



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102737137 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 17

(21) 申请号 201110086259. 9

(22) 申请日 2011. 04. 07

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15  
号

(72) 发明人 虞钢 褚庆臣 郑彩云 宁伟健  
何秀丽

(74) 专利代理机构 北京中创阳光知识产权代理  
有限责任公司 11003

代理人 尹振启 马知非

(51) Int. Cl.

G06F 17/50 (2006. 01)

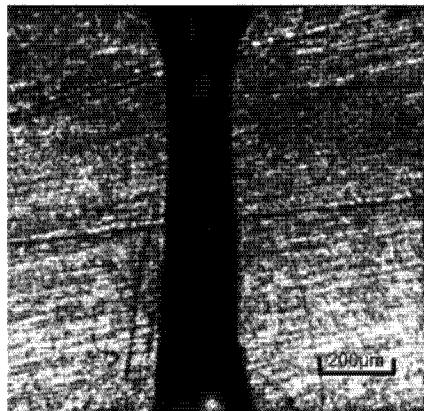
权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种激光精微打孔工艺参数优化方法

(57) 摘要

一种激光精微打孔工艺参数优化方法，所述方法主要包括以下步骤：1)、确定目标孔型；2)、根据目标孔型，进行工艺参数预测，并进行数值仿真；3)、然后根据数值仿真中的工艺参数进行实际打孔实验；4)、对工艺参数进行优化，最终得到目标工艺参数。本发明提供的激光精微打孔工艺参数优化方法可节省激光打孔试验前期大量的探索性试验，极大的减小了工作量，最大程度降低了试验成本，提高了加工效率。



1. 一种激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为:所述方法主要包括以下步骤:
  - 1)、确定目标孔型;
  - 2)、根据目标孔型,进行工艺参数预测,并进行数值仿真;
  - 3)、然后根据数值仿真中的工艺参数进行实际打孔实验;
  - 4)、对工艺参数进行优化,最终得到目标工艺参数。

2. 根据权利要求 1 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述步骤 2) 具体为:根据步骤 1) 所设定的目标孔型,进行数值仿真和工艺参数预测;建立激光打孔过程的二维物理模型;根据非线性热传导方程即式(1),计算出激光打孔的温度场演化过程,并输出可能满足要求的孔型和工艺参数:

激光打孔过程的二维非线性瞬态传热平衡方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中:T 为温度, ρ 是密度, c 是比热容, k 是热传导系数。

3. 根据权利要求 2 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述非线性热传导方程即式(1)中:由于激光打孔是非稳态的热传递过程,其边界条件和初始条件为:

初始条件取激光打孔初始时刻的温度分布,即为环境温度:

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (2)$$

在激光作用表面,

$$k \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{\varepsilon \alpha P}{\pi r(y)^2} \right) \exp \left[ -\frac{\varepsilon x^2}{r(y)^2} \right] \quad (3)$$

式中 P 为激光功率;r(y) 为激光光束半径;ε 为热流集中程度系数,对应于 ε 取 1,2,3 的值时,高斯热源的能量分布百分比分别为 63.2%,86.4%,95.02%;α 为材料对激光的吸收率,k 是热传导系数。P 是激光脉冲功率。

4. 根据权利要求 2 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述非线性热传导方程即式(1)中:在激光打孔过程中存在材料的熔化甚至汽化现象,所以在这个过程中存在着相变问题。并且,相变时会吸收或放出潜热,即相变潜热。相变潜热在一定的程度上会影响工件吸收激光能量的大小;通过定义材料的焓值随温度变化来考虑潜热,即

$$H = \int \rho c dT \quad (4)$$

式中,H 为热焓值,T 为温度,ρ 是密度,c 是比热容。

5. 根据权利要求 1 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述步骤 3) 具体为:所述光打孔工艺试验:该工艺试验包括激光打孔试验和对孔截面的试验观测两部分。

6. 根据权利要求 5 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述激光打孔试验采用脉冲激光制造系统,使用所述步骤 2) 中预测得到了激光参数进行激光打孔试验;并通过试样得到的激光孔进行线切割,打磨后在立体式显微镜观测孔的形状和尺寸。

7. 根据权利要求 1 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法,其特征为,所述步骤 4) 包括:

A、比较数值仿真孔型与实际孔型之间的差距,调整工艺参数;

B、重复步骤 3) 和 4)，最终得到目标工艺参数。

8. 根据权利要求 7 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法，其特征为，所述工艺参数优化具体为：对比目标孔型和步骤 3) 得到的孔型，得到两者的差异，根据步骤 2) 中所模拟的各种孔型的变化趋势，调整工艺参数，重新进行步骤 3)，直至得到满足要求的孔型。

9. 根据权利要求 2 中所述激光精微打孔工艺参数优化方法，其特征为，所述物理模型中的参数包括实际材料形状、尺寸，激光加载区域、有限元网格划分。

## 一种激光精微打孔工艺参数优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激光精微打孔工艺参数的优化方法，属于激光去除技术领域。

### 背景技术

[0002] 随着航空航天、电子、医疗器械等工业的发展，许多高精尖产品的关键零部件都需要设计许多微孔，以完成特定功能，从而提高产品的性能。比如在现代航空发动机涡轮叶片、导流叶片、燃烧室需要上万个微孔以实现冷却的作用。激光打孔技术以其可以打出大深径比孔、速度快、加工材料不受限制等优势，逐渐取代传统加工方法在一些加工领域得到广泛应用。

[0003] 对于激光精微打孔技术，涉及到材料性质（材料属性、热物性）、材料几何参数（厚度、长、宽等）、激光参数（激光功率、脉宽脉冲个数、保护气压力、离焦量等）等多参数问题。在实际加工产品时，需要得到特定大小和形状的激光孔，由于上述影响因素繁多，造成实际加工时需要大量摸索性试验，极易造成材料的破坏和加工成本的浪费。因此，要实现激光精微打孔的成本的有效控制，必须探索激光打孔的预测与优化。

[0004] 目前，对激光打孔的研究多针对物理机理的分析，而且都以激光未打透时的情况为研究对象，激光打孔实际加工时候仍需大量摸索，对于激光精微打孔工艺参数预测与优化，目前尚未见相关的研究报道或者是公布的专利技术。

### 发明内容

[0005] 本发明提供一种激光精微打孔工艺参数的优化方法，该方法主要包括以下步骤：1)、确定目标孔型；2)、根据目标孔型，进行工艺参数预测，并进行数值仿真；3)、然后根据数值仿真中的工艺参数进行实际打孔实验；4)、对工艺参数进行优化，最终得到目标工艺参数。

[0006] 进一步，所述步骤 2) 具体为：根据步骤 1) 所设定的目标孔型，进行数值仿真和工艺参数预测；建立激光打孔过程的二维（X-Y）物理模型；根据非线性热传导方程即式（1），计算出激光打孔的温度场演化过程，并输出可能满足要求的孔型和工艺参数：

[0007] 激光打孔过程的二维非线性瞬态传热热平衡方程：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

[0009] 式中：T 为温度，ρ 是密度，c 是比热容，k 是热传导系数。进一步，所述非线性热传导方程即式（1）中：由于激光打孔是非稳态的热传递过程，

[0010] 其边界条件和初始条件为：

[0011] 初始条件取激光打孔初始时刻的温度分布，即为环境温度：

$$T(x, y, 0) = T_0 \quad (2)$$

[0013] 在激光作用表面，

$$[0014] k \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{\varepsilon \alpha P}{\pi r(y)^2} \right) \exp \left[ -\frac{\varepsilon x^2}{r(y)^2} \right] \quad (3)$$

[0015] 式中 P 为激光功率 ;r(y) 为激光光束半径 ; $\varepsilon$  为热流集中程度系数, 对应于  $\varepsilon$  取 1, 2, 3 的值时, 高斯热源的能量分布百分比分别为 63. 2%, 86. 4%, 95. 02%;  $\alpha$  为材料对激光的吸收率, k 是热传导系数。P 是激光脉冲功率。

[0016] 进一步, 所述非线性热传导方程即式 (1) 中 : 在激光打孔过程中存在材料的熔化甚至汽化现象, 所以在这个过程中存在着相变问题。并且, 相变时会吸收或放出潜热, 即相变潜热。相变潜热在一定的程度上会影响工件吸收激光能量的大小; 通过定义材料的焓值随温度变化来考虑潜热, 即

$$[0017] H = \int \rho c dT \quad (4)$$

[0018] 式中, H 为热焓值, T 为温度,  $\rho$  是密度, c 是比热容。

[0019] 进一步, 所述步骤 3) 具体为 : 所述激光打孔工艺试验 : 该工艺试验包括激光打孔试验和对孔截面的试验观测两部分。

[0020] 进一步, 所述激光打孔试验采用脉冲激光制造系统, 使用所述步骤 2) 中预测得到了激光参数进行激光打孔试验; 并通过对试样得到的激光孔进行线切割, 打磨后在立体式显微镜观测孔的形状和尺寸。

[0021] 进一步, 所述步骤 4) 包括 :

[0022] A、比较数值仿真孔型与实际孔型之间的差距, 调整工艺参数;

[0023] B、重复步骤 3) 和 4), 最终得到目标工艺参数。

[0024] 进一步, 所述工艺参数优化具体为 : 对比目标孔型和步骤 3) 得到的孔型, 得到两者的差异, 根据步骤 2) 中所模拟的各种孔型的变化趋势, 调整工艺参数, 重新进行步骤 3), 直至得到满足要求的孔型。

[0025] 进一步, 所述物理模型中的参数包括实际材料形状、尺寸, 激光加载区域、有限元网格划分。

## 附图说明

[0026] 图 1 为激光精微打孔工艺参数优化方法具体步骤框图;

[0027] 图 2 为有限元网格;

[0028] 图 3 为通过有限元网格仿真所得到的孔型图;

[0029] 图 4 为实际打孔实验所得到的孔型截面图;

[0030] 图 5 为经过参数调整后实际打孔实验所得到的直筒孔型图。

## 具体实施方式

[0031] 图 1 为本发明的激光打孔方法中的步骤框图, 由该框图可知本发明中的激光精微打孔工艺参数的优化方法, 主要包括以下步骤:

[0032] 1、确定目标孔型;

[0033] 2、根据目标孔型, 进行工艺参数预测, 并进行数值仿真;

[0034] 3、然后根据数值仿真中的工艺参数进行实际打孔实验;

[0035] 4、比较数值仿真孔型与实际孔型之间的差距, 调整工艺参数;

[0036] 5、重复步骤 3、4，最终得到目标工艺参数。

[0037] 上述步骤具体如下：

[0038] 1、确定实际打孔工作所需的目标孔型；

[0039] 2、激光打孔与工艺参数预测：根据步骤 1 所设定的目标孔型；进行数值仿真和工艺参数预测。由于数值仿真比实际打孔试验具有高效、成本低等特点，本发明中工艺参数预测采用数值仿真方法。考虑到激光束和孔都具有轴对称的特点，建立反映激光打孔过程的二维物理模型。物理模型中的参数包括实际材料形状、尺寸，激光加载区域、有限元网格划分。根据非线性热传导方程即式（1），计算出激光打孔的温度场演化过程，并输出可能满足要求的孔型和工艺参数。

[0040] 激光打孔过程的二维非线性瞬态传热平衡方程：

$$[0041] \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

[0042] 式中：T 为温度，ρ 是密度，c 是比热容，k 是热传导系数。

[0043] 激光打孔是非稳态的热传递过程，其边界条件和初始条件为：

[0044] 初始条件取激光打孔初始时刻的温度分布，即为环境温度：

$$[0045] T(x, y, 0) = T_0 \quad (2)$$

[0046] 在激光作用表面，

$$[0047] k \frac{\partial T}{\partial y} = \left( \frac{\varepsilon \alpha P}{\pi r(y)^2} \right) \exp \left[ -\frac{\varepsilon x^2}{r(y)^2} \right] \quad (3)$$

[0048] 式中 P 为激光功率；r(y) 为激光光束半径；ε 为热流集中程度系数，对应于 ε 取 1, 2, 3 的值时，高斯热源的能量分布百分比分别为 63.2%，86.4%，95.02%；α 为材料对激光的吸收率，k 是热传导系数。P 是激光脉冲功率。

[0049] 在激光打孔过程中存在材料的熔化甚至汽化现象，所以在这个过程中存在着相变问题。并且，相变时会吸收或放出潜热，即相变潜热。相变潜热在一定的程度上会影响工件吸收激光能量的大小。一般是通过定义材料的焓值随温度变化来考虑潜热，即

$$[0050] H = \int \rho c dT \quad (4)$$

[0051] 式中，H 为热焓值，T 为温度，ρ 是密度，c 是比热容。

[0052] 针对激光打孔的特点，设计合理的算法求解激光打孔过程中温度的变化并捕捉小孔的界面变化，最终给出满足特定孔型的工艺参数。

[0053] 3、激光打孔工艺试验：该工艺试验包括激光打孔试验和对孔截面的试验观测两部分。激光打孔试验采用脉冲激光制造系统，可调整的工艺参数包括脉冲激光功率，脉宽，脉冲个数，占空比等；以步骤 2 预测得到了激光参数进行激光打孔试验。对试样得到的激光孔进行线切割，打磨后在立体式显微镜观测孔的形状和尺寸。

[0054] 4、工艺优化：对比步骤 1 中所设定的目标孔型和步骤 3 得到的孔型，得到两者的差异，根据步骤 2 中所模拟的各种孔型的变化趋势，调整工艺参数，重新进行步骤 3，直至得到满足要求的孔型。

[0055] 下面结合附图和具体实施例子，对本发明提供的方法进一步说明：

[0056] 现代工业制造中许多零部件为了满足特殊的性能要求，常需要加工出特定形状的小孔，比如直筒型、正锥型、倒锥型等孔型。比如发动机涡轮叶片、喷油嘴等为了满足性能要

求,常需要大量直筒型的细微小孔。

[0057] 下面具体实施例说明本发明的具体步骤:

[0058] 1、确定目标孔型:要求在1mm厚301不锈钢板得到孔径约0.2mm直筒型的激光孔。材料成分如下:

[0059] 表1 301不锈钢的化学成分(质量分数, %)

	C	Cr	Ni	Mn	P	S	N	Fe
[0060]	≤0.15	17.00-18.00	6.0-8.0	1.0-2.0	0.02-0.04	0.02-0.04	≤ 0.10	Bal.

[0061] 2、激光打孔的数值仿真与工艺参数预测:如图2中所示,考虑孔径小于0.3mm的激光作用域在1mm范围内,建立2mm×1mm的计算域,对其赋值不锈钢的材料属性并划分有限元网格。对有限元模型进行激光打孔过程仿真,试探性激光参数如表2,仿真得到的孔型如图3。

[0062] 表2 激光工艺参数

	激光脉冲功率	脉宽	个数	离焦量
[0063]	① 1000	2	1	-0.5
	② 1000	2	1	-0.2
	③ 1000	2	1	0
	④ 1000	2	1	+0.2
	⑤ 1000	4	1	0

[0064] 3、激光打孔工艺试验:对表2所示激光工艺参数进行激光打孔试验,试验后观察各孔型如图4所示。

[0065] 4、工艺优化:对步骤2得到的孔型分析可以看出,随激光工艺参数从负离焦量变化到正离焦量时,孔型从正锥型变化到倒锥型;在同一离焦量下变化脉宽时孔尺寸改变,孔型变化不大。鉴于此,可以猜测要求得到的直筒型孔的工艺参数在工艺参数图4中的③左右。考虑到实际激光试验重复性较差的特点,经过对图4中③所对应的工艺参数进行多次做微调整可以得到满足要求的孔型,如图5中所示,工艺参数为激光脉冲功率1000W,脉宽2ms,脉冲个数1,离焦量-0.1。

[0066] 从上述过程可以看出,本发明中所公开激光精微打孔工艺参数的优化方法通过设计合理的程序算法对激光打孔过程进行仿真,初步预测满足实际孔型和尺寸要求的激光打孔工艺参数,并以此参数进行实际激光打孔试验,通过对比试验结果和计算结果调整激光加工参数,最终确定需要的工艺参数及孔型。本发明提供的激光精微打孔工艺参数优化方法可节省激光打孔试验前期大量的探索性试验,极大的减小了工作量,最大程度降低了试验成本,提高了加工效率。

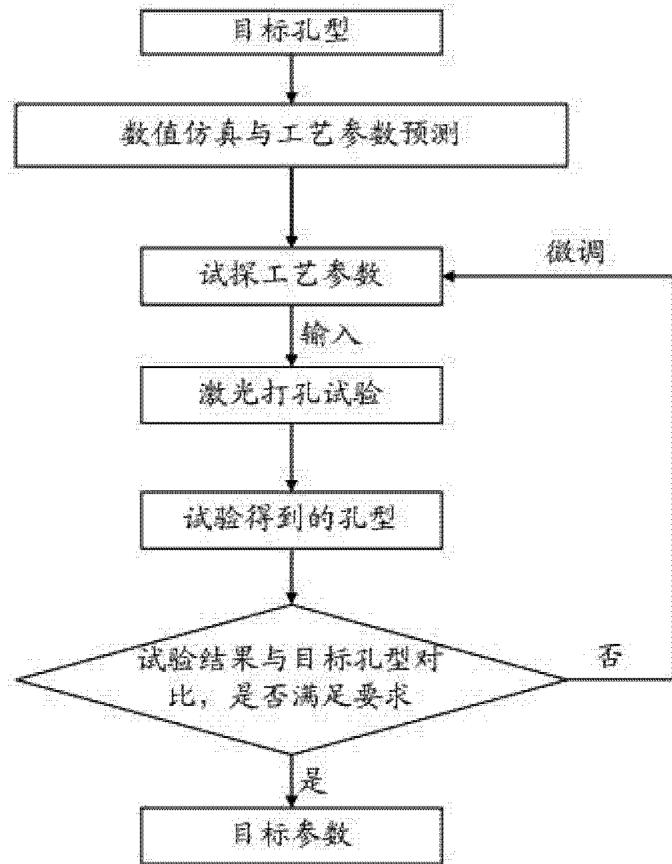


图 1

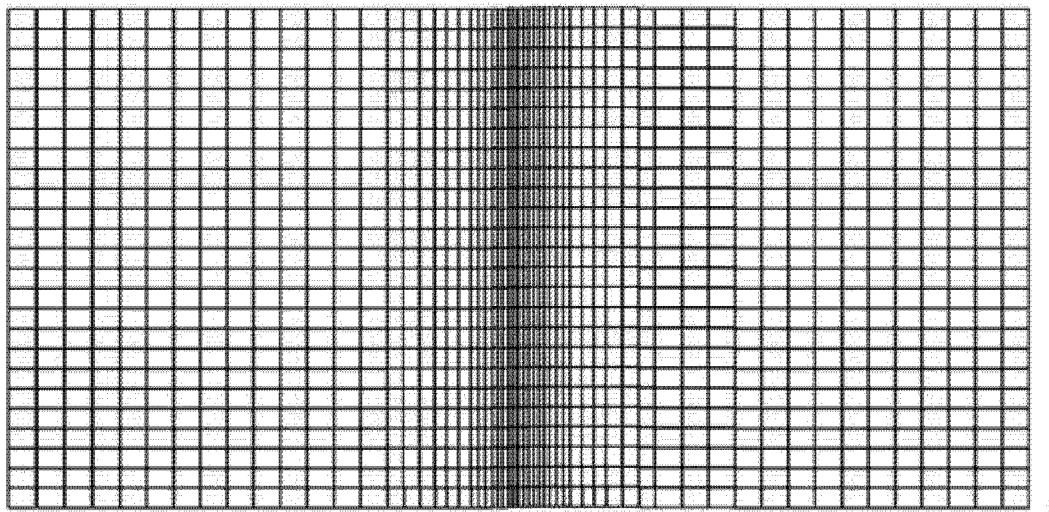


图 2

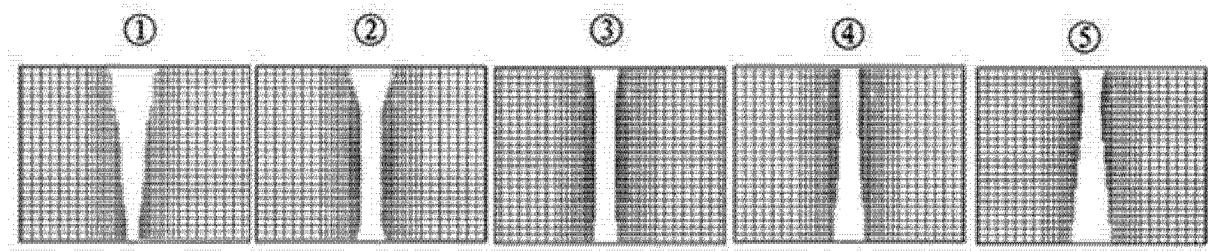


图 3

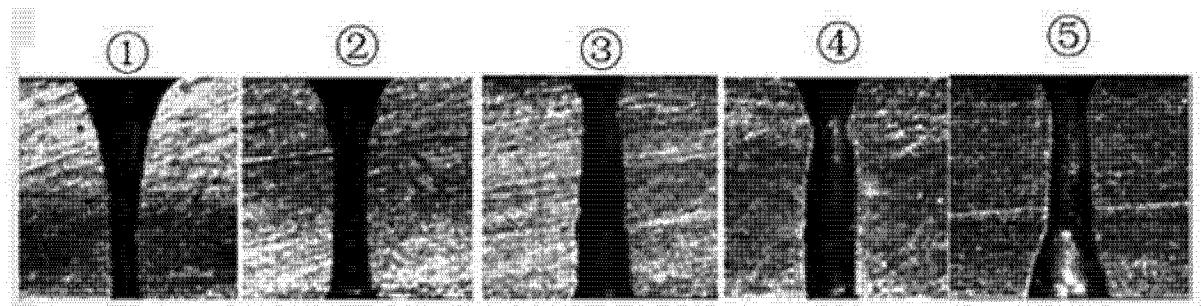


图 4

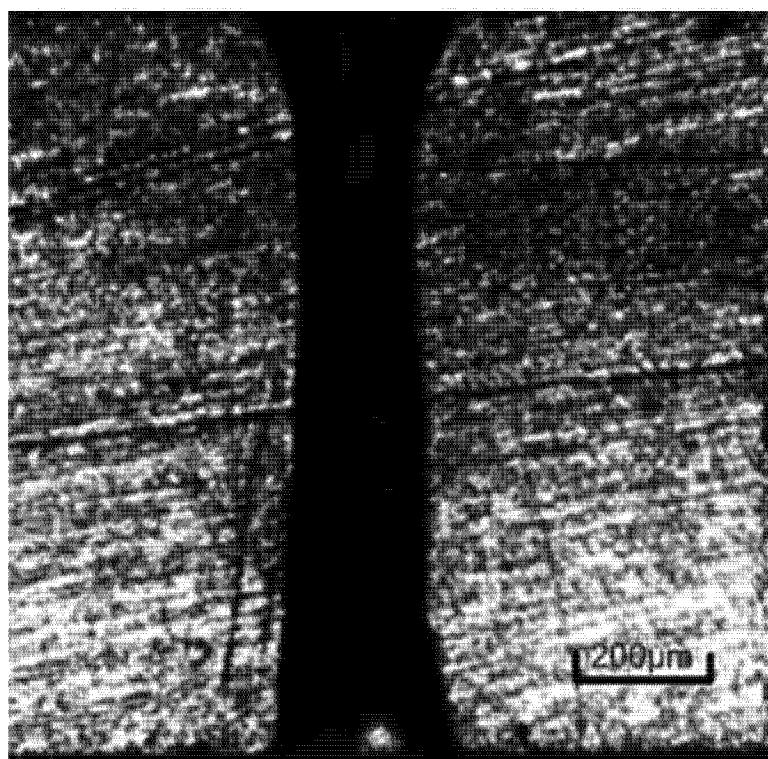


图 5