

摘要

Hardin, Craig William. 固着磨料金刚石线锯切割单晶 SiC 片和木材（Dr. Albert Shih 领导）

研究固着磨料金刚石线切割工艺参数的影响，研究金刚石线切割单晶 SiC 片过程中线速度、摆动频率和进给速度对切削力和表面粗糙度的影响，还研究了摆动和环形线切割加工木材以及进给速度、线速度、冷却液和纹理方向对切削力和表面粗糙度的影响。

切削实验设计使用 3 种不同的线切割设备：第一个实验使用一台 Diamond Wire Technology Millennium 线轮-线轮式摆动金刚石线切割设备来加工单晶 SiC 片；接下来的实验使用一台 Murg 环形线切割机器和一台 Well Diamond Wire Saws 的 Model 7243 摆动线切割设备来加工松木和橡木。

记录切削力和信号处理技术的一个数据采集系统用来去除噪声。金刚石线运行良好，然后所有材料的加工表面检查表面粗糙度。一台扫描电子显微镜用来检查 SiC。最后，讨论了结果和这个领域未来研究的方向。

固着磨料金刚石线锯切割单晶 SiC 片和木材

Craig William Hardin

术语	v
1. 简介	1
1.1 固着磨料金刚石线锯	2
1.2 金刚石线加工的优势	3
1.2.1 薄截口	3
1.2.2 复杂形状切割	4
1.3 文献综述	5
2. 实验设计和设置	5
2.1 设备使用	5
2.1.1 金刚石线技术金刚石线切割	5
2.1.2 Well Diamond Wire 环形线切割	7
2.1.3 Well Diamond Wire 摆动线切割	8
2.1.4 金刚石线	9
2.1.5 测力仪	9
2.1.6 数据采集	10
2.1.7 木材实验的推进机构	10
2.1.8 扫描电子显微镜	10
2.1.9 表面粗糙度测量	10
2.2 使用材料	11
2.3 实验设计	12
2.3.1 单晶 SiC 实验设计	12
2.3.2 摆动切割实验设计	15
2.3.3 环形线切割实验设计	17
3. 线切割加工力学	18
3.1 摆摆运动学	18
3.2 线切削力平衡	20
4. 单晶 SiC 切割实验 I 结果	21
4.1 数据采集	21
4.1.1 切向力	22
4.1.2 法向力	23
4.2 切削力和表面粗糙度结果	26
4.3 扫描电子显微镜表面特征	28
5. 单晶 SiC 加工实验 II 结果	32
5.1 数据采集	32
5.2 切削力和表面粗糙度结果	32
5.3 扫描电子显微镜分析	34
6. 摆动切割木材结果	34
6.1 数据采集	34
6.1.1 切向力	35
6.1.2 法向力	37
6.2 切削力和表面粗糙度结果	37
6.2.1 基准结果	38
6.2.2 导轮测试结果	39
6.2.3 高进给速度测试结果	39

7.	环形切割木材结果	40
7.1	数据采集	40
7.2	切削力和表面粗糙度结果	40
7.2.1	基础结果	42
7.2.2	冷却液测试结果	43
7.2.3	进给速度测试	43
8.	总结	44

术语

符号	描述
d_w	摆动切割轮直径
l_w	摆动切割轮间距
d_r	导轮直径
l_r	导轮间距
Ψ_1	实测弓角 1
Ψ_2	实测弓角 2
θ_1	线弓角 1
θ_2	线弓角 2
α	摆动角度
F_T	实测切向切削力
F_N	实测法向切削力
T_1	工件右侧线的张力
T_2	工件左侧线的张力
f_T	切向比力
f_N	法向比力
R_a	表面粗糙度

1. 简介

材料成本的控制要求找到一种木材加工时更低截口损失的方法。固着磨料金刚石线锯研究用于切割各种类型的木材。木材加工被传统的锯条垄断。固着磨料金刚石线锯开发用于半导体行业，产生的截口比最先进的薄切口锯更薄。这将节约生产环节中的材料成本。

单晶 SiC 正成为一种非常重要的电子陶瓷，用于蓝光和绿光激光二极管、高功率半导体器件、微波及射频功率晶体管和光电产品。与 Si 相比，SiC 更硬更难切片，遇到了严格的翘曲度和总厚度变化 (TTV) 要求。加工表面的划痕和亚表面损伤已成金刚石线切割技术的使用难点。大规格直径 200mm 和 300mm (8 寸和 12 寸) 的单晶硅片的使用及开发使得金刚石线切割技术更有活力。图 1.1 展示的是传统内圆金刚石锯条用于单晶硅锭切片。由锯条厚度引起的截口损失浪费加工材料。线切割技术开发用于最后 90 秒的硅片生产以此减少截口损失。

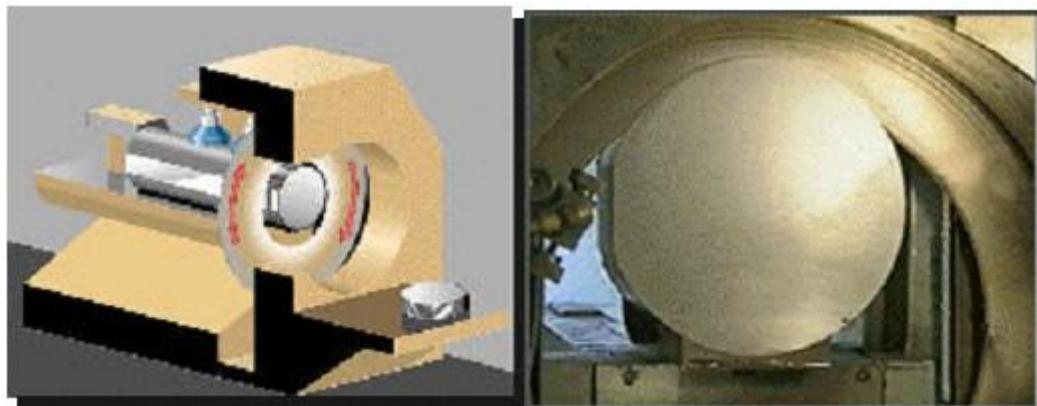


图 1.1：传统内圆金刚石锯条用于硅切片。三菱[1]

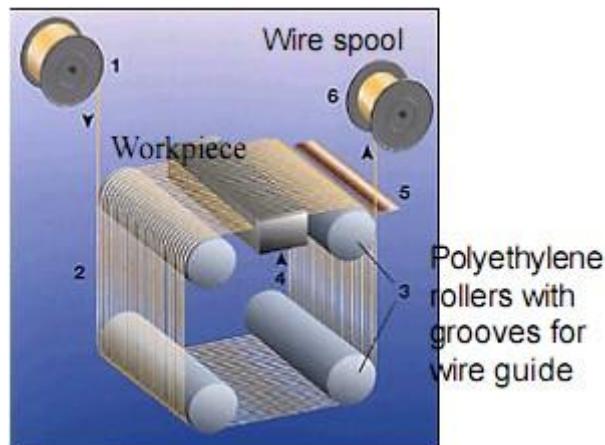


图 1.2：线锯切片的演示。贝卡尔特[2]

1.1 固着磨料金刚石线锯

固着磨料金刚石线锯有很多种描述方法。每个制造商使用有些不同的方法。金刚石线使用 0.22 到 0.55mm 不同直径的钢丝基体。此次实验使用两种不同类型的线。SiC 加工实验采用的是直径 0.22mm、大小 $25\mu m$ 的金刚石颗粒、电镀结合的一根钢芯的金刚石线，Winter/Saint-Gobain 制造的线用于 SiC。用于 SiC 实验的线锯的 SEM 图如图 1.3(a)所示，图 1.3(a)展示的是线锯上的 $25\mu m$ 的金刚石磨料。松木和项目加工实验使用的是 Well Diamond Wire Saws 生产的两种类型的线。Well Diamond Wire Saws 使用的是不锈钢基体，有一个使金刚石有效卷入的结合层。金刚石尺寸是 $64\mu m$ ，线锯基体的直径是 0.3mm 和 0.5mm。高线速度木材实验使用的是一种采用新技术的连续的环形线。Well Diamond Wire Saws 生产的环形线采用他们特有的工艺卷入金刚石，然后激光焊接两端成一个连续循环。表 1.1 包含每个实验使用金刚石线锯的所有数据。Well Diamond Wire Saws 的线锯 SEM 图如图 1.3(b)所示。

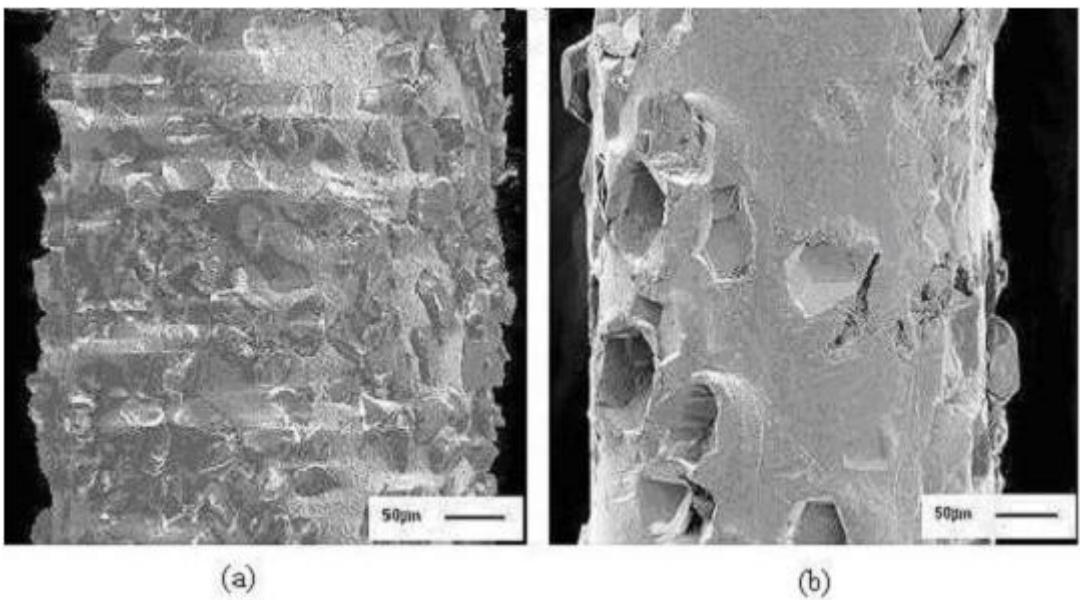


图 1.3: 固着磨料线锯的 SEM 图: Winter/Saint-Gobain(a)和 Well Diamond Wire Saws(b)。

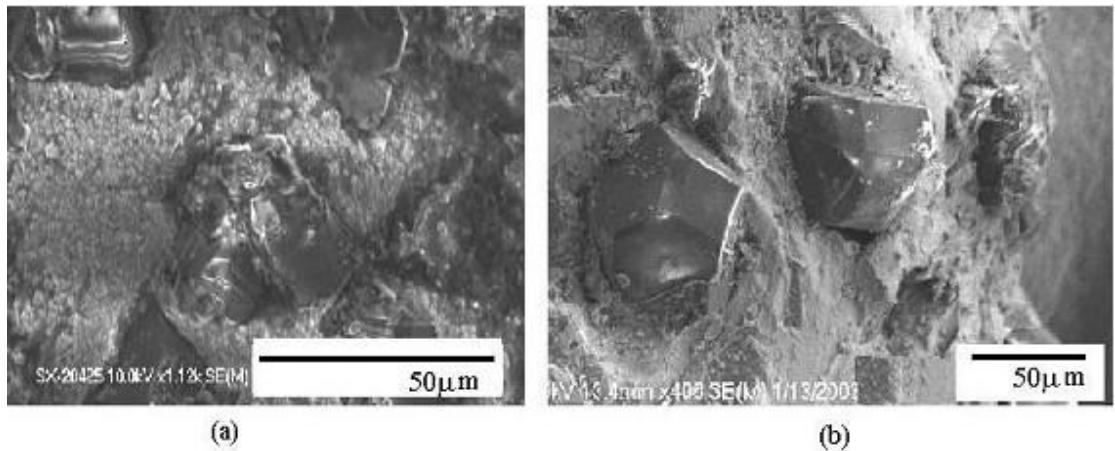


图 1.4: 金刚石磨料: Winter/Saint-Gobain(a)和 Well Diamond Wire Saws(b)。

表 1.1: 金刚石线数据

	Winter/Saint-Gobain	Well Standard Wire	Well Continuous Loop
Experiment	SiC tests 1 and 2	Oak and Pine; Rip and Crosscut	Oak and Pine; Rip and Crosscut
Core Material	Steel	Stainless Steel	Stainless Steel
Core Diameter	0.2 mm	0.5 mm	0.3 mm
Diamond Grit Size	25 μm	64 μm	64 μm
Manufacturing Method	Electroplating diamonds with a nickel layer	Mechanically affixing the diamonds to wire	Mechanically affixing the diamonds to wire, laser weld ends to form loop

1.2 金刚石线加工的优势

固着磨料金刚石线锯和传统的木材加工相比有两大优势：它有非常小的直径，使得可以拥有极其小的截口损失；另一个优势是可以进行复杂形状的切割。

1.2.1 薄截口

对于木材，固着金刚石线锯在许多应用上已经有能力取代薄切口圆锯和带锯加工。金刚石线锯加工和任何传统木材加工方法相比有更小的截口损失。一根典型的薄切口锯需要一根非常精密的轴和精度控制。最好的薄切口锯只能产生

1mm 的截口损失，固着金刚石线锯和它相比最多产生一半的截口损失。图 1.5 比较了此次实验各种薄切口锯和金刚石线锯的使用情况。

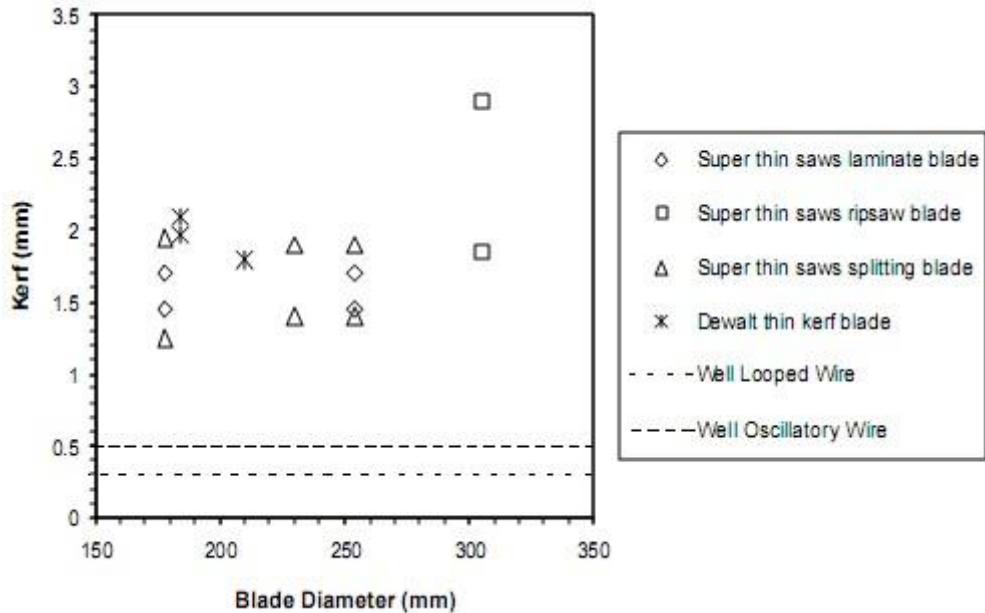


图 1.5：圆锯和金刚石线锯加工的截口比较

1.2.2 复杂形状切割

固着磨料金刚石线锯可以用来复杂形状切割。传统的木材加工工具在不退出工件的情况下不能切割复杂的几何图形，需要重新从另一个位置开始切割。由于它们只能像带锯刃口一样弯曲，所以家具生产中的许多曲线受到限制。金刚石线锯在切割过程中有能力在任一点改变方向。图 1.6 是高速 Well Diamond Wire Saws 环形线锯切割复杂形状的演示。

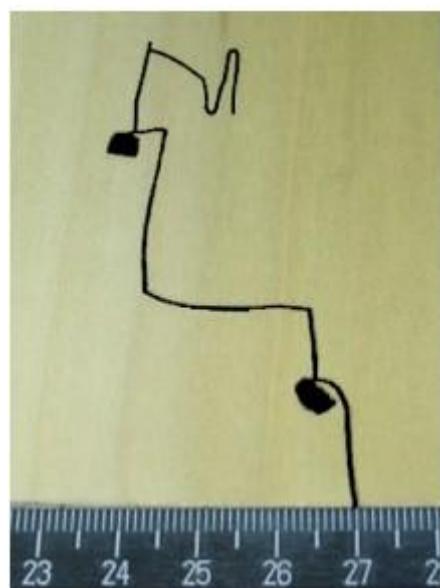


图 1.6: Well Diamond Wire Saws 环形线锯切割出的复杂形状

1.3 文献综述

线切割加工包括游离磨料和固着磨料方法各自是一项新技术。Ito 和 Murata [3]、Tokura 等 [4] 和 Ishikawa 等人[5]做了早期线切割加工实验。Li, Kao, and Prasad [6]介绍了 Si 切片中磨料和由游离磨料滚入工件线切割的一种设计和分析报告。Sahoo 等[7]使用有限元法分析线切割切薄片的振动形式。Bhagavat 及 Kao [8]和 Bhagavat 等[9]使用有限元分析游离磨料金刚石线切割的弹性液动配合。Clark 等[10,11]介绍了流程监控和金刚石线切割木材的分析报告。

大多数线切割技术的重大突破已申请专利。对美国的关于金刚石线切割的专利进行了调查发现：H. Mech [12,13]在 70 年代首先开发了金刚石线切割易碎半导体材料的工艺，在 70 年代[12-14]只有三项关于线切割加工技术的专利而 80 年代[15,16]只有两项，专利数量从 90 年代中期[17-20]开始明显增多尤其是 1998 年之后，专利的进一步的发展如：1998 年[21-25]、1999 年[26-29]、2000 年[30-39]、2001 年[40-45]和 2002 年[46-50]。

这些预示着线切割加工仍然是个专利技术，仍然缺乏固着金刚石线切割加工的研究。随着半导体、陶瓷和木制品工业的发展需求，新的金刚石线和线切割加工期望继续发展成更精密、高效和划算的加工方式。

2. 实验设计和设置

这个章节如何实施这个实验，它包含介绍实验设备和实验材料的部分，还包含介绍如何选择工艺参数作为检测矩阵。

2.1 设备使用

许多工具在此项研究中用来完成实验和分析结果。下面的章节描述了主要设备如：线切割使用、固着磨料金刚石线锯每个设备的使用、测力仪系统的部件、扫描电子显微镜使用、扫描声学显微镜使用和测量表面粗糙度的装置。

2.1.1 金刚石线技术金刚石线切割

此次研究使用固着磨料金刚石线通过一台 Millennium Series 摆摆运动切割

设备切割单晶 SiC。此次切割采用线可以周期性反转方向的线轮-线轮式切割。此设备具有在 3 种速度（低 0.15HZ、中 0.30HZ 和高 0.50HZ）下实施摇摆运动切割时摆动多达 6° 的能力。线在两个线轮间运行。引导线轮连接有电机可以让线运动起来，从动线轮接有电机用来反向给这个运动提供额定的线的张力。当线从一个线轮完全的导入另一个线轮时，线的运动方向反转，改变在引导和从动作用间的每个电机的功能。每个线轮都留有线锯的缓冲量，有助于机器平稳地运行。线速度可由用户在 2.5m/s 和 15m/s 间任意选择。由从动电机提供的线的张力可在 13N 到 50N 间自由编程。

采用缓慢的将线进给到工件的线切割方式。为了达到这个目的，整条线的束缚结构包含两个线轮和所有四个线导轮，装在两条垂直滑块上，工件在加工过程中保持静止。步进电机使滚珠丝杠旋转起来，驱使束缚装置以固定单位上下运动。步进电机每转有 240 步，它的传动装置产生 10 种转速每次线性向下进给 2.54mm。两种控制向下进给速度的方法分别是线弓角速率和规定的线性向下进点速度。此次实验进行的所有测试保持固定的线性向下进给速度，而实验的方法在改变。为了运用角速率控制向下进给速度，设备可以设定程式找到导致一套线弓角度从 0.1° 到 6° 的任意角度变化的向下进给速度。规定的线性向下进给速度可由用户在 0.00127mm/s 和 0.635mm/s 间自由选择。

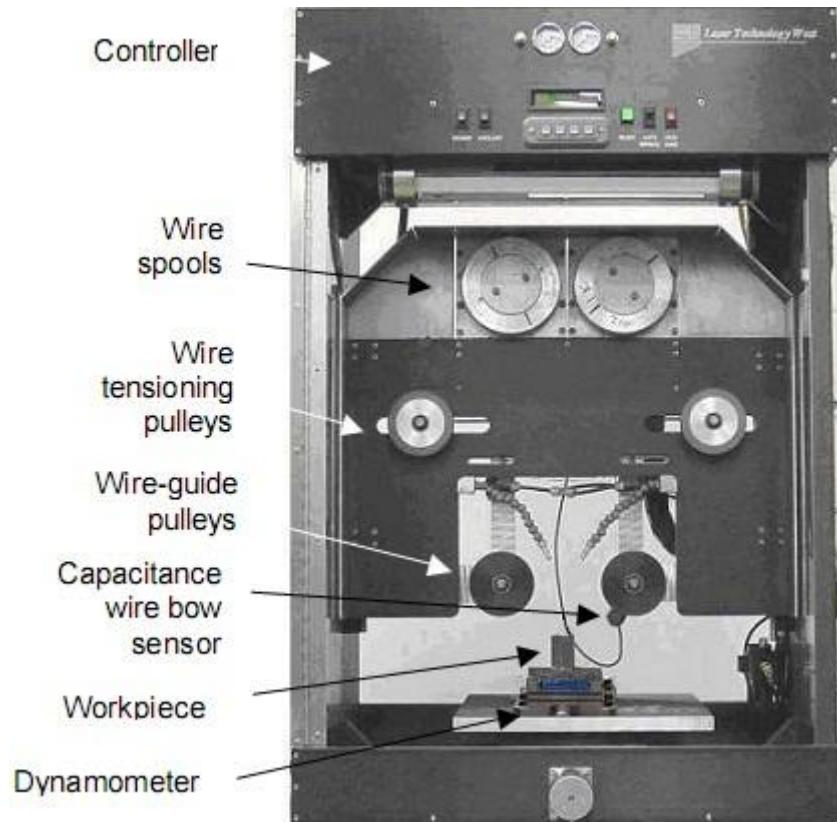


图 2.1：实验中线锯使用

2.1.2 Well Diamond Wire 环形线切割

Well Diamond Wire Saws Murg 高速环形线锯用来加工橡木和松木样品。设备使用 2.2m 长的环形金刚石线。环形线锯能使用的线速度从 0.5m/s 到 20m/s。线的运动时单向的，类似于带锯。切割没有任何的推进机构和运动控制机构。图 2.2 展示了线锯在 $dw=394\text{mm}$ 和 $lw=481\text{mm}$ 下的运动：

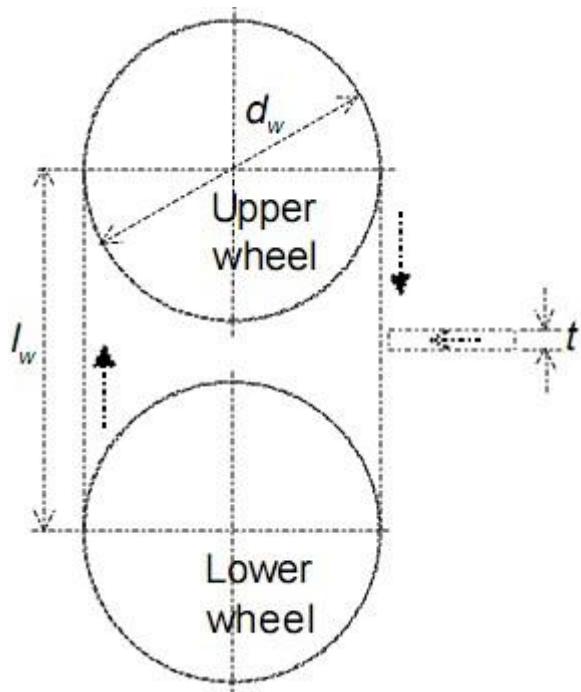


图 2.2：环形线切割图。

2.1.3 Well Diamond Wire 摆动线切割

一条 Well Diamond Wire Saws 型号 7243 的固着磨料摆动金刚石线锯用来加工橡木和松木。机器使用的是一段长 40m 直径 0.7mm 的金刚石线。摆动线锯能采用的线速度是 0 到 1.5m/s。线的运动方式是摆动的，是传统切片锯和钢丝锯混合而成。40m 长的线从上部轮运转到下部轮，然后反转运动。轮子上有单独的沟槽用于线和周围的线轮，这种方法使得线不会和别段的线接触，这样可以防止过早破坏和总加工效率的降低。线导轮安装在切口上用来保证线运动的更精准。此切割没有任何推进机构和运动控制机构。用户必须手动进给工件。图 2.3 展示了线锯在 $d_w=470\text{mm}$ 、 $l_w=927\text{mm}$ 、 $dr=25\text{mm}$ 和 $lr=112\text{mm}$ 下的运动：

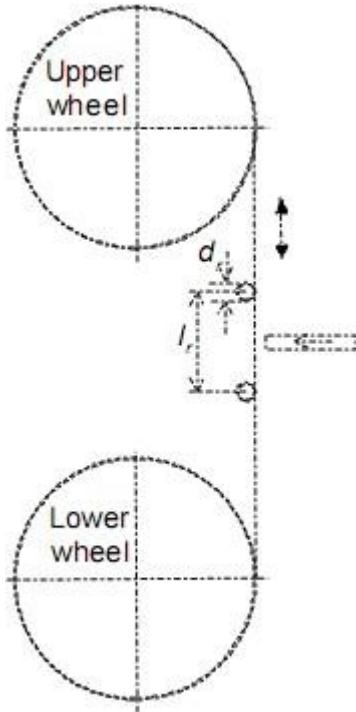


图 2.3: 摆动线切割图。

2.1.4 金刚石线

此次加工实验中使用了 3 种类型的固着磨料金刚石线。表 2.1 展示了金刚石线和使用设备的不同规格和说明。Winter/Saint-Gobain 生产的线用于 SiC。SiC 实验使用的线锯的 SEM 图如图 2.4(a)。松木和橡木加工实验使用的是 Well Diamond Wire Saws 的两种类型的线。高线速度木材实验利用的是一项新的连续环形线技术。Well Diamond Wire Saws 线的 SEM 图如图 2.4(b)所示。

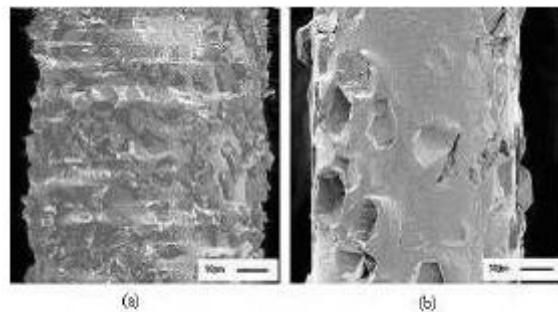


图 2.4: 固着磨料线锯 Winter/Saint-Gobain (a) 和 Well Diamond Wire Saws (b)

2.1.5 测力仪

一台 Kistler 的型号 9225B 3 轴测力仪用来测量切割过程中工件上显示的切

割力。测力仪信号通过一对 Kistler 5010B 单信道双频模式电荷放大器搜索，每力学单位校准系数为 3.76 和 7.85pC 用于垂直力和水平力信道。测力仪用来记录在-5kN 到 5kN 的力，在阈值 0.01N 上。一根 Kistler3 导线铠装电缆用于将测力仪和盒子相连。同轴电缆通过 BNC 电缆连接器从测力仪电缆末端的终端头连接到电荷放大器。

2.1.6 数据采集

一套 National Instruments 的串口数据采集系统用来记录测力仪获得的力的信号以及线锯设备控制器获得的线弓信号。这些信号由 National Instruments SCB-68 的终端块采集。型号为 184749A-02 的屏蔽线将终端块连接到 PCI-6035E 型号的串口 PCI 数据采集卡。这个卡的理论的采样率是 20 万个样品每秒覆盖 16 个单工信道。如果像差动信号一样测量此卡支持 8 个信道。

2.1.7 木材实验的推进机构

Well Diamond Wire Saw 生产的锯没有可改变的进给速度，因此木材加工实验需要一个推进机构来将工件进给到金刚石线上。一台 Isel Automation 线性装置用来实现这个目的，一个可编程序控制器用来控制它，线性装置在所有木材测试中可以使用各种有效的进给速度。

2.1.8 扫描电子显微镜

一台 Hitachi S-4700 冷场发射式扫描电子显微镜用来对 SiC 片、金刚石线样品和切割碎片进行 SEM 图拍摄。每张图片的电压设置为 10kV。有些材料是不导电的，因此样品需要涂上一层导电材料来拍摄良好的显微图片。一台金/铂金溅射机用来实现样品涂层这个目的。

2.1.9 表面粗糙度测量

一台 Talysurf 120 接触探针式表面粗糙度测量仪用来获得 SiC 加工面的 Ra 值。这台机器使用一根金刚石探针沿剖面线测量工件表面的高度。每次测量使用 60 次连续的 0.08mm 的截断长度来达到列出的总剖面长度 4.8mm。

一台 Mitutoyo Surftest 探针系统用来检查木材加工表面的表面质量。这台机器采用一个金刚石探针测量表面的剖面，每次测量使用的剖面线长度为 2.4mm。

2.2 使用材料

此次切割测试使用的是 Cree Inc 提供的单晶 SiC，SiC 锆的直径是 3 英寸。单晶 SiC 是非常硬但易碎的材料。它的硬度是 9mohs，大约 2035HV。这个硬度对机器来说有相当大的挑战。首先使用平边片进行测试，确保力值在整个测试中一直精准无误使得线接触面积保持不变。因为最终目标是使用金刚石线加工圆片，所以第二个测试使用的是一个普通的 3 英寸圆片。第二个测试分析切削力和表面粗糙度。图 2.5 展示的是第二个试验中使用的平边 SiC 片和普通的 3 英寸片。



图 2.5: (a) 平边和(b)普通单晶 SiC 片。

由于松木和橡木在工业应用广泛，故选来作为主要木材材料。松木作为一种常见的软木材运用于家具产品中，橡木也是一种经常使用的木材。每个样品的工业标准“one by”宽度是 19mm(3/4”)。图 2.6 展示的松木和橡木工件。

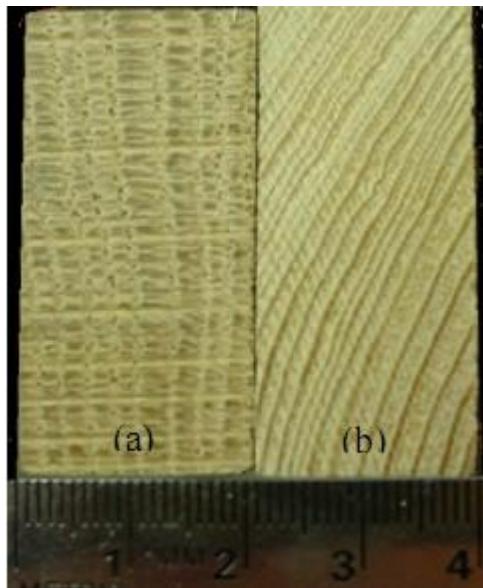


图 2.6: (a)橡木和(b)松木加工样品

2.3 实验设计

设计了 3 种不同的测试。单晶 SiC 测试采用的是 Diamond Wire Technology Millennium Slicing Saw，木材测试设计了一个可以放置任何垂直运动的线锯的部件。每个测试设置不同的进给速度来测量切削力。

2.3.1 单晶 SiC 实验设计

Millennium Series Slicing Saw 安装有测力仪，数据采集系统安装调试完毕。一个固定板固定单晶 SiC。图 2.7 是线切割机器的内部总装图。

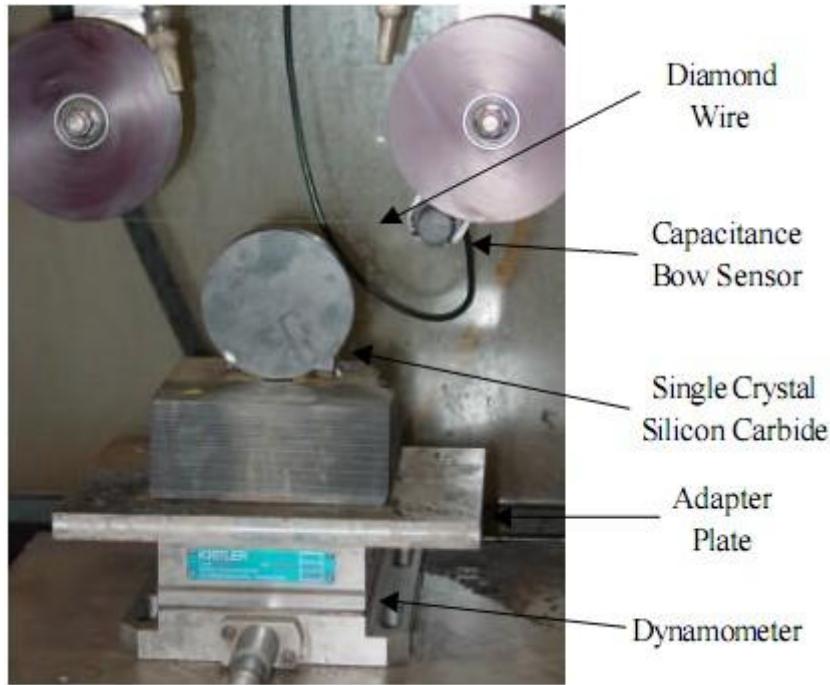


图 2.7：线切割机器内部单晶 SiC 安装。

测试矩阵开发出来用于测试向下进给速度、摆动频率和线速度对切削力和表面粗糙度的影响。第一个切削测试使用的是有平边的单晶 SiC，第二个测试采用的是常见的圆片。Diamond Wire Technology Millennium Series Slicing Saw 有各种工艺参数，但在切割实验中只有少量的参数可以改变的。此次试验中使用的线已经使用过几次，这是因为金刚石线有一个磨合期，力产生明显的变化同时金刚石开始磨损。线锯无需经历任何改变就可以精确地测量。下表列出了平边圆片切割测试中保持不变的工艺参数。

表 2.1 实验 I 中保持不变的工艺参数。

Wire Length	185.928 m
Left and Right Buffer Length	45.7 m
Wire Velocity	10.16 (m/s)
Rock Angle	2 deg.
Rock Frequency	0.3 Hz
Wire Tension	22.24 N
Coolant	Water
After Cut Dwell	6 sec
Saw Retraction	Off

切割实验 I 中设计来测试进给速度对表面粗糙度的影响，因此选择一组 3 个向下进给速度用来分析。下面的测试矩阵列出了可改变的参数和它们切割工件的总切削深度。

表 2.2：实验 I 测试矩阵

Cut Number	Downfeed Rate (mm/s)	Cut Depth (mm)
1	0.0127	12 (7mm lead-in)
2	0.00508	5
3	0.00127	5

第二个单晶 SiC 测试检测摆动频率和线速度对 SiC 切削力和表面粗糙度的影响。第二个测试使用新的金刚石线。这个测试观察新线的影响和它的有效磨合期。第二次测试中工艺参数保持不变，如下表所示。

表 2.3：实验 II 中保持不变的工艺参数

Wire Length	185.928 m
Left and Right Buffer Length	45.7 m
Downfeed Rate	0.0127 (mm/s)
Rock Angle	2 deg.
Wire Tension	22.24 N
Coolant	Water
After Cut Dwell	6 sec
Saw Retraction	Off

实验 II 测试线速度和摆动频率对表面粗糙度的影响，因此使用四个摆动频率和三个线速度进行分析。下面的测试矩阵列出了工艺参数和 SiC 工件切割的总切削深度。

表 2.4：SiC 测试 2 实验矩阵

Cut	Wire Speed (m/s)	Rock Frequency (Hz)	Cut Depth (mm)
1	10.16	0	13.35 (7mm lead-in)
2	10.16	0.15	6.35
3	10.16	0.30	6.35
4	10.16	0.50	6.35
5	8.128	0.15	6.35
6	8.128	0.30	6.35
7	8.128	0.50	6.35
8	11.18	0.15	6.35
9	11.18	0.30	6.35
10	11.18	0.50	13.35 (7mm lead-out)

2.3.2 摆动切割实验设计

Well Diamond Wire Saws 的 7243 型摆动式金刚石线切割机器安装有 Isel Automation 线性滑轨、测力仪和数据采集系统。一个固定板用来固定测力仪，上顶板在加工时压紧工件。图 2.8 为总装图。

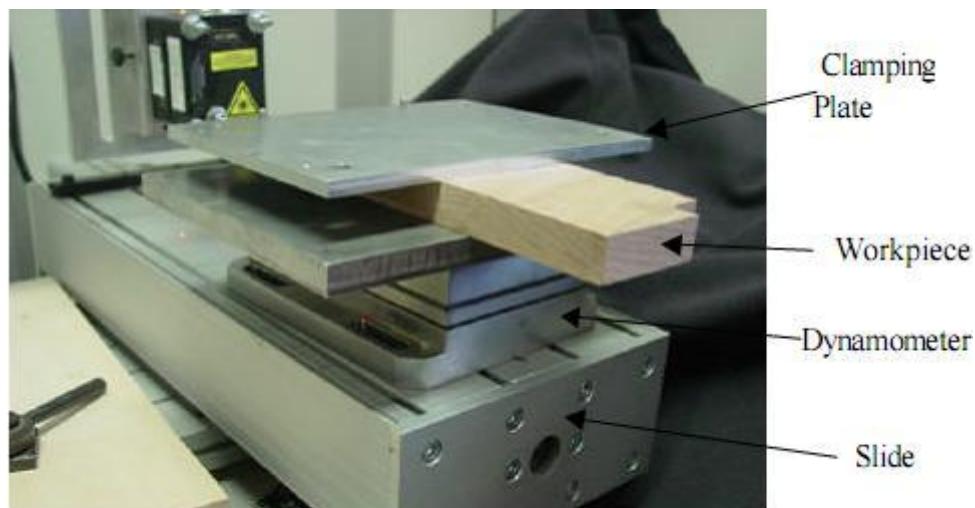


图 2.8：木材加工安装

摆动线切割采用两种不同类型的切割方式：纵切是沿着纹理方向运动，如图 2.9(a)；横切时沿横穿纹理方向切割，如图 2.9(b)。

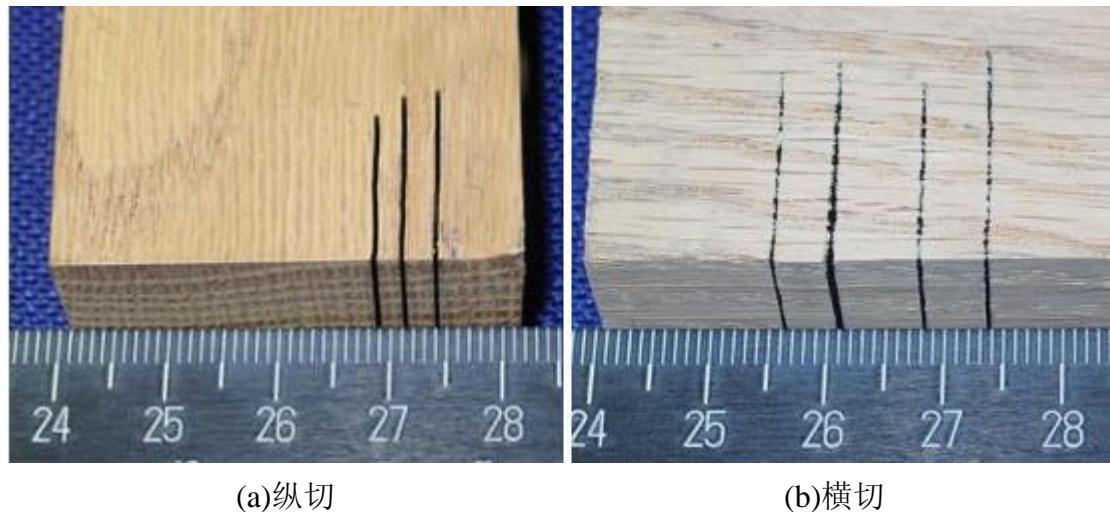


图 2.9：木材切割的两种类型

这个实验用来检测表面粗糙度和分析切削力。所有实验中使用的是一根 Well 的固着磨料金刚石线，它通径是 0.5mm，金刚石颗粒尺寸为 $64\mu\text{m}$ 。在松木和橡木样品中进行了一系列基准切割测试，基准测试矩阵如下表所示。

表 2.5：摆动切割基准测试

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed (m/s)
Oak	Rip (with guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5
Oak	Cross Cut (with guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5
Pine	Rip (with guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5
Pine	Cross Cut (with guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5

然后从基准测试矩阵延伸一系列测试。第一套测试是观察靠近切割样品的线导轮的影响。导轮间间隔为 112mm，它们确保线锯在切割过程中不偏离方向。线导轮如图 2.10 所示。去掉线导轮的影响测试如表 2.6 所示。

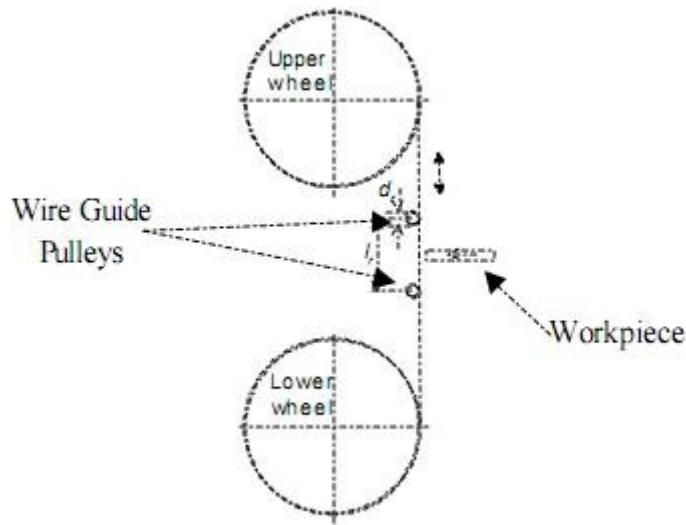


图 2.10: 摆动切割和线导轮

表 2.6: 摆动切割线导轮测试矩阵

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed
Oak	Rip (without guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5
Pine	Rip (without guides)	0.5	0.5, 1.0, 1.5

第二套测试设计来观察进给速度对切削力和表面粗糙度的影响。第二套测试选用横切方式，在松木和橡木上各使用 3 种不同的线速度进行测试。测试如表 2.7 所示。

表 2.7: 摆动切割进给速度测试矩阵

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed (m/s)
Oak	Cross Cut (with guides)	1	0.5, 1.0, 1.5
Pine	Rip (with guides)	1	0.5, 1.0, 1.5

2.3.3 环形线切割实验设计

Well Diamond Wire Saws Murg 型号环形金刚石线切割机器安装有 Isel Automation 线性装置、测力仪和数据采集系统滑块，如图 2.8 所示。环状线切割有非常高的线速度使得它可以承载更高的进给速度。在各种进给速度下进行了一系列基准测试，表 2.8 的测试矩阵展示的是设计的基准测试。

表 2.8: 环形线切割基准测试矩阵

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed (m/s)
Oak	Rip	0.5, 1, 1.5, 2	20
Oak	Cross Cut	0.5, 1, 1.5, 2	20
Pine	Rip	0.5, 1, 1.5, 2	20
Pine	Cross Cut	0.5, 1, 1.5, 2	20

两组测试用来比较基线数据。第一组测试使用少量的冷却液冷却线锯，解决当金刚石线切割时金刚石线会变热导致的问题，切割产生的摩擦产生大量的热会导致线过早损坏。这组测试设计采用非常少的冷却液滴在正在切削木头的线锯上。测试参数如表 2.9 所示。

表 2.9: 环形切割横切冷却液测试参数

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed (m/s)
Oak	Cross Cut (with coolant)	0.5, 1, 1.5, 2	20
Pine	Cross Cut (with coolant)	0.5, 1, 1.5, 2	20

第二组测试设计用来观察极限进给速度，它用来探索环形线切割加工的极限进给速度。由于木材加工时进给速度本身的极限，进给速度是木材加工的最重要因素。表 2.10 展示了进给速度测试的一组参数。

表 2.10: 环形切割横切进给速度测试参数

Workpiece	Cut Type	Feed Speed (mm/s)	Wire Speed (m/s)
Pine	Cross Cut	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4	20

3. 线切割加工力学

开发了一种模型用来分析 Diamond Wire Technology Millennium Series 摆摆切割固着磨料金刚石线锯设备上摆运动的运动学和切割力学。这个模型展示了金刚石线切割过程中力的平衡性。

3.1 摆摆运动学

使此次研究使用的金刚石线切割机器的支架发生摇摆运动的机械装置如图 3.1 所示。用来引导支架沿一个点摆动的圆弧形狭槽上的两个栓标记为 A，如图 3.1 所示。一台步进电机驱动齿轮来带动圆齿条旋转整个支架组件，支架组件包括线轮、两轮间的这段线和切割过程中 A 点周围的电容传感器。

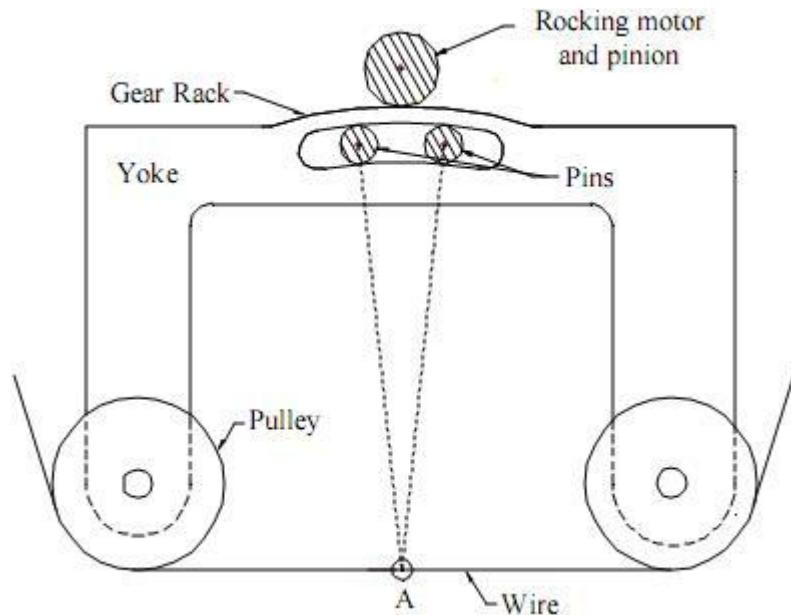
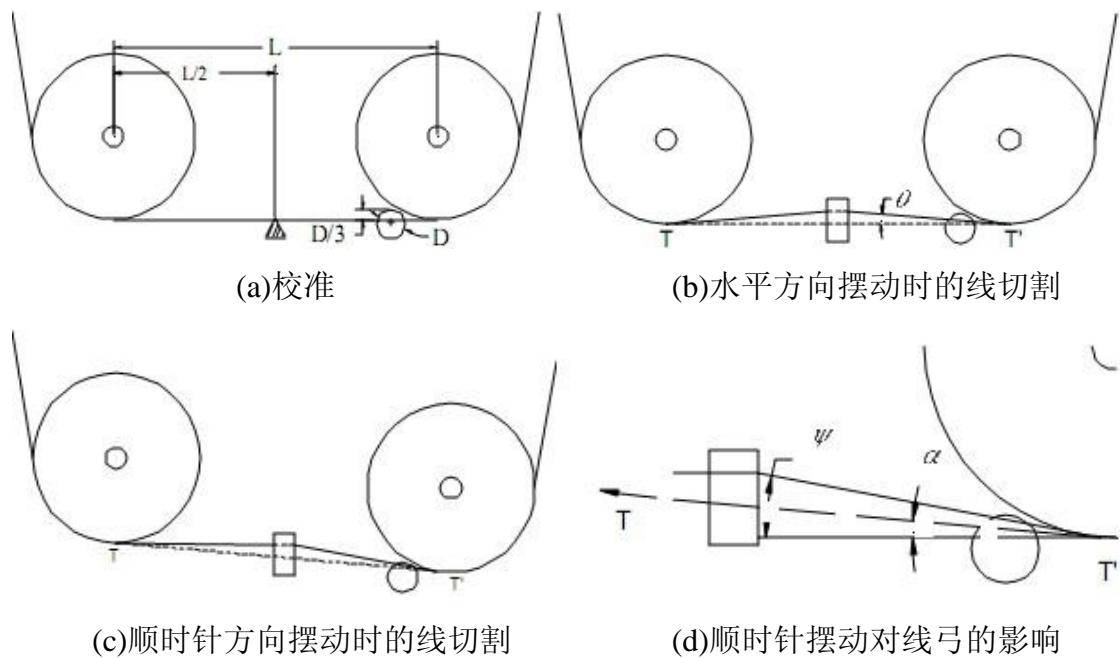


图 3.1：支架摇摆装置的运动学

一个电容传感器监测摇摆运动，它使用一个校准过的输出电压监视摇摆运动。图 3.2 演示了机器如何校准和线及轮的运动。



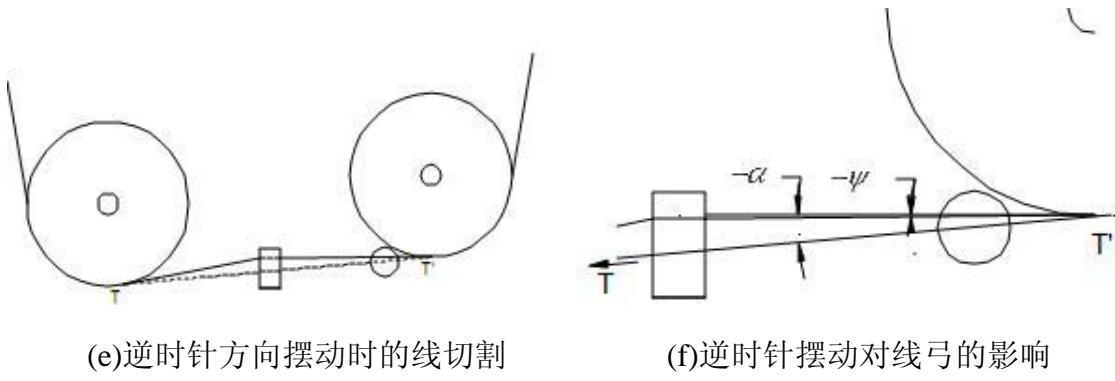


图 3.2: 电容线弓传感器的设置和摇摆运动对线弓传感器输出的影响

3.2 线切割力平衡

假设切割发生在一个狭窄的区域可以简化为一个接触点。如图 3.3 所示，线上切割点有四个力起作用，标记为 B 。 F_T 和 F_N 是切削力，线的张力 T_1 和 T_2 反方向起作用。假设在小摆动角度下，图 3.3 所示的两个线弓电容传感器用来测量 ψ_1 和 ψ_2 ， $\psi_1 = \theta_1 + \alpha$ ， $\psi_2 = \theta_2 - \alpha$ 。 θ_1 和 θ_2 是两侧的线弓角度。

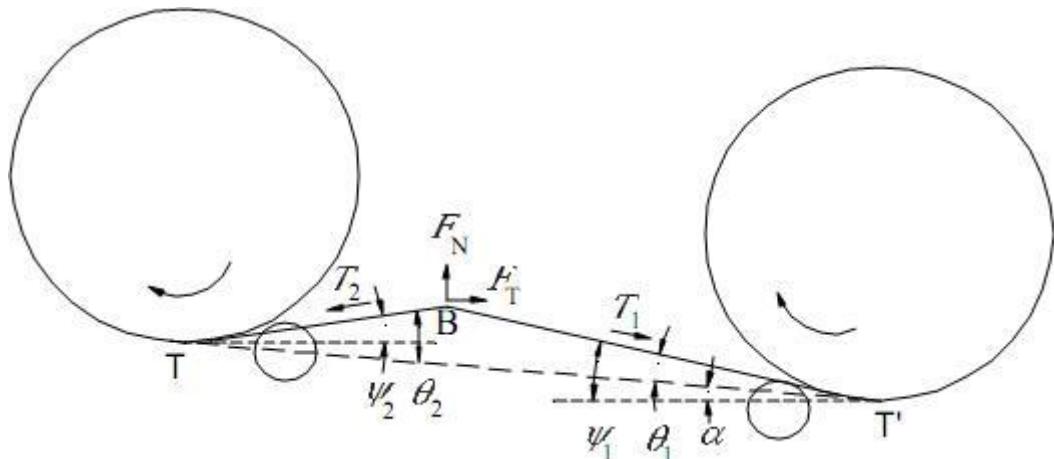


图 3.3: 线切割加工的受力图

B 点力平衡公式是：

$$\sum F_x = F_T - T_2 \cos\psi_2 + T_1 \cos\psi_1 = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = F_N - T_2 \sin\psi_2 - T_1 \sin\psi_1 = 0 \quad (2)$$

公式(1)和(2)的 6 个变量之中， F_T 、 F_N 、 ψ_1 和 ψ_2 是可以测量的。A 是测力仪，可能需要测量 F_N 。线的张力 T_1 和 T_2 可以由方程式(1)和(2)因式分解出来。

$$T_1 = \frac{-F_T \sin \Psi_2 + F_N \cos \Psi_2}{\cos \Psi_1 \sin \Psi_2 + \cos \Psi_2 \sin \Psi_1} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{F_T \sin \Psi_1 + F_N \cos \Psi_1}{\cos \Psi_1 \sin \Psi_2 + \cos \Psi_2 \sin \Psi_1} \quad (4)$$

当切割点 B 位于两轮线段中间时, 如图 3.2(a)和 3.2(b)所示, $\Psi_1=\theta_1+\alpha$, $\Psi_2=\theta_2-\alpha$, 只需一个线弓传感器。

4. 单晶 SiC 切割实验 I 结果

这个章节研究一台固着 Diamond Wire Technology Millennium Series Slicing Saw 切割单晶 SiC 时的切削力和表面粗糙度, 研究向下进给速度、线速度和摆动频率的影响。扫描电子显微镜用来真实地描述表面粗糙度以及和表面轮廓仪测量的结果进行比较。

4.1 数据采集

总之, 此次研究使用的数据采集系统共测量两种信号。在测力仪三个可用的力的信道中, 只有 1 个信道测量每次切割使用的切向力 F_T 。法向力从电容传感器信号获得, 通过将输出电压转换为力。力通过使用线弓传感器上的刻度校准和测力仪上的法向力信号进行计算。图 4.1 是记录的力向图。下面的章节会对每个信号做下简要说明。

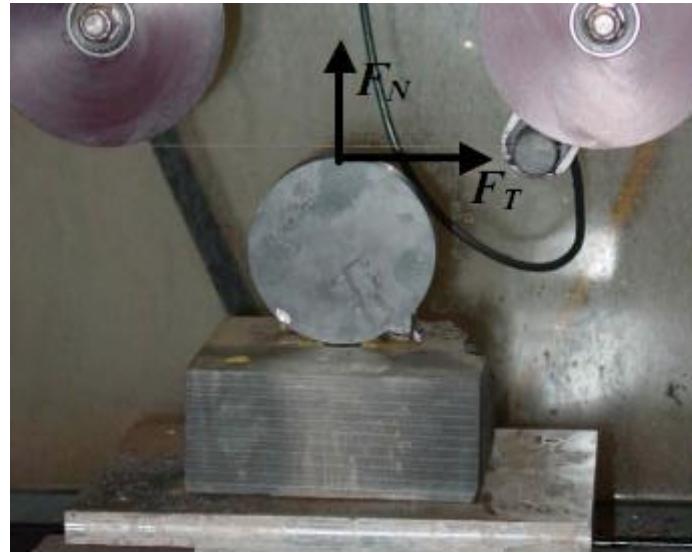


图 4.1：切削力方向简图

4.1.1 切向力

使用测力仪输出的电压计算切向力 F_T 。获得 F_T 的第一步是校准测力仪。一个标尺连接到测力仪上，然后使用 5、10、5 和 0 磅的力。校准过程中产生的曲线如下图所示。

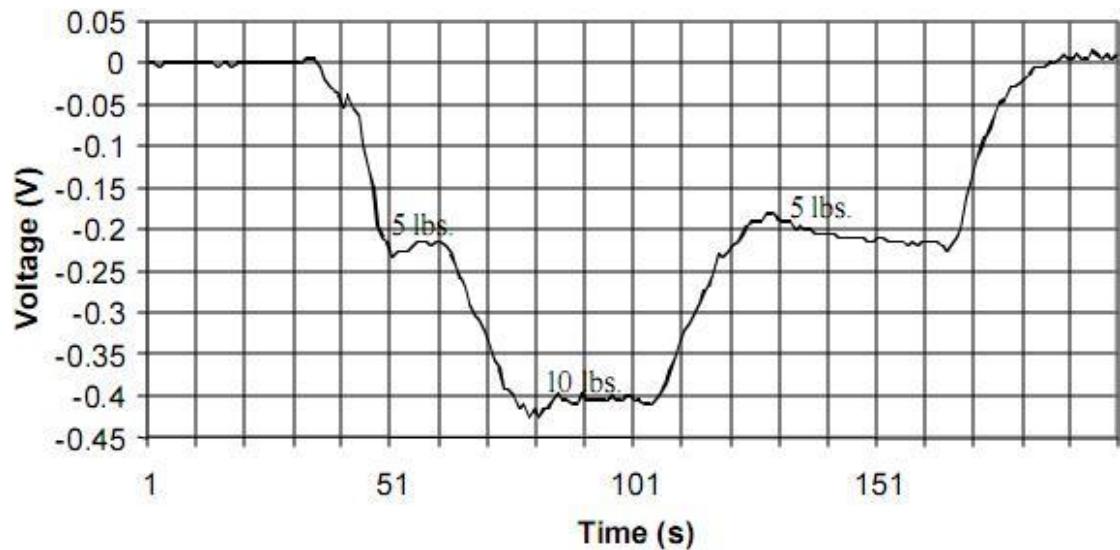


图 4.2： F_T 校准曲线

在力曲线图产生一个校准系数后，每个重量的平均电压增益计算出来，然后一个最终的校准系数确定为 $0.009125(V/N)$ 。这个系数设置在 Labview 程序中，Labview 程序记录测力仪上力的数据和给数据提供校准系数。第一个单晶 SiC 测

试使用的扫描速率是 1000 (point/s)。力的变化不快，因此这个速率考虑重复采样。

原始数据输入数据分析工具 DadispTM。一个移动平均数用来排除电荷放大器和信道间串扰产生的噪音。为得到移动平均数重复采样数据允许每 1500 个点取其平均值。图 4.3 展示的是原始数据和线性平均后的数据。

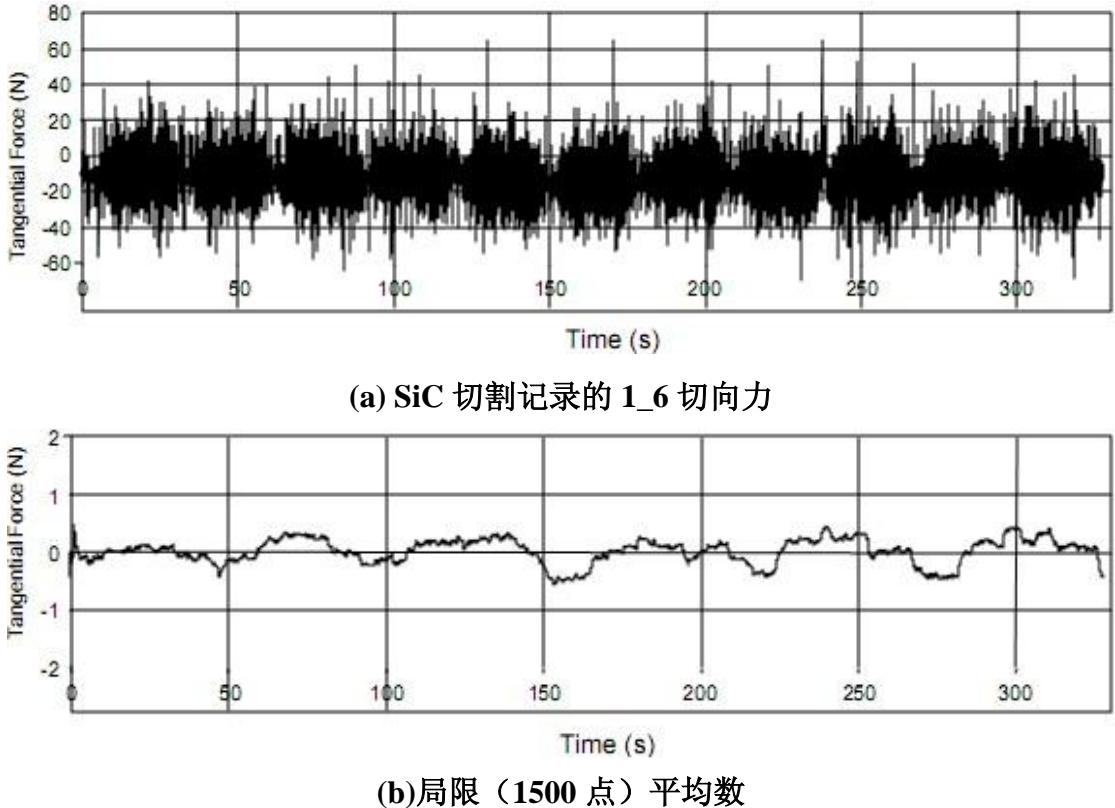


图 4.3：测量和局部平均 F_T

线性平均后切向力转化为比力，这个力和压强相似。无论切削长度多长，力转化成比力后每个力都可进行比较。力和比力的转换见方程式(1)。最终切割数据为：向下进给速度为 0.127mm/s、 $t=50\text{mm}$ 和 $W_D=0.33\text{mm}$ 。

$$f_T = \frac{F_T}{t * W_D} \quad (1)$$

4.1.2 法向力

由于法向力 F_N 偏小，因此很难获得。一台压电式测力仪不能长时间识别一

个不变的力。压电式测力仪用来识别变化的力，而法向力相当稳定。由于线锯方向的改变，切向力频繁的改变，然而线一直往下移，生成一个相当稳定的法向力。力非常小，产生一些问题，金刚石线锯上的线弓电容传感器用来解决这个问题。第一步是当线弓传感器校准进行的时候记录下测力仪上读出的数据。这个方法类似于[10]中提到的方法，不过在转换成力的时候不需要将输出电压转换成角度。

图 4.4 展示了测力仪上的法向力和电容传感器的输出电压。

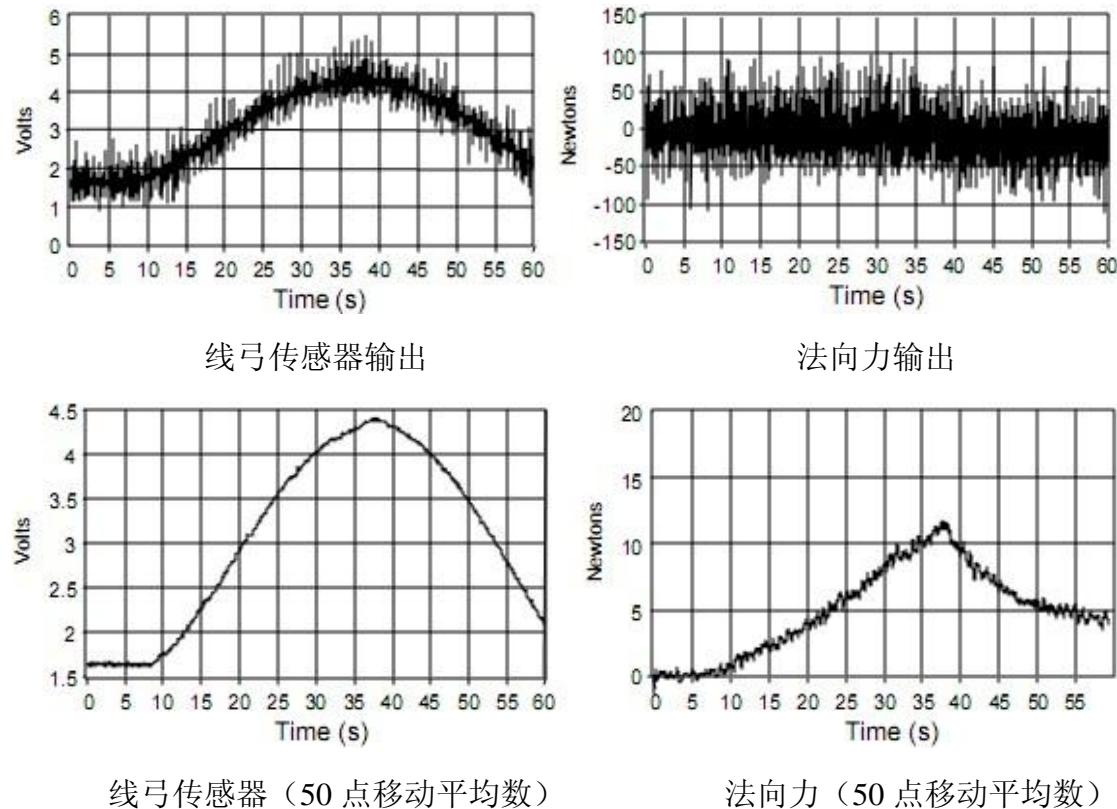


图 4.4：线弓传感器校准图

信息显示电压和力正相关。输出数据产生了一条校准曲线，可用一个三项式表示，校准曲线图下图 4.5 所示。

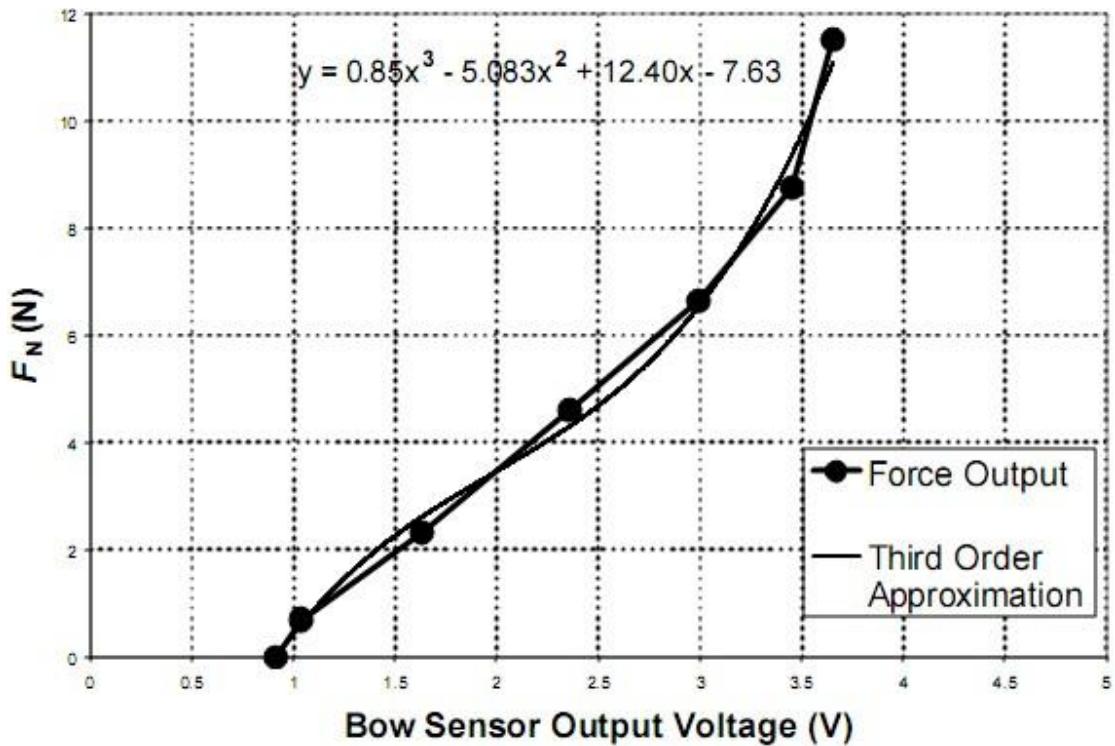
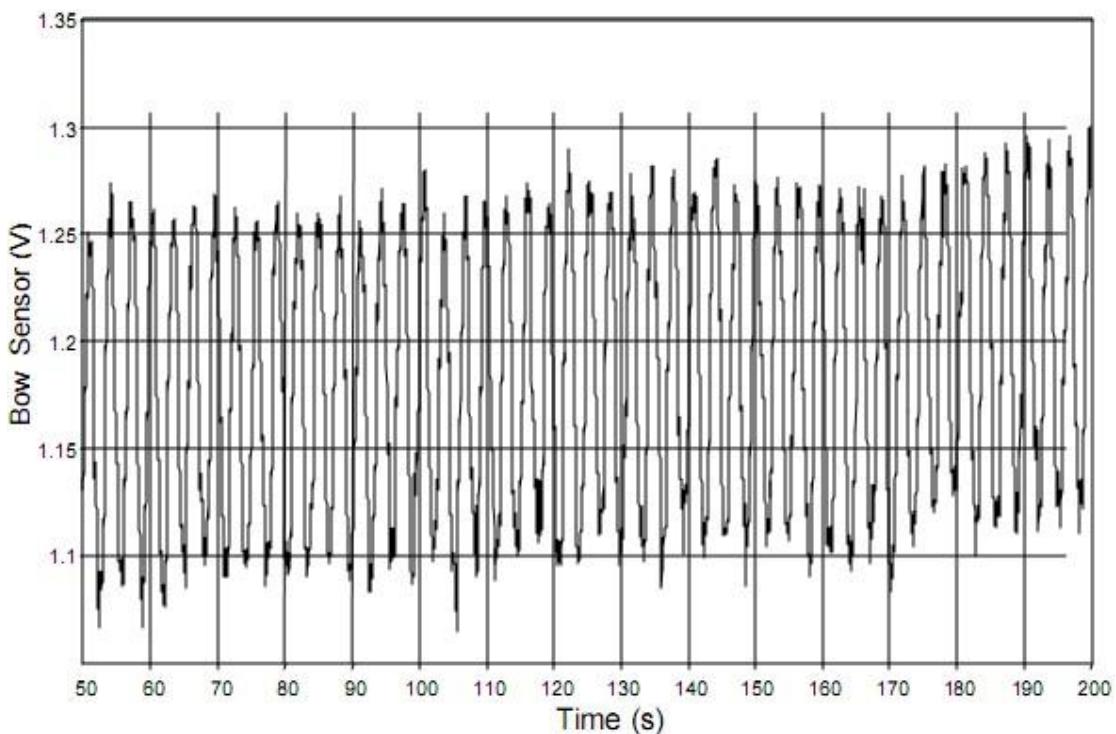


图 4.5: 线弓传感器电压和力转换图

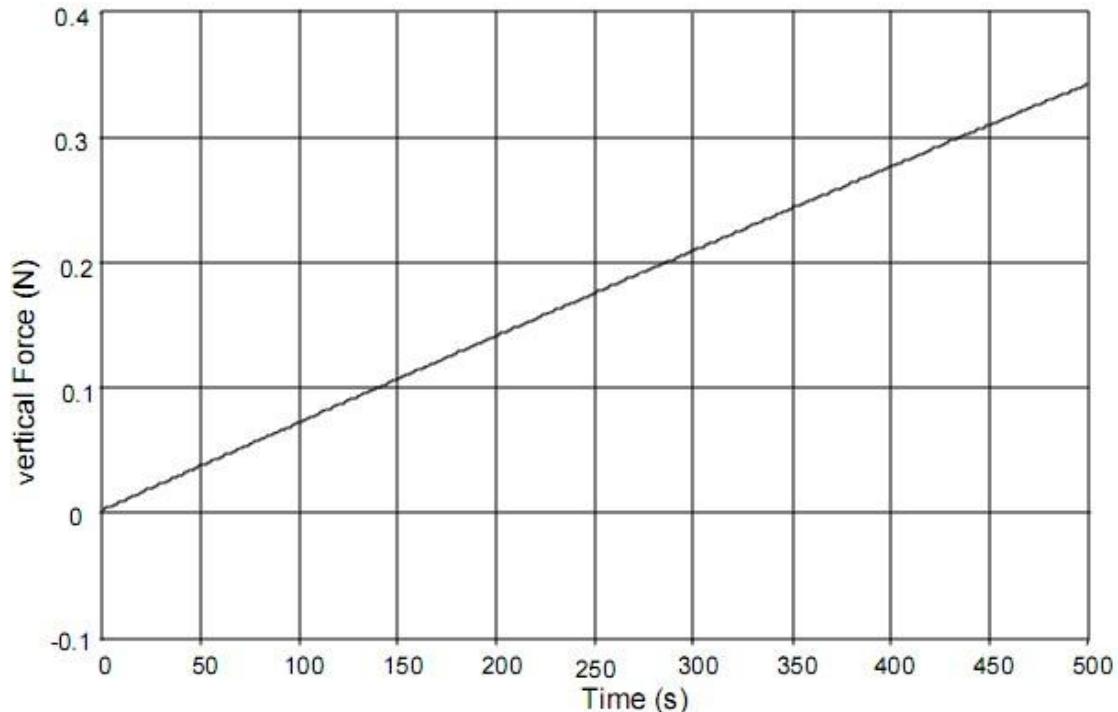
由于线切割是摇摆运动，线弓电容传感器输出的是正弦曲线；由于加工时力的增大，它也有线性的趋势。图 4.6 展示了以 0.15Hz 摆动频率加工时电容传感器的输出。



局限 (50 点) 平均

图 4.6: 摆摆运动加工时线弓传感器输出

获得法向切削力的最后一步是排除线切割揆摆运动产生的正弦运动。当去掉揆摆运动时，由于法向力基本上一直在增大，数据成正弦趋势。最终的数据见下图 4.7。



线挠度转变为法向力

图 4.7: F_N 最终输出

线性平均后法向力转化为比力。这个力和压强相似。无论切削长度多长，力转化成比力后每个力都可进行比较。力和比力的转换见方程式(1)。最终切割数据为：向下进给速度为 0.127mm/s。

$$f_N = \frac{F_N}{t * W_D} \quad (1)$$

4.2 切削力和表面粗糙度结果

此次测试的主要目标是检查平边单晶 SiC 片的切削力和表面粗糙度。向下进

给速度是变化的，实验设置中已讨论过。测试参数见表 2.2。所有数据处理完成后，表面粗糙度检测出的结果如图 4.8 所示。

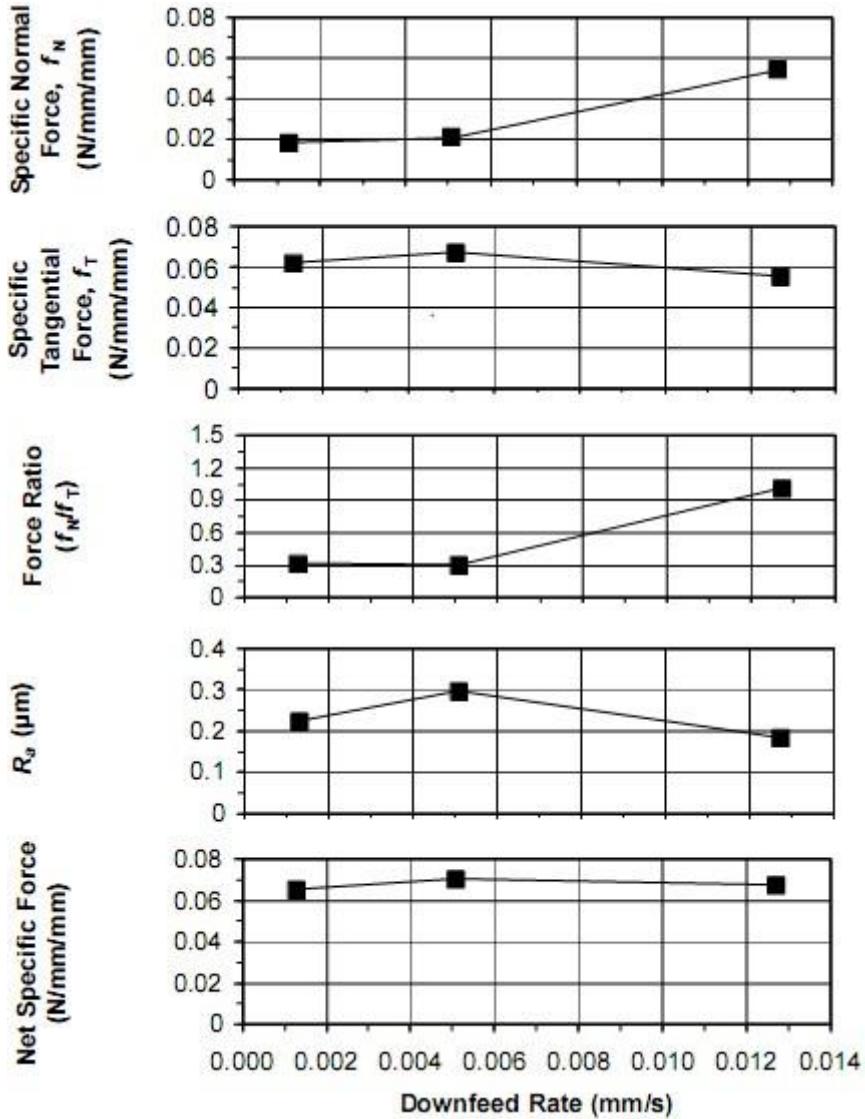


图 4.8：实验 I 切削力和表面粗糙度结果

法向比力 f_N 如预期一样是变化的。向下进给速度增加， f_N 增大。在进给速度 0.0013mm/s 下的法向切削比力大约有 $0.018N/mm^2$ 。进给速度增加， F_N 也增大。最快的进给速度有最高的法向比力。最终的法向比力是 $0.0540 N/mm^2$ 。向下进给速度增大 10 倍，法向比力增大 3.5 倍。

切向比力 f_T 和法向比力相比变化的形式不同。当进给速度增加时，切向比力开始时确实增大，但切割到最后时随着进给速度的增加而减少。切向力仅仅在 8% 的范围内改变，但它有和传统逻辑相反的趋势，这个趋势好像是由一些不同

的环境因素导致的。最明显的是最开始切片时的进给速度时 0.0127mm/s，此时切割的切向力最小，不符合传统逻辑。可能的原因是此时切割冷却液有更好的入口使得切削力降低。接着切割远离顶部，使得相同体积的冷却液更难到达切割表面润滑和冷却线锯。图 4.12 展示了冷却液系统，它可以解释切向力现象。

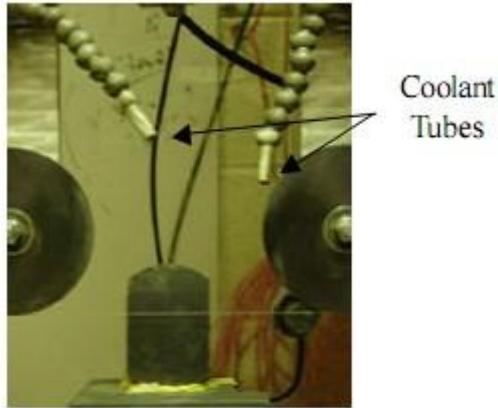


图 4.9：冷却液传送系统

力比也是切割的一个重要部分。力比范围是 1~4，与氧化锆 CBN 磨料的力比 3~15[51]、M2 工具钢 CBN 磨料的力比 3~10[51]、氮化硅 CBN 磨料的力比 4~9[52]、氮化硅金刚石磨料的力比 5~5.5[53]、金刚石线切割 SiC 和 TTZ 泡沫塑料的力比 2~22 相比，此次研究中的力比是更低，这预示着和传统磨削相比它有更高的材料去除率。

表面粗糙度非常有趣，它看起来好像和切向比力有相同的趋势，每个点和切向比力恰好吻合。这是个非常重要的发现，它有利于实施第二轮测试。Ra 值在 0.18 μ m 到 0.29 μ m 间变化。高进给速度看起来对表面质量没有影响。从冷却液影响切向力之后，表面粗糙度结果显示了切割时冷却液的重要性。和各种不同方法相比，数据非常重要。在使用游离磨料金刚石砂浆切割时 Ra 的工业标准是 0.1 μ m，测试出的数据非常接近这个值显示了这项技术的潜力。

比力合力仅仅展示力大小的趋势，随着进给速度的增加，它有增大的趋势。合力是总量的一个很好的指标，当单独观察分力时它可能被轻易地忽略掉。

4.3 扫描电子显微镜表面特征

扫描电子显微镜是视觉呈现加工产生 pulverization 的表面粗糙度的一项很好

的方法。只有少量主要类型的单晶 SiC 表面缺陷是明显的。缺陷的第一种类型叫做滞止线，它产生于金刚石线方向反转时，如图 4.10(a)所示。由于线锯从来不停止向下进给，因此每当线锯停止和反转方向时都会产生一个额外的力，在线反转方向的时候，片子上都会有一根清晰可见的线痕；第二种缺陷是显微裂纹，如图 4.10(b)所示，这在任何极其易碎的材料加工时经常出现；最后一种缺陷是表面破碎，如图 4.10(c)所示，这个类型的缺陷是表面的深层次损坏，材质明显破碎。

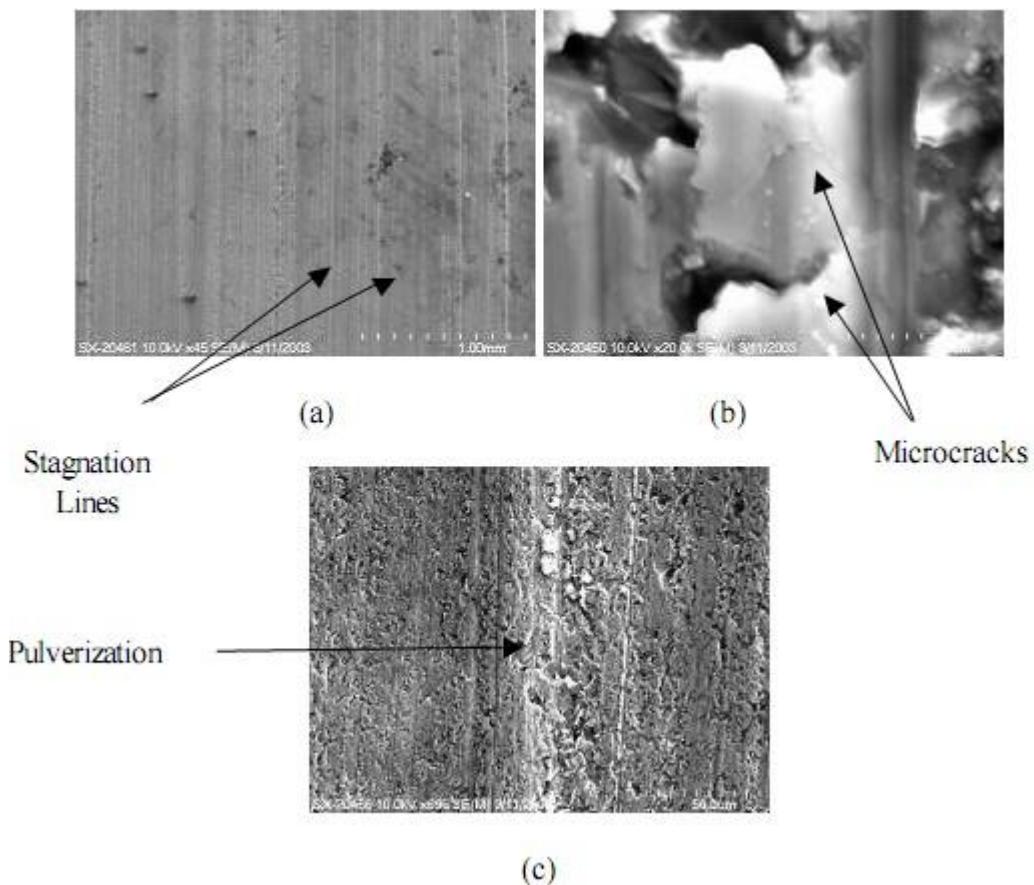


图 4.10：缺陷种类特征 SEM 图

滞止线间距随着向下进给速度和线锯长度的改变而变化。线锯长度在测试中保持不变，所以只有进给速度影响间距。图 4.11(a)中字母 G 展示了滞止线的间距，滞止线间隔 0.021mm。线锯长度是 185.93m，线速度是 10.16m/s，因此线锯每 18.3 秒改变下方向。向下进给速度时 0.00127mm/s，将进给速度和时间相乘得到一个理论的滞止线间距为 0.023mm，此间距接近于真实的滞止线间距，但平均

间距比理论的稍微小点，这导致随着时间的过去力的增大。图 4.11 展示了片子的视觉特征。

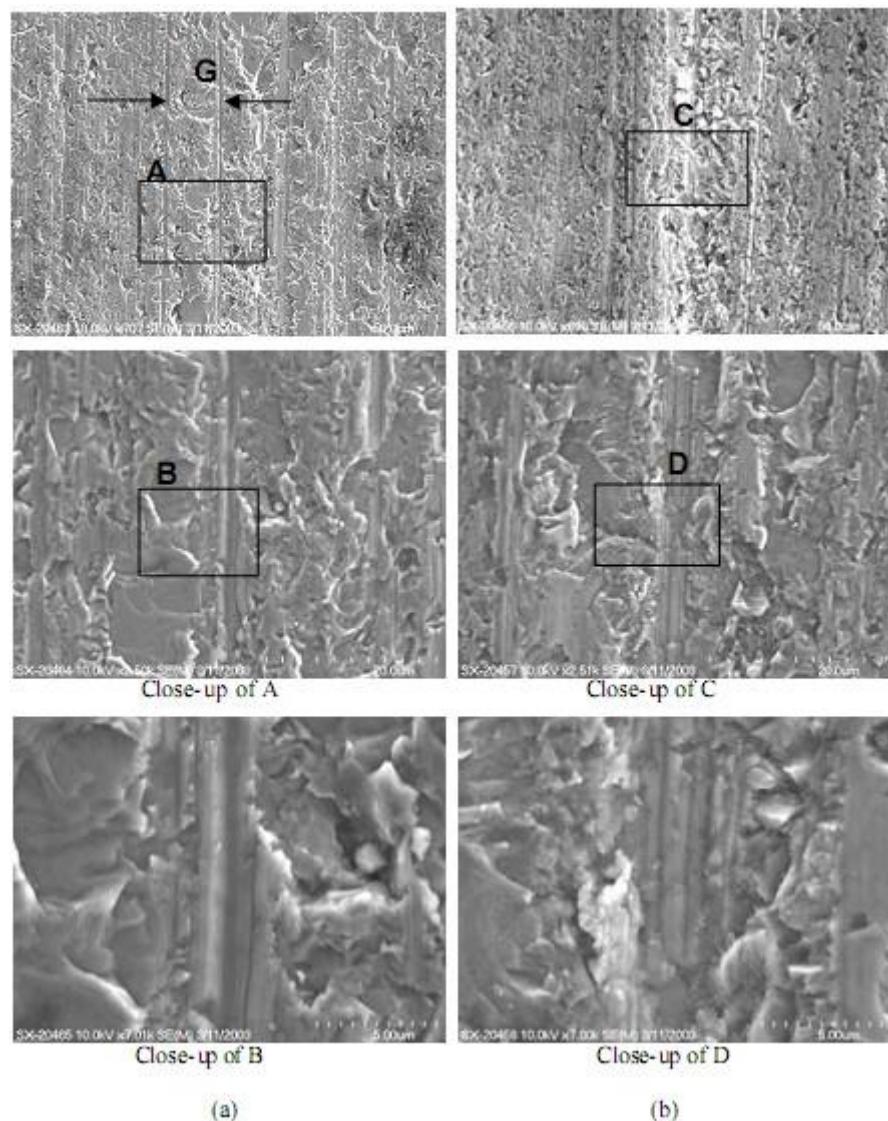


图 4.11：以 (a) 0.00127mm/s、(b) 0.00508mm/s 切割 SiC 表面的 SEM 图

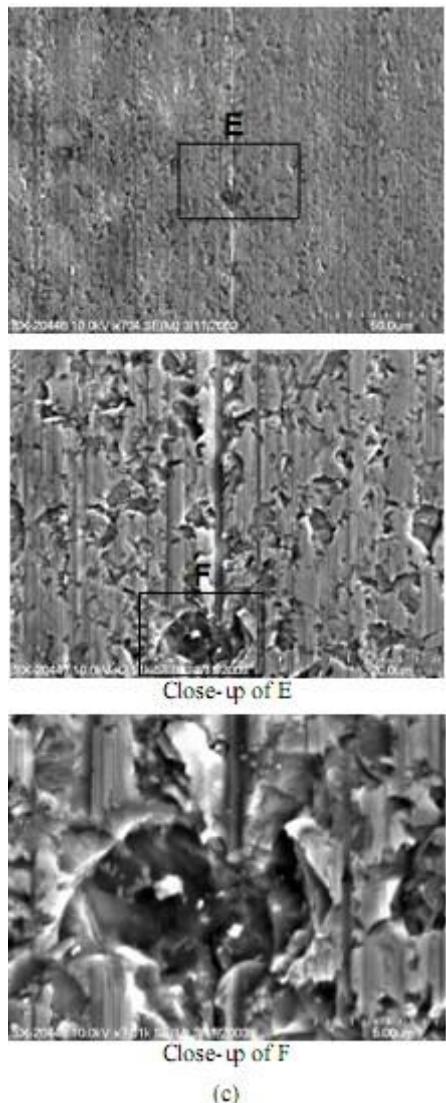


图 4.12: 以(c) 0.0127mm/s 切割 SiC 表面的 SEM 图

图 4.11(a)展示了在三个进给速度中速度最慢的一个造成的滞止线缺陷。一系列图片展示了一些显微裂纹和不多的表面破碎。由于在较低的进给速度下线锯方向反转了很多次，故滞止线间距非常小。

第二组显微照片展示了 0.00508mm/s 进给速度下的缺陷。不同之处在于滞止线非常明显，由于进给速度更快，滞止线间距更远，但是有大量的破碎和显微裂纹区域。缺陷深度更大。

图 4.11(c)展示了 0.0127mm/s 进给速度下的缺陷。这个速度下的缺陷非常明显。最大的不同是缝隙的尺寸和破损的深度。最后一张聚焦图显示一大块 SiC 严重损坏，尺寸大约是别的缺陷的 2 倍。

总之，进给速度影响圆片的缺陷。进给速度最高，滞止线间距更大但损坏更严重，很难找到其中的平衡。

5. 单晶 SiC 加工实验 II 结果

在第一个实验后切向力 F_T 显然是表面粗糙度的驱动力。第二组测试用来检查新线、摆动频率和线速度对表面粗糙度的影响。由于切向力是所有表面粗糙度的决定因素，因此这个实验中只检测切向力。因为线切割技术的最终用途是加工完成片，所以这项实验使用的是普通的圆片。实验中使用新线来研究线损和新线破断力。

5.1 数据采集

第一项测试显示 F_T 是最重要的力，因此这组实验中只研究 F_T ，这组实验只测量切向力。测量方法和 4.4.1 章节描述的一样，由于加工过程中片子的宽度在改变，所以不计算比力。下图展示了第二个实验中一个独特的切向力。

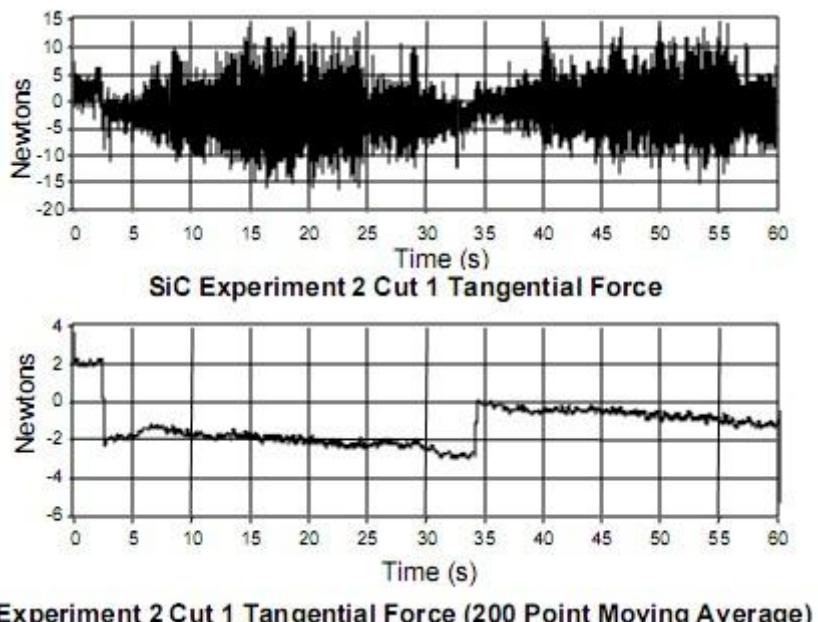


图 5.1：独特的切向力示意图

5.2 切削力和表面粗糙度结果

加工圆片时必须进行 10 项测试，它们是 3 种不同的线速度和 3 种不同的摆

动频率，另一项测试是无摆动频率的基准切割。表 2.4 展示此次测试的工艺参数。在所有数据处理完成后，下表列出了表面粗糙度结果。

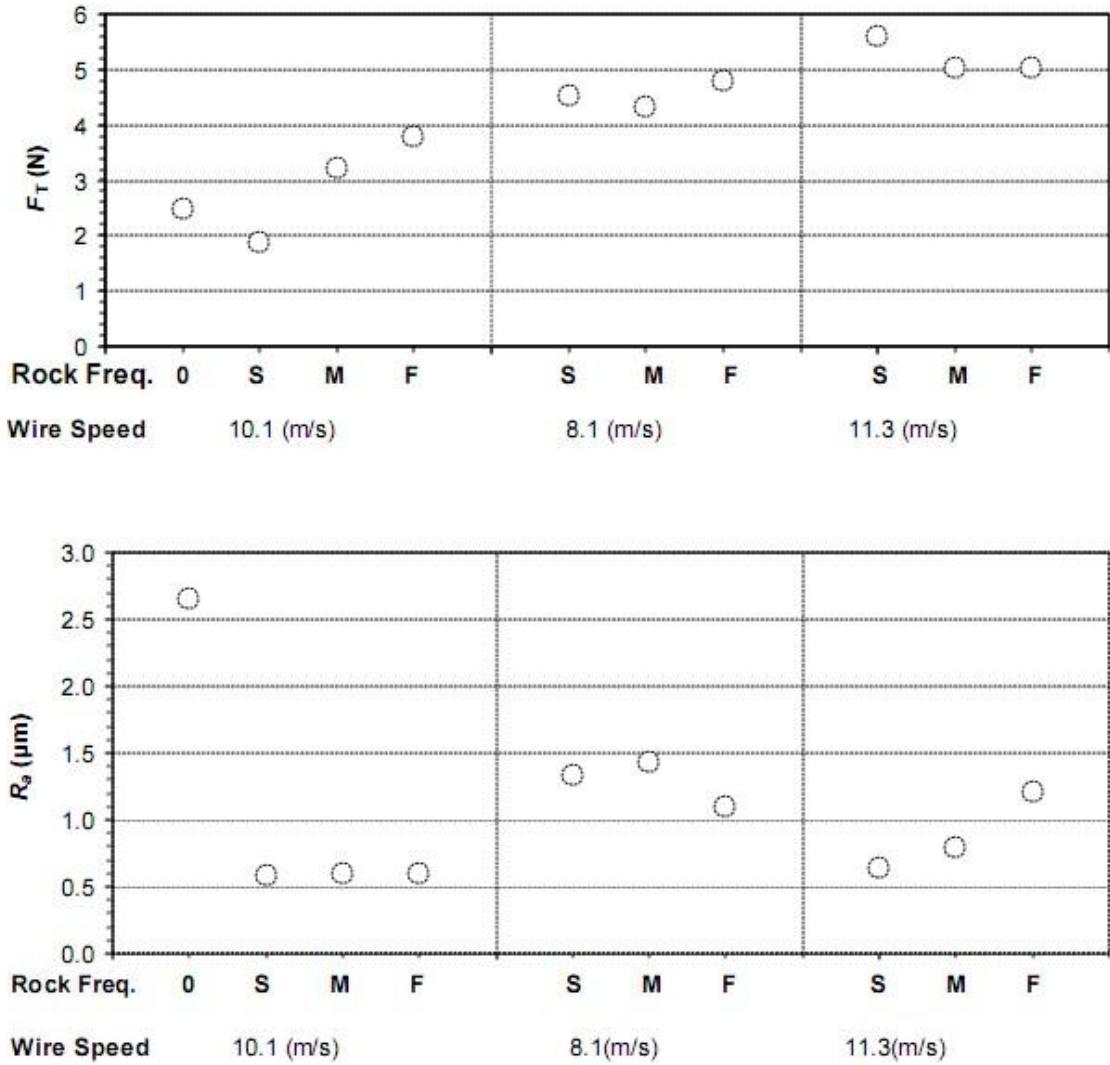


图 5.2：单晶 SiC 实验 II 结果

如上的力图展示了线开始工作的过程。有一个金刚石磨料严重磨损的时期，然后在一段时间内趋于稳定。这可以解释为刚开始时力较小，然后随着测试的进行，力在增大。力图的第一个点是无摇摆运动的测试结果，这个点和接下来的切割相比力非常大，证明第三章进行的摇摆运动和运动学分析很有道理。

实验 II 中的线速度是改变的，但影响效果看起来不如线刚开始开始工作的时候。线速度和一些其他参数相比改变不大，这也解释为线速度影响不大。

表面粗糙度结果显示出一些有意思的趋势。第一个趋势是摆动运动严重影响表面粗糙度。没有摆动时 R_a 接近 $2.7\mu m$ ，但摆动时 R_a 最高只有 $1.5\mu m$ 。加工

到片子中间时表面粗糙度最差，这可以解释为冷却液不能很好的到达切割表面。片子中心有最大的表面长度，意味着冷却液不能很好的浸透这个区域。最好的表面粗糙度是 $0.59\mu m$ ，虽然不如第一次测试，但仍可接受。

这个测试总体展示了磨料工作的现象，也展示了摇摆运动对于表面粗糙度的重要性，还展示了摆动频率对力和表面粗糙度没有太大的影响，但摇摆运动对提供一个良好的表面粗糙度非常重要。

5.3 扫描电子显微镜分析

扫描电子显微镜是视觉描述加工表面粗糙度的一个非常好的方法。附录 1 中的 SEM 图展示了 3 种主要的表面缺陷，在 4.3 节也描述过。这 3 种缺陷是滞止线、显微裂纹和表面破碎。图 A.1(b) 和 A.2(a) 展示一个很大的裂缝，但这个裂缝是材料缺陷不是加工导致的。每个实验的试验号和他们对应的参数如表 5.1 所示。

片子缺陷和第一个实验中的缺陷非常相似，所有三种类型的缺陷都有。在某些区域内的缺陷更深，如图 A.2(b) 所示。另一个区域如图 A.1(a) 所示。第一个测试没有摇摆运动，故缺陷总体来说和有摇摆运动的其他区域明显不同。缺陷看起来更糟，整个区域看起来破碎不堪，看起来好像 SiC 是扯掉的，从没有加工过。缺陷总体来说和起初的平边片类型相似，但在某些区域程度不同。

6. 摆动切割木材结果

摆动线切割测试的主要目的是尝试研究切削力和量化表面粗糙度。一个较高速度的切割测试用来演示在更快进给速度下加工的可能性，也研究了一系列导轮对表面粗糙度和切削力的影响。

6.1 数据采集

数据采集系统用来获得切削力数据。这组测试使用力的测量系统，安装有线性进给装置的除外。法向力的计算和单晶 SiC 测试使用不同方法。进给速度比金刚石线切割快得多，因此使用测力仪获得所有力的数据。图 6.1 标出了切削力和

它们的方向。

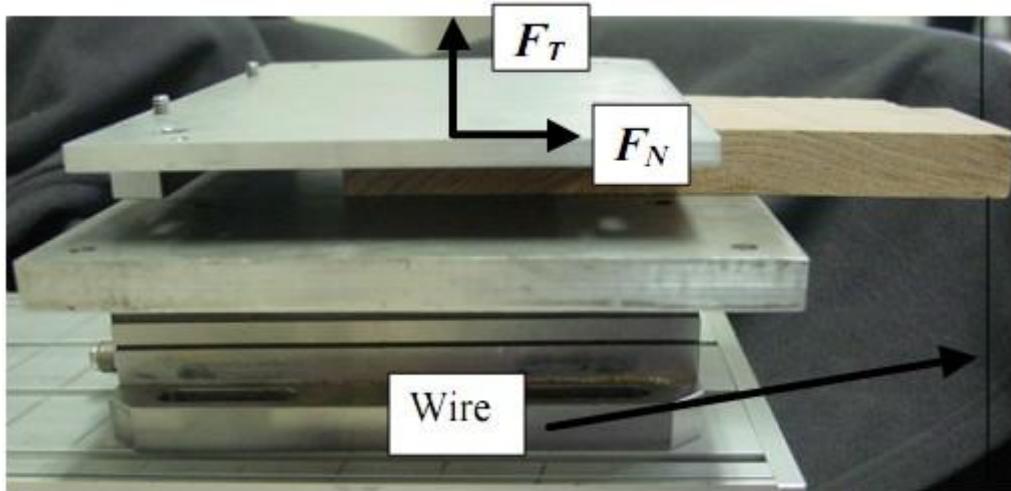


图 6.1：木材加工力的方向

6.1.1 切向力

切向力数据从压电式测力仪上获取，切向力方向和测力仪垂直，它需要计算。测力仪上加载了一系列的重量：0、6、12、18、24、30、36、30、24、18、12、6 和 0 磅。下图展示了由重量产生的电压输出。

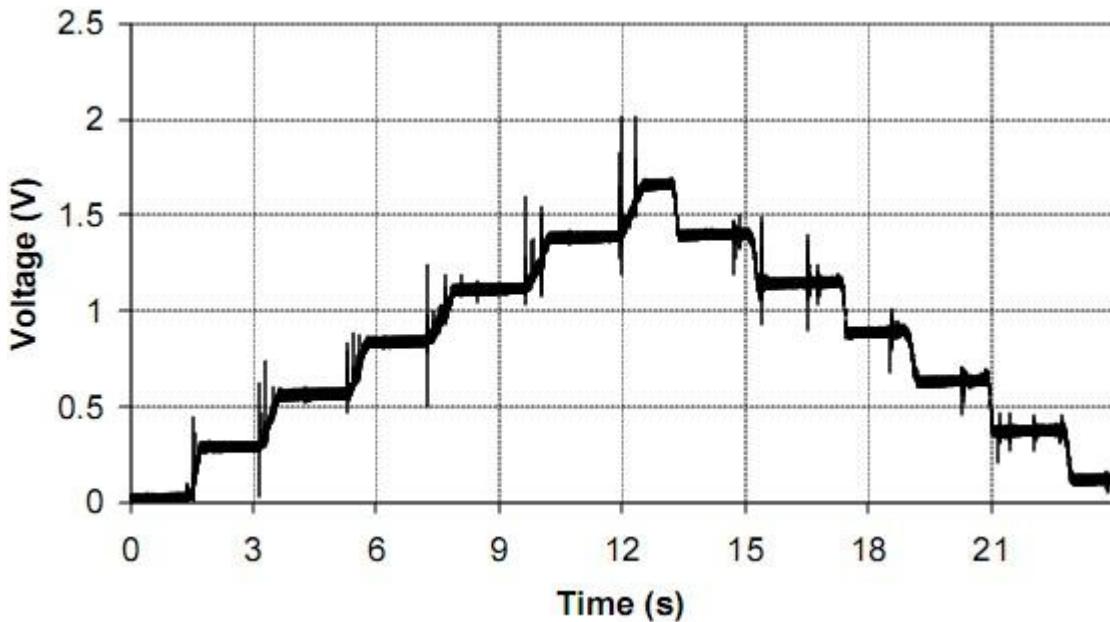


图 6.2：切向力校准

上图的校准因子是 0.009772 V/N 。从上图可看出曲线的末端没有回到 0V ，这是由于电压漂移。当线改变方向时，实验预先改变力，然而力在这点有些稳定，

因此需计算漂移速率。

计算切向力的最后困难是计算电荷放大器的漂移速率。由于电路的设置和压电力计算的类型，每个电荷放大器有它独特的漂移速率。当没有力加载到测力仪上时记录整个数据采集系统输出。下图展示了数据采集系统的整体漂移速率。

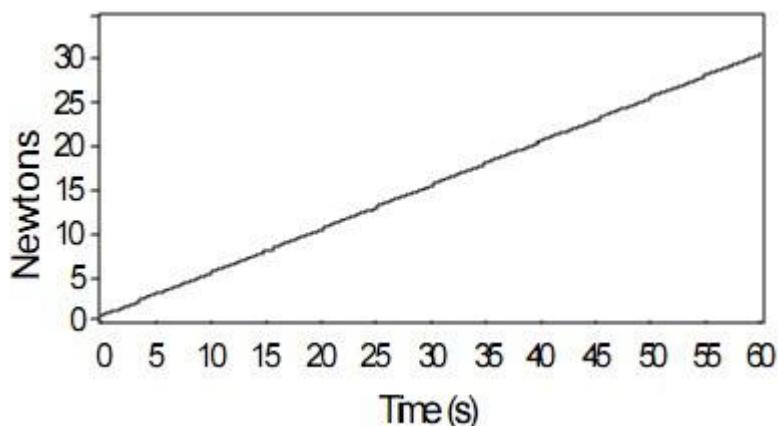


图 6.3: F_T 漂移速率曲线

在漂移速率测定之后， F_T 可以计算出来。再次使用移动平均数消除无用的数据采集系统的固有噪音。

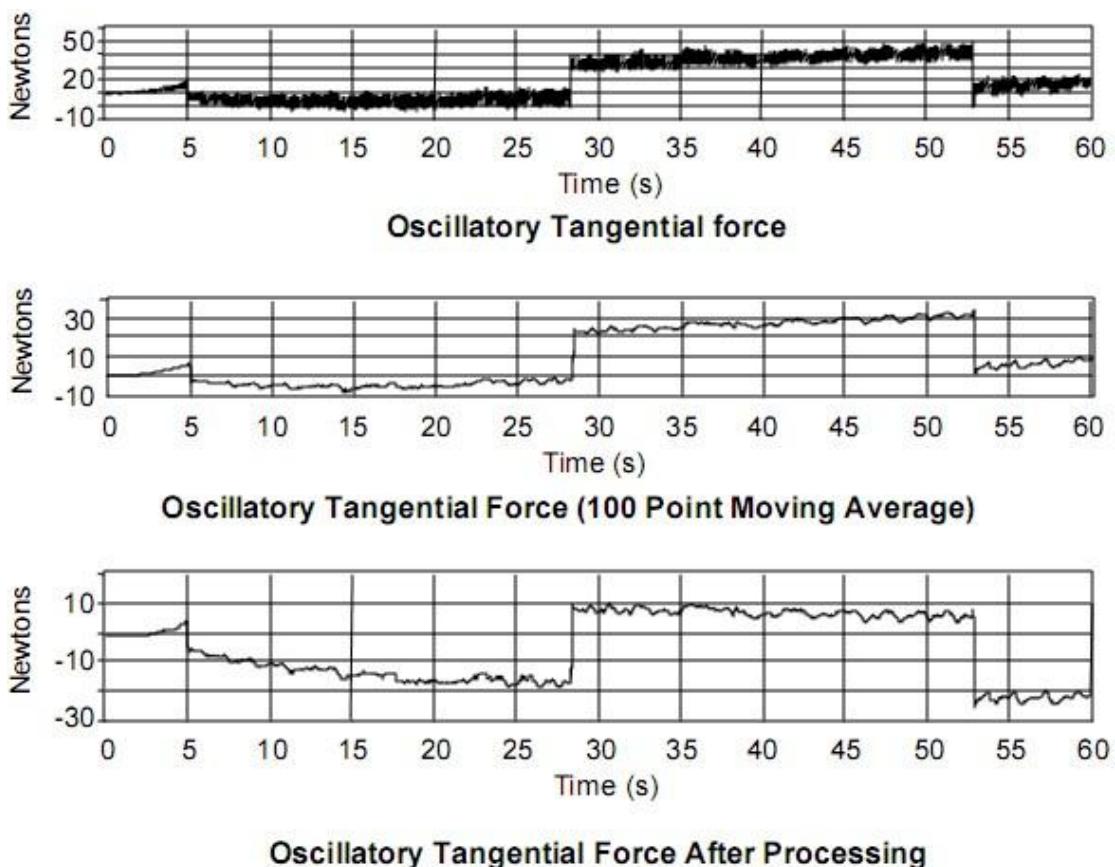


图 6.4: 摆动线切割数据

力分析过程的最后一步是将力转化成比力，方法和 4.1.1 节描述的方法大致相同，唯一的不同是工件厚度 t 为 19.05mm，而线锯直径 W_D 是 0.5mm。

6.1.2 法向力

法向力 F_N 计算方法和 F_T 相似。测力仪也需计算漂移速率，方法和 6.1.1 节相同，图 6.4 展示了第二个实验中一个独特的切向力。

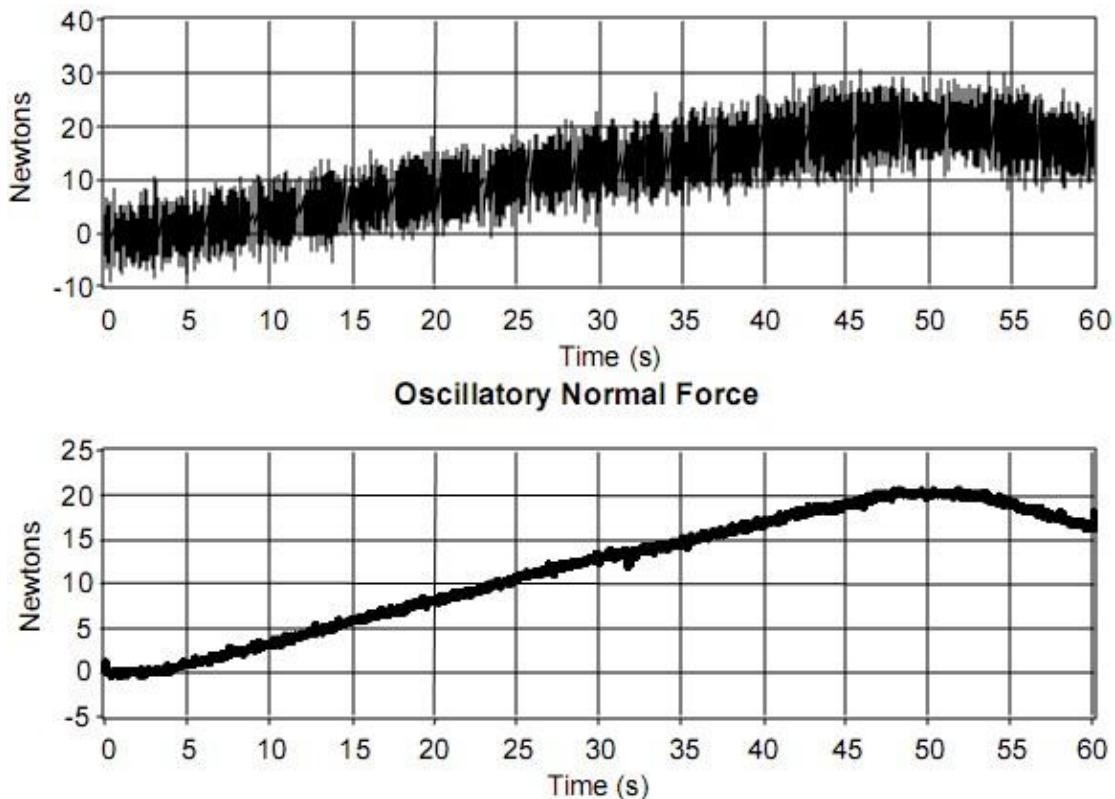


图 6.5: 摆动线切割法向力

切割到达稳定状态时呈平顶峰状态，力在滑块停止运动时逐渐消失。分析过程的最后一步是将力转化为比力，方法见 4.1.1 和 6.1.1 节。

6.2 切削力和表面粗糙度结果

这个实验用来检查进给速度和线速度对切削力和表面粗糙度的影响。一个单

独的测试用来观察进给速度对切削力的影响。机器的能力在测试过程中有局限性，下面的测试矩阵概况了摆动线切割的实验。表 2.5 到 2.7 展示了实验的工艺参数。在所有数据处理完毕后，表面粗糙度计算出来，图 6.6 列出了测试结果。

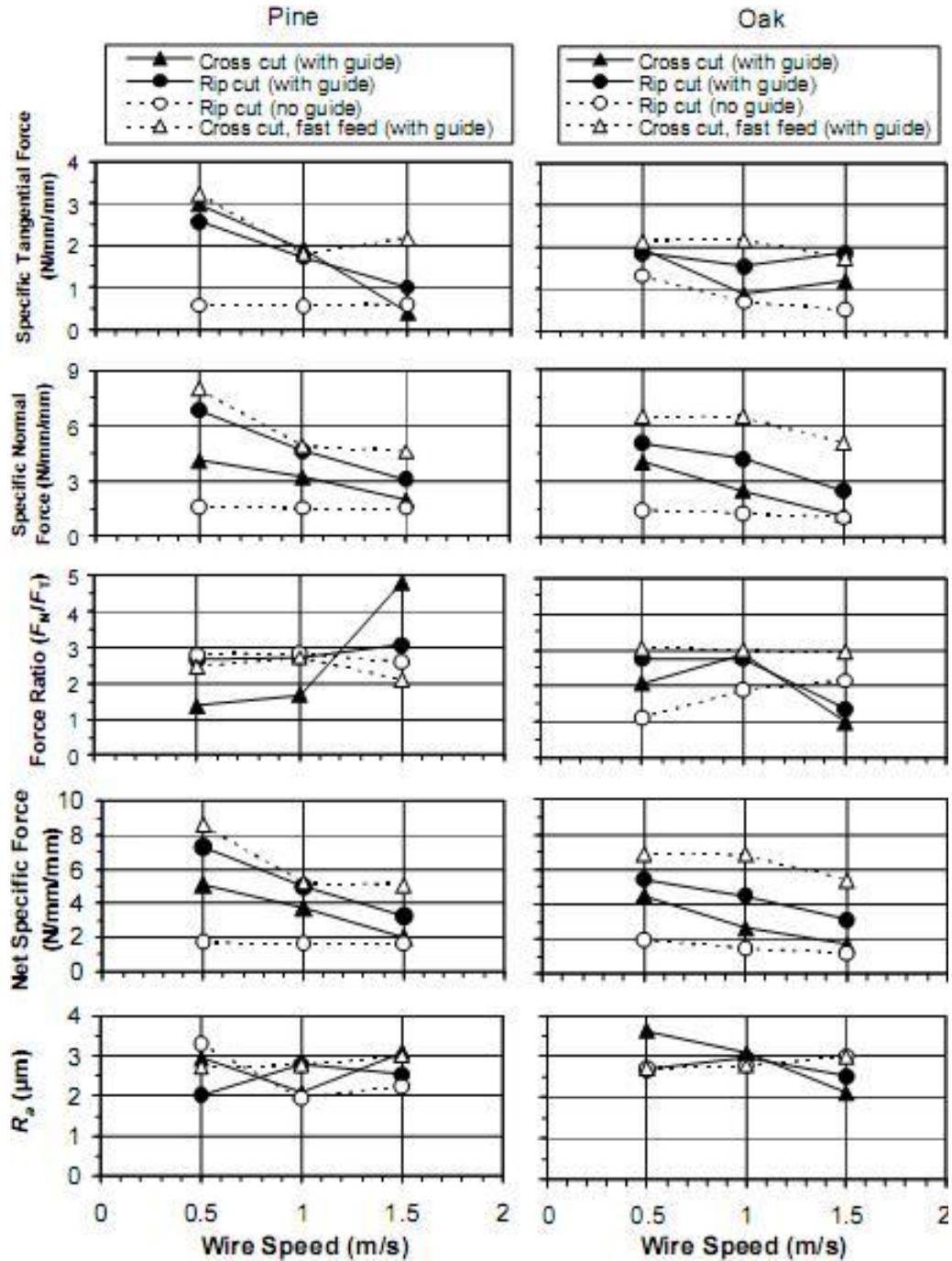


图 6.6：摆动切割切削力和表面粗糙度结果

6.2.1 基准结果

这个实验中的基准测试展示了使用导轮纵切和横切的不同。纵切和横切有非

常相似的切向比力 f_T 。当线速度线性下降时， f_T 也线性下降，松木工件的线性递减趋势更大，两种类型总的来说趋势相似。这在预料之中，和传统理论相符。

法向比力 f_N 的测试结果不一样。当线速度线性上升时，法向比力线性下降。松木横切测试和纵切相比法向比力高出一半。橡木有相似的趋势，但两种切割方式没有太大的差异。 f_N 总的来说要比 f_T 高得多，这是由线速度和进给速度导致的。

力比在变化，但程度不大。松木的力比在 0.35 到 0.65 间。这预示着切割是有效地，和 Clark[9] 金刚石线切割木材结果类型。

比力合力受线速度的影响。在松木和橡木的纵切测试显示比力合力比横切高得多，这可能是由切割横穿纹理和切割沿着纹理的不同导致的。

表面粗糙度与线速度和进给速度关系不是很大，它基本保持在 $2\mu m$ 到 $3\mu m$ 范围内。表面效果比带锯切割好的多，甚至在表面形貌仪上都不能检测出。

6.2.2 导轮测试结果

第一个实验展示导轮的影响。纵切的 f_N 要低的多。观察发现线导轮将力传递出去而不是由线转向而消失。由于切割过程中线的转向不精确，会使切割大大的减速。力减小，切割既不高效也不合理。

法向比力在没有导轮时要低得多，这和上面解释的原因一样，线频繁转向。

力比和每次其他切割方式相似，但在加工过程中大体保持不变。力比不受切割速度和线速度的影响。

线导轮不影响表面粗糙度，表面粗糙度保持在 $3\mu m$ 到 $4\mu m$ 范围内。橡木和松木样品在表面粗糙度上有相似的趋势。

6.2.3 高进给速度测试结果

第二个实验显示了在更高进给速度下横切的影响。法向比力在高进给速度下更高，和预期的一样。松木测试结果和低速纵切非常相似，橡木测试结果也差不多。低线速度降低切向力，但和低进给速度程度不一样。

法向比力受进给速度的影响和切向力类似。 f_N 和低进给速度纵切非常相似。低线速度降低法向力，但程度不大。橡木和松木结果非常相似。

力比和低进给速度下相似，但看起来进给速度和力比没有关系。

比力合力与纵切松木和橡木非常相似，力总的来说稍大，但最多增大 10%。

随着进给速度的提高，表面粗糙度不受影响。由于在不影响表面粗糙度的情况下可以提高进给速度，这值得庆幸。

7. 环形切割木材结果

环形线切割测试的主要目的是尝试研究切削力和量化表面粗糙度。实施了两个基础试验：一是观察冷却液在一系列切割类型和进给速度下的影响；另一个研究环形线切割的切削速度限制。

7.1 数据采集

这次试验采用和摆动类型实验完全一样的数据采集方法和系统，见 6.1.1 节和 6.1.2 节。

7.2 切削力和表面粗糙度结果

这个实验用来检查进给速度和冷却液在不同切割方式下的影响。一个单独的测试用来观察高进给速度对切削力的影响。机器的能力在测试过程中有局限性，下面的测试矩阵概况了环形线切割的实验。表 2.8 到 2.10 展示了实验的工艺参数。在所有数据处理完毕后，表面粗糙度计算出来，图 7.1 列出了冷却液测试的基础数据。图 7.2 列出了高进给速度在松木上的横切测试。

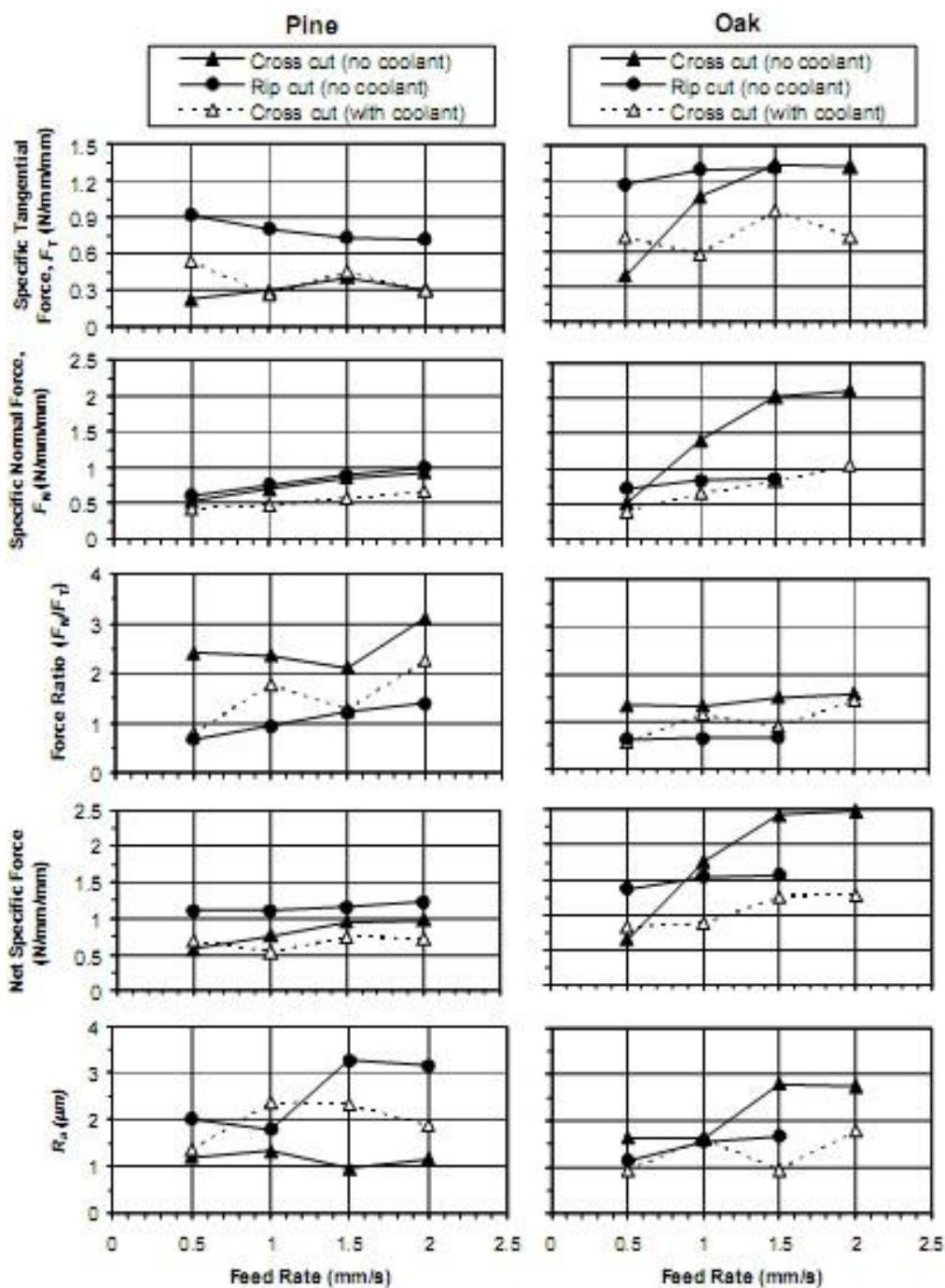


图 7.1：基础和冷却液对力和表面粗糙度影响结果

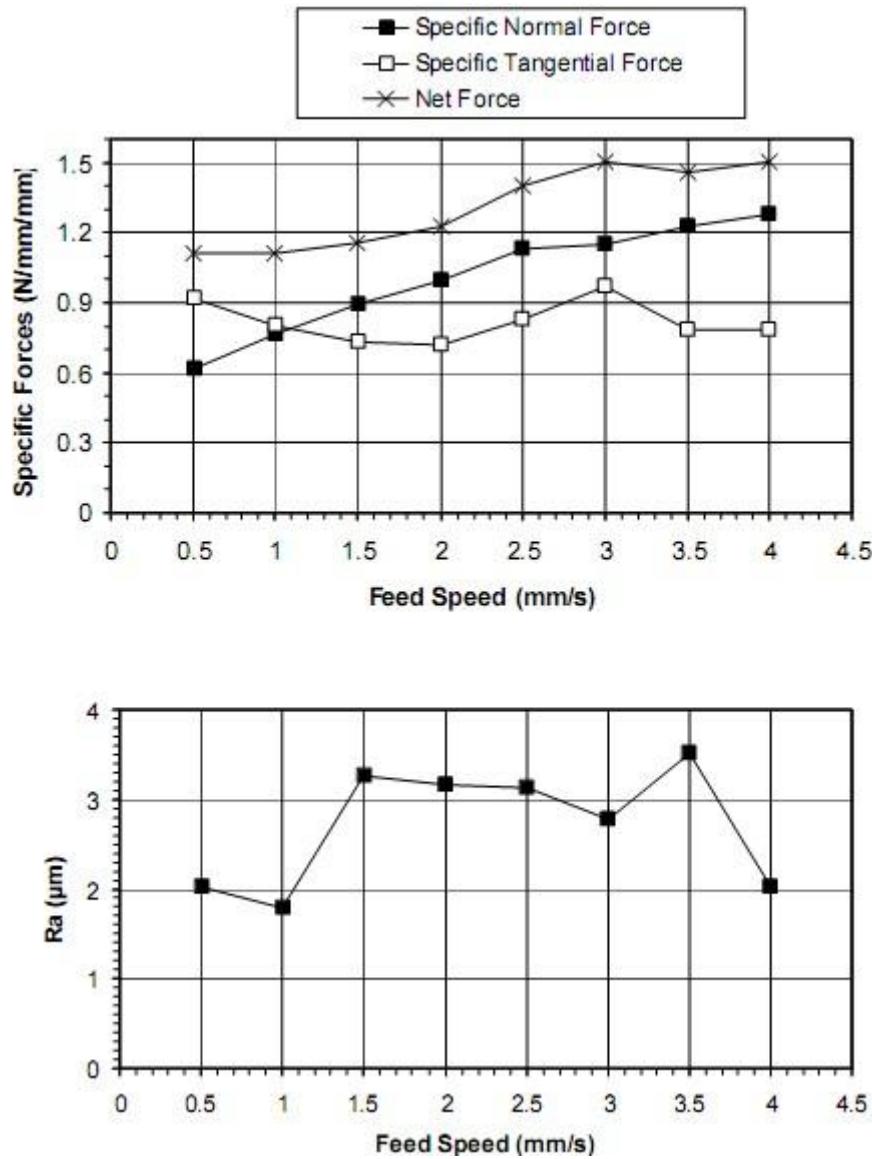


图 7.2: 高进给速度对力和表面粗糙度影响结果

7.2.1 基础结果

图 7.1 的第一组图展示了切向力比力。它们有一些非常有趣的趋势：第一个趋势是当进给速度增大时 f_T 明显下降，这和传统加工一样；第二个是金刚石线纵切需要更多的力，这个趋势在所有实验中都出现过；图中最有意思的部分是松木总体有更低的切削力，这可能是由于事实上一些松木出现焦炭状，意味着木材产生了大量的热量，因此加工速度更快。

f_N 和切向比力有许多相同的趋势。横切时法向切削力非常低。和预期一样，进给速度增大，切削力增大。

力比显示切割非常有效，它和 Clark[9]在木材加工实验中研究的类似。松木

的力比随着进给速度的增加而稍稍增大。橡木的力比在实验中变化很大，但仍然表现出进行相当高效的切割。

比力合力展示了力的大小如何变化。进给速度对它的影响原理相同，进给速度增加，力增大，但纵切时力要大得多。

表面粗糙度也非常有意思。每一个测试的表面粗糙度都在 $1\mu\text{ m}$ 到 $3.5\mu\text{ m}$ 范围内。进给速度看起来稍微影响表面粗糙度，但损害不大。最重要的事实是木材的表面粗糙度比带锯加工的要好的多，甚至使用表面粗糙度分析工具都不能检查出其缺陷。

这个实验展示了很多有意思的趋势，但也证实了许多期望的趋势。需注意橡木不能承受最高进给速度的纵切，这个实验开始后很快停止保护环形线锯。

7.2.2 冷却液测试结果

冷却液使切向比力减小，尤其是在橡木实验中。松木切削力不大一样，但总体趋势相似。他们和干切测试趋势一样，但力总的来说更低。

当使用冷却液时法向比力也减小。当使用少量冷却液时，橡木和松木的法向切削力也减小。

总的来说冷却液减小合力，这和预期的一样。法向比力和切向比力减小，因此合力比力也减小。

冷却液看起来可以改善表面完成质量。这相当于水磨工艺，水作为润滑油，也可以冷却线，使得它按理论设计一样切割。

7.2.3 进给速度测试

第二个高线速度横切松木测试得到了有意思的结果。这个测试展示了环形线切割的极限进给速度。这些结果显示在环形线测试中可以使用更高的进给速度。力和预期的一样随着进给速度的增加而增大。

高进给速度测试显示表面粗糙度在高速度加工时没有受到太大影响。粗糙度稍稍高了点，但在可接受范围内。实验显示环形线切割在切割速度上较好，表面粗糙度不受太大影响，可以接受。

8. 总结

材料成本的控制要求找到一种木材加工时更低截口损失的方法。固着磨料金刚石线锯研究用于切割各种类型的木材。木材加工被传统的锯条垄断。固着磨料金刚石线锯开发用于半导体行业，切割晶锭产生的截口比最先进的薄切口锯片更薄。这将节约生产环节中的材料成本。

单晶 SiC 是非常难以加工。目前的加工方法耗时间，代价昂贵。随着功率和光电设备以 SiC 为基底需求的增长，更快更有效的加工方法的需求日益增长。固着磨料金刚石线锯有可能满足这些需求，这个领域研究的需求是非常大的。

研究了单晶 SiC 的加工特性。研究了线速度、进给速度和摆动频率对表面粗糙度和切削力的影响。第一个实验显示切削力和表面粗糙度直接相关。进给速度不影响表面粗糙度，但影响片子缺陷的深度。假设切割时表面粗糙度和与之接触的冷却液的数量有关，这个假设有助于解释切向切削力。SEM 图视觉描述了缺陷的特征。由于线速度减小和进给速度不变，滞止线形成。表面粗糙度处于 $0.2 \mu m$ 到 $0.3\mu m$ 范围内。

第二个 SiC 加工实验检测了新的金刚石线加工一个完整的 SiC 片的表面粗糙度和切向力。这个实验展示了新线的影响和表面粗糙度的联系，也检测了摆动频率对表面粗糙度的影响。没有摇摆运动加工的一部分片子表面粗糙度很差。摇摆运动的存在的比摆动频率的实际价值更加影响表面粗糙度。

摆动木材加工实验显示线速度对切削力起着很大作用。高进给速度的线切割取决于线速度。研究了防止线偏转的线导轮的影响。线导轮用来避免线偏转，但会增大切削力。总体结果是在低进给速度摆动线切割木材不错，但进给速度和环形线切割相比仍然很慢。表面粗糙度在 $2\mu m$ 到 $3\mu m$ 间，这在木材制品中是非常优秀的。

环形高线速度切割有能力提供研究过的所有线锯切割最快的进给速度。线运行在接近摆动线切割工作时进给速度 13 倍的速度下，最大进给速度是摆动线切割的 4 倍。表面粗糙度在 $3\mu m$ 到 $4\mu m$ 范围内，比摆动线切割稍差，但和其他木材加工方法相比仍然是非常好的。

在固着磨料线切割领域还有大量的研究需要去做。加工单晶 SiC 时摆动角度的影响需要研究。Millennium Series Slicing Saw 的控制器需要修改以解决当线反

转方向是如何减慢向下进给速度的问题。冷却液供给系统需要研究用来改善冷却液流量。最后还需一系列的测试用来研究表面粗糙度在这些改动之后的变化。

木材加工结果显示这个领域也需要更多的研究工作，研究超过 20m/s 的线速度用于木材加工。环形线切割的进给速度比别的方式更快，但仍远不及传统薄切口锯片。

研究的结果提供了丰富的资料，可以作为进一步实验的良好开端。

参考文献

- [1] Mitsubishi, 1998, Pathway to the Production of High Purity Silicon, Mitsubishi Advanced Materials.
- [2] Bekaert, 1999, Sawing Wire, Bekaert Steel Cord Product Group, Zwevege, Belgium.
- [3] S. Ito, R. Murata, Study on machining characteristics of diamond abrasive wire, Journal of Mechanical Engineering Lab, Tokyo, Japan 41 (5) (1987) 236-244.
- [4] H. Tokura, S. Nakayama, M. Yoshikawa, Cutting performance of diamond plated wire tools, Journal of Japan Society of Precision Engineering 58 (12) (1992) 2013-2018.
- [5] K. Ishikawa, H. Suwabe, K. Kanayama, M. Makino, and H. Yoshida, Study on machining characteristics of wire tool with electrodeposited diamond grains, Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers 60 (573) (1994) 1815-1820.
- [6] J. Li, I. Kao, V. Prasad, Modeling stresses of contacts in wire saw slicing of polycrystalline and crystalline ingots: application to silicon wafer production, ASME Journal of Electronic Packaging 120 (1998) 123-128.
- [7] R.K. Sahoo, V. Prasad, I. Kao, J. Talbott, and K. P. Gupta, Towards an integrated approach for analysis and design of wafer slicing by a wire saw, ASME Journal of Electronic Packaging 120 (1998) 35-40.
- [8] M. Bhagavat, I. Kao, Computational model for free abrasive machining of brittle

silicon using a wiresaw, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Nashville, TN, ASME Design Engineering Division, DE-104 (1999) 21-30.

- [9] M. Bhagavat, V. Prasad, and I. Kao, Elasto-hydrodynamic interaction in the free abrasive wafer slicing using a wiresaw: modeling and finite element analysis, ASME Journal of Tribology 122 (2) (2000) 394-404.
- [10] W.I. Clark, A.J. Shih, C.W. Hardin, R.L. Lemaster, S.B. McSpadden, Fixed abrasive diamond wire machining "part I: process monitoring and mechanics of wire cutting, International Journal of Machine Tools and Manufacture (2002) 523-532.
- [11] W.I. Clark, A.J. Shih, C.W. Hardin, R.L. Lemaster, S.B. McSpadden, Fixed abrasive diamond wire machining " part II: experiment design and results, International Journal of Machine Tools and Manufacture (2002) 533-542.
- [12] H. Mech, Machine and method for cutting brittle materials using a reciprocating cutting wire, US Patent Number 3,831,576 (1974).
- [13] H. Mech, Machine for cutting brittle materials, US Patent Number 3,841,297 (1974).
- [14] H. B. McLaughlin, Use X and Y table to contour cut the workpiece, US Patent Number 4,016,856 (1977).
- [15] R. C. Wells, Wire saw, US Patent Number 4,494,523 (1985).
- [16] R. C. Wells, T. J. Hatfield, Wire saw machine, US Patent Number 4,655,191 (1987).
- [17] T. Kurokawa, Wire saw, US Patent Number 4,903,682 (1990).
- [18] N. Takeuchi, Brittle material cutting method, US Patent Number 5,201,305 (1991).
- [19] K. Toyama, E. Kiuchi, K. Hayakawa, Wire saw and slicing method using the same, US Patent Number 5,269,285 (1993).
- [20] R. Bonzo, H.G. Shafer, J.P. Trentelman, Apparatus and method for wire cutting glass-ceramic wafers, US Patent Number 5,564,409 (1996).
- [21] C. Hauser, Wire Sawing Device, US Patent Number 5,758,633 (1998).
- [22] C. Hauser, Wire Sawing Device, US Patent Number 5,787,872 (1998).

- [23] K. Toyama, Wire saw cutting method synchronizing workpiece feed speed with wire speed, US Patent Number 5,810,643 (1998).
- [24] C. Hauser, Device for wire sawing provided with a system for directing wire permitting use of spools of wire of very great length, US Patent Number 5,829,424 (1998).
- [25] J. B. Hodsden, Apparatus and method for slicing a workpiece utilizing a diamond impregnated wire, US Patent Number 5,878,737 (1998).
- [26] C. Hauser. Wire Saw Device, US Patent Number 5,910,203 (1999).
- [27] K. Miyoshi, T. Suzuki, K. Takahashi, Y. Goto, A. Shiba, S. Wada, Wire type slicing machine and method, US Patent Number 5,944,007 (1999).
- [28] K. Toyama, Wire saw cutting apparatus synchronizing workpiece feed speed with wire speed, US Patent Number 5,947,789 (1999).
- [29] J. B. Hodsden, Apparatus and method for slicing a workpiece utilizing a diamond impregnated wire, US Patent Number 5,964,210 (1999).
- [30] J. B. Hodsden, J. B. Hodsden, Continuous wire saw loop and method of manufacture thereof, US Patent Number 6,065,462 (2000).
- [31] S. T. Buljan, R. M. Andrews, Brazed superabrasive wire saw and method therefore, US Patent Number 6,102,024 (2000).
- [32] K. Egglihuber, Wire saw and method of using it, US Patent Number 6,098,610 (2000).
- [33] K. Asakawa, H. Oishi, Ingot slicing method and apparatus therefore, US Patent Number 6,065,461 (2000).
- [34] M. Ikehara, Method using a wire feeding device for a multi-wire saw, US Patent Number 6,109,253 (2000).
- [35] S. Katamachi, Wire saw for slicing brittle materials with an ingot loading and unloading mechanism, US Patent Number 6,135,103 (2000).
- [36] I. Ueoka, J. Sugawara, A. Mizoguchi, H. Oshita, M. Yamanaka, H. Ogawa, N. Urakawa, H. Yoshinaga, Wire-saw and its manufacturing method, US Parent Number 6,070,570 (2000).
- [37] D. A. Witte, T. Ragan, Method of slicing silicon wafers for laser marking, US

Patent Number 6,112,738 (2000).

[38] F. C. Yu, Diamond wire saw, US Patent Number 6,105,568 (2000).

[39] J. B. Hodsdon, Apparatus and method for slicing a workpiece utilizing a diamond impregnated wire, US Patent Number 6,024,080 (2000).

[40] J. B. Hodsdon, Rocking apparatus and method for slicing a workpiece utilizing a diamond impregnated wire, US Patent Number 6,279,564 (2001).

[41] S. Nagatsuka, S. Okubo, H. Kawarai, H. Oishi, K. Asakawa, J. Matsuzaki, Wire saw control method and wire saw, US Patent Number 6,178,961 (2001).

[42] S. Ohashi, M. Matsuzawa, Saw wire assembly, cutting method utilizing the same, and system therefore, US Patent Number 6,178,962 (2001).

[43] K. Egglhuber, Wire saw and process for cutting off shaped articles, US Patent Number 6,234,159 (2001).

[44] H. Oishi, K. Asakawa, J. Matsuzaki, Wire Sawing Machine, US Patent Number 6,237,585 (2001).

[45] K. Onizaki, K. Ogawa, Wire saw cutting method and apparatus therefore, US Patent Number 6,283,111 (2001).

[46] O. Kononchuk, G. Preece, Apparatus and method for reducing bow and warp in silicon wafers sliced by a wire saw, magnets using wire saw, and voice coil motor, US Patent Number 6,352,071 (2002).

[47] M. Chikuba, H. Ishida, Method for cutting rare earth alloy, method for manufacturing rare earth alloy plates and method for manufacturing rare earth alloy, US Patent Number 6,381,830 (2002).

[48] C. Hauser, Wire sawing device for cutting fine slices using angular crossing of at least two sawing yarn layers, US Patent Number 6,408,839 (2002).

[49] H. Oishi, K. Asakawa, J., Matsuzaki, K. Ashida, Slurry useful for wire-saw slicing and evaluation of slurry, US Patent Number 6,422,067, (2002).

[50] J. B. Hodsdon, Continuous wire saw loop and method of manufacture thereof, US Patent Number 6,311,684 (2002).

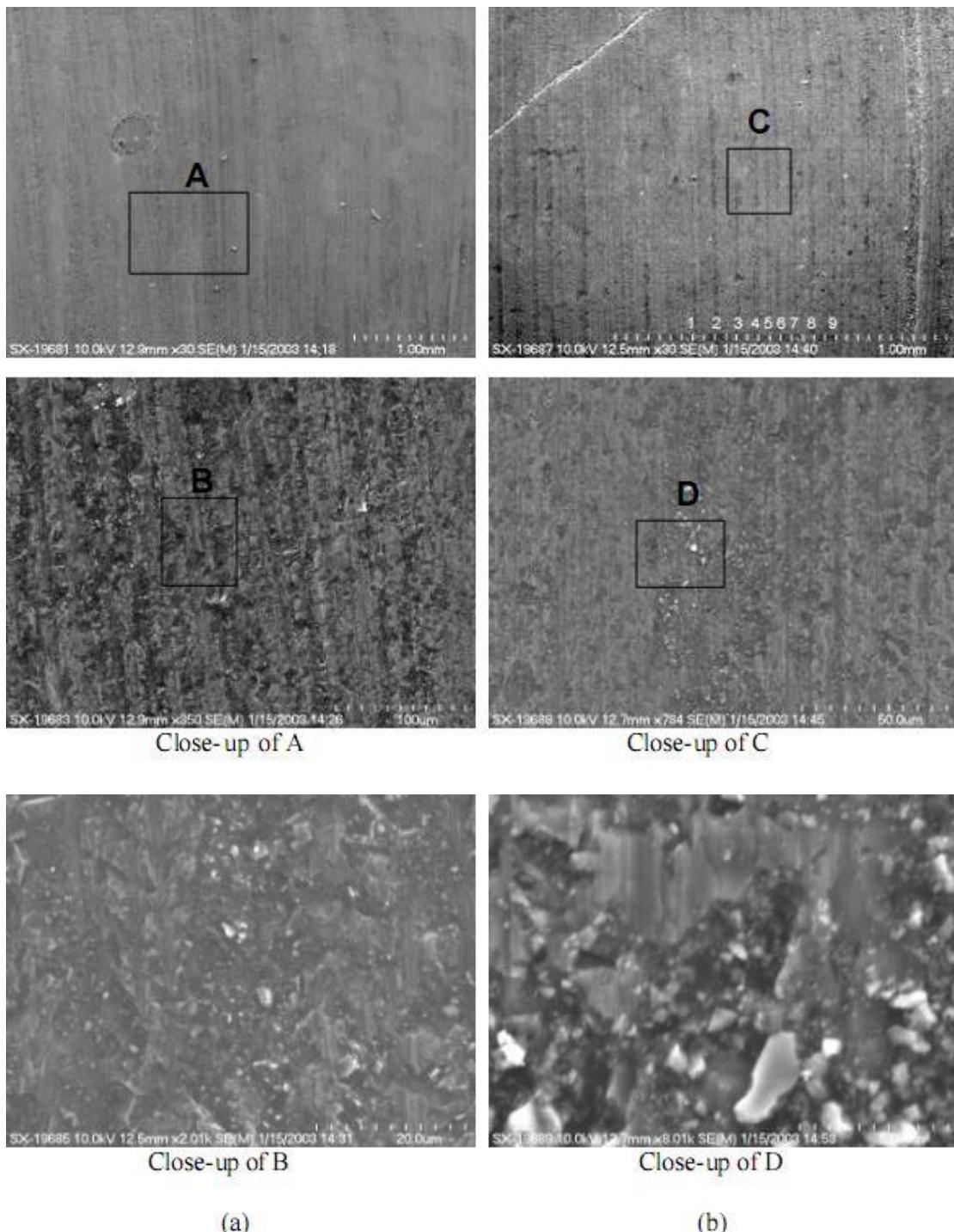
[51] A.J. Shih, T.M Yonushonis, M.B. Grant, T.O. Morris and S.B. McSpadden, Vitreous bond CBN wheel for high speed grinding of ceramic and M2 steel,

Transaction of the North American Manufacturing Research Institution of SME 26
(1998) 195-200.

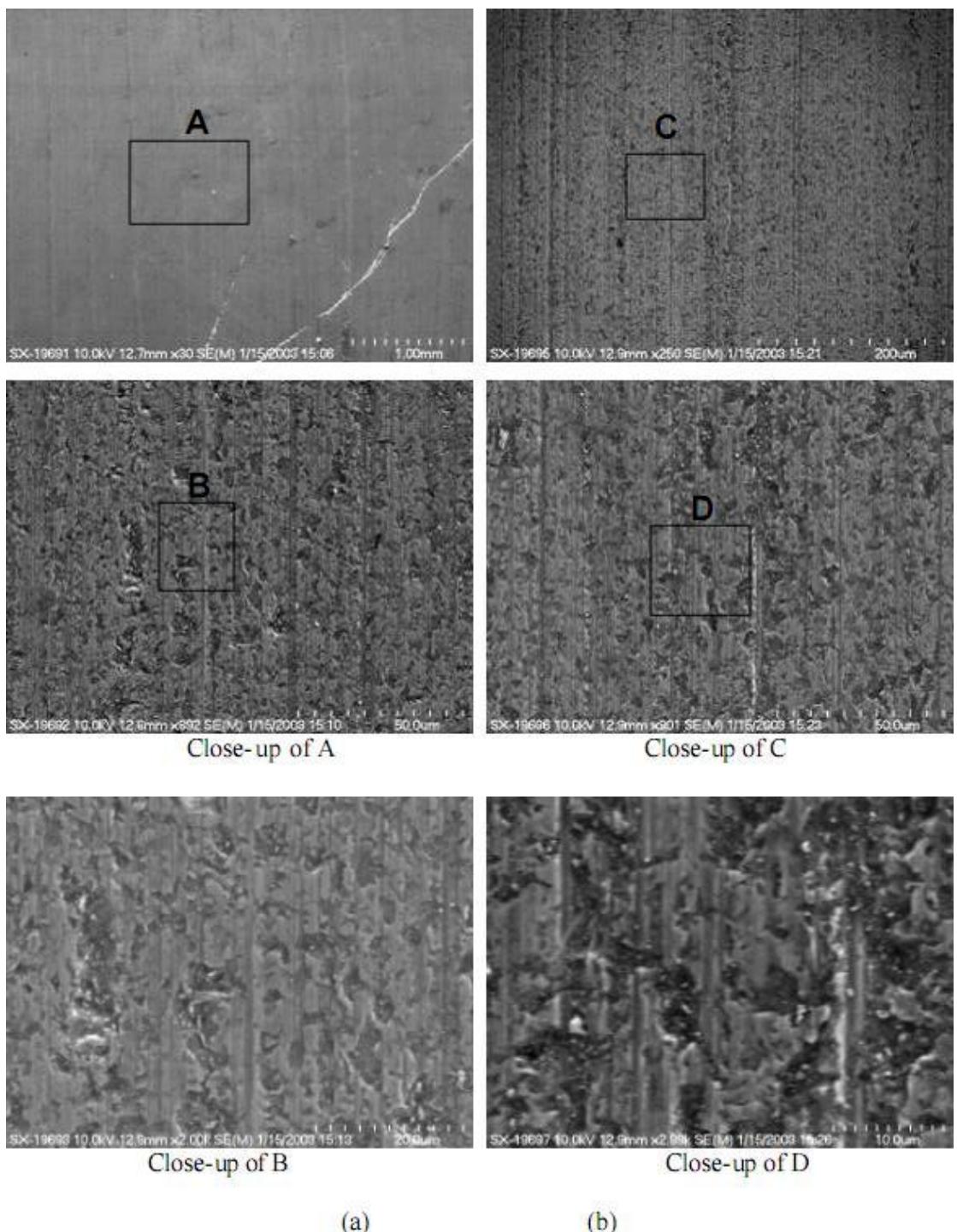
[52] A.J. Shih, M.B. Grant, T.M. Yonushonis, T.O. Morris and S.B. McSpadden, High speed and high material removal rate grinding of ceramics using the vitreous bond CBN wheel, *Machining Science and Technology* 4 (2000) (1) 43-58.

[53] B.K. Rhoney, A.J. Shih, R.O. Scattergood, J.L. Akemon, D.J. Gust, and M.B. Grant, Cylindrical wire electrical discharge machining of metal bond diamond wheels for ceramic grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. (accepted)

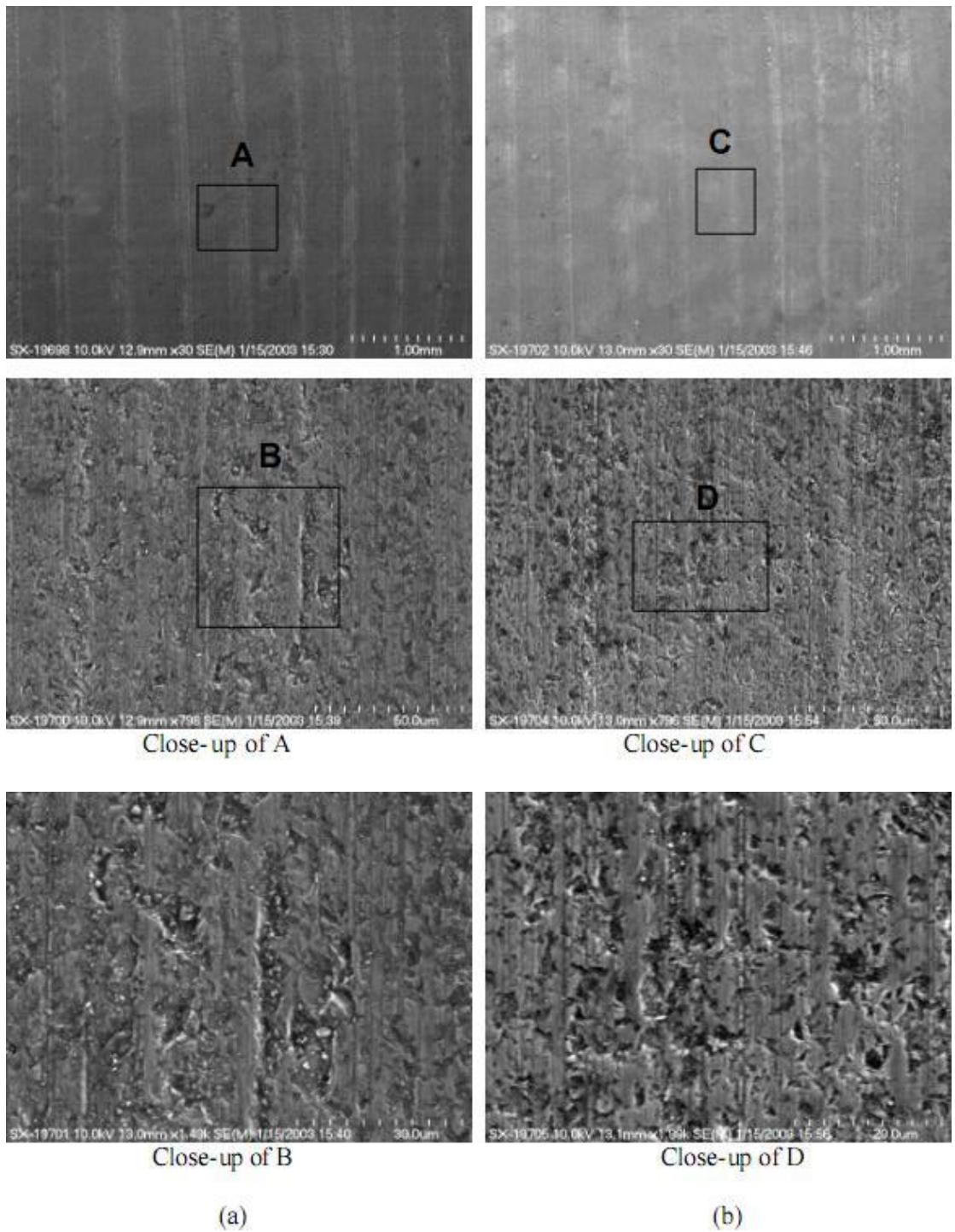
附录 A



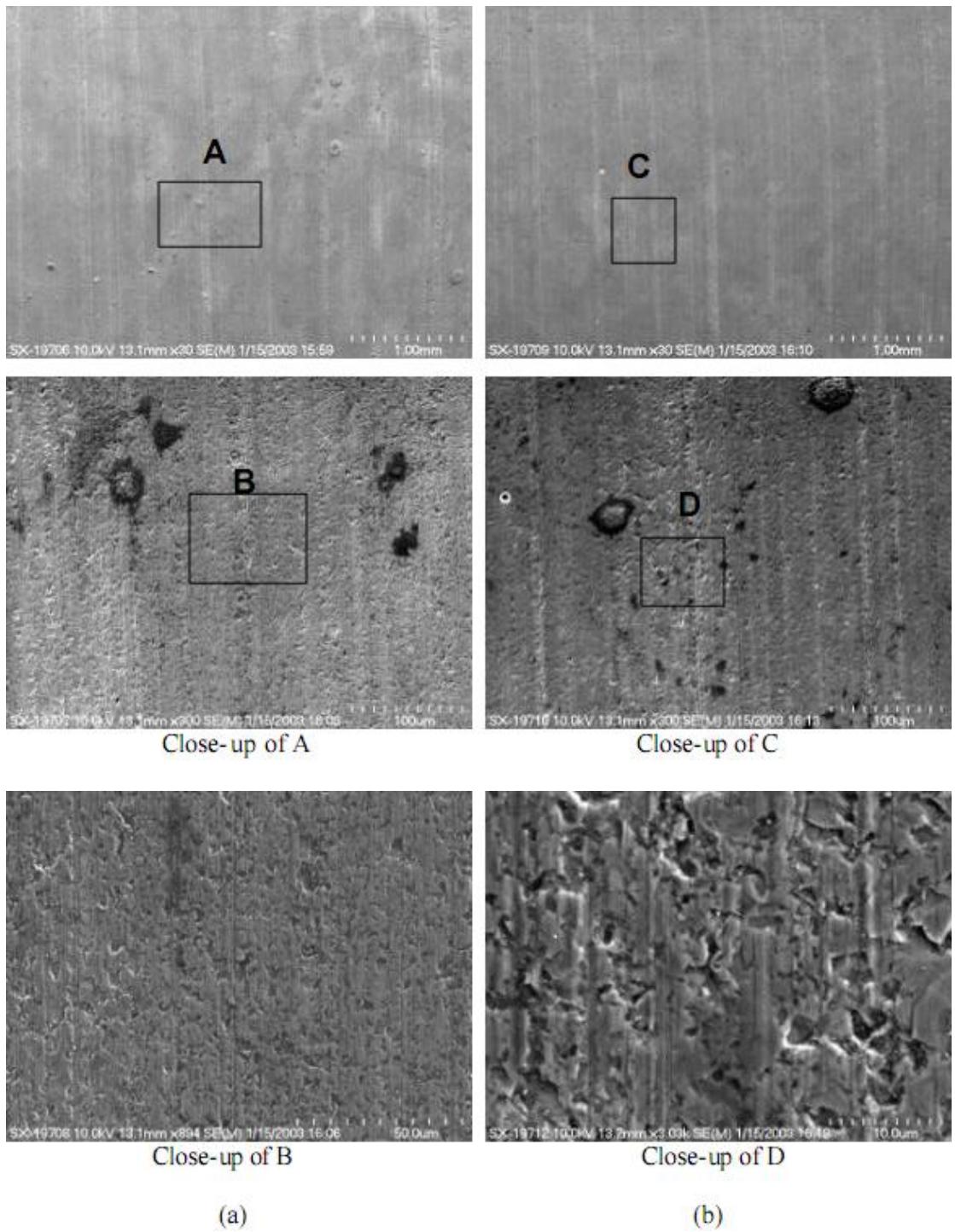
A.1: 测试 1(a)和测试 2(b)中 SiC 加工表面的 SEM 图



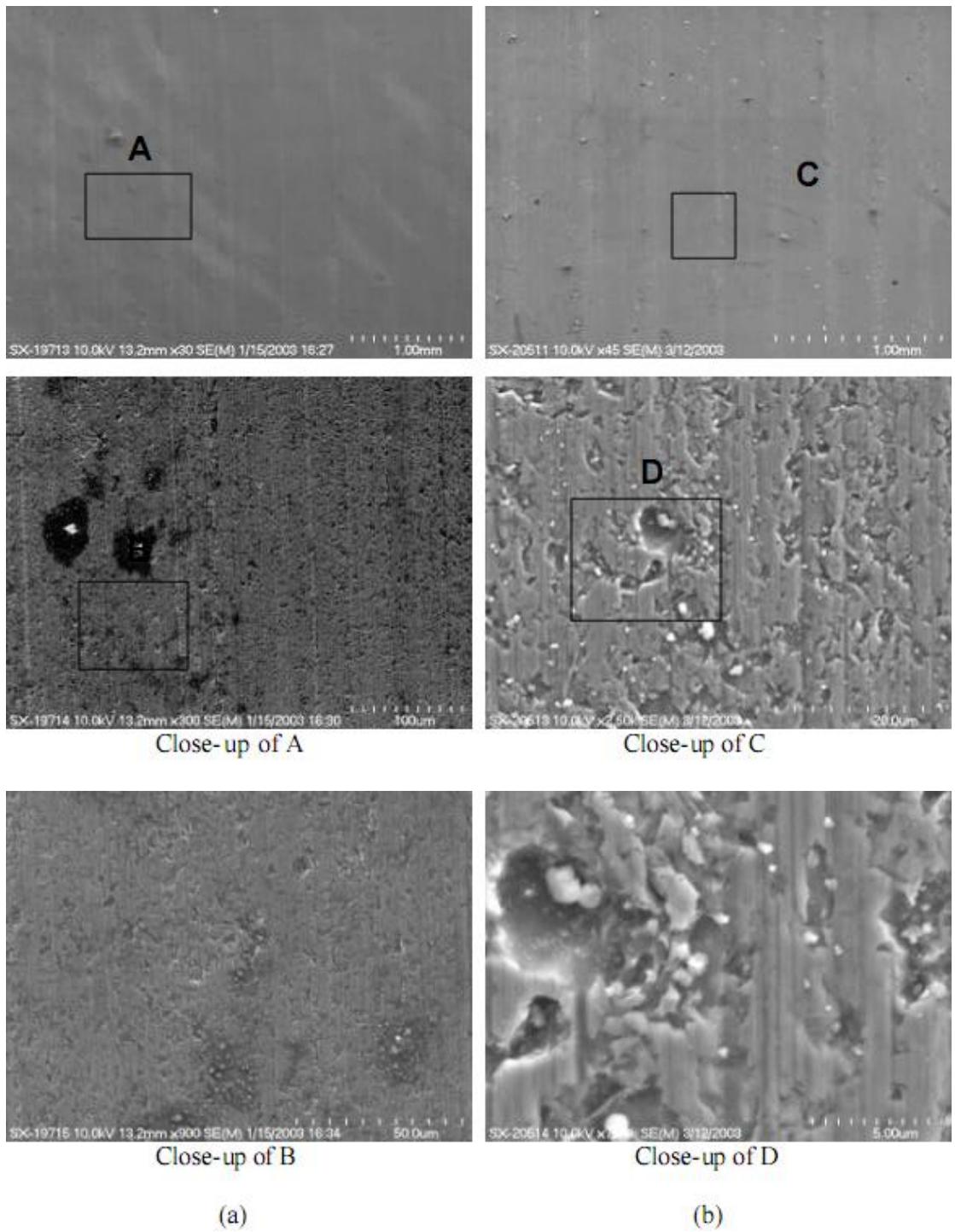
A.2: 测试 3(a)和测试 4(b)中 SiC 加工表面 SEM 图



A.3: 测试 5(a)和测试 6(b)中 SiC 加工表面 SEM 图



A.4: 测试 7(a)和测试 8(b)中 SiC 加工表面 SEM 图



A.5: 测试 9(a)和测试 10(b)中 SiC 加工表面 SEM 图