

先进陶瓷加工导论

Handbook of Advanced Ceramics Machining

[美] Ioan D. Marinescu 编著
田欣利 张保国 吴志远 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

先进陶瓷加工导论

Handbook of Advanced Ceramics Machining

[美] Ioan D. Marinescu 编著
田欣利 张保国 吴志远 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2010-018号

图书在版编目(CIP)数据

先进陶瓷加工导论/(美)马里内斯库
(Marinescu, I. D.) 编著;田欣利,张保国,吴志远译
—北京:国防工业出版社,2010.4
书名原文:Handbook of Advanced Ceramics Machining
ISBN 978-7-118-06799-6

I. ①先… II. ①马… ②田… ③张… ④吴… III.
①陶瓷-生产工艺 IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 062086 号

※

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
国防工业出版社印刷厂印刷
新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 298 千字
2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422 发行邮购:(010)68414474
发行传真:(010)68411535 发行业务:(010)68472764

中文版前言

工程陶瓷由于其高硬度、防腐耐磨、耐高温、质量轻等特性在航空航天、石油勘探、化工、国防等工业领域的应用越来越广泛,可以预见,许多机械装备上的关键零部件用陶瓷替代金属已成为一种不可逆转的发展趋势。但陶瓷由于其硬脆特性决定的加工难度大、加工效率低、成本高已成为阻碍工程陶瓷进一步广泛应用的“瓶颈”。自 20 世纪 80 年代以来,对加工理论和技术的研究在国内外一直处于热点状态。

为了及时将近年来国外陶瓷材料加工的最新理论与技术呈现给国内该领域的广大科技工作者,促进陶瓷加工技术更快、更好地发展,我们翻译了《先进陶瓷加工导论》。本书全面和系统地阐述了近年来国外特别是一些发达国家在陶瓷加工领域所取得的学术成果。本书以陶瓷加工的新理论、新技术、新工艺以及应用为主要内容,集结了一些国际上在陶瓷加工领域著名学者的最新研究成果,内容丰富、层次分明、特色突出。在翻译过程中,按照尽量尊重原著的原则,仅对个别章节出现的重复内容做了局部调整。

本书共分 16 章。内容主要包括陶瓷的塑性磨削、用粗砂轮进行精细陶瓷的塑性超精加工、陶瓷磨削机理、陶瓷磨削的强度和损伤深度、ELID 磨削技术高效超精密加工结构陶瓷零件、陶瓷材料的 ELID 磨削性能、ELID 磨削陶瓷技术的应用及其砂轮的在线监测、陶瓷材料的高效砂带磨削、陶瓷研磨的声发射监控、陶瓷材料的单晶和多晶金刚石研磨、陶瓷磨削的双裂纹模型、金刚石砂轮双面磨削、磁头的超精密抛光、陶瓷的激光辅助磨削、陶瓷的超声波加工以及陶瓷材料加工进展等。本书由田欣利、张保国、吴志远任主译,负责全书的组织和译审,参加翻译的有田欣利(第 4 章)、张保国(第 1、13、15 章)、吴志远(第 12 章)、姚巨坤(第 2 章)、唐修检(第 3 章)、杨俊飞(第 5、14、16 章)、郭昉(第 6、第 7 章第 2、3 节)、许森(第 8 章)、王健全(第 7 章第 1 节、第 9 章)、刘超(第 10、11 章),王健全负责全书的文字校对与图表修改。

本书既可以作为高等院校陶瓷材料专业和机械制造专业的研究生、本科生的教材或参考书,也可供从事相关领域的研究人员和工程技术人员参考。

由于译者水平有限,书中不妥之处恳请读者和专家批评指正。

译者

2009 年 10 月

目 录

第1章 陶瓷的塑性磨削:机床与加工过程	1
1.1 陶瓷和金属	1
1.2 脆性材料的塑性磨削	3
1.3 陶瓷塑性行为的加工过程观察	7
1.3.1 脆性模式的划痕实验	8
1.3.2 塑性模式的加工过程观察	9
1.4 陶瓷的延性域磨削	11
1.5 陶瓷塑性磨削机床	14
1.5.1 塑性微磨削机床的设计标准	14
1.5.2 塑性微磨削机床的关键技术	16
参考文献	21
第2章 用金刚石粗砂轮实现精细陶瓷的塑性超精磨削	23
2.1 引言	23
2.2 采用 140 [#] 砂轮实现塑性磨削	24
2.2.1 试验步骤	24
2.2.2 工作台速度的影响	26
2.2.3 砂轮转速的影响	31
2.2.4 工件材料的影响	34
2.3 超精磨削	39
2.3.1 超精磨削方法	39
2.3.2 超精磨削结果	41
2.4 结论	43
参考文献	44
第3章 陶瓷磨削机理	45
3.1 引言	45
3.2 压痕断裂力学方法	45
3.2.1 中位/径向裂纹:静态压头	46
3.2.2 中位/径向裂纹:滑动压头	49

3.2.3 侧向裂纹与挤压	52
3.3 加工方法	53
3.3.1 磨屑	53
3.3.2 划痕及磨削表面的微观形貌	55
3.3.3 磨削能与磨削机理	56
3.4 结论	65
参考文献	66
第4章 陶瓷磨削强度与损伤深度	71
4.1 引言	71
4.2 典型陶瓷材料的性能	72
4.3 实验过程	73
4.3.1 磨削试验方法	73
4.3.2 磨粒的切深	73
4.3.3 强度测试标准	74
4.3.4 研磨试验方法	74
4.3.5 磨削强度测试	75
4.3.6 损伤深度测试	76
4.4 试验结果及讨论	78
4.4.1 磨削强度	78
4.4.2 损伤深度	82
4.5 结论	85
参考文献	86
第5章 ELID 磨削技术高效超精密制造结构陶瓷零件	88
5.1 引言	88
5.2 ELID 磨削原理	89
5.2.1 放电修整技术	92
5.2.2 预修整中的电解反应	93
5.2.3 ELID 磨削机理	93
5.3 实验系统	94
5.3.1 砂轮	95
5.3.2 磨削液	95
5.3.3 电源	95
5.3.4 材料	96
5.3.5 测试仪器	96

5.4	结果与分析	96
5.4.1	结合剂材料的影响	96
5.4.2	电源的影响	98
5.4.3	常规磨削与 ELID 磨削的对比	99
5.4.4	改进的 ELID 磨削	101
5.4.5	青铜结合剂和钴结合剂砂轮的磨削	102
5.4.6	磨削比	104
5.4.7	基于车削加工中心的高效外圆磨削	106
5.4.8	ELID 超精密磨削	106
5.4.9	氮化硅的弯曲强度	109
5.5	结论	111
	参考文献	112
第 6 章	陶瓷材料的 ELID 磨削性能	115
6.1	氧化锆陶瓷材料的高效、精密 ELID 无心磨削	115
6.1.1	实验装置	115
6.1.2	加工效果	116
6.2	陶瓷球面透镜的 ELID 磨削特性	119
6.2.1	ELID CG 磨削机构	119
6.2.2	ELID CG 磨削的实验装置	119
6.2.3	陶瓷球面透镜的 ELID CG 磨削	120
6.3	AlN 陶瓷 ELID 磨削特性和表面改性作用	121
6.3.1	ELID 磨削 AlN 陶瓷的实验装置	121
6.3.2	ELID 磨削表面的观测	124
6.3.3	ELID 磨削的表面改性效应	127
6.3.4	ELID 磨削改性表面的分析	128
	参考文献	129
第 7 章	ELID 磨削陶瓷技术的应用及砂轮的在线监测	132
7.1	ELID 磨削陶瓷技术的应用	132
7.1.1	ELID 单面磨削	132
7.1.2	ELID 双面磨削	133
7.1.3	ELID 研磨	135
7.1.4	陶瓷在立轴圆台平面磨床的 ELID 磨削	136
7.1.5	陶瓷在立式磨削中心上的 ELID 磨削	137
7.1.6	陶瓷涂层的 ELID 磨削	140

7.1.7	非球形镜面的 ELID 超精密磨削	141
7.1.8	微球面镜头的 ELID 磨削	141
7.1.9	大型光学玻璃基板的 ELID 磨削	141
7.1.10	ELID 精密内圆磨削	142
7.1.11	化学气相沉积碳化硅(CVD-SiC)的 ELID 磨削	143
7.2	CCD 系统在线监测 ELID 磨削过程砂轮的磨损	143
7.2.1	引言	143
7.2.2	实验方法	144
7.2.3	实验结果及讨论	144
7.2.4	从摩擦学角度研究 ELID 磨削	148
7.2.5	小结	150
	参考文献	150
第 8 章	陶瓷材料的高效砂带无心磨削	154
8.1	引言	154
8.2	问题的提出	155
8.3	目标	156
8.4	陶瓷材料加工实验	156
8.5	试验结果	157
8.6	结论	165
	参考文献	165
第 9 章	研磨过程中的声发射监控	166
9.1	引言	166
9.2	相关工作	166
9.2.1	托莱多大学从事的工作	166
9.2.2	AMMC 以外的工作	167
9.3	研究方法	167
9.4	实验结果	169
9.4.1	试验流程	169
9.4.2	数据分析	170
9.5	小结	172
第 10 章	陶瓷材料的单晶和多晶金刚石研磨	173
10.1	引言	173
10.2	实验方法	174
10.3	实验结果	174

参考文献	180
第 11 章 陶瓷研磨的双裂纹模型	182
11.1 引言	182
11.2 双裂纹模型	182
11.3 实验过程	184
11.3.1 实验材料	184
11.3.2 试验设备	185
11.3.3 试验方法	185
第 12 章 金刚石砂轮双面磨削先进陶瓷	186
12.1 引言	186
12.2 双面磨削运动学模型	187
12.3 轨迹模拟	192
12.4 实验验证	195
12.5 结果讨论	197
12.6 结论	198
参考文献	198
第 13 章 磁头的超精密抛光	200
13.1 引言	200
13.2 相关研究	200
13.2.1 托莱多大学精密微加工中心	200
13.2.2 其他研究机构	200
13.3 实验	201
13.4 实验结果	202
13.4.1 材料去除量	202
13.4.2 粗糙度和表面形貌	202
第 14 章 激光预热辅助磨削陶瓷技术	207
14.1 引言	207
14.2 问题综述	207
14.2.1 概述	207
14.2.2 实验设计	207
14.2.3 试验结果及讨论	208
14.3 切削去除机理	210
14.4 结论	211
14.5 研究前景	211

参考文献	212
第 15 章 陶瓷的超声加工	213
15.1 引言	213
15.2 超声技术	213
15.3 超声研磨技术	215
15.3.1 基础理论	215
15.3.2 陶瓷材料的切削加工性	218
15.3.3 常规超声研磨加工	218
15.3.4 旋转超声研磨加工	221
15.3.5 附加直线运动的旋转超声研磨加工	221
15.4 超声辅助磨削	223
15.4.1 基本原理	223
15.4.2 陶瓷材料的可加工性	224
15.4.3 平面磨削	225
15.4.4 端面磨削	225
15.4.5 超声辅助复合圆周磨削	227
15.5 工艺过程比较	228
参考文献	229
第 16 章 陶瓷材料的加工进展	232
16.1 引言	232
16.2 珩磨	232
16.2.1 概述	232
16.2.2 技术调查	233
16.2.3 陶瓷材料和结构性能的影响	234
16.3 动态研磨性磨削技术	234
16.3.1 工艺技术	234
16.3.2 加工过程	235
16.3.3 应用与前景	235
16.4 陶瓷材料磨削中的冷却润滑	236
16.4.1 基本现状	236
16.4.2 冷却润滑液的选择	236
16.4.3 供液系统的设计	238
16.4.4 清洁装置的设计	239
参考文献	239

第 1 章 陶瓷的塑性磨削:机床与加工过程

H. Eda

1.1 陶瓷和金属

工程材料一般指金属和非金属(陶瓷和高聚合物)材料,并可进一步划分为塑性和脆性材料^[1]。如图 1.1 的应力应变图显示,塑性材料的应变是脆性材料的 100 倍 ~1000 倍。通常用下面的三个指标来描述材料的脆性和塑性。

[I]	断裂韧性 K_{IC}	塑性材料 > 脆性材料
[II]	韦伯系数 m	塑性材料 > 脆性材料
[III]	裂纹扩展率 n	塑性材料 < 脆性材料

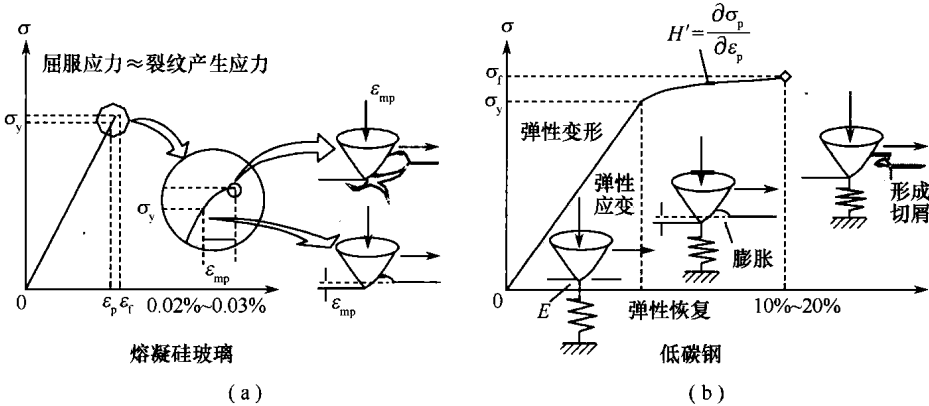


图 1.1 脆性材料和塑性材料的应力应变曲线

(a) 熔融硅玻璃; (b) 低碳钢。

下面列出典型金属和陶瓷的每个指标,来对脆性材料和塑性材料进行比较。

指标 [I]: 断裂韧性 K_{IC}

金属

$$K_{IC} = 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$K_{IC} = 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \sim 100 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

陶瓷

$$K_{IC} = 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$K_{IC} = 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

利用 K_{IC} 的值, 裂纹长度 $2C_c$ 可以用下式表示:

$$C_c = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma^2} \quad (1-1)$$

此处的 K_{IC} 起到抵抗裂纹增长的作用。在上式中代入实际 K_{IC} 值, 裂纹长度可量化为

$$2C_c = (3 \sim 13) \times 10^3 \mu\text{m} \quad | \quad 2C_c = 60 \mu\text{m} \sim 600 \mu\text{m}$$

指标[II]: 韦伯系数

依据韦伯分布, 断裂概率 P_f 可表达为

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_f - \sigma_u}{\sigma_0} \right)^m \right\} \quad (1-2)$$

式中: P_f 为材料从内部应力为 σ_f 的某点处发生断裂的概率; σ_f 为断裂应力; σ_u 、 σ_0 、 m 分别为材料常数, 这三个常数在统计学上分别称为韦伯分布的位置参数、尺度参数和形状参数, σ_u 相当于材料在断裂发生概率为零的前提下所能承受的最高应力, m 习惯上又称为韦伯系数。

$$m \approx 50 \quad | \quad m = 5 \sim 20$$

陶瓷材料实际的韦伯系数在这个值的上下 25% 内浮动。

指标[III]: 裂纹扩展率

$$n = 2 \sim 4 \quad | \quad n = 40 \sim 100$$

裂纹扩展率 dC/dt 可由下式给出:

$$\frac{dC}{dt} = A \cdot K_I^n \quad (1-3)$$

式中 K_I ——应力强度系数;

A ——常数。

一般来说, 由于一些不确定的原因, 脆性材料往往本身存在一些裂纹、损伤或同时出现两种情况。由以上三个指标可以看出, 当裂纹或损伤达到容许裂纹尺寸 C_c (大约为 $30 \mu\text{m}$) 时开始扩展。由图 1.2 所示, 裂纹扩展率很大程度上取决于裂纹尺寸 C 。

$C \leq 30 \mu\text{m}$	$dC/dt \leq 60 \text{m/s}$
$30 \mu\text{m} < C \leq 300 \mu\text{m}$	$60 \text{m/s} < dC/dt \leq 150 \text{m/s}$
$C > 300 \mu\text{m}$	$150 \text{m/s} \leq dC/dt \leq (4000 \sim 6000) \text{m/s}$

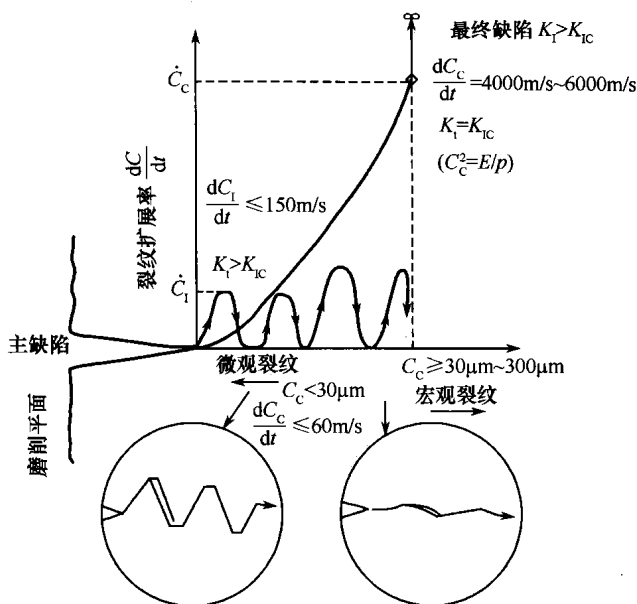


图 1.2 微观裂纹和宏观裂纹

在加工区域,由于裂纹的末端选择性地沿微裂纹或微损伤方向呈锯齿状生长,因此材料的断裂韧性似乎得到了增长。通常,尺寸在 $30\mu\text{m} \sim 300\mu\text{m}$ 的微裂纹通过重生成—扩展—终止这样的循环成长为宏观裂纹,最终,当裂纹生长到足够大时发生突然断裂,此时的裂纹扩展速度为材料自身的弹性传播速度 ($4000\text{m/s} \sim 6000\text{m/s}$)。

$$\frac{dC}{dt} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1-4)$$

式中 E ——弹性模量;
 ρ ——材料密度。

1.2 脆性材料的塑性磨削

由 1.1 节介绍的几个指标 (K_{IC}, m, n) 可知,陶瓷对裂纹远比金属敏感得多。例如,如图 1.3 所示,磨粒划痕残留在加工表面上,表面粗糙度图表显示,陶瓷表面上的波谷比金属表面上要深且密集得多,比较陶瓷和金属的 R_y/R_a 值:

陶瓷	金属
$R_y/R_a = 3 \sim 5$ (平均值)	$R_y/R_a = 5 \sim 21$ (平均值)

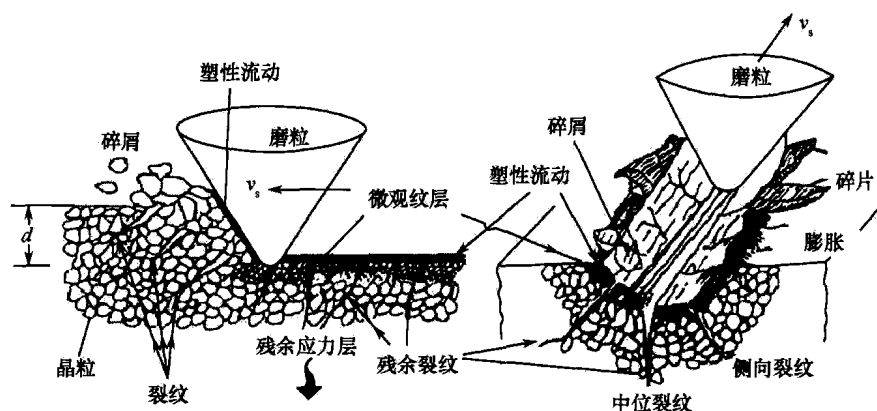


图 1.3 单磨粒划过的表面层

两类材料的比值大约有三倍的差异,陶瓷波谷深度要比它的中位平均粗糙度大一个数量级,两种材料波谷的顶锥角 2α 分别为

陶瓷	金属
$2\alpha \approx 134^\circ$	$2\alpha \approx 150^\circ \sim 170^\circ$

这意味着裂纹非常尖锐地深入陶瓷基体,并且裂纹尖端经常是封闭的,从而不易被常规检测工具所发现。

脆性材料的塑性模式加工(也可称为延性域加工)最初由 Yoshikawa^[2] 和 Taniguchi^[3] 研究,他们对脆性材料在塑性流动区域的一般行为进行了描述,McMahon^[4] 概括了微塑性理论,Hill 和 Hertz 研究了弹/塑性理论。

如图 1.1 所示,脆性材料(如玻璃)加工时,当应变 ε 达到 $0.02\% \sim 0.03\%$ 时属于塑性流动,当使用金刚石磨粒磨削时,单切削刃周围的变形区域大小为 $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$,这个变形区域是由表面的残余应力造成的。 $0.02\% \sim 0.03\%$ 的应变近似对应塑性流动区域的 $2\text{nm} \sim 6\text{nm}$,由磨粒造成的更大变形将可能形成新的裂纹,并且使加工模式由塑性转变为脆性。这就意味着,只有在应变位于图 1.1 上塑性流动的初始点 ε_p 和终止点 ε_f 之间时,脆性材料才能在塑性模式下去除。因此,为满足塑性模式磨削的条件,必须精确地控制每个切削刃的位置和运动,以保证磨削压力(磨削能量)能被连续地控制在许可的条件下。

上面的描述只是为了表达塑性磨削的应力应变图概念,和实际三维磨削区域的热力学和动力学环境并不严格一致。

加工脆性材料时,一般情况下,当切削深度足够小的时候,可以发生塑性切削,其临界切削深度为

$$d_c = 0.15 \left(\frac{E}{H} \right) \left(\frac{K_c}{H} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中 E ——弹性模量;
 H ——材料硬度;
 K_c ——断裂韧性。

迄今为止,脆塑转变的实例都很好符合了上面的结论。然而,有人提出一个新的观点,并通过研究成果进一步证明,脆塑转变是由加工气体环境决定的。

脆塑转变是关于切削过程的仿真,在一般情况下可以用临界切削深度 d_c 来评价。Inamura 等人^[6]提出了一项名叫重正化分子动力学的新型仿真技术,这项技术可以处理从纳米级到微米级的动力学现象。进行这项仿真时,在绝对真空环境下,以 20m/s 的速度、1 μm 的切深切削无缺陷的单晶硅材料。如图 1.4 所示,1 μm 和 1nm 切深的加工效果十分接近,没有发现明显的脆性行为。刀尖(金刚石)附近的硅原子密度分布明显变大,声发射信号是连续的,在刀具侧面区域,密度分布较低,发生的现象和裂纹很相似,有断断续续的声发射信号形成和发出。

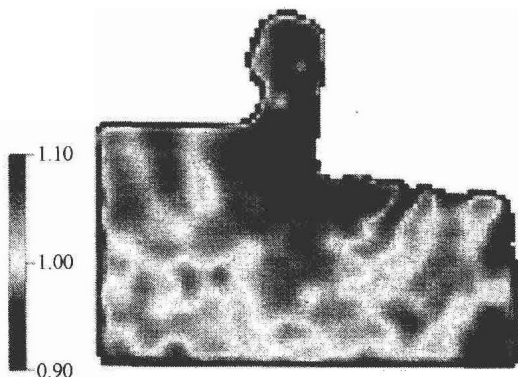
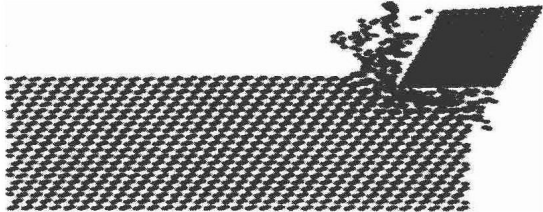


图 1.4 真空环境下切削时声发射密度分布快照(未变形切屑厚度 1 μm)

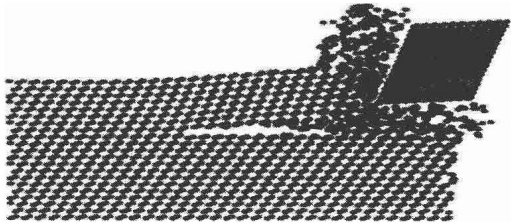
为观察刀具和工件的接触面吸收空气分子后的效果,在大气环境下对切削过程进行了仿真。仿真结果如图 1.5 所示,图 1.5(a)是 0.5 μm 的切深,图 1.5(b)是 1 μm 的切深,可以明显看出,切削时单晶硅呈现出脆性材料的性质。在图 1.5(b)中,刀尖前方的裂纹清晰可见,说明材料处于脆性切削模式;图 1.5(a)中刀刃前方没有裂纹,说明切削过程处于临界状态,即正处于由塑性模式到脆性模式的转换中。

为研究此裂纹的动力学机理,从断裂力学角度对应力区域进行了研究。基于图 1.5(b)的应力仿真结果如图 1.6 所示,表达了该过程的主应力,浅色代表拉应力,深色代表压应力。在放大图上,断线指示了拉应力方向。观察裂纹的末端,发现存在影响裂纹的拉应力集中,同时,刀具前方的切屑向上卷起,导致在水

平方向上也受拉应力影响,因此形成复合应力区域。裂纹扩展速度约为弹性传播速度的 1/4(约 2200m/s),这是合理的现象。



(a)



(b)

图 1.5 在空气环境下的仿真结果
(a)无变形切削深度 0.5 μm ; (b)无变形切削深度 1 μm 。

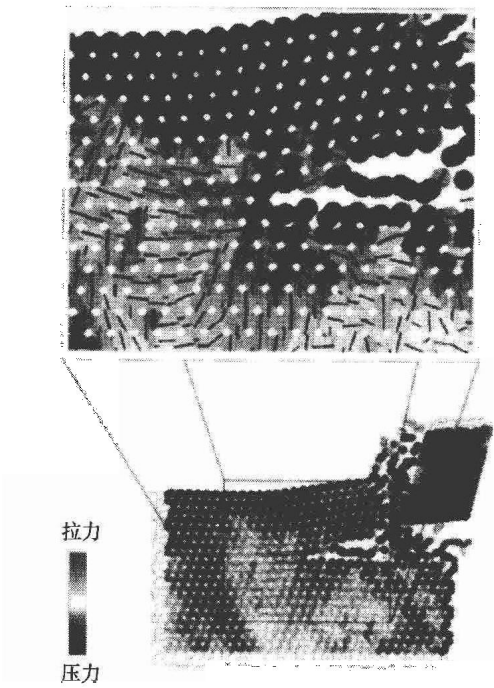


图 1.6 切削时工作区的应力分布(切削深度 1 μm)

由上面的结果,可以得出结论:裂纹的产生是由于刀刃附近应变能的瞬间释放,这个释放由空气分子(O_2)和活性分子(Si)的化学反应热所触发。这个结论同时可以解释在切削区域应变能聚集量很小的超轻磨削时,以及切削面心立方晶体结构的金属时,不是在脆性模式下切削的原因。这个结论还揭示了已存在裂纹能否扩展,取决于新表面产生所需能量和裂纹产生释放能量大小的关系,而这个关系由材料去除量决定。该观点已经被 Tanaka 和 Ueguchi 的实验研究“Grinding Process in Vacuum Atmosphere.”^[7]证明。

1.3 陶瓷塑性行为的加工过程观察

陶瓷塑性行为的加工观察由 Hatamura 等人首次提出,他们开发了如图 1.7 所示的系统^[8],它包括一个量程为 $50\mu\text{m}$ 、分辨率为 0.1nm 的 X - Y - Z 三向平台,能够测量法向力和切向力的平板型测压元件以及一个金刚石压头。实验

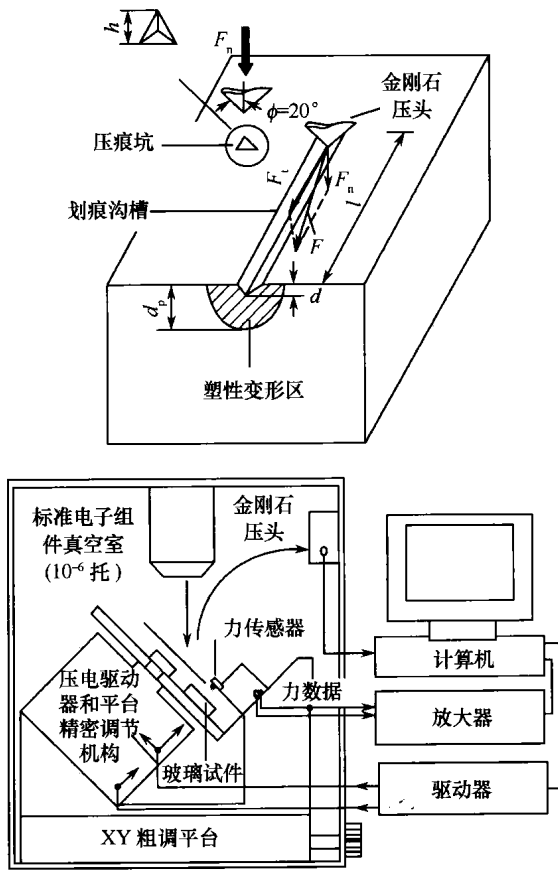


图 1.7 纳米压—划痕装置示意图(1 托 = 133.2Pa)