



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112317961 B

(45) 授权公告日 2022.06.24

(21) 申请号 202011075274.9

B23K 26/146 (2014.01)

(22) 申请日 2020.10.09

B23K 26/14 (2014.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

B23K 26/064 (2014.01)

申请公布号 CN 112317961 A

B23K 26/06 (2014.01)

(43) 申请公布日 2021.02.05

审查员 彭绍

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西
大直街92号

(72) 发明人 郭振飞 郭兵 赵清亮 尹航
刘文超

(74) 专利代理机构 哈尔滨市阳光惠远知识产权
代理有限公司 23211

专利代理师 刘景祥

(51) Int. Cl.

B23K 26/36 (2014.01)

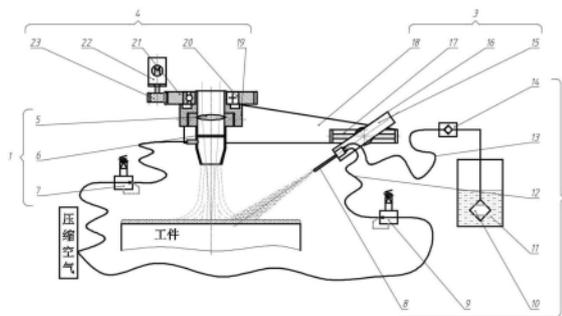
权利要求书2页 说明书8页 附图10页

(54) 发明名称

一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置及其加工方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置及其加工方法。所述加工装置包括激光聚焦装置1、喷雾装置2、喷雾调整装置3和旋转装置4,所述旋转装置4安装在激光聚焦装置1上,所述旋转装置4与喷雾调整装置3相连接,所述喷雾调整装置3上设置喷雾装置2。本发明为了解决现有的水辅助激光微加工中加工效率、加工精度和加工分辨率低的问题。



1. 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,其特征在于:所述加工装置包括激光聚焦装置(1)、喷雾装置(2)、喷雾调整装置(3)和旋转装置(4),所述旋转装置(4)安装在激光聚焦装置(1)上,所述旋转装置(4)与喷雾调整装置(3)相连接,所述喷雾调整装置(3)上设置喷雾装置(2);

所述喷雾装置(2)包括喷雾头(8)、调压阀Ⅱ(9)、过滤器(10)、单向阀(11)、水槽(12)、气管(13)和水管(14),压缩空气通过气管(13)经过调压阀Ⅱ(9)到达喷雾头(8),所述喷雾头(8)通过水管(14)依次连接单向阀(11)、过滤器(10)和水槽(12),所述喷雾头(8)处的压缩空气输入压力为0.2~0.4MPa,所述喷雾头(8)出口直径为0.5~3mm,喷射雾化角度10~20°,水雾的雾化粒径为10~100 μm 。

2. 根据权利要求1所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,其特征在于:所述激光聚焦装置(1)包括聚焦透镜(5)、防护锥管(6)和调压阀Ⅰ(7),所述聚焦透镜(5)安装在防护锥管(6)内的上端,所述防护锥管(6)侧面装有调压阀Ⅰ(7),保护气通过调压阀Ⅰ(7)进入防护锥管(6)内,所述防护锥管(6)在下端开有圆形激光出口,脉冲激光通过聚焦透镜(5)聚焦并从圆形激光出口射出。

3. 根据权利要求1所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,其特征在于:所述喷雾调整装置(3)包括支撑板(15)、直线位移滑台Ⅰ(16)、转台(17)和直线位移滑台Ⅱ(18),所述直线位移滑台Ⅱ(18)安装在转台(17)上,所述转台(17)安装在直线位移滑台Ⅰ(16)上,所述直线位移滑台Ⅰ(16)安装在支撑板(15)上,所述支撑板(15)安装在旋转装置(4)上,所述喷雾头(8)安装在支撑板(15)上。

4. 根据权利要求3所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,其特征在于:所述旋转装置(4)为中空的电控旋转台,所述旋转装置(4)包括轴承座(19)、轴承(20)、齿轮Ⅰ(21)、电动机(22)和齿轮Ⅱ(23),所述轴承座(19)与防护锥管(6)通过螺栓连接,所述支撑板(15)固定于齿轮Ⅰ(21)之上,所述轴承(20)安装于轴承座(19)之中,所述齿轮Ⅰ(21)与轴承座(19)相连接,所述电动机(22)与齿轮Ⅱ(23)相连接,所述齿轮Ⅱ(23)与齿轮Ⅰ(21)啮合。

5. 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,其特征在于:所述加工方法包括以下步骤,

步骤1:开启激光聚焦装置(1)的保护气;

步骤2:调整喷雾调整装置(3)的上下位置和角度;

步骤3:调整喷雾调整装置(3)的水平位置,确保脉冲激光通过激光聚焦装置(1)后照射在快速流动超薄水膜的稳定区;

步骤4:根据脉冲激光和水膜参数进行单次激光加工烧蚀形貌的求解;

步骤5:根据单次激光加工烧蚀形貌的宽度和深度数值和待加工工件几何参数制定最终脉冲激光加工轨迹;

步骤6:开启脉冲激光,使激光聚焦在待加工区的工件表面上实现工件材料的超薄水膜辅助激光微加工,根据上述步骤获得的加工轨迹进行脉冲激光微加工。

6. 根据权利要求5所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,其特征在于:所述步骤1具体为,聚焦透镜(5)的焦距 L 为50~200mm,防护锥管(6)的激光出口直径 r_0 可由公式 $r_0 = (L-H)R/L$ 计算确定,其中 R 为聚焦透镜(5)的半径, H 为聚焦透镜距防护锥管(6)管口的距离,取聚焦透镜(5)的焦距 L 长度的1/4~1/3;由于防护气流对水膜有一定的冲

击效果,为防止破坏水膜的流动状态,应保证防护锥管管口距离水膜表面存在一段安全距离 H_1 ,计算公式为:

$$H_1 = \frac{\frac{CQ_v^2}{\rho_1 g r_0^3} - 4h^2}{h}$$

式中: C 为空气对水的冲击常数, $C \approx 0.4$; Q_v 为防护气流量, $0.6 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$; ρ_1 为水的密度, $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; r_0 为防护锥管管口半径, $r_0 = (2/3 \sim 3/4) R$; h 为水膜凹陷的深度, $0 \sim 0.01 \text{ mm}$ 。

7. 根据权利要求5所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,其特征在于:所述步骤2具体为,使喷雾装置(2)喷射出的水雾射流与工件表面的喷射夹角为 $35^\circ \sim 50^\circ$,流量应为 $0.001 \sim 0.002 \text{ kg}/\text{s}$,喷雾头(8)距离工件表面的高度为 $50 \sim 70 \text{ mm}$,以保证水雾射流撞击工件表面后形成稳定的且快速流动的水膜,调节调压阀II(9)使水膜厚度为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,流速为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m}/\text{s}$,所述水雾由蒸馏水或去离子水产生。

8. 根据权利要求5所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,其特征在于:所述步骤3具体为,调整喷雾调整装置(3)的水平位置使水雾射流撞壁点中线距激光焦点的距离为 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 。

9. 根据权利要求5所述一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,其特征在于:所述步骤4具体为,烧蚀形貌宽度 w 计算公式为:

$$w = \sqrt{2\omega_0^2(1 + H^2) \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_m h_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1 + H^2)} \right)}$$

其中, $H = \frac{z^2}{|z| + z_s(h_m)}$, f 代表脉冲激光的重复频率, Z_s 表示水膜折射导致得激光实际焦点的偏移距离, z_R 表示瑞利长度, ω_0 表示激光的束腰半径, s 表示水膜对激光反射所造成能量损失后的能量密度百分比, α_m 为水对激光的吸收系数, h_m 为水膜厚度, P 为激光功率, z 为激光束传播方向上的距离, I_{th} 为激光能量密度;

烧蚀形貌深度 h 计算公式为:

$$h = kN \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_m h_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1 + H^2)} \right)$$

其中, N 表示等效脉冲数, k 表示材料光学渗透深度系数。

一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置及其加工方法

技术领域

[0001] 本发明属于微细加工领域,具体为一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置及其加工方法。

背景技术

[0002] 传统激光加工是通过热效应以及其他作用使材料熔化、汽化以及化学分解,从而实现材料去除。但是除超短脉冲激光(脉宽小于10ps是通过材料的多光子吸收,在极短时间内产生热量使材料汽化并迅速冷却,基本无热效应外,其余激光都表现出明显的热效应。这就使得激光加工技术具有一个很大的局限性,特别是在微细加工领域。受热效应影响,在脉冲激光微加工过程中极易产生热应力和重铸现象,从而降低激光微加工的精度和质量。水辅助激光加工技术是一种可以弥补传统激光加工劣势的新型复合微细加工技术,在激光加工过程中通过水介质的冲刷和冷却作用,可以有效降低加工热影响和重铸现象。现有水辅助激光加工技术主要为水导激光加工、水下激光加工和水射流激光加工,受水介质的厚度影响,现有水辅助激光加工技术中激光都会严重受到水介质的吸收、反射和折射作用等的影响,限制了其激光加工效率、加工精度和加工分辨率的提升。

发明内容

[0003] 本发明将提出一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置及加工方法,在不降低水介质冲刷和冷却作用的同时,极大减小水介质的厚度,为了解决现有的水辅助激光微加工中加工效率、加工精度和加工分辨率低的问题。

[0004] 本发明通过以下技术方案实现:

[0005] 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,所述加工装置包括激光聚焦装置1、喷雾装置2、喷雾调整装置3和旋转装置4,所述旋转装置4安装在激光聚焦装置1上,所述所述旋转装置4与喷雾调整装置3相连接,所述喷雾调整装置3 上设置喷雾装置2。

[0006] 进一步的,所述激光聚焦装置1包括聚焦透镜5、防护锥管6和调压阀7,所述聚焦透镜5安装在防护锥管6内的上端,所述防护锥管6侧面装有调压阀I7,保护气通过调压阀7进入防护锥管6内,所述防护锥管6在下端开有圆形激光出口,脉冲激光通过聚焦透镜5聚焦并从圆形激光出口射出。

[0007] 进一步的,所述喷雾装置2包括喷雾头8、调压阀II 9、过滤器10、单向阀11、水槽12、气管13和水管14,压缩空气通过气管13经过调压阀9到达喷雾头8,所述喷雾头8通过水管14依次连接单向阀11、过滤器10和水槽12,所述喷雾头8处的压缩空气输入压力为0.2~0.4MPa,所述喷雾头8出口直径为0.5~3mm,喷射雾化角度10~20°,水雾的雾化粒径为10~100μm。

[0008] 进一步的,所述喷雾调整装置3包括支撑板15、直线位移滑台I 16、转台17 和直线位移滑台II 18,所述直线位移滑台II 18安装在转台17上,所述转台17安装在直线位移滑台I16上,所述直线位移滑台I 16安装在支撑板15上,所述支撑板 15安装在旋转装置4上,所

述喷雾头8安装在支撑板15上。

[0009] 进一步的,所述旋转装置4为中空的电控旋转台,所述旋转装置4包括轴承座19、轴承20、齿轮I21、电动机22和齿轮II 23,所述轴承座19与防护锥管6通过螺栓连接,所述支撑板15固定于齿轮I23之上,所述轴承20安装于轴承座19之中,所述齿轮I21与轴承19相连接,所述电动机22与齿轮II 23相连接,所述齿轮II 23与齿轮I21啮合。

[0010] 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,所述加工方法包括以下步骤,

[0011] 步骤1:开启激光聚焦装置1的保护气;

[0012] 步骤2:调整喷雾调整装置3的上下位置和角度;

[0013] 步骤3:调整喷雾调整装置3的水平位置,确保脉冲激光通过激光聚焦装置1后照射在快速流动超薄水膜的稳定区;

[0014] 步骤4:根据脉冲激光和水膜参数进行单次激光加工烧蚀形貌的求解;

[0015] 步骤5:根据单次激光加工烧蚀形貌的宽度和深度数值和待加工工件几何参数制定最终脉冲激光加工轨迹;

[0016] 步骤6:开启脉冲激光,使激光聚焦在待加工区的工件表面上实现工件材料的超薄水膜辅助激光微加工,根据上述步骤获得的加工轨迹进行脉冲激光微加工。

[0017] 进一步的,所述步骤1具体为,聚焦透镜5的焦距L为50~200mm,防护锥管6的激光出口直径 r_0 可由公式 $r_0=L-HR/L$ 计算确定,其中R为聚焦透镜5的半径,H为聚焦透镜距防护锥管6管口的距离,取聚焦透镜5的焦距L长度的1/4~1/3。由于防护气流对水膜有一定的冲击效果,为防止破坏水膜的流动状态,应保证防护锥管管口距离水膜表面存在一段安全距离 H_1 ,计算公式为:

$$[0018] \quad H_1 = \frac{\frac{CQ_v^2}{\rho_1 g r_0^3} - 4h^2}{h}$$

[0019] 式中:C为空气对水的冲击常数, $C \approx 0.4$; Q_v 为防护气流量, $0.6 \sim 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$; ρ_1 为水的密度, $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; g为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; r_0 为防护锥管管口半径, $r_0 = 2/3 \sim 3/4 R$; h为水膜凹陷的深度, $0 \sim 0.01 \text{ mm}$ 。

[0020] 进一步的,所述步骤2具体为,使喷雾装置2喷射出的水雾射流与工件表面的喷射夹角为 $35^\circ \sim 50^\circ$,流量应为 $0.001 \sim 0.002 \text{ kg}/\text{s}$,所述喷雾头8距离工件表面的高度为50~70mm,以保证水雾射流撞击工件表面后形成稳定的且快速流动的水膜,调节调压阀9使水膜厚度为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,流速为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m}/\text{s}$,所述水雾由蒸馏水或去离子水产生。

[0021] 进一步的,所述步骤3具体为,调整喷雾调整装置3的水平位置使水雾射流撞壁点中线距激光焦点的距离为20-40mm。

[0022] 进一步的,所述步骤4具体为,烧蚀形貌宽度w计算公式为:

$$[0023] \quad w = \sqrt{2\omega_0^2(1+H^2) \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_m h_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1+H^2)} \right)}$$

[0024] 其中, $H = \frac{z^2}{|z| + z_s(h_m)}$, f代表脉冲激光的重复频率, Z_s 表示水膜折射导致得激光实际焦

点的偏移距离, z_R 表示瑞利长度, ω_0 表示激光的束腰半径, s 表示水膜对激光反射所造成能量损失后的能量密度百分比, α_m 为水对激光的吸收系数, h_m 为水膜厚度, P 为激光功率, z 为激光束传播方向上的距离, I_{th} 为激光能量密度;

[0025] 烧蚀形貌深度 h 计算公式为:

$$[0026] \quad h = kN \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_m h_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2 (1 + H^2)} \right)$$

[0027] 其中, N 表示等效脉冲数, k 表示材料光学渗透深度系数。

[0028] 本发明的有益效果是:

[0029] 1. 本发明通过精确制定喷雾射流撞壁参数从而快速流动的超薄水膜, 在不降低水介质冲刷和冷却作用的同时, 有效减少了水介质对激光的吸收、反射和折射影响, 从而提升了脉冲激光的加工效率、加工精度和加工分辨率。实验结果表明, 相同参数下材料去除率可提升100%以上, 加工精度可提升20-50%, 加工分辨率可提升5-10%。

[0030] 2. 本发明由于是有压缩空气的虹吸原理形成的喷雾射流撞壁超薄水膜, 水膜影响面积小(水膜稳定面积直径通常小于50mm)且水膜稳定性强, 不易受待加工工件的表面形貌和几何结构影响, 因此加工稳定, 可应用于各种微小表面或复杂表面的脉冲激光微加工。

[0031] 3. 本发明耗水量在0.002kg/s以内, 与现有水辅助激光加工相比, 耗水量极小, 且更环保。

[0032] 4. 本发明使用方便, 通用性好, 适用于多种脉冲激光加工条件, 可加装在多种激光加工设备。

附图说明

[0033] 图1为本发明的结构示意图。

[0034] 图2为本发明的超薄水膜辅助脉冲激光微加工原理图。

[0035] 图3为本发明的喷雾撞壁仿真粒子轨迹图。

[0036] 图4为本发明的喷雾撞壁成膜厚度分布图。

[0037] 图5为本发明的喷雾撞壁成膜流速分布图。

[0038] 图6为本发明的不同喷雾流量撞壁水膜分布图。

[0039] 图7为本发明的不同喷射角度撞壁水膜分布图。

[0040] 图8为本发明的喷射倾斜角度变化对撞壁水膜厚度与流速的影响示意图。

[0041] 图9为本发明的喷射流量变化对撞壁水膜厚度与流速的影响示意图。

[0042] 激光聚焦装置1, 喷雾装置2, 喷雾调整装置3, 旋转装置4, 聚焦透镜5, 防护锥管6, 调压阀I 7, 喷雾头8, 调压阀II 9, 过滤器10, 单向阀11, 水槽12, 气管13, 水管14, 支撑板15, 直线位移滑台I 16, 转台17, 直线位移滑台II 18, 轴承座19, 轴承20, 齿轮I 21, 电动机22, 齿轮II 23。

具体实施方式

[0043] 下面将结合本发明实施例中的附图对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例, 而不是全部的实施例。基于本

发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0044] 实施例1

[0045] 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置,所述加工装置包括激光聚焦装置1、喷雾装置2、喷雾调整装置3和旋转装置4,所述旋转装置4安装在激光聚焦装置1上,所述旋转装置4与喷雾调整装置3相连接,所述喷雾调整装置3上设置喷雾装置2。可实现喷雾装置2与激光聚焦装置1在Y-Z平面内的精确调整,并且可实现调整后喷雾装置2在X-Y平面内绕激光聚焦装置1的实时转动。

[0046] 进一步的,所述激光聚焦装置1包括聚焦透镜5、防护锥管6和调压阀I 7,所述聚焦透镜5安装在防护锥管6内的上端,所述防护锥管6侧面装有调压阀I 7,保护气通过调压阀I 7进入防护锥管6内,所述防护锥管6在下端开有圆形激光出口,脉冲激光通过聚焦透镜5聚焦并从圆形激光出口射出。所述防护锥管6利用保护气的气流防止水雾或粉尘影响激光聚焦光路,并同时保证保护气的气流不影响到工件表面的流动水膜。

[0047] 进一步的,所述喷雾装置2包括喷雾头8、调压阀II 9、过滤器10、单向阀11、水槽12、气管13和水管14,压缩空气通过气管13经过调压阀II 9到达喷雾头8,所述喷雾头8通过水管14依次连接单向阀11、过滤器10和水槽12,所述喷雾装置2利用虹吸喷雾原理生成微细水雾射流;所述喷雾头8处的压缩空气输入压力为0.2~0.4MPa,所述喷雾头8出口直径为0.5~3mm,喷射雾化角度10~20°,水雾的雾化粒径为10~100 μ m。

[0048] 进一步的,所述喷雾调整装置3包括支撑板15、直线位移滑台I 16、转台17和直线位移滑台II 18,所述直线位移滑台II 18安装在转台17上,所述转台17安装在直线位移滑台I 16上,所述直线位移滑台I 16安装在支撑板15上,所述支撑板15安装在旋转装置4上,所述喷雾头8安装在支撑板15上。通过喷雾调整装置3以调整喷雾头8与脉冲激光焦点的位置,从而调整喷射出的水雾与工件表面撞壁后形成的快速流动超薄水膜的状态,以及脉冲激光焦点处于快速流动超薄水膜中的相对位置。

[0049] 进一步的,所述旋转装置4为中空的电控旋转台,所述旋转装置4包括轴承座19、轴承20、齿轮I21、电动机22和齿轮II 23,所述轴承座19与防护锥管6通过螺栓连接,使旋转装置4与激光聚焦装置1相连,所述支撑板15固定于齿轮I23之上,使喷雾调整装置3与旋转装置4相连,所述轴承20安装于轴承座19之中,所述齿轮I21与轴承19相连接,所述电动机22与齿轮II 23相连接,所述齿轮II 23与齿轮I21啮合。脉冲激光加工时,旋转装置4根据激光加工运动轨迹进行实时转动,使喷雾装置2始终位于激光聚焦装置1的运动前方,即确保由喷雾装置2产生的超薄水膜的流动方向始终与激光加工运动方向相反。其中旋转装置4的转动角度为 $\pm 180^\circ$ 。

[0050] 一种超薄水膜辅助脉冲激光微加工装置的加工方法,所述加工方法包括以下步骤,

[0051] 步骤1:开启激光聚焦装置1的保护气;利用保护气的气流防止水雾或粉尘影响激光聚焦光路,并同时保证保护气的气流不影响到工件表面的流动水膜。其中所述保护气可为压缩空气或氮气等惰性气体,保护气的流量为0.6~1.5 m^3/h ;

[0052] 步骤2:调整喷雾调整装置3的上下位置和角度;

[0053] 步骤3:调整喷雾调整装置3的水平位置,确保脉冲激光通过激光聚焦装置1后照

射在快速流动超薄水膜的稳定区；

[0054] 步骤4:根据脉冲激光和水膜参数进行单次激光加工烧蚀形貌的求解；

[0055] 步骤5:根据单次激光加工烧蚀形貌的宽度和深度数值和待加工工件几何参数制定最终脉冲激光加工轨迹；

[0056] 步骤6:开启脉冲激光,使激光聚焦在待加工区的工件表面上实现工件材料的超薄水膜辅助激光微加工,根据上述步骤获得的加工轨迹进行脉冲激光微加工。在加工过程中利用旋转装置4确保喷雾装置2始终位于激光聚焦装置1的运动前方并随其同步运动使快速流动超薄水膜始终覆盖工件的待加工区表面,且激光焦点始终保持在快速流动超薄水膜的稳定区。其中所述脉冲激光为脉宽为 100ns~10ps,波长为355nm~1064nm,功率为0.5W~10W。

[0057] 进一步的,所述步骤1具体为,聚焦透镜5的焦距L为50~200mm,防护锥管6的激光出口直径 r_0 可由公式 $r_0=L-HR/L$ 计算确定,其中R为聚焦透镜5的半径,H为聚焦透镜距防护锥管6管口的距离,取聚焦透镜5的焦距L长度的 1/4~1/3。由于防护气流对水膜有一定的冲击效果,为防止破坏水膜的流动状态,应保证防护锥管管口距离水膜表面存在一段安全距离 H_1 ,计算公式为:

$$[0058] \quad H_1 = \frac{\frac{CQ_v^2}{\rho_1 g r_0^3} - 4h^2}{h}$$

[0059] 式中:C为空气对水的冲击常数, $C \approx 0.4$; Q_v 为防护气流量, $0.6 \sim 1.5 \text{m}^3/\text{h}$; ρ_1 为水的密度, $1000 \text{kg}/\text{m}^3$; g 为重力加速度, $9.8 \text{m}/\text{s}^2$; r_0 为防护锥管管口半径, $r_0 = 2/3 \sim 3/4R$; h 为水膜凹陷的深度, $0 \sim 0.01 \text{mm}$ 。

[0060] 进一步的,所述步骤2具体为,使喷雾装置2喷射出的水雾射流与工件表面的喷射夹角为 $35^\circ \sim 50^\circ$,流量应为 $0.001 \sim 0.002 \text{kg}/\text{s}$,所述喷雾头8距离工件表面的高度为 $50 \sim 70 \text{mm}$,以保证水雾射流撞击工件表面后形成稳定的且快速流动的水膜,调节调压阀9使水膜厚度为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,流速为 $0.4 \sim 0.6 \text{m}/\text{s}$,所述水雾由蒸馏水或去离子水产生。

[0061] 进一步的,所述步骤3具体为,调整喷雾调整装置3的水平位置使水雾射流撞壁点中线距激光焦点的距离为 $20 \sim 40 \text{mm}$ 。

[0062] 进一步的,所述步骤4具体为,烧蚀形貌宽度 w 计算公式为:

$$[0063] \quad w = \sqrt{2\omega_0^2(1+H^2) \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_m h_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1+H^2)} \right)}$$

[0064] 其中, $H = \frac{z^2 + z_s(h_m)}{z_R}$, f 代表脉冲激光的重复频率, z_s 表示水膜折射导致得激光实际焦点的偏移距离, z_R 表示瑞利长度, ω_0 表示激光的束腰半径, s 表示水膜对激光反射所造成能量损失后的能量密度百分比, α_m 为水对激光的吸收系数, h_m 为水膜厚度, P 为激光功率, z 为激光束传播方向上的距离, I_{th} 为激光能量密度;

[0065] 烧蚀形貌深度 h 计算公式为:

$$[0066] \quad h = kN \ln \left(\frac{2sPe^{-\alpha_{mh_m}}}{\pi f l_{th} \omega_0^2 (1 + H^2)} \right)$$

[0067] 其中,N表示等效脉冲数,k表示材料光学渗透深度系数。

[0068] 在不降低水介质冲刷和冷却作用的同时,有效减少了水介质对激光的吸收、反射和折射影响,从而提升了脉冲激光的加工效率、加工精度和加工分辨率。

[0069] 该发明不易受待加工工件的表面形貌和几何结构影响,因此加工稳定,可应用于各种微小表面或复杂表面的脉冲激光微加工。该发明耗水量在0.002kg/s以内,与现有水辅助激光加工相比,耗水量极小,且更环保。该发明使用方便,通用性好,适用于多种脉冲激光加工条件,可加装在多种激光加工设备。

[0070] 实施例2

[0071] 1. 形成超薄水膜的喷雾射流撞壁设置参数的求解:

[0072] 基于DPM离散相建立喷雾撞壁成膜的仿真模型,以获得水膜的厚度与流速分布情况并得到喷雾参数变化对水膜厚度与流速的影响规律。根据喷雾的特点,选用遵循欧拉-拉格朗日方法的拉格朗日离散相模型来模拟喷雾撞壁的整个过程。将流场区域建模并划分网格,网格大小为0.005m,应保证网格尺寸大于设置的液滴尺寸,设置喷雾头出口直径应在0.5~3mm范围内,喷射雾化角度10~20°,水雾的雾化粒径为10~100μm,喷雾头距离工件表面的高度为50~70mm。进行初始化并设置求解选项,时间步长规模为0.002s,时间迭代步数为500。同时在求解前设置监控,采用双精度五通道并行运算求解,即可获得如图3所示的喷射粒子分布以及轨迹(角度为40度,质量流量为0.001kg/s)。

[0073] 由以上两图可以观察到喷雾喷射的液滴是自撞壁点成放射状散布开的,并且凝聚在壁面上的液滴流动积聚成类椭圆的液膜形状。相应的水膜厚度与流速分布图如4以及5(角度为40°,质量流量为0.001kg/s)所示。

[0074] 由液膜厚度分布的图像可以了解到喷雾撞壁形成的液膜在沿喷射方向上厚度分布是不均匀的,也没有固定的增减规律。并且沿喷射方向线撞壁点的水膜厚度最小前后的水膜都明显增厚。如图4在质量流量0.001kg/s以及喷射角度为40°的参数设置下成膜的厚度在60-130μm之间。

[0075] 通过以上对于喷雾撞壁水膜相关参数分布的分析,可以在水膜覆盖区域选择合适的位置进行水膜辅助激光加工。根据综述调研以及其他研究者的实验探究,水膜辅助激光加工的关键是激光加工点位置形成薄而快速流动的水膜。根据水膜厚度与流速的分布应当调整激光光斑位置,使其位于喷雾撞壁的喷射线上,并且距离喷射撞壁点20-40mm处为宜。在此段范围内,撞壁水膜厚度位于分布曲线的凹处,而流速分布又接近峰值,满足薄而快速流动的要求。在此处进行激光加工既具有良好的辅助作用又对激光干扰较小。这也要求在设计超薄水膜辅助脉冲激光加工装置时,在保证撞壁点与激光加工点位置满足距离要求后,位移平台运动加工过程中应当保持喷头与激光会聚透镜的相对位置不变,即材料表面的激光烧蚀点与喷雾的撞壁点相对静止。

[0076] 喷雾装置可供控制的实验参数包括喷出流量、喷射角度以及偏移距离(撞壁点与激光加工点之间的距离)。而对于喷雾的喷出流量主要与给予的压力有关,通过逐渐改变仿真中涉及的流量参数,可以获得喷雾撞壁水膜随给予流量变化的分布变化图,如图6所示。

而改变喷嘴与撞壁平面的角度也会对水膜在材料表面的分布产生影响,如图7(从左到右依次为 10° 、 30° 、 50°)所示。由于距离喷射撞壁点20-40mm处利于进行激光加工辅助,下面研究成膜厚度与流速随流量与角度变化规律时,取该段距离数据点的平均值作为衡量水膜厚度和流速的指标。

[0077] 由流量变化与角度变化图对比可以得到,喷雾流量不会像角度那样对水膜分布的形状带来较大的影响,流量增大,确实使得整个水膜的厚度有了一定的增加,而角度增大却会导致水膜的整体高度降低;另外,随喷射角度的增加,除了水膜分布的形状发生变化外,分布的范围也在逐渐增大。而对于适合进行激光辅助的区域而言,水膜的厚度与流速也会发生改变,如图8、9所示。根据研究结果可以确定喷射夹角应为 $35^\circ \sim 50^\circ$ 用以获得稳定的水膜分布,流量应为0.001-0.002kg/s,此时水膜厚度为 $50 \sim 150 \mu\text{m}$,流速为 $0.4 \sim 0.6 \text{m/s}$,有利于获得稳定的激光加工过程。

[0078] 2. 单次激光加工烧蚀形貌的求解:

[0079] 脉冲激光光束在焦点附近的能量密度分布可以用推导公式(1)来描述。

$$[0080] \quad I(r,z) = I_0 \left[\frac{\omega_0}{\omega(z)} \right]^2 e^{-\frac{2r^2}{\omega(z)^2}} \quad (1)$$

[0081] 其中, $I(r,z)$ 表示距离焦点中心 $r-z$ 平面内的能量密度分布, I_0 表示焦点中心点的能量密度, ω_0 表示激光的束腰半径, $\omega(z)$ 表示激光束在 z 平面上的 $1/e$ 能量密度焦点半径变化。其中 I_0 与 $\omega(z)$ 可用(2)与(3)式进行计算。中心点处的能量密度 I_0 通过功率计测得的平均功率、脉冲激光的重复频率与激光的束腰半径来获得;公式(3)描述激光束截面半径随 Z 向(激光束传播方向)变化规律,随 Z 向距离变化而逐渐增大,并与瑞利长度有关;公式(4)为瑞利长度的表达式。

$$[0082] \quad I_0 = \frac{2P}{\pi\omega_0^2 f} \quad (2)$$

$$[0083] \quad \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (3)$$

$$[0084] \quad z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda} \quad (4)$$

[0085] 考虑到水膜辅助水膜对激光反射以及吸收所导致的能量密度损失,对(2)式进行修正,得到水膜辅助激光在材料表面的焦点中心点能量密度公式,如(5)所示。

$$[0086] \quad I'_0 = sI_0 e^{-\alpha_w h_m} = s \frac{2P}{\pi\omega_0^2 f} e^{-\alpha_w h_m} \quad (5)$$

[0087] 其中, s 表示水膜对激光反射所造成能量损失后的能量密度百分比, $s \approx 98\%$; h_w 为水层厚度, α_w 为水对激光的吸收系数。 532nm 波长激光的吸收系数为 $4.6 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$, 1064nm 波长激光的吸收系数为 0.147cm^{-1} ; P 代表激光的功率; ω_0 表示水膜辅助激光的焦点半径; f 代表皮秒脉冲激光的重复频率。

[0088] 另外,水膜对激光的折射会导致激光焦点的偏移,对(3)进行修正,得公式

$$[0089] \quad \omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z^2/|z| + z_s(h_m)}{z_R}\right)^2} \quad (6)$$

[0090] 其中, z_s 表示水膜折射导致得激光实际焦点的偏移距离, z_R 表示瑞利长度。

[0091] 在完成激光光斑能量密度分布的定量表达之后, 沟槽材料的去除是通过比较材料烧蚀阈值与激光能量密度的大小来实现的, 即能量密度大于等于材料烧蚀阈值的部分材料去除。上述模拟过程可以通过公式 (7) 来描述。

$$[0092] \quad h = kN \ln\left(\frac{I}{I_{th}}\right) \quad (7)$$

$$[0093] \quad \text{光} = 2\omega_0 f / v \quad (8)$$

[0094] 其中, N 表示等效脉冲数, k 表示材料光学渗透深度系数, 通过公式 (7) 可以直接获得水膜辅助激光烧蚀沟槽的深度, 而深度为零处坐标的差值, 即为直径方向上能量密度与材料烧蚀阈值相等的坐标的差值, 可以作为沟槽烧蚀的宽度, 在公式 (7) 中, 令 $I(r, z)$ 与 I_{th} 相等, 得烧蚀沟槽宽度的计算公式, 如 (9) 所示。

$$[0095] \quad w = \sqrt{2\omega_0^2(1+H^2) \ln\left(\frac{2sPe^{-\alpha mh_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1+H^2)}\right)} \quad (9)$$

$$[0096] \quad \text{其中: } H = \frac{\frac{z^2}{|z|} + z_s(h_m)}{z_R}$$

[0097] 公式 (9) 中的 z 受激光离焦量的影响, P 代表激光的平均功率, 激光焦点偏移 z_s 是水膜厚度 h_m 的函数, 水膜厚度 h_m 又与喷雾的压力角度以及偏移距离有关。

[0098] 同理, 可以求得沟槽深度的表达式, 如 (10) 所示。

$$[0099] \quad h = kN \ln\left(\frac{2sPe^{-\alpha mh_m}}{\pi f I_{th} \omega_0^2(1+H^2)}\right) \quad (10)$$

[0100] 同样, 水膜辅助激光烧蚀获得的沟槽深度的计算公式中 N 表示等效脉冲数, 与激光的扫描速度直接相关, z 受激光离焦量的影响, P 代表激光的平均功率, 激光焦点偏移 z_s 是水膜厚度 h_m 的函数, 水膜厚度 h_m 又与喷雾的压力角度以及偏移距离有关。

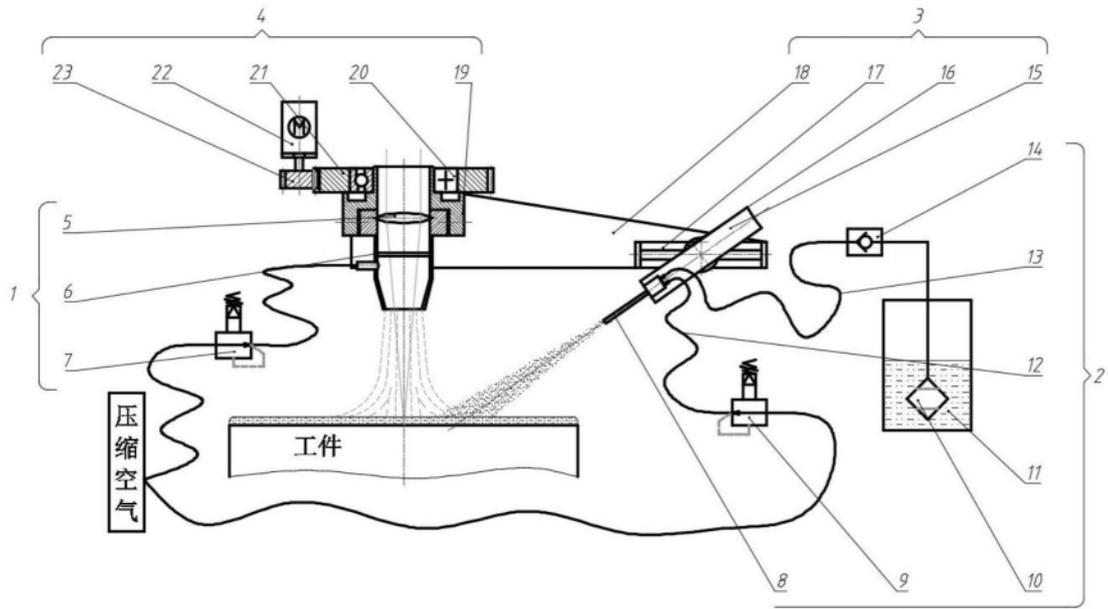


图1

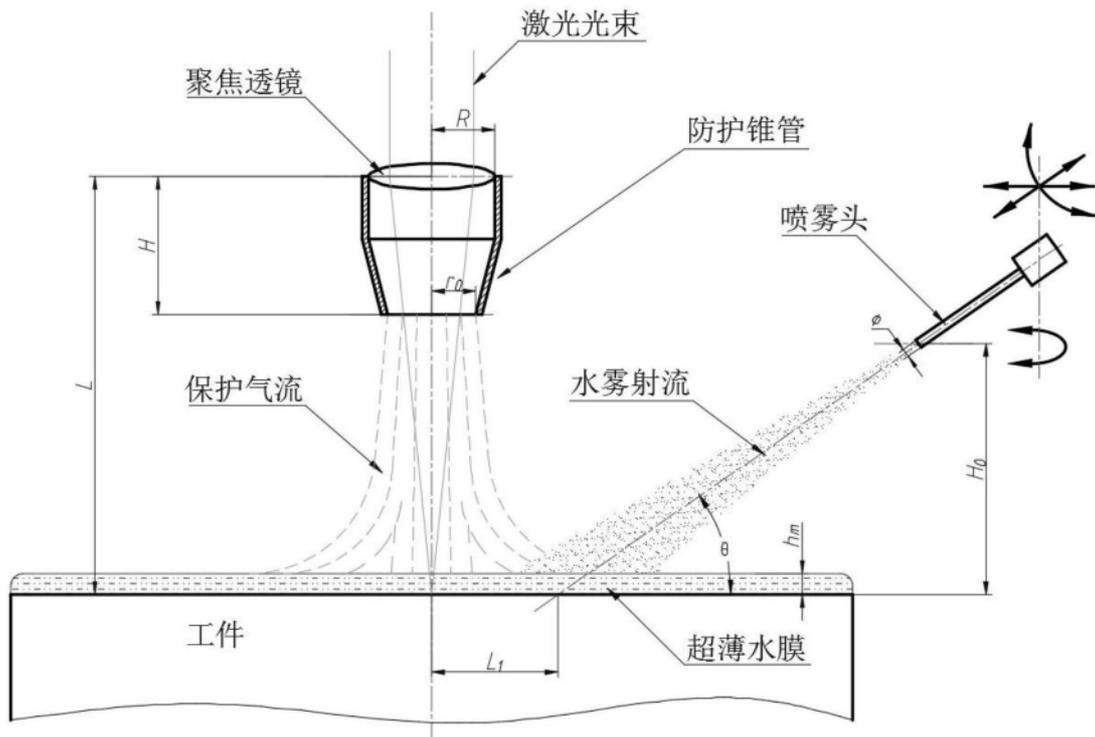


图2

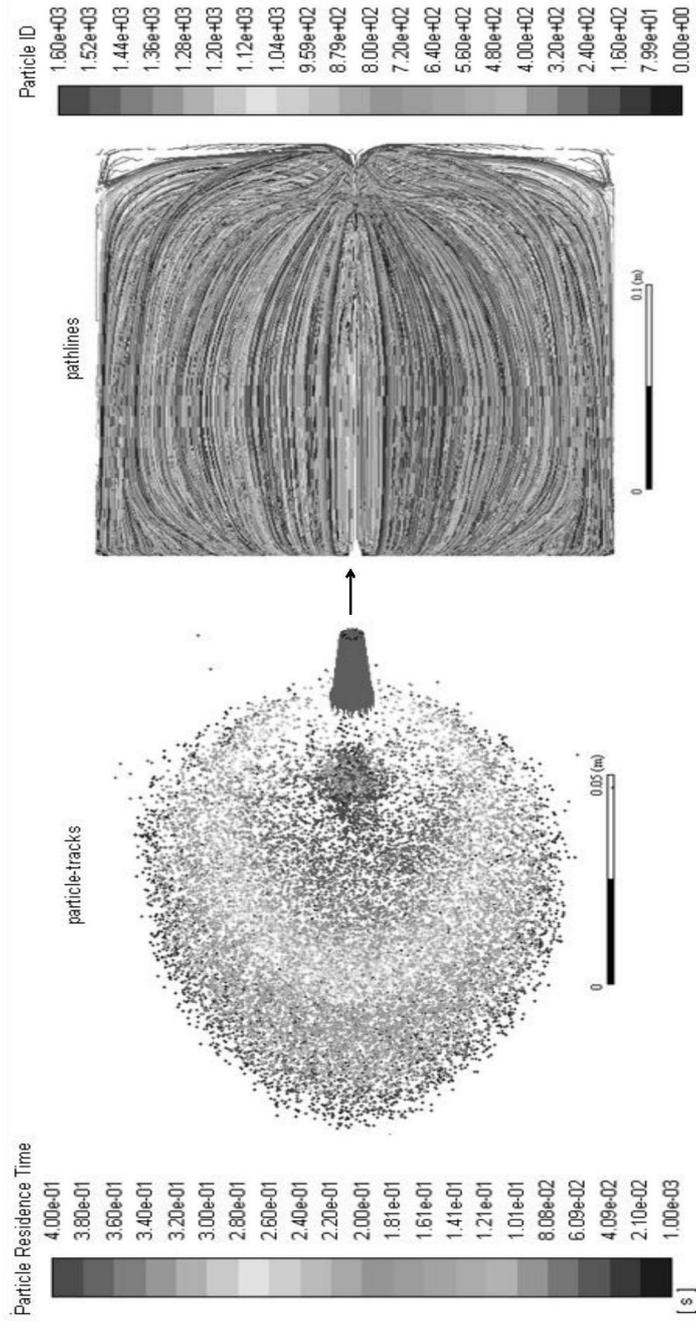


图3

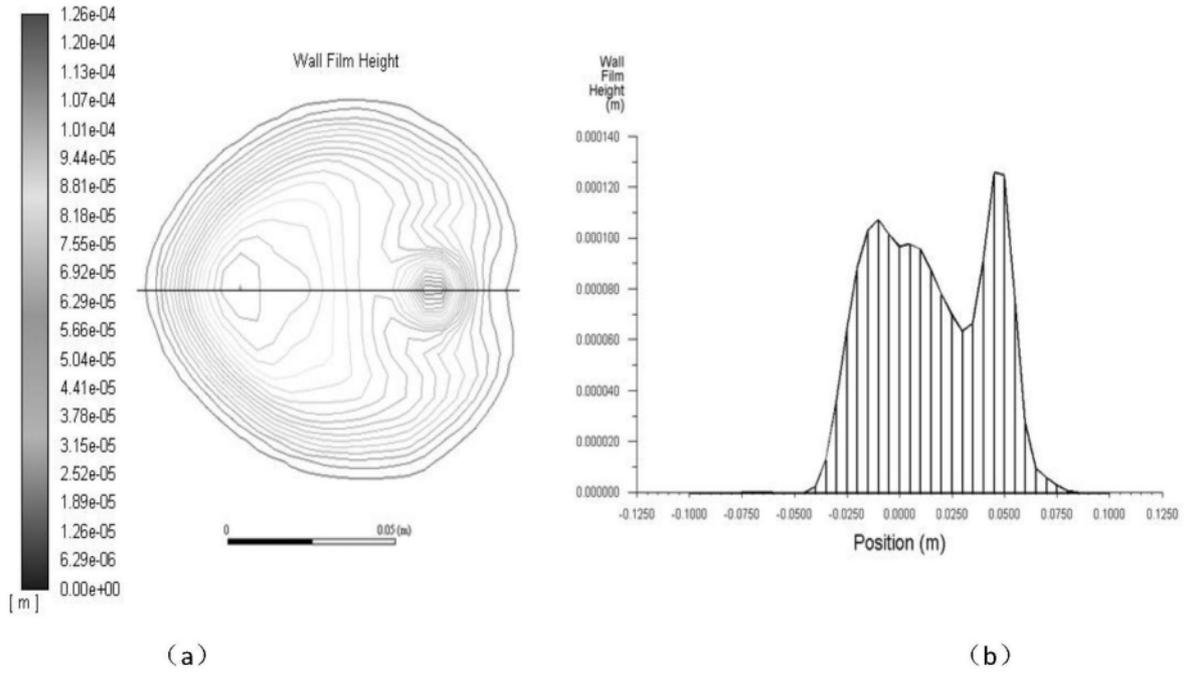


图4

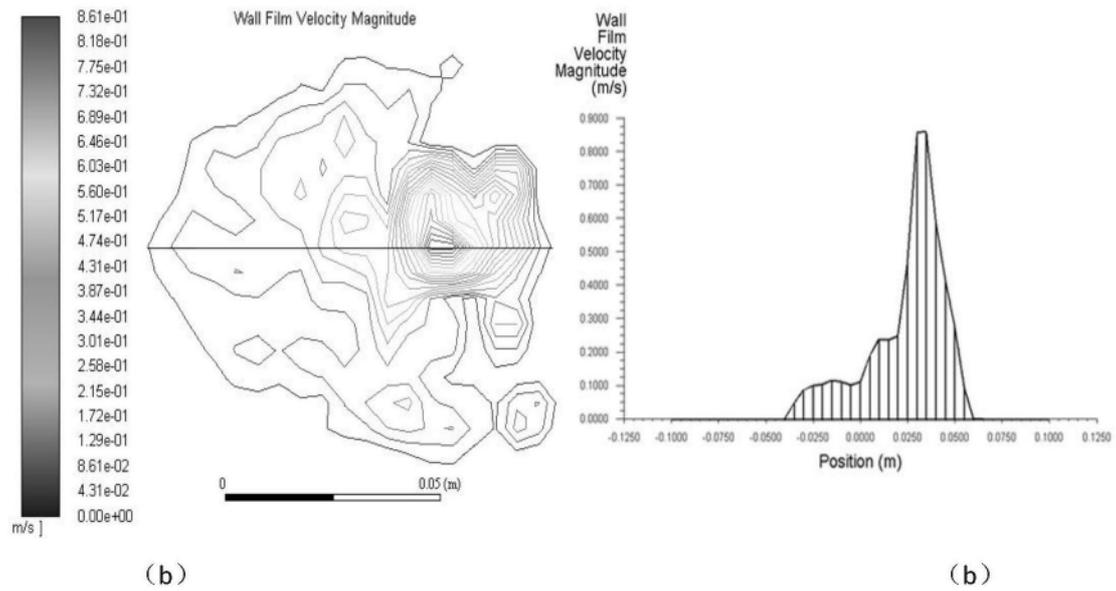
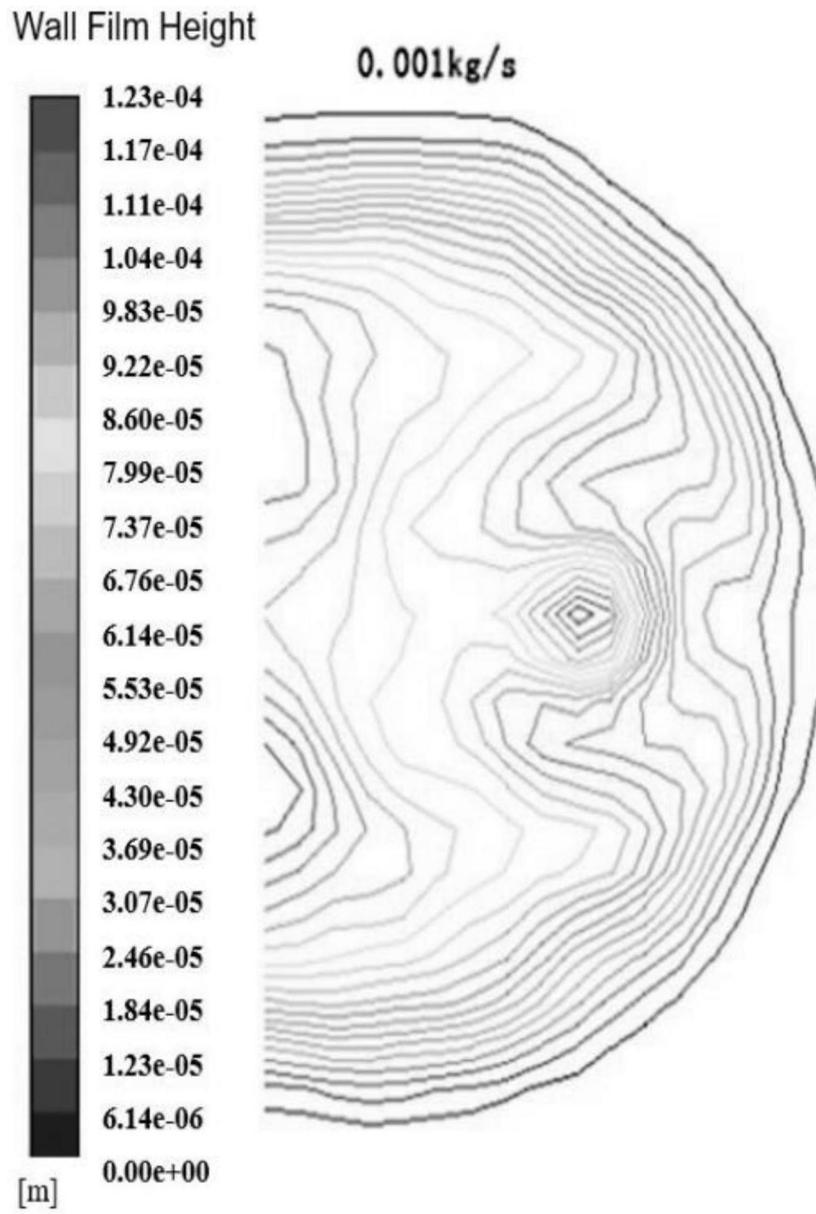
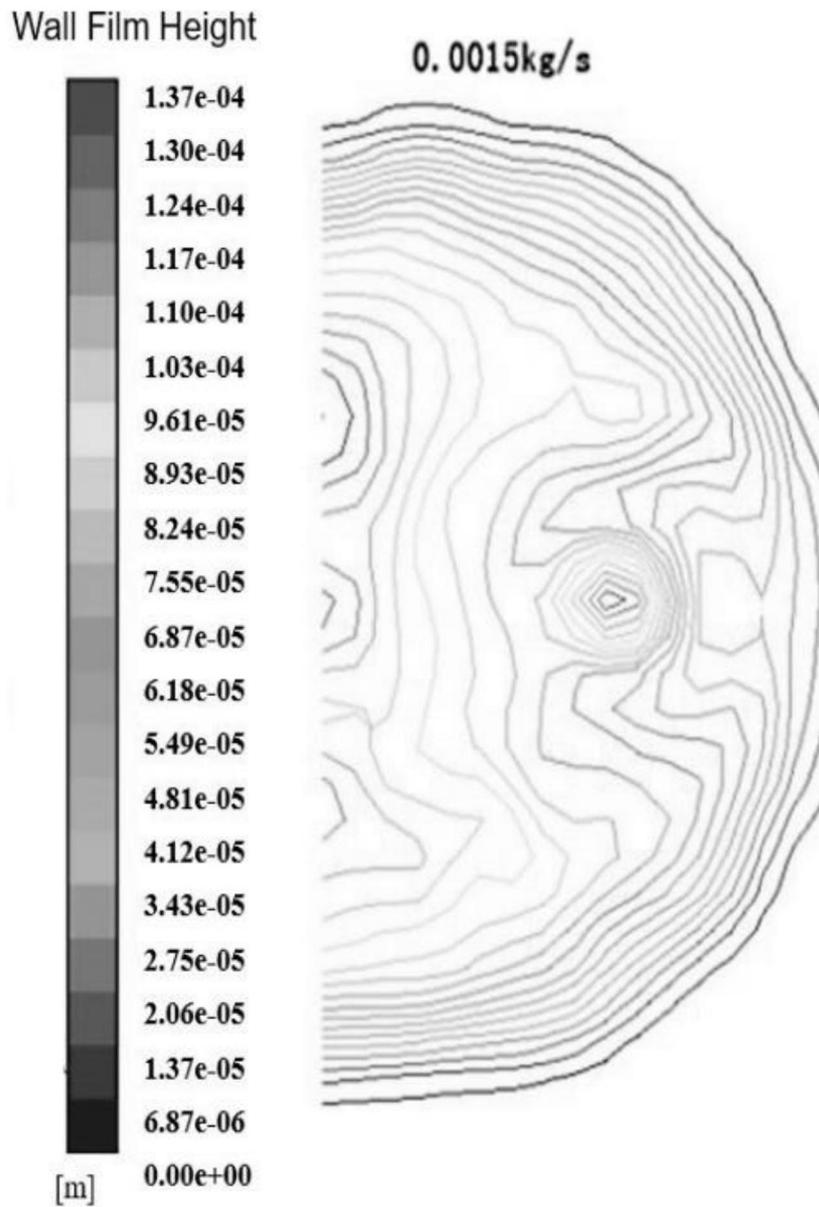


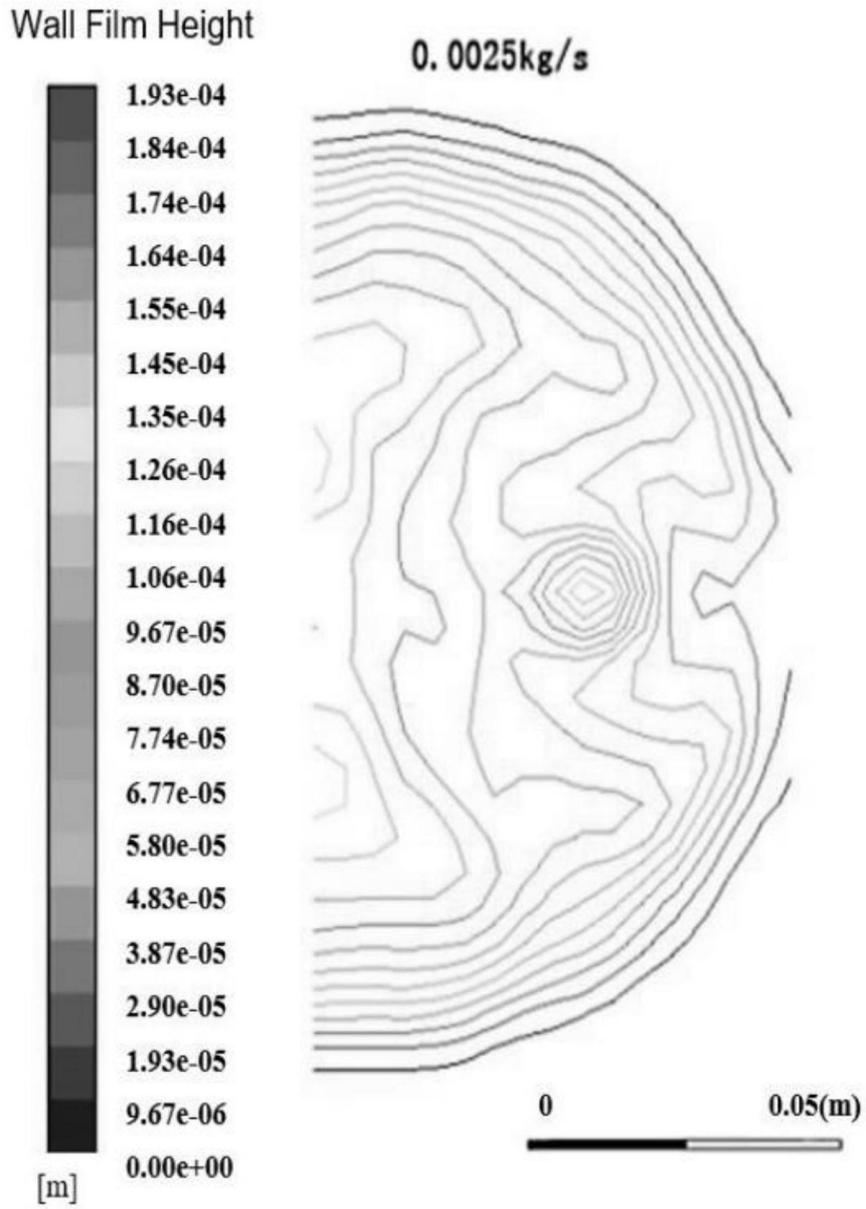
图5



(a)



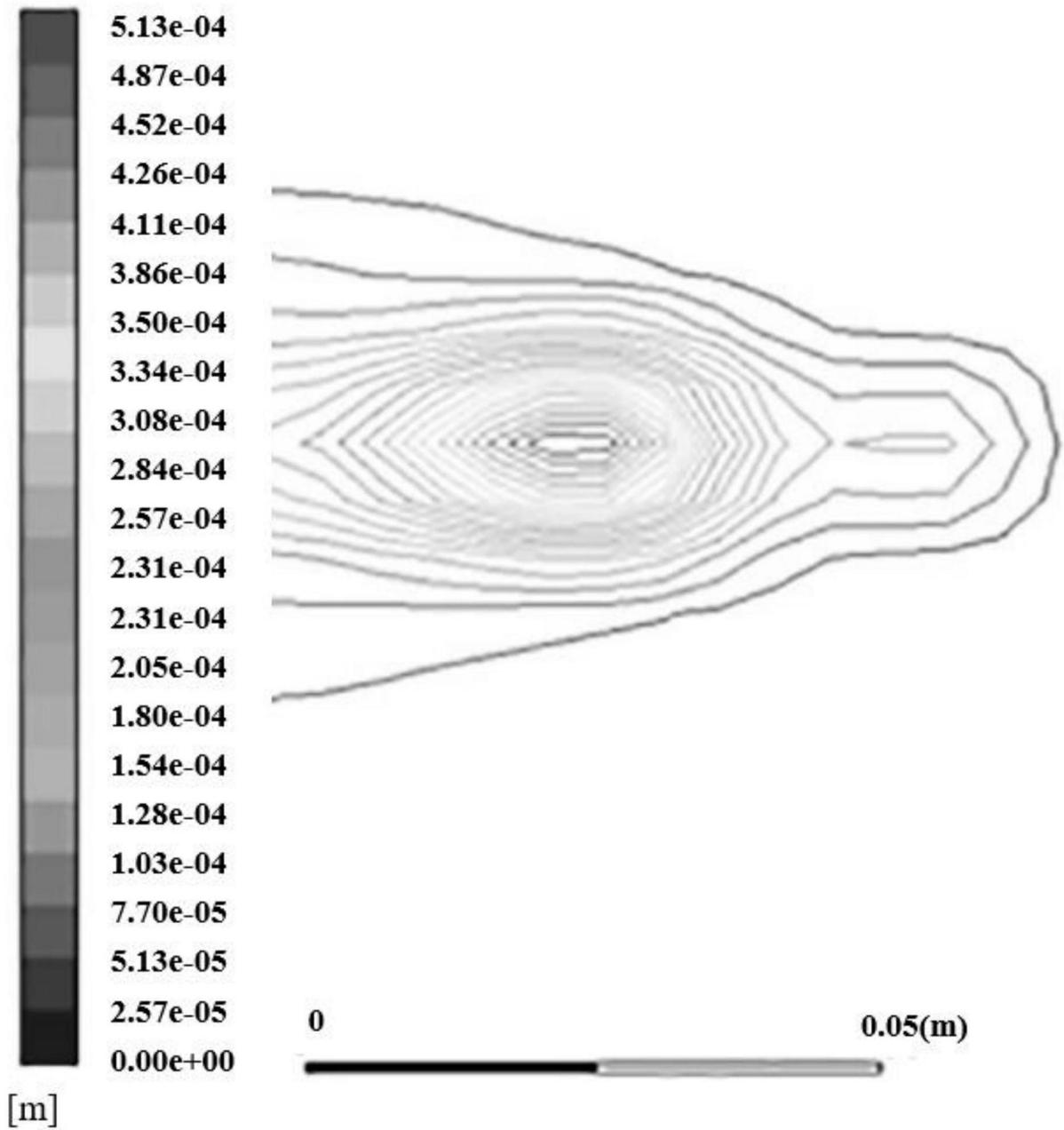
(b)



(c)

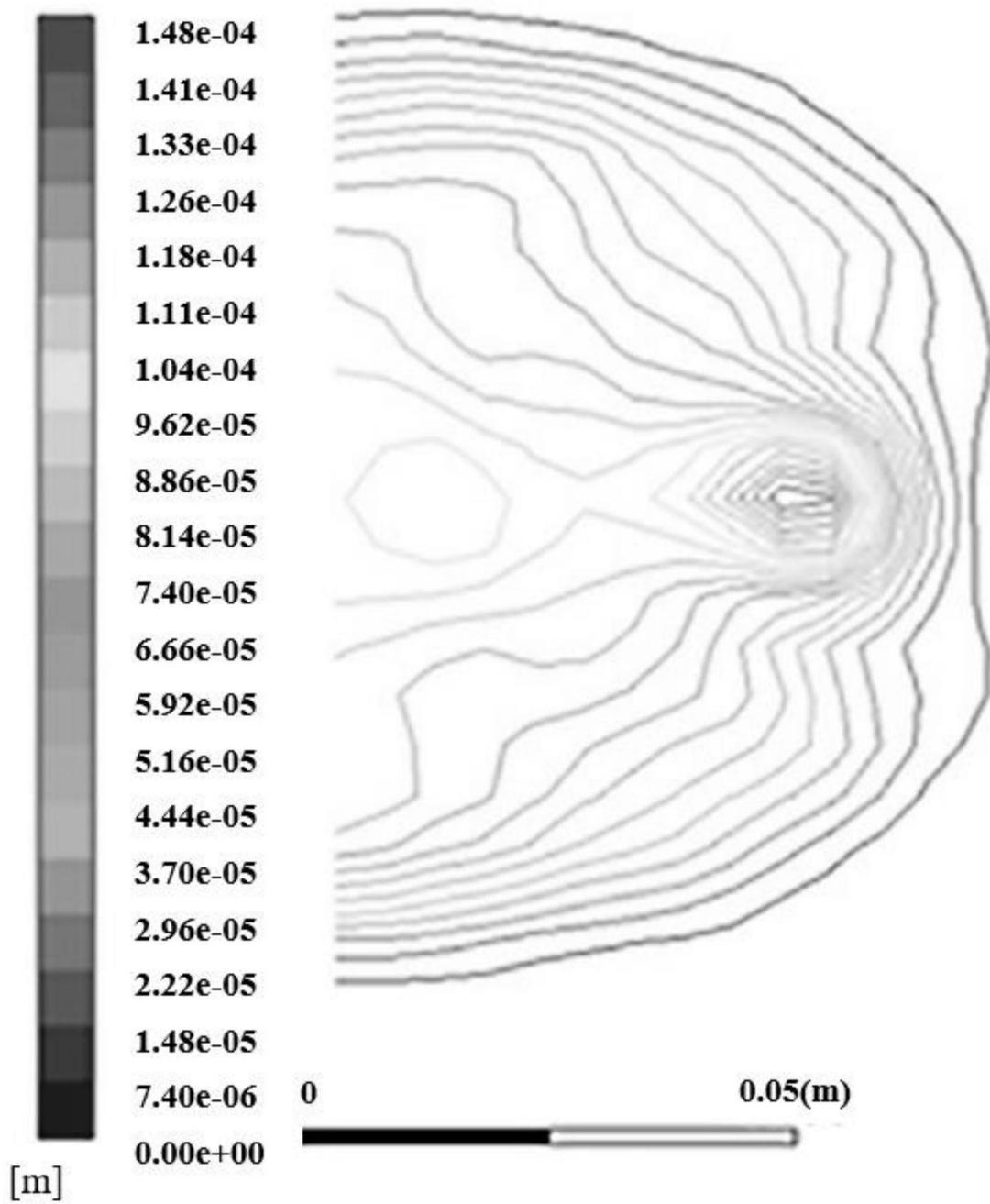
图6

Wall Film Height

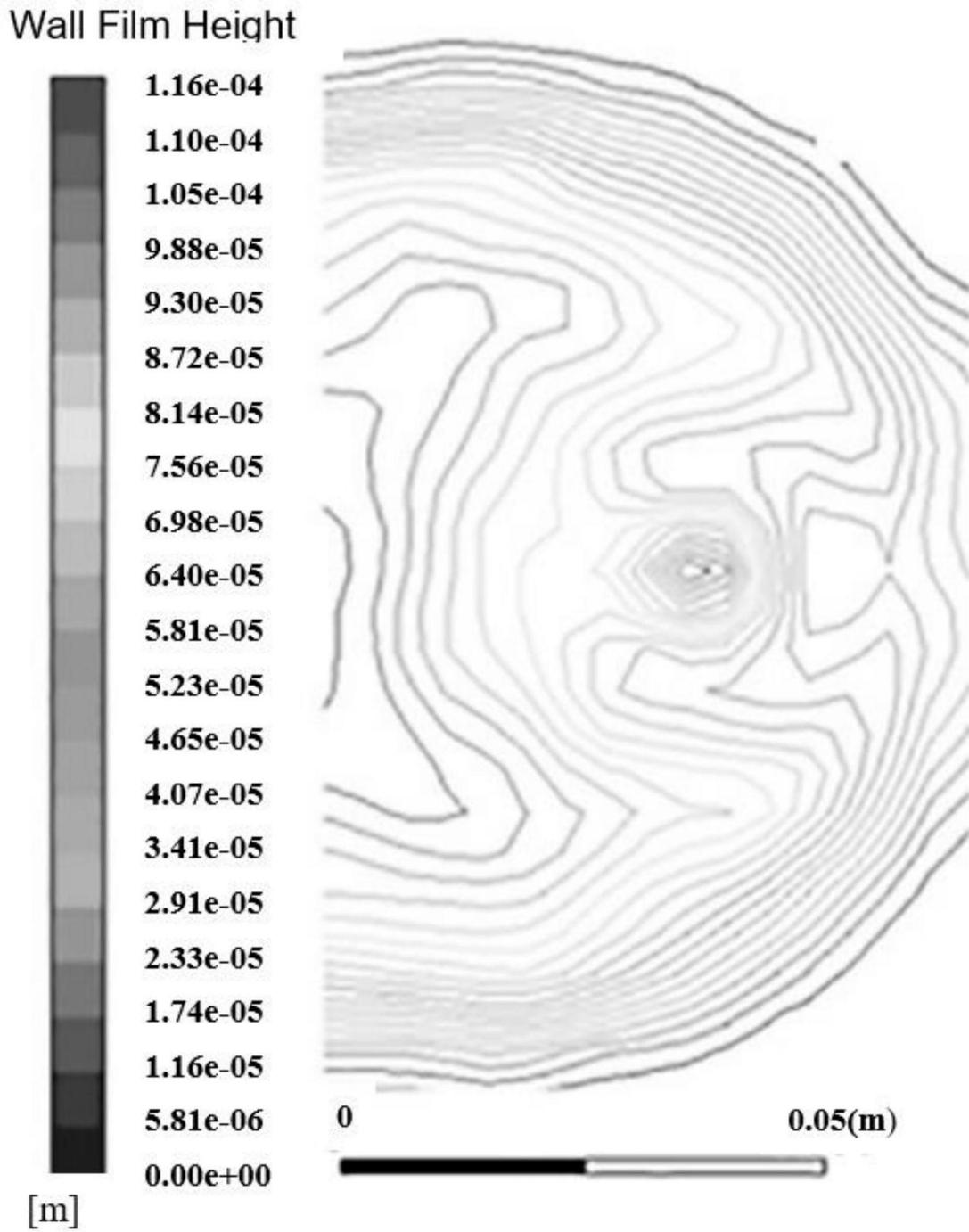


(a)

Wall Film Height



(b)



(c)

图7

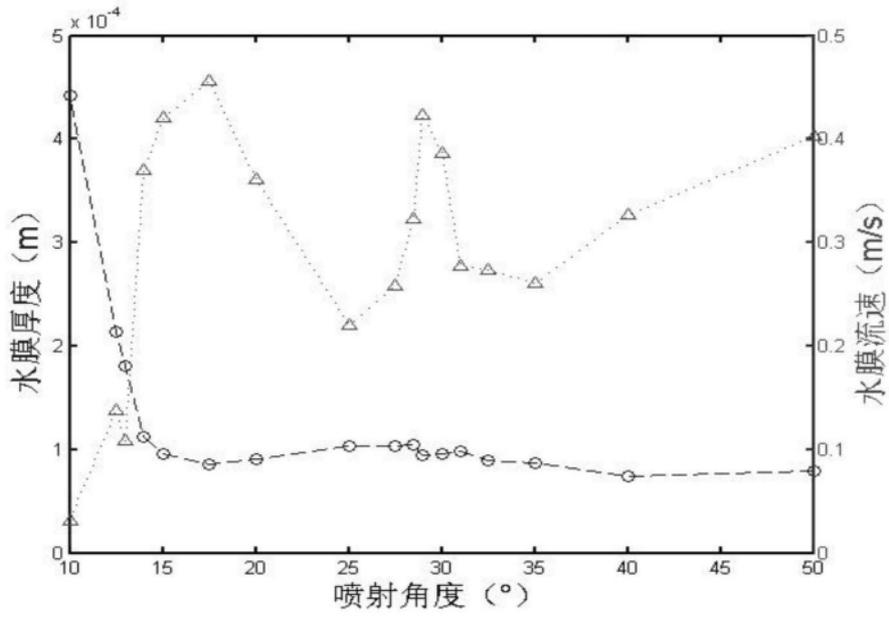


图8

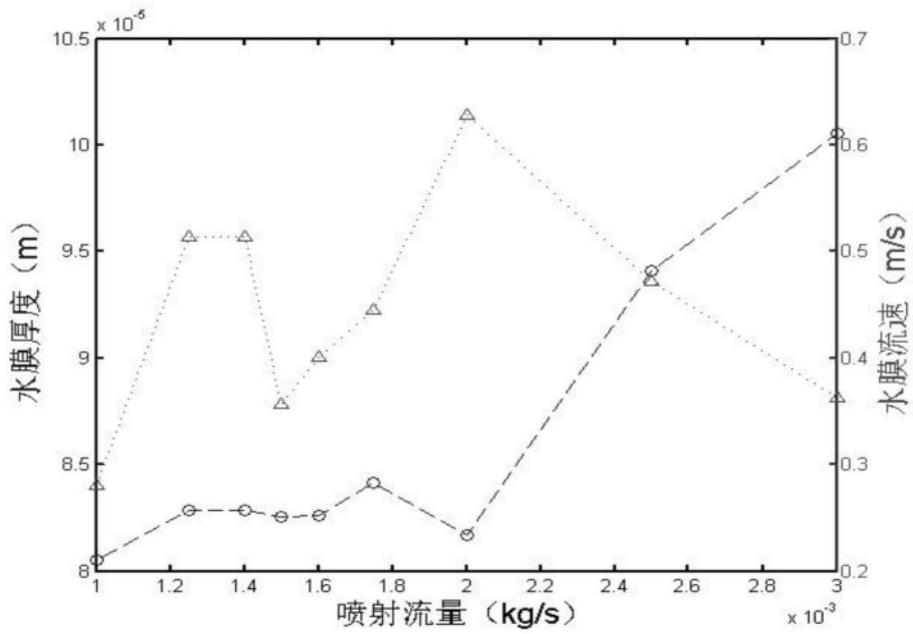


图9