

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.07.011

高压静电辅助聚合物熔融沉积快速成型工艺

马昊鹏,焦志伟,李荣军,向声燧,杨卫民

(北京化工大学机电工程学院,北京 100029)

摘要:提出一种高压静电辅助聚合物熔体快速成型工艺,在现有熔融沉积成型(FDM)技术基础上加以高压静电场作用细化熔丝,并研究施加电压、打印温度、打印距离、打印速度等工艺参数对沉积熔丝直径的影响,以实现低成本高精度快速成型。通过正交实验法分析得知,随着打印速度、施加电压及打印温度的增加,沉积熔丝直径相应减小;随着打印距离的增大,沉积熔丝直径增大。基于PLA材料试验得知,当施加电压7 kV,打印距离1 mm,打印速度为50 mm/s,打印温度240℃时,沉积熔丝直径最小,可达82 μm,且施加电压对熔丝直径影响程度最大。研究结果为低成本微米级聚合物增材制造提供一种可行且稳定的技术方案及相关工艺的理论分析。

关键词: 高压静电;快速成型;工艺参数;微米级制造;熔丝直径

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)07-0057-05

High Voltage Electrostatic Assisted Rapid Prototyping Technology for Polymer Melt

Ma Haopeng, Jiao Zhiwei, Li Rongjun, Xiang Shengyue, Yang Weimin

(Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A high voltage electrostatic assisted melt rapid prototyping process was proposed. High voltage electrostatic devices were applied on the FDM technology to research the effect of applied voltage, bipolar distance, printing speed and other process parameters on the diameter of deposited fuse to achieve the rapid prototyping with high precision and low cost. Through the analysis of the orthogonal test method, the conclusion is drawn that with the increase of printing speed, applied voltage and printing temperature, the diameter of deposited fuses decreases correspondingly; with the increase of bipolar distance, the diameter of deposited fuses increases; when the applied voltage is 7 kV, the printing distance is 1 mm, the printing speed is 50 mm/s, and the printing temperature is 240℃, the diameter of deposited fuse is the smallest, and the voltage has the greatest influence on the fuse diameter. The study provides a viable and stable technical solution for low-cost micron scale polymer additive manufacturing and the theoretical basis for related processes.

Keywords: high voltage electrostatic; rapid prototyping; process parameter; micron manufacturing; fuse diameter

快速成型技术又称为3D打印技术,该技术是一种基于三维数字模型,运用计算机对模型切片处理、规划喷头行走路径,通过三维运动机构控制喷头在成型平台上按照指定路径进行耗材铺设并层层堆积实现精确三维立体成型过程。由于快速制造过程无需加工模具,所以该技术理论上可以加工任意复杂形状的立制品,同时具有个性化、单件小批量加工成本低、加工效率高等优势^[1]。

随着快速成型技术在微型芯片、生物工程、电

池技术等方面运用越来越广泛^[2],国内外对微尺度下的三维增材制造关注日趋增多。

由于光学系统的精度高于一般机械传动机构,通常微尺度增材制造采用光固化成型方法^[3]。但光固化成型加工成本较高、材料种类单一,限制了该技术在微尺度制造领域的应用^[4]。而对于更常见的熔融沉积成型(FDM)技术而言,其精度受限于喷头直径和挤出胀大现象^[5],一直难以在微米级尺度制造领域应用。基于该技术现状国内外有学者对提高

基金项目: 广东省科技计划项目(2016B090915001),宁波市产业技术创新及成果产业化重大项目(2013B10041)

通讯作者: 焦志伟,副教授,主要从事聚合物成型加工原理及设备研究 E-mail: jiaozw@mail.buct.edu.cn

收稿日期: 2018-04-12

引用格式: 马昊鹏,焦志伟,李荣军,等. 高压静电辅助聚合物熔融沉积快速成型工艺[J]. 工程塑料应用,2018,46(7):57-61.

Ma Haopeng, Jiao Zhiwei, Li Rongjun, et al. High voltage electrostatic assisted rapid prototyping technology for polymer melt[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(7):57-61.

FDM 技术加工精度方面进行相关研究。烟台大学的齐元磊等^[6]提出采用 FDM 与切削工艺结合的复合加工方式可制得高精度 FDM 制品。浙江工业大学的魏辉^[7]分析了工艺参数对 FDM 制品精度的影响并在模型设计和参数设定阶段进行相应补偿,设计了新型的支撑生成策略,有助于提高 FDM 制品成型精度。大连理工大学的邹国林^[8]针对各打印参数对制品精度的影响进行正交分析,用 MATLAB 软件对试验数据进行处理得到各参数对制品精度影响程度的大小,并进行工艺参数的优化,为 FDM 制品精度提高提供系统的理论指导。S. Maidin 等^[9]应用超声振动的方式来改善 FDM 制品的精度。

此外在二维平面成型领域中高压静电熔体纺丝技术制备的纤维直径可达到微纳级别且材料种类丰富、加工成本低廉^[10]。但传统熔体静电纺丝装置制备的纤维排布杂乱无序,其孔隙不均匀^[11],难以直接运用在生物组织工程支架、芯片封装等微尺度高精度制造领域。

基于前人研究成果以及各种成型技术的发展水平,笔者利用现有 FDM 技术快速成型机辅以高压静电场,将熔体静电纺丝技术与 FDM 三维制造技术结合形成高压静电辅助聚合物熔体快速成型技术,可大幅提高 FDM 技术的加工精度,达到微米级熔丝按需排布堆叠成型的效果。

1 实验部分

1.1 原材料

聚乳酸 (PLA) 丝状耗材: 直径 1.75 mm, 打印前放入真空干燥箱中在 80℃ 下干燥 4 h, 珠海天威飞马打印耗材有限公司。

1.2 实验装置及成型工艺

实验采用自主研发的高压静电辅助快速成型机,其外观、结构及工艺如图 1 所示。该装置主要由进料机构、电加热喷头、亚克力接收板、紫铜极板、三维运动机构、运动控制系统和高压静电发生器构成。

该装置电加热喷头直径为 400 μm , 三维运动呈现方式为具有水平方向同步轮-同步带传动两自由度运动的电加热喷头和竖直方向丝杠传动的接收板组成,通过控制系统进行三轴运动控制。其控制系统和机械传动系统配合可达到 X, Y 水平方向重复定位精度为 0.0025 mm, Z 竖直方向定位精度为 0.011 mm。

如图 1b 所示,高压静电辅助装置中将高压电端口接在成型平台正下方的铜极板上,使铜极板成为

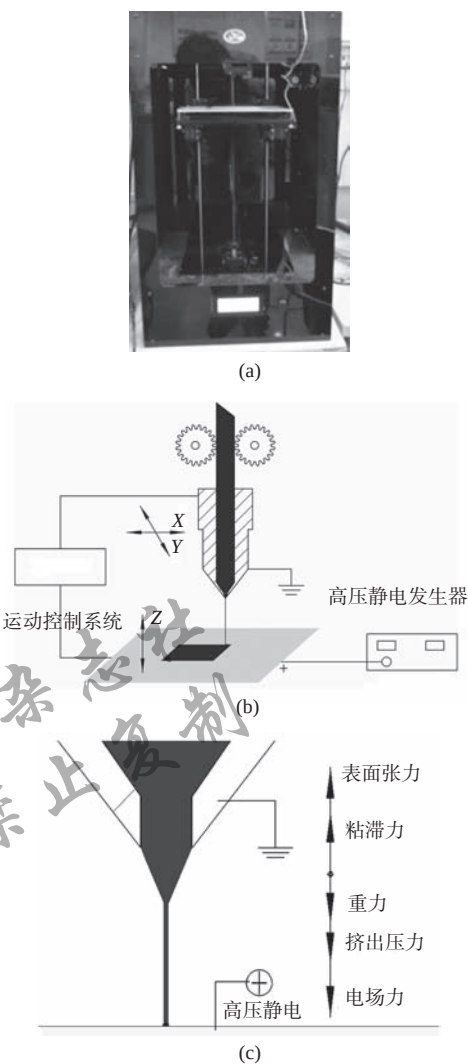
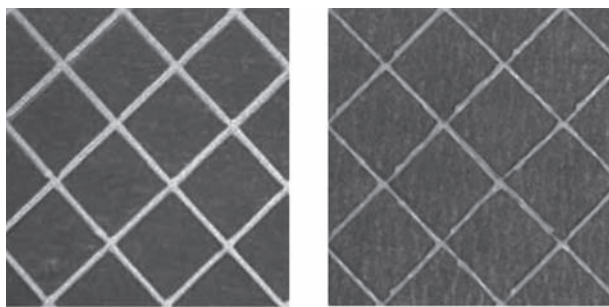


图 1 高压静电辅助 FDM 设备、结构及工艺示意图

高电势。喷头接地作为低电势,两极间产生高压电场。如图 1c 所示,通过喷头和极板间的电场力作用在喷头处产生泰勒锥,泰勒锥底部拉伸出较细的熔丝,这不仅抵消了因聚合物挤出胀大现象导致熔丝变粗的现象,还可使熔丝直径大幅降低^[12],使 FDM 制品精度大幅提升。传统 FDM 工艺在 400 μm 直径喷头下可挤出熔丝直径在 500 ~ 800 μm 范围内,而采用高压静电辅助 FDM 技术可将熔丝直径缩小至 400 μm 或以下。

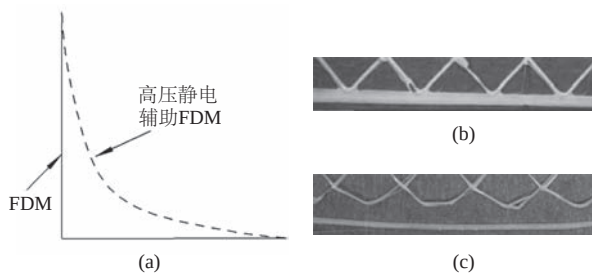
图 2 所示为在相同工艺参数情况下 FDM 技术和高压静电辅助 FDM 技术打印的栅格模型,堆叠层数为 5 层。

两种成型技术在拐角处沉积效果如图 3 所示。由于高压静电辅助 FDM 技术属于非接触式加工,熔丝挤出后未能及时与成型平台粘接,在空中下落



(a) (b)
a—FDM 打印; b—高压静电辅助 FDM 打印

图2 两种成型技术打印栅格结构模型



(a) (b) (c)
a—两种成型技术拐角处堆积方式; b—FDM 网格拐角;
c—高压静电辅助 FDM 网格拐角

图3 两种成型技术在拐角处沉积效果

过程中喷头运动对其拖拽使熔丝未在指定位置堆积。高压静电辅助 FDM 技术熔丝的堆积延时效应导致在打印拐角和折返处产生误差或导致内部填充网格无法与外部边界粘接造成成型失败,可通过降低拐角处的打印速度以减小误差但不可完全消除。

2 结果与讨论

2.1 正交试验设计

PLA 材料的最佳加工温度为 200~240℃,若低于 200℃其流动性较差加工性不足,而高于 240℃会导致材料热分解^[13]。

在前期实验中发现打印距离超过 5 mm 后,由于静电场两极间距过大,熔丝在电场中所受电场力较小,导致熔丝在空中出现由地心引力造成的鞭动现象且随打印距离增大鞭动幅度增大^[14],在成型平台上沉积形成波浪形熔丝,难以精确定位堆叠成型,所以打印距离限制在 5 mm 以内。

研究发现,打印温度(A)、打印速度(B)、施加电压(C)、打印距离(D)等对熔丝直径有一定影响,选取四因素三水平正交实验方法,分析高压静电辅助 FDM 中各工艺参数与熔丝直径的关系及相关程度。

正交试验水平参数如表 1 所示,试验方案及结果如表 2 所示。

表 1 试验因素水平表

水平	A/℃	B/(mm·s ⁻¹)	C/kV	D/mm
1	200	10	1	1
2	220	30	4	3
3	240	50	7	5

表 2 正交试验方案及结果

实验号	A/℃	B/(mm·s ⁻¹)	C/kV	D/mm	熔丝直径/μm
1	200	10	1	1	413
2	200	30	4	3	324
3	200	50	7	5	263
4	220	10	4	5	359
5	220	30	7	1	113
6	220	50	1	3	314
7	240	10	7	3	143
8	240	30	1	5	412
9	240	50	4	1	127

2.2 正交试验方法分析

表 3 所示为各水平响应指标和平均值(K_i)和极差(R)。由表 3 可看出,A、B、C、D 四个因素的最小均值分别是 K_3 、 K_3 、 K_3 、 K_1 ,所以理论最优工艺参数组合为 $A_3B_3C_3D_1$,经实验验证采用该工艺参数组合所得到熔丝直径为 82 μm。此外通过分析每个因素中各水平与其均值的变化趋势可知,提高打印速度、施加电压及打印温度使沉积熔丝直径减小;增大打印距离使沉积熔丝直径增大。上述四个因素对熔丝直径的影响程度各不相同,其影响程度可通过分析各因素水平指标的极差大小判断,当该因素对应指标的极差越大,表明影响程度较大,反之较小。根据表 3 可知 $R_C > R_D > R_A > R_B$,因素主次顺序为 $C > D > A > B$,故高压静电辅助 FDM 技术中提高施加电压是优化成型质量的最关键因素,其次是打印距离、温度和速度。

表 3 正交试验数据分析

项目	A	B	C	D
K_1	333.333	305.000	379.667	217.667
K_2	262.000	283.000	270.000	260.333
K_3	227.333	234.667	173.000	344.667
R	106.000	70.333	206.667	127.000

图 4 为试验因素与响应指标关系趋势图。由图 4 直观分析可知, $A_3B_3C_3D_1$ 为理论最优水平组合,通过线段变化幅度亦可直观判断各因素对熔丝直径影响程度大小,通过线段升降变化趋势亦可定性分析各因素对沉积熔丝直径的影响,直观分析所得结论与数值计算分析结果相同。

2.3 各工艺参数对熔丝直径的影响分析

(1) 施加电压和打印距离。

根据上述理论分析可知,熔丝直径主要由电场

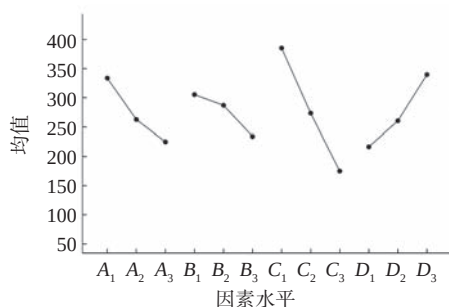


图4 试验因素与响应指标关系

强度决定。电场强度与施加电压成正比,与打印距离成反比,电场强度越大电场力越大,熔丝受到电场力拉伸细化作用越强,熔丝直径越细,这与实验结果吻合。而对于打印距离方面,打印距离越大则喷头处电场强度较小,细化熔丝的效果较弱导致熔丝较粗。由于高压静电辅助 FDM 为非接触式加工,其间距越大鞭动幅度越大,难以使熔丝在规定的位置沉积,易产生熔丝团聚,不仅不利于细化熔丝甚至可能导致成型失败。此外较大的打印距离会使聚合物熔丝在空中下落时间较长,在熔丝下落过程中喷头已高速移动到其他位置并且移动的喷头会对正在下落的熔丝造成拖拽作用,拖拽方向实时变化,使熔丝很难在指定位置沉积,且过大的打印距离会导致熔丝沉积时的温度较低或熔丝在空中固化,导致上层与下层材料无法良好粘接造成成型失败,综上所述该工艺应采用较小的打印距离。

(2) 打印温度。

由于高聚物在热降解之前黏度随温度升高而降低,其流体内部粘滞力和表面张力也随之降低^[15],即向上分力减小,更有利于竖直向下的电场力细化熔丝。此外由于熔丝在空中冷却,较高的打印温度可以使熔丝下落堆叠在下层材料上表面时依然保持有较高的温度,有助于提高制品上下层间结合强度,降低了制品上下层成型过程中分离的可能性。基于层间结合性能问题,设想采用较高的打印环境温度,可降低熔丝温度下降速率,以提高制品层间粘接性能,接下来会对此方面进行相关研究。

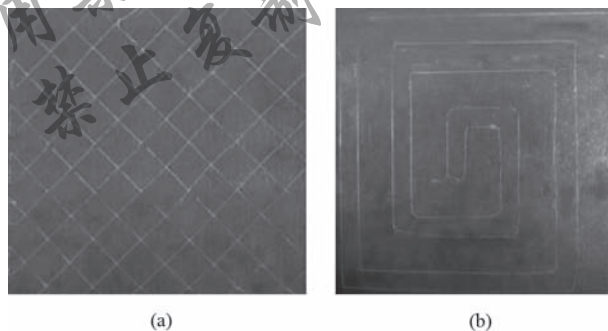
(3) 打印速度。

随着打印速度提高,喷头和接收平台间的相对移动产生对熔丝的拖拽力加大,有助于细化熔丝。但实验发现打印速度是对沉积熔丝直径影响最小的参数,这可能是由于熔丝挤出后初段主要凭借电场力作用细化熔丝并使熔丝保持竖直姿态,而在临近

接触成型平台时由于喷头和成型平台的相对移动造成的拖拽作用起到主导作用,熔丝明显呈弯曲状态,但该阶段熔丝温度相对较低、熔体黏度较大,导致较高的打印速度产生的拖拽力无法及时细化熔丝,从而削弱打印速度对沉积熔丝直径影响程度。此外过快的打印速度会导致已被电场力细化的熔丝拉断,导致熔丝直径一致性较差。故在高压静电辅助 FDM 工艺中,应针对不同拉伸强度的材料在熔丝直径保持稳定的前提下尽可能采用较高的打印速度拉伸细化熔丝。

2.4 高压静电辅助 FDM 技术实际加工制作效果

基于上述研究,在施加电压 7 kV,打印距离 1 mm,打印温度为 240℃,喷头运动速度为 50 mm/s 的条件下利用自主设计高压静电辅助 FDM 成型装置制备了 PLA 材料三维拓扑网格结构和三维回旋结构,堆叠层数为 5 层,如图 5 所示,制品堆叠重复精度较高,但在拐角处出现误差。



a—三维拓扑结构; b—三维回旋结构

图5 高压静电辅助 FDM 工艺制品

3 结论

(1) 采用高压静电辅助 FDM 技术,可得到直径为 82 μm 的沉积熔丝,一定程度提高了 FDM 技术加工制造精度极限。

(2) 正交试验结果表明,打印速度、施加电压及打印温度的增加使沉积熔丝直径减小;打印距离增大使沉积熔丝直径增大。各因素对熔丝直径的影响程度从大到小排列分别为:施加电压、打印距离、打印温度、打印速度。当施加电压为 7 kV,打印距离为 1 mm,打印温度为 240℃,喷头运动速度为 50 mm/s 时为最佳工艺参数组合。

(3) 实际加工验证了高压静电辅助 FDM 加工工艺的可行性,并为后期研究高压静电辅助对聚合物熔体微滴堆叠 3D 打印技术的影响提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 王位, 陆亚林, 杨卓如. 三维快速成型打印机成型材料[J]. 铸造技术, 2012, 33(1):114-117.
Wang Wei, Lu Yalin, Yang Zhuoru. Materials for printing shaping in 3D rapid prototyping technology[J]. Foundry Technology, 2012, 33(1):114-117.
- [2] 李小丽, 马剑雄, 李萍, 等. 3D 打印技术及应用趋势[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1):1-5.
Li Xiaoli, Ma Jianxiong, Li Ping, et al. 3D printing technology and its application trend[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 35(1):1-5.
- [3] 宋晓艳, 邢金峰. 双光子聚合 3D 打印[J]. 化工学报, 2015, 66(9):3 324-3 332.
Song Xiaoyan, Xing Jinfeng. 3D printing technology based on two-photon polymerization[J]. CIESC Journal, 2015, 66(9):3 324-3 332.
- [4] 路丰军, 洪雅真, 王士斌. 光固化 3D 打印及其打印材料改性的研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(8):1 563-1 565.
Lu Fengjun, Hong Yazhen, Wang Shibin. Light curing 3D printing and the development of modifying study on printing materials[J]. Applied Chemical Industry, 2016, 45(8):1 563-1 565.
- [5] 李金华, 张建李, 姚芳萍, 等. 3D 打印精度影响因素及翘曲分析[J]. 制造业自动化, 2014(21):94-96.
Li Jinhua, Zhang Jianli, Yao Fangping, et al. Precision affecting factors and warpage analysis of 3D printer[J]. Manufacturing Automation, 2014(21):94-96.
- [6] 齐元磊, 于建涛. FDM 技术制造高精度零件的方法[J]. 科学技术创新, 2016(10):111.
Qi Yuanlei, Yu Jiantao. A method for manufacturing high-precision parts that FDM[J]. Journal of Science and Technology Innovation, 2016(10):111.
- [7] 魏辉. FDM 成型质量及支撑策略的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
Wei Hui. Research about FDM molding quality and the support strategy[D]. Hangzhou: College of Mechanical Engineering Zhejiang University of Technology, 2016.
- [8] 邹国林. 熔融沉积制造精度及快速模具制造技术的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
Zou Guolin. Study on precision of FDM and rapid tooling based on FDM & LOM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002.
- [9] Maidin S, Muhamad M K, Pei E. Feasibility study of ultrasonic frequency application on fdm to improve parts surface finish[J]. Mpra Paper, 2015, 77(32):27-35.
- [10] 杨卫民, 李好义, 吴卫逢, 等. 熔体静电纺丝技术研究进展[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2014(4):1-13.
Yang Weimin, Li Haoyi, Wu Weifeng, et al. Advances in melt electrospinning technology[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2014(4):1-13.
- [11] 刘晓凤, 张莉彦, 阎华, 等. 熔体静电纺丝技术及其在生物医学中的应用[J]. 合成纤维工业, 2015, 38(5):39-42.
Liu Xiaofeng, Zhang Liyan, Yan Hua, et al. Melt electrospinning technology and its application in biomedicine[J]. China Synthetic Fiber Industry, 2015, 38(5):39-42.
- [12] Zhang B, Seong B, Nguyen V D, et al. 3D printing of high-resolution PLA-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2016, 26(2):1 002-1 007.
- [13] 金泽枫, 金杨福, 周密, 等. 基于 FDM 聚乳酸 3D 打印材料的工艺性能研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(2):67-70.
Jin Zefeng, Jin Yangfu, Zhou Mi, et al. Research of processing property of PLA materials for 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2):67-70.
- [14] 刘晓凤, 张莉彦, 谭晶, 等. 熔体电纺聚乳酸可控结构成型工艺初探[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(5):51-54.
Liu Xiaofeng, Zhang Liyan, Tan Jing, et al. Study on forming process of controlled structure about polylactic acid by melt electrospinning[J]. engineering Plastics Application, 2016, 44(5):51-54.
- [15] Turner B N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling[M]//Process modeling and improvement for business. McGraw-Hill Professional, 2014:192-204.

壳牌将以石化产品重返塑料市场

近年来,全球能源公司荷兰皇家壳牌的壳牌化工子公司已经退出大部分塑料业务。近日,壳牌却以一种大型石化产品的形式重返。该公司目前正在匹兹堡地区建设。

该项目将利用在阿帕拉契亚 Marcellus 和 Utica 页岩区开发的低价天然气原料。建设完成后,壳牌项目将拥有 35 亿磅/年的聚乙烯树脂年产能。

业务整合主管 Michael Marr 表示:“我们正在寻求发展客户需求和客户关系。该项目与原料供应和客户基础十分

密切。”Marr 表示,在匹兹堡地区生产的树脂,其大部分将被销售到美国市场。他补充说,该地理位置将带来竞争优势,而不是竞争对手。70% 的 PE 树脂购买者和最终使用产品的制造商都在匹兹堡的方圆 700 英里范围内。

该项目将在高峰时期创造 600 个全职工作岗位和 6 000 个建筑工作岗位。Marr 说,壳牌已从州和地方政府那里得到了巨大的支持。他不太担心进入一个已经有几个供应商的私募股权市场,其中许多供应商也因为页岩原料而增加了产能。
(中塑在线)