

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.04.020

低密度 CH 泡沫微柱微细车削加工工艺研究

袁光辉, 王 冰, 陶 洋

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘 要: 低密度多孔泡沫材料在 高能密度物理、辐射运输、绝热成型研究中有重要应用, 但材料多孔易碎, 加工难度大. 在尖刃金刚石外圆刀具和尖刃金刚石切断刀具设计的基础上, 利用精密车削微加工方法制备了激光惯性约束聚变(ICF)所需的各类低密度 CH 泡沫微柱, 并详细讨论了切削加工条件、加工刀具集合参数、切断刀具几何参数、加工参数等对 CH 泡沫微柱车削加工的影响.

关键词: 低密度泡沫; 微柱; 激光惯性约束聚变; 微加工

中图分类号: TB324 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)04-0709-04

Research on pocessing technology of low-density CH foam micro-column

YUAN Guang-Hui, WANG Bing, TAO Yang

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Low-density foams have important applications in high-energy density physics, radiation transport and adiabatic molding. However, it has high processing difficulty because of its porous and fragile properties. Therefore, two special diamond tools were designed and fabricated, which were used for turning of cylindrical surface and cutting. Variable kinds of low-density CH foam micro-column used for ICF were machined by precision turning micromachining technology. The effects of cutting conditions, geometry parameters of diamond tool and machining parameters on the forming of CH foam micro-column were also discussed in detail.

Keywords: Low density foam; Micro-column; ICF; Micromachining

1 引 言

在 ICF 实验研究中, 低密度多孔泡沫是一类很早就被应用并且目前应用较广的靶材料, 广泛应用于高能密度物理、辐射输运和绝热成型研究^[1-2]. 其中, 聚-4-甲基-1-戊烯(PMP)是一种理想的低密度聚合物泡沫材料, 易于控制成份(比如易于进行掺杂), 一般为 C、H, 耐高温、低温、辐照能力强. 目前有机聚合材料因其各自特有的性质已经能够被成熟地应用在多个领域, 包括 ICF 物理实验^[3-6].

对于能够进行掺杂的材料, 国内也有相关应用和研究^[7-8]. 加工成型的纯 CH 和掺杂 CH 低密度微柱可以有效地抑制受激拉曼散射效应、提高 X 光的转换效率、改善 X 光对靶丸辐照的均匀性, 主要作为液态氙氫燃料吸收层、多壳层靶支撑层、X 光均化层、等离子体与物质相互作用、燃烧层^[9-10]. ICF 中的低密度泡沫材料是一种多孔、易碎的塑料材料, 其密度范围宽 1~1000 mg/cm³, 孔径低于 10 μm, 直径和高度均为微米量级, 且材料密度仅为本体材料的 1/30, 因此利用常规金属切削加工方式

收稿日期: 2018-10-26
基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展项目(2015B0302071)
作者简介: 袁光辉(1974—), 男, 四川中江人, 技师, 从事精密微加工的研究. E-mail: yghuii@163.com
通讯作者: 陶洋. E-mail: afty22@163.com

不仅会导致表面缺陷,而且很难加工成形(图 1). 为克服低密度材料加工的困难,在现有加工条件的基础上,通过非标准刀具设计以及加工参数优化,成功制备出符合物理实验要求的泡沫微柱.

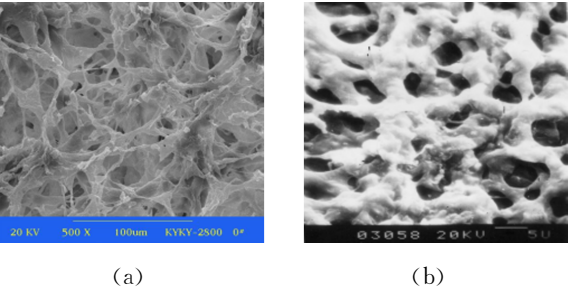


图 1 (a) 130 mg/cm³ 泡沫材料的 SEM 照片; (b) 30 mg/cm³ 掺铜泡沫材料的 SEM 照片
Fig. 1 (a) Photo of foams with density of 130mg/cm³ by SEM; (b) Photo of copper doped foams with density of 30mg/cm³ by SEM

2 切削加工条件

利用精密数控车床进行低密度泡沫微柱车削加工实验,车床主轴采用超精密级的滚动轴承,回转精度为 0.5 μm. 采用滚珠丝杠进行导轨驱动,整个系统采用半闭环控制,X、Z 轴的移动分辨率均为 1 μm.

由于低密度泡沫微柱的尺寸较小,因此整个加工过程需在 QM-100 长焦距显微镜观测系统监测下进行. 显微系统的分辨率为 0.001 mm,最大焦距可达 350 mm,如图 2 所示. 显微系统把监测参数传输到计算机,计算机实时调整主轴转速、背吃刀量、进给速度等加工参数.

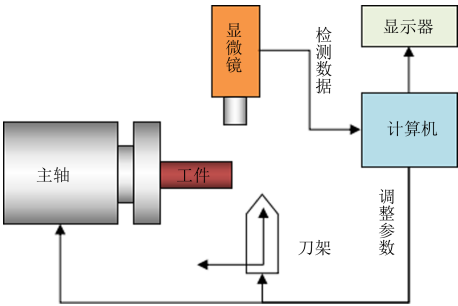


图 2 加工系统简图
Fig. 2 Diagram of processing system

3 低密度泡沫的装夹方式

基于低密度泡沫的特性,承受不了机床的夹紧力,因此采用辅助夹具的装夹方式,泡沫材料与夹具之间采用过盈配合,由过盈配合产生的预紧力装

夹工件,而由辅助夹具来承受机床的装夹力,以保护低密度泡沫不被夹坏. 由于低密度泡沫材料的中心区域的密度相对外围区域密度不均匀,加工难度更大,偏心装夹可以有效避开中心区域,选择密度均匀区域加工低密度泡沫. 图 3 为辅助夹具装夹方式示意图.

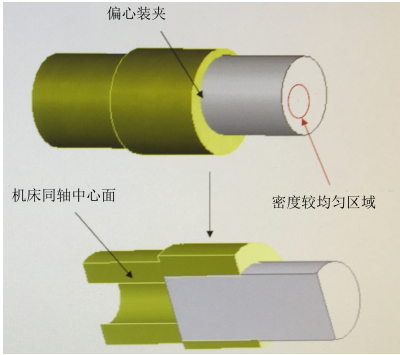


图 3 辅助夹具装夹方式示意图
Fig. 3 Diagram of clamping method aided fixture

4 低密度泡沫微柱加工刀具设计

4.1 刀具材料

CH 低密度泡沫是一种易碎、强度低、刚性差且加工成型困难的塑料材料^[11],对于切削力、振动和切削深度等条件工艺的选择十分敏感. 因此要加工出高质量的低密度泡沫微柱,刀具材料本身就应该具有能磨出锐利切削刃的特点,而不必考虑切削刃的强度. 金刚石刀具以其硬度高、能磨出极锋利的刀刃等优点,是车削泡沫微柱的首选刀具材料^[12].

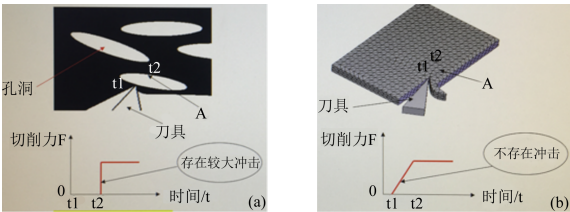


图 4 (a) 泡沫材料 A 点切削力变化曲线; (b) 金属材料 A 点切削力变化曲线

Fig. 4 (a) Cutting force curve of point A in form material; (b) Cutting force curve of point A in metallic materials

4.2 外圆刀具几何参数

泡沫材料的加工是不连续的断续切削,在加工过程中,切屑吸潮后会堆积在刀尖,严重影响到泡沫柱的成型^[13]. 泡沫材料、金属材料 A 点切削力变化曲线见图 4.

综合分析低密度泡沫材料的性质和刀具刃磨的可行性, 所设计刀具的几何参数如下:

(1)主偏角 u_r 和副偏角 u'_r . 为减小切削力, 刀具应该取大的主偏角和较大的副偏角. 因此, 选用刀具主偏角为 $u_r>90^\circ$ 和副偏角为 $u'_r=30^\circ$.

(2)前角 γ_0 和后角 α_0 . 刀具的前角是减小切屑的变形, 降低切削力、切削温度和动力的损失; 后角是减小刀具和已加工表面之间的挤压摩擦. 刀具的前角取为 $\gamma_0=0^\circ$, 后角取为 $\alpha_0<8^\circ$.

(3)刀尖圆弧半径 r_ϵ . 刀具主切削刃和副切削刃的连接部分构成刀尖. 对于加工刚性差的低密度泡沫微柱, 不宜选择较大圆弧半径的刀具, 有圆弧过渡刃刀具不适合加工微小零件, 所以采用刀具主切削刃和副切削刃相交为一点的尖锐刀尖. 图 5 为车削低密度泡沫微柱的外圆刀设计图.

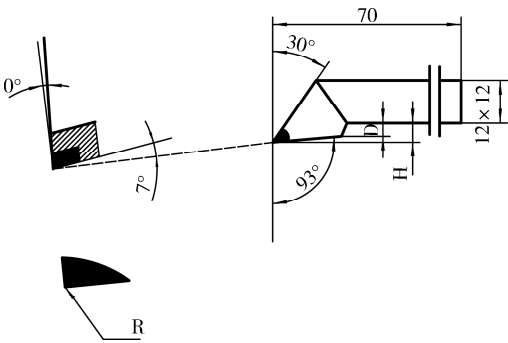


图 5 外圆刀设计图
Fig. 5 Design of Cylindrical cutter

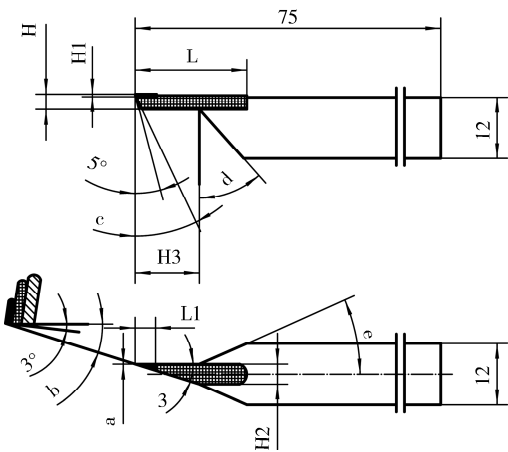


图 6 切断刀设计图
Fig. 6 Design of cut-off cutter

4.3 切断刀具几何参数

低密度泡沫微柱的尺寸为 $\varnothing 600\ \mu\text{m}\times 600\ \mu\text{m}$, 而且两端面的平整度要小于 $10\ \mu\text{m}$. 因此, 在设计切断刀时, 要考虑材料是难以加工成型的塑料材

料, 其端面精度要求又很高, 对切断刀的要求就特别高, 所设计的刀具就要有别于传统的切断刀. 经过反复的切削实验和对切断刀角度、形状的修改, 得出切断刀几何参数为: 切断刀的前角取为 $\gamma_0=0^\circ$, 后角取为 $\alpha_0=3^\circ$. 采用刀具主切削刃和副切削刃相交为一点的尖锐刀尖. 图 6 为低密度泡沫微柱的切断刀图.

5 加工参数的选择和结果

低密度泡沫微柱加工与车削金属工件不同, 在车削加工时, 很容易蹦裂、脱落、断裂, 给切削加工带来一系列的困难, 最终使低密度泡沫微柱的几何形状精度和表面质量得不到保证. 切削用量的选择在加工过程中非常重要, 关系到泡沫微柱是否能够车削成形. 切削用量只有在一定范围内才能车削成低密度泡沫微柱.

5.1 切削深度 p

在满足生产率的要求下, 经过大量切削加工实验证明了: 切削深度 p 大于 $0.1\ \text{mm}$, 低密度泡沫微柱无法车削成型; 切削深度 p 在 $0.05\sim 0.1\ \text{mm}$ 之间, 则几何形状精度保证不了; 切削深度 p 小于 $0.05\ \text{mm}$, 车削的低密度泡沫微柱的几何形状较好. 经过反复的切深实验, 切削深度 p 在 $p=0.005\sim 0.05\ \text{mm}$ 范围内, 低密度泡沫微柱才能保证几何形状精度.

5.2 进给量 f

对于泡沫材料来说, 当 $f>0.05\ \text{mm/min}$ 时, 很难车削成形; 当 f 在 $0.001\sim 0.05\ \text{mm/min}$ 之间时, 车削的低密度泡沫微柱几何形状较好.

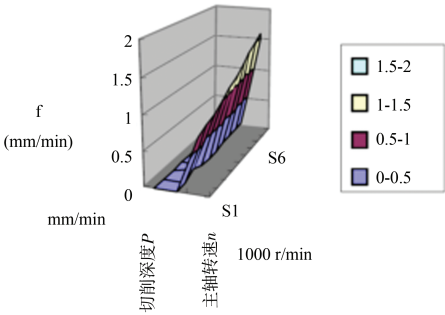


图 7 成形参数极限值
Fig. 7 Limit value of forming parameters

5.3 主轴转速 n

改变主轴转速, 其每转的进给量也随之变化, 当 $n<800\ \text{r/min}$ 时, 直接影响着低密度泡沫微柱加工成型. 当 $n>2000\ \text{r/min}$ 时, 随着主轴转速的

增加,由于离心力的作用,使低密度泡沫微柱不能成型。如图 6,加工参数极限值内均能加工成形,经过多次实验,当主轴转速 $n=1200\text{ r/min}$,切削深度 $p=0.01\text{ mm}$,进给量 $f=0.01\text{ mm/min}$ 时取得了很好的几何形状。

5.4 切断参数

为了满足 ICF 物理实验对低密度泡沫微柱两端面平整度的要求,并且由于材料本身的难加工性,结合低密度泡沫微柱外圆加工经验和加工参数的选择并经过切削实验验证,最终确定了低密度泡沫微柱切断时的参数:主轴转速 $n=1200\text{ r/min}$,进给量 $f=0.01\text{ mm/min}$ 。最终加工出符合要求的低密度泡沫微柱。图 8 为加工的低密度泡沫微柱照片。

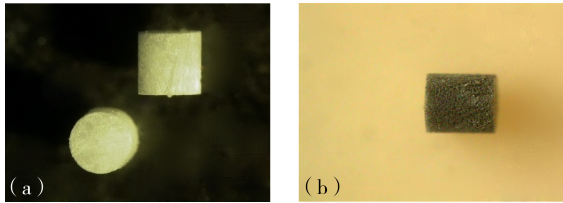


图 8 (a) 30 mg/cm^3 泡沫微柱照片; (b) 30 mg/cm^3 掺杂泡沫微柱照片

Fig. 8 (a) Photo of tiny pillar by form with density of 30 mg/cm^3 ; (b) photo of tiny pillar by copper doped foams with density of 30 mg/cm^3

6 结 论

在大量的加工实验和加工数据统计分析基础上,设计了适合低密度 CH 泡沫加工的尖刃金刚石外圆刀具和尖刃金刚石切断刀具,并确定了较好的低密度 CH 泡沫加工参数,圆满地完成了低密度 CH 泡沫及掺杂 CH 泡沫微柱的制备工作。外圆刀具主要几何参数为:主偏角 $u_r>90^\circ$ 、副偏角 $u'_r=30^\circ$ 、前角取为 $\gamma_0=0^\circ$ 。切断刀具主要几何参数为:前角取为 $\gamma_0=0^\circ$ 。加工参数为:主轴转速 $n=1200\text{ r/min}$,进给量 $f=0.01\text{ mm/min}$,切削深度 $p=0.01\text{ mm/min}$ 。这些数据的取得也为进一步优化加工参数、提高加工精度提供了很好的条件。

参考文献:

[1] Schaefer D W. Engineeredporous materials EXPO '93 [J]. Mater Proc Rep, 1994, 9: 68.

[2] Pfenning A. Kirk - Othmer encyclopedia of chemical technology [J]. Chem Ing Tech, 1995, 67: 595.

[3] Bhandarkar, Suhas, Baumann, *et al.* Fabrication of low-density foam liners in hohlraums for NIF targets [J]. Fusion Science & Technology, 2018, 73: 1.

[4] Oakdale J S, Smith R F, Forien J, *et al.* Porous Materials: Direct Laser Writing of Low - Density Interdigitated Foams for Plasma Drive Shaping (Adv. Funct. Mater. 43/2017) [J]. Adv Funct Mater, 2017, 27: 1702425.

[5] 崔帅, 吕武华. 聚乙烯醇对型煤热解的影响研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 55: 145.

[6] 刘晓, 朱元强, 景亚, 等. FeCl_3 催化 2-(1-丙炔基)-2'-乙酰基联苯环化反应的机理研究 [J]. 原子与分子物理学报, 2017, 34: 1011.

[7] 吴小说, 汪鹏飞. 基于甲酸根离子原位形成的单个稀土配位聚合物的构筑及其掺杂化合物的荧光性质研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 147.

[8] 王群, 孙玉希, 崔书亚, 等. 密度泛函理论研究纯的及不同掺杂原子石墨烯和 CaH_2 分子相互作用 [J]. 原子与分子物理学报, 2017, 34: 811.

[9] Kwon Y K, Bae H K. Production of microcellular foam plastics by supercritical carbon dioxide [J]. Korean J Chem Eng, 2007, 24: 127.

[10] 江少恩, 孙可煦, 郑志坚, 等. 神光 II 装置 x 射线辐射在低密度 CH 泡沫中的超声速传播实验研究 [J]. 物理学报, 2004, 53: 3413.

[11] 罗炫. 全气代低密度聚苯乙烯泡沫的制备及其性能研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004.

[12] 陈治. 微机械制造中对精密超精密加工技术的有效应用 [J]. 河南科技, 2016(23): 85.

[13] 张宗阳, 刘战强, 艾兴, 等. 基于最小表面磨损率的铁基高温合金车削加工研究 [J]. 工程科学与技术, 2012, 44: 199.

引用本文格式:

中 文: 袁光辉, 王冰, 陶洋. 低密度 CH 泡沫微柱微细车削加工工艺研究 [J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2019, 56: 709.

英 文: Yuan G H, Wang B, Tao Y. Research on pocessing technology of low-density CH foam micro-column [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2019, 56: 709.