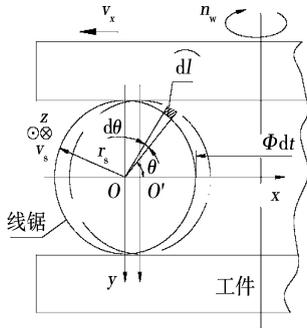


图 1 几何运动模型

Fig. 1 Geometric motion model

根据相对运动关系,若单位时间内线锯沿  $x$  轴正向移动的距离为  $OO' = v_x$ ,则去除材料的体积为:

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} v \cdot OO' \cos \theta \cdot dl = 2r_s v v_x \quad (1)$$

将磨粒简化为图 2 所示模型,取  $\beta = 60^\circ$  [7]。根据体积不变原理有

$$h b v = \frac{2r_s v v_x}{c \lambda \pi r_s v} \quad (2)$$

式中,  $v = v_s \pm v_1 = v_s \pm \frac{\pi d_1 n_w}{1000 \times 60}$  为线锯与工件沿  $z$  轴正向的相对速率,  $v_1$  为某一时刻工件的圆周线速率,  $v_s, v_1$  同向取“-”,逆向取“+”,  $c$  为单位面积磨粒数,  $b$  为磨粒宽度。

根据以上各式及图 2 的几何关系可得金刚石磨粒的平均切削深度为:

$$h = \left( \frac{v_x}{c \lambda \pi v \tan \beta} \right)^{1/2} \quad (3)$$

SiC 单晶为脆性材料去除,其纵向裂纹的产生深度大于磨粒的磨削深度,因此,切割 SiC 单晶时金刚石磨粒的平均切削深度为:

$$h_b = z \left( \frac{v_x}{c \lambda \pi v \tan \beta} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $z > 1$ ,  $c$  为 435,  $\lambda$  为参加切割的磨粒所占的比例,取  $\lambda = 2/3$ 。

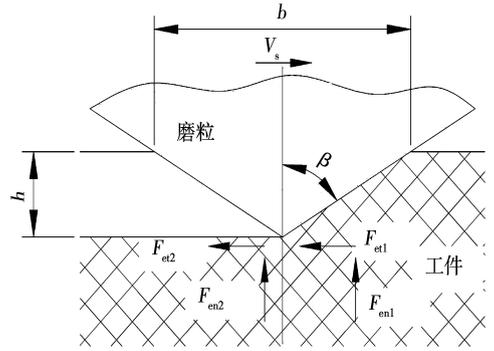


图 2 单颗磨粒受力模型

Fig. 2 Mechanical model of single diamond grit

### 1.2 单颗磨粒所受锯切力

锯切过程中磨粒与工件的相互作用关系与磨削相似,而磨削力由切屑变形分力和摩擦力组成 [8]。因此,单颗金刚石磨粒所受的锯切力可利用 S. Malkin 的结论,引入类似的结果 [9],即  $\theta$  角处的锯切力为:

$$\begin{cases} F_{en} = F_{en1} + F_{en2} \\ F_{et} = F_{et1} + F_{et2} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $F_{en}$  为单颗磨粒的法向锯切力,  $F_{et}$  为单颗磨粒的切向锯切力,  $F_{en1}$  为切屑变形产生的法向锯切力,  $F_{et1}$  为切屑变形产生的切向锯切力,  $F_{en2}$  为摩擦产生的法向锯切力,  $F_{et2}$  为摩擦产生的切向锯切力。

#### 1.2.1 单颗磨粒的法向锯切力

##### (1) 切屑变形产生的法向锯切力

在切削过程中,金刚石磨粒以一定的深度压入工件中,因此由切屑变形引起的法向锯切力为 [8]:

$$F_{en1} = KQ \quad (6)$$

式中,  $K$  为法向磨削力的比切削力;  $Q$  为切屑的平均断面积。

##### (2) 摩擦产生的法向锯切力

根据摩擦学原理,单颗磨粒由摩擦产生的法向锯切力为 [10]:

$$F_{en2} = A_\theta \sigma_{sy} \quad (7)$$

式中,  $A_\theta$  为磨粒切削刃顶面面积,即磨粒和工件真实接触面积,  $\sigma_{sy}$  为磨粒磨损平面与工件之间的平均接触压力强度常数,与工件材料硬度成正比。

$$F_{en} = KQ + A_\theta \sigma_{sy} \quad (8)$$

### 1.2.2 单颗磨粒的切向锯切力

#### (1) 切屑变形产生的切向锯切力

如果只考虑切屑作用于磨粒前面的法向力而忽略切屑与磨粒的摩擦力,并假定磨粒为圆锥形,由文献[11]可知

$$\frac{F_{et1}}{F_{en1}} = \frac{\pi}{4 \tan \beta}$$

则

$$F_{et1} = \frac{\pi}{4 \tan \beta} F_{en1} = \frac{\pi}{4 \tan \beta} KQ \quad (9)$$

#### (2) 摩擦产生的切向锯切力

本实验条件下,材料以脆性断裂方式去除。因此,只考虑磨粒与工件之间的摩擦力、忽略磨粒与切屑之间的摩擦力。根据摩擦学原理,单颗金刚石磨粒由摩擦产生的切向锯切力为:

$$F_{et2} = \mu F_{en2} = \mu A_{\theta} \sigma_{sy} \quad (10)$$

故

$$F_{et} = \frac{\pi}{4 \tan \beta} KQ + \mu A_{\theta} \sigma_{sy} \quad (11)$$

式中, $\mu$ 为磨粒与SiC单晶之间的摩擦因数,为常数。锯切硬脆材料时, $\mu = F_t / F_n$ <sup>[12]</sup>,根据实验结果,本文取 $\mu$ 为0.3。

### 1.3 金刚石线锯所受锯切力

线锯受力模型如图3所示。因仅线锯右侧磨粒参与切割,所以,线锯的总法向力为沿 $x$ 向的所有单颗磨粒法向力的和,线锯的总切向力为所有单颗磨粒切向力的和。线锯与工件切割模型如图4所示。假定切割时工件位于上下导轮正中, $A$ 为上导轮, $L$ 为上下导轮之间的距离,其实际值为170 mm,理论状态下线锯与工件的接触点为 $D$ ,而实际为弧 $l_t$ ,即线锯与工件的动态接触弧长, $\alpha$ 为线锯理论状态与实际状态之间的夹角,由于 $\alpha$ 较小,故有

$$\alpha \approx \sin \alpha \approx \tan \alpha = \frac{v_x}{L/2}$$

即

$$l_t \approx \frac{2v_x d_t}{L} \quad (12)$$

因此

$$\begin{cases} dF_n = c\lambda(Kh_b + \sigma_{sy} l_t) \cos \theta r_s d\theta \\ dF_t = c\lambda \left( \frac{\pi}{4 \tan \beta} Kh_b + \mu \sigma_{sy} l_t \right) r_s d\theta \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)在 $[-\pi/2, \pi/2]$ 上积分,即得

$$\begin{cases} F_n = 2c\lambda r_s (Kh_b + l_t \sigma_{sy}) \\ F_t = \pi c\lambda r_s \left( \frac{\pi}{4 \tan \beta} Kh_b + \mu l_t \sigma_{sy} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $F_n$ 为线锯所受的法向锯切力, $F_t$ 为线锯所受的

切向锯切力。

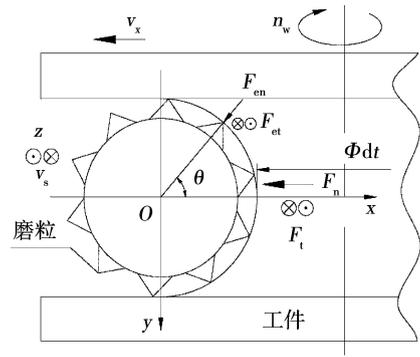


图3 线锯受力模型

Fig. 3 Mechanical model of diamond wire saw

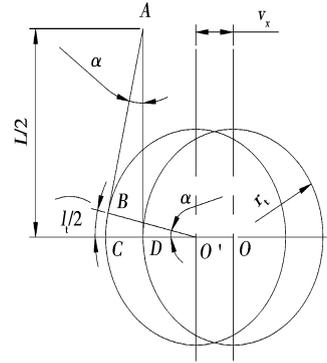


图4 线锯与工件切割模型

Fig. 4 Cutting model of wire saw and workpiece

## 2 旋转条件下SiC单晶切割实验

### 2.1 实验方法

选用自行改进的WXD170型往复式电镀金刚石线旋转点切割机,切割原理如图5所示。

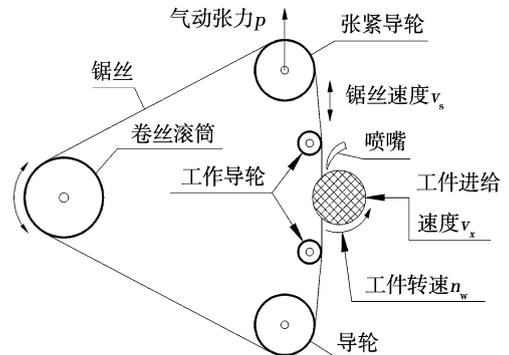


图5 切割实验工作原理图

Fig. 5 Schematic diagram of cutting process

SiC单晶棒做旋转运动的同时垂直于锯丝进给。锯丝由可正反向转动的卷丝滚筒带动,并由一对张紧导轮与一对工作导轮支撑,张紧力用气动装置调节。当滚筒作顺时针(逆时针)转动使走丝到最大长度时,滚筒在控制系统的作用下实现逆向运转,从而使锯丝往复运转,实现切割加工。微型潜水循环泵通过喷嘴向锯丝切割区供给冷却液(水)。

SiC 单晶棒由西安理工大学新型半导体功能材料与设备研究中心提供,采用 PVT 法生成,直径 70 mm,切片厚度 0.8 mm,线锯直径 0.3 mm、长度 50 m,金刚石磨粒粒径 30 ~ 40  $\mu\text{m}$ ,锯切参数及范围如表 1 所示。

表 1 锯切参数及条件

Tab.1 Machining parameters and range

线锯速率 $v_s$	工件进给速率 $v_x$	工件旋转速率 $n_w$
$/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$/\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$
1.0	25	4
1.3	38	8
1.6	50	12
1.9	80	16
2.2	100	20

测力系统由 Kistler 9256C1 型三向压电晶体测力仪、Kistler 5070A11100 型电荷放大器、自制的数据采集仪和装有数据采集分析软件的计算机组成。每个切片取 6 个时间点测量,每点测量 3 次,所得数据去噪后得到的平均值减去初始阶段力的平均值,所得结果即为实验的真实值。

## 2.2 结果与讨论

理论计算和实验结果均表明,线锯受到的法向锯切力与切向锯切力具有类似的趋势。因此,本文只讨论锯切工艺参数对切向锯切力的影响。

由于仅从锯切工艺参数与锯切力的关系考核锯切力模型,则切向锯切力公式可以简化为:

$$F_t = K_1 \left( \frac{v_x}{v} \right)^{\frac{1}{2}} + K_2 d_1 v_x \quad (15)$$

式中,

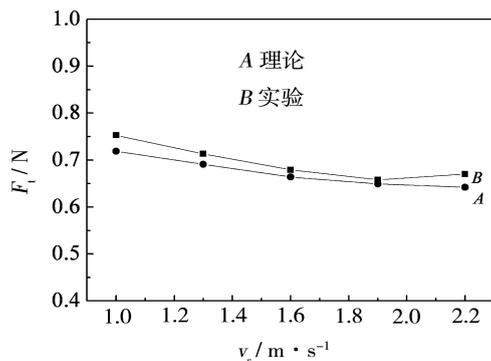
$$K_1 = \frac{\pi r_s \sqrt{\pi c \lambda}}{4 (\tan \beta)^{\frac{3}{2}}} K$$

$$K_2 = \pi c \lambda r_s \frac{2\mu\sigma_{sy}}{L}$$

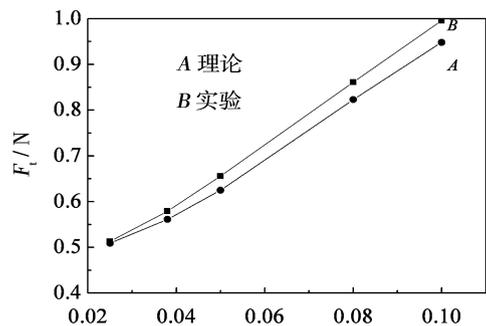
固定  $v_s$ 、 $v_x$ 、 $d_1$  和  $n_w$  其中的三个,改变另一个,将  $v_x$  与  $F_t$  的两对合乎规律的实验数据(本实验取  $v_{s0} = 1.3 \text{ m/s}$ 、 $n_{w0} = 8 \text{ r/min}$ 、 $d_{10} = 20 \text{ mm}$ ,改变  $v_x$ ,取  $v_{x1} = 0.025 \text{ mm/min}$  和  $v_{x2} = 0.05 \text{ mm/min}$ ),代入式(14),通过解二元方程组就可得  $K_1 = 1.059 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ,  $K_2 = 1.01 \times 10^7 \text{ N/mm}^2$ ,回代求得  $K = 6.787 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ ,  $\sigma_{sy} = 62.82 \text{ MPa}$ 。故有:

$$F_t = 1.059 \times 10^3 \left( \frac{\frac{v_x}{60}}{\frac{\pi d_1 n_w}{6 \times 10^4}} \right)^{\frac{1}{2}} + 10.1 \times 10^6 d_1 \frac{v_x}{60} \quad (16)$$

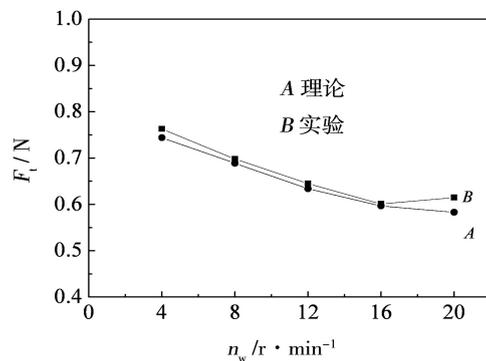
图 6 为根据公式(16)及实验所得数据绘制的各工艺参数对切向锯切力影响的曲线图。



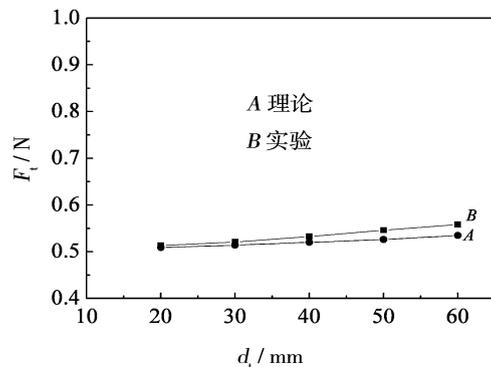
(a)  $v_s$



(b)  $v_x$



(c)  $n_w$



(d)  $d_1$

图 6  $v_s$ 、 $v_x$ 、 $n_w$ 、 $d_1$ 对切向锯切力的影响

Fig.6 Influence of  $v_s$ 、 $v_x$ 、 $n_w$ 、 $d_1$  to tangential cutting force

(1) 线锯速率对切向锯切力的影响

如图 6(a) 所示, 线锯速率小于 1.9 m/s 时,  $F_t$  随  $v_s$  增大而减小。  $v_s$  增大, 单位时间参加切削的磨粒数增多, 使得单颗磨粒切削厚度减小、 $F_t$  减小。当线锯速率超过 1.9 m/s 时, 开始崩片, 且  $F_t$  增大, 此时测得的  $F_t$  中包含了因线锯速率过大而产生的振动力。

### (2) 工件进给速率对切向锯切力的影响

由图 6(b) 可知,  $v_x$  增大,  $F_t$  增大。  $v_x$  增大时, 线锯与工件的动态接触弧长增加, 增加了磨粒滑擦路径的长度, 也增加了排屑的难度, 故锯切力增大。

### (3) 工件转速对切向锯切力的影响

由图 6(c) 可知,  $n_w$  增大,  $F_t$  减小。工件转速增加, 单位面积内参与切削的磨粒数增加, 使得单颗磨粒切削厚度减小、切向锯切力减小。当工件转速超过 16 r/min 时, 出现崩片, 且  $F_t$  增大。这是因为过大的转速引起工艺系统的振动所致。

### (4) 工件未切割直径对切向锯切力的影响

由 6(d) 可知,  $d_t$  增大,  $F_t$  增大。线锯切割 SiC 单晶时, 虽然理论上线锯与工件是点接触, 但实际上却是面接触, 当  $d_t$  增大时, 线锯与工件的动态接触弧长增大, 而脆性材料的去除机理决定了摩擦力占锯切力主要成分, 因此  $F_t$  增大。

理论计算与实验所得数据相对误差小于 5.2%。从图 6 得出, 实测值均大于理论值, 这可能是理论推导时没有考虑切削液等次要因素所致。

## 3 结论

(1) 切削 SiC 单晶片时线锯速率、工件旋转速率、工件进给速率及工件未切割部分直径对锯切力均有影响。

(2) 工件进给速率及工件未切割部分直径与锯切力正相关, 线锯速率及工件转速与锯切力负相关,

且工件进给速率对锯切力影响最大。

(3) 实测值与理论值相对误差不大于 5.2%。

## 参考文献

- [1] 高玉飞, 葛培琪, 李绍杰. 往复式电镀金刚石线锯切割单晶硅片特性研究[J]. 人工晶体学报, 2009, 38(2): 372-377
- [2] 侯志坚, 葛培琪, 张进生, 等. 利用金刚石线锯切割硅晶体的实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007(5): 14-16
- [3] Clark W I, et al. Fixed abrasive diamond wire machining—part II: experiment design and results [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003(43): 523-532
- [4] 陈秀芳, 李娟, 马德营, 等. 金刚石线锯切割大直径 SiC 单晶[J]. 功能材料, 2005, 36(10): 1575-1577
- [5] 高伟. 环形电镀金刚石线锯的制造及其切割技术与机理的研究[D]. 山东大学, 2002
- [6] 孟剑峰. 环形电镀金刚石线锯加工技术及加工质量研究[D]. 山东大学, 2006
- [7] 李伯明, 赵波. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [8] 李力均, 傅杰才. 磨削力数学模型的研究[J]. 湖南大学学报, 1979(3): 44-55
- [9] Malkin S. Grinding mechanisms of ceramics[J]. Annual of the CIRP, 1996, 45(2): 569-579
- [10] 石森森. 切削中的摩擦与切削液[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994: 16-17
- [11] Wang C Y, Clausen R. Stone sawing forces by single diamond segment [J]. Key Engineering Materials, 2001 (202/203): 61-66
- [12] 徐西鹏, 黄辉, 于怡青, 等. 锯切过程中花岗岩与金刚石间的摩擦效应[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(4): 304-310

(编辑 李洪泉)

## 航天材料及工艺研究所科研成果获得 国防科学技术进步一等奖

经国防科学技术奖专业评审委员会初评、国防科学技术奖评审委员会评审和国防科学技术奖励委员会终审, 工业和信息化部批准授予了航天材料及工艺研究所“高性能天线罩(窗)热透波机理及热透波材料基础研究”项目国防科学技术进步一等奖。

该项目涉及了多个学科及领域, 具有基础性、创新性强和难度跨度大的特点。科研人员经过 6 年的努力攻关, 实现了重要创新与突破: 首次揭示了高温固液气三相共存体系热透波机理, 建立了热电联合分析软件平台; 创新发展了热透波材料体系, 显著提高了烧蚀热透波材料使用温度; 攻克了高温电性能测试难题, 建立了宽频介电性能测试系统, 首次实现了高温熔体介电性能测试, 建立了热透波模拟试验系统并首次实现了烧蚀透波实时模拟, 形成了高温电性能评价表征能力。

项目共申请发明专利 41 项(其中已授权 11 项), 并在核心期刊上发表论文 99 篇, 研究成果已得到了成功转化和广泛应用, 显著提升了我国在该领域的研发和自主创新能力, 填补了多项国内外技术领域空白。

· 罗焱 ·