

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.03.012

圆管气辅挤出中挤出胀大模拟研究^{*}

徐妍清, 黄兴元, 柳和生

(南昌大学机电工程学院聚合物成型实验室, 南昌 330031)

摘要: 针对圆管型气辅挤出工艺, 建立模拟分析几何模型, 选用 PTT 黏弹性本构方程, 采用 Polyflow 有限元仿真软件模拟研究不同挤出流量、管径、壁厚及气辅段长度时挤出制品的挤出胀大。结果表明, 传统挤出时挤出胀大比随挤出流量的增加而大幅增大, 气辅挤出时挤出胀大比随其提高而增长甚微, 其值始终接近 1, 可忽略不计; 气辅挤出时挤出胀大比随管径增大而微弱增加, 随壁厚增大而微弱减小, 且都可得到基本消除; 挤出胀大随气辅段长度增长而减小, 最终趋于 1。

关键词: 气辅挤出; 圆管口模; 挤出胀大; 数值模拟

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)03-0060-05

Numerical Simulation of Die Swell in Gas-assisted Pipe Extrusion

Xu Yanqing, Huang Xingyuan, Liu Hesheng

(Polymer Processing Research Lab, School of Mechanical and Electric Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract : Through the finite element simulation software Polyflow, building pipe-shape geometric model and selecting the PTT viscoelastic constitutive equations, die swell phenomenon of extruded products aiming at pipe-shape gas-assisted extrusion technology was simulated in different extrusion flow, pipe diameter, wall thickness and gas-assisted length. The results show that the die swell ratio of traditional extrusion increases sharply with the increasing of extrusion flow, while increasing faintly in gas-assisted extrusion, which is closed to 1 and can be ignored. In gas-assisted extrusion, the die swell increases faintly with the increase of diameter, while the die swell decreases faintly with the increase of wall thickness, and both of them can be basically eliminated. The die swell decreases with the increasing of gas-assisted length, and trends to be 1 at last.

Keywords : gas-assisted extrusion ; pipe die ; die swell ; numerical simulation

挤出成型是聚合物管材加工主要的方法之一, 大部分热塑性塑料都能用其加工生产。其生产连续、效率高、操作简单、应用广泛。然而, 聚合物在传统挤出成型过程中因为塑料熔体的高黏性、黏弹性和加工过程参数的偶合作用导致了离模膨胀和翘曲变形, 使制品形状尺寸精度控制困难^[1-2], 同时传统塑料制品在成型时易出现挤出胀大, 挤出口模压降大, 挤出物表面缺陷等缺点, 严重影响了挤出制品精度, 限制了挤出速度, 导致了基础能耗高^[3]。上述问题在聚合物加工过程中影响极大, 是现代挤出加工工艺中急需解决的技术难题。

气辅挤出成型技术通过在挤出熔体和口模之间形成稳定的气垫膜层, 使口模挤出方式由传统挤出的非滑移粘着剪切转化为完全滑移非粘着剪切, 不仅可使口模压降降低 30% 左右, 而且可使挤出制品的内应力和翘曲变形大为降低, 离模膨胀基本得到消除, 成为解决传统挤出技术难题的有效手段^[4]。

随着现代化建设的不断发展, 国内市场对于圆形管材的需求不论在数量还是质量上都有了更高的要求。目前已有大量学者对传统圆管挤出进行了数值模拟和实验研究^[5-7]。然而, 尽管经过了数百年的不断完善, 传统挤出生产出的圆管仍或多或少存在挤出胀大及内外壁面“鲨鱼皮”等缺陷。将气体辅助技术应用于圆管挤出工艺中, 不仅可以基本消除圆管挤出制品的挤出胀大和翘曲变形, 还能有效提高其生产效率, 降低生产能耗, 极大改善生产条件及产品质量。

国内外学者对气辅挤出工艺进行的研究工作仅限于口模形状如圆形^[8]、方形^[9-10]、L 形^[11]、T 形^[12]等, 而针对圆管的气辅挤出研究鲜少。相对于上述截面, 圆管壁比较薄, 挤出过程中易截面变形。其

^{*} 国家自然科学基金项目 (51403615, 51165031)

联系人: 黄兴元, 教授, 主要从事聚合物成型和设备研究

收稿日期: 2014-12-12

他形状挤出物内部实心,熔体和口模只有一个接触表面,辅助气体只需通入此表面形成一层气垫膜层。而圆管芯部为中空,熔体内外表面都要与挤出口模发生接触,两个接触面都需通入辅助气体,形成双层气垫膜层。这与已有的气辅挤出模拟研究有很大区别。

因此,笔者将通过 Polyflow 有限元仿真软件,针对圆形管材进行气辅挤出成型的三维数值模拟,着重研究挤出流量、管径、壁厚及气辅段长度对圆管挤出胀大的影响。

1 管材口模流体模拟分析前处理

1.1 物理模型及网格划分

对圆管模型进行三维绘图。由于该模型为横纵对称模型,为简化计算过程,节省计算时间,仅截取其 1/4 模型进行模拟。三维模型如图 1 所示。

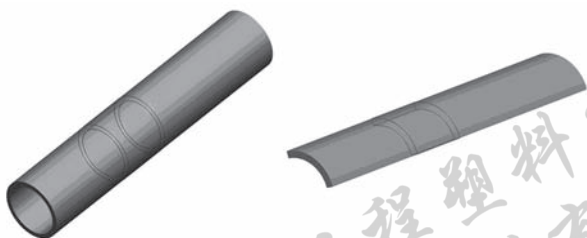


图 1 圆管三维模型

对 1/4 圆管模型进行映射网格划分,采用六面体结构化网格。划分后模型如图 2 所示。

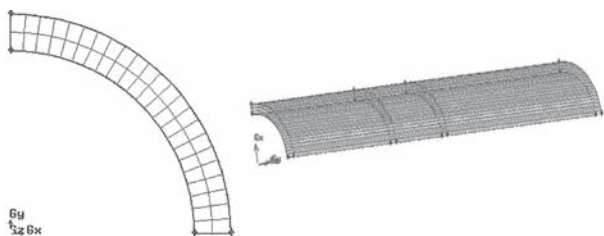


图 2 管材网格划分

1/4 口模二维模型如图 3 所示。圆管壁厚 $a=2$ mm, 半径 $R=10$ mm。熔体从 A-A 进入, B-B 为辅助气体入口, C-C 为口模出口, A-B 段无气辅, $L_{AB}=40$ mm, B-C 段有气辅, 气辅段长度 $L_{BC}=20$ mm,

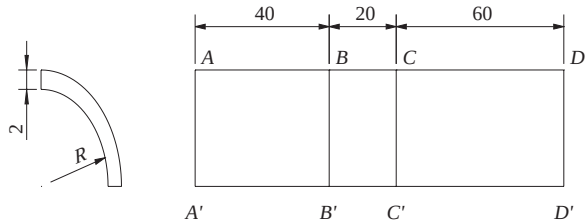


图 3 圆管二维模型

C-D 为自由表面段, $L_{CD}=60$ mm。在传统挤出中, A-C 段为无气辅段, 总长 $L_{AC}=60$ mm。

1.2 数学模型

在进行模拟之前, 由于聚合物熔体流动复杂, 难以逐一进行精确确切的描述, 现对其进行简化, 并假定:

- (1) 流体为黏性不可压缩流体, 稳定层流;
- (2) 压力在横截面上的梯度为零;
- (3) 由于熔体的高黏性, 其惯性力和重力相对于黏性力很小, 故忽略不计;
- (4) 流场为等温场, 流体物理性质如熔体密度、导热系数和比热容均恒定;
- (5) 熔体与模壁之间的气垫膜层作完全滑移运动。

基于以上假定, 由聚合物的成型加工过程所遵循的守恒定理, 得到其控制方程。

$$\text{连续性方程: } \nabla v = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } -\nabla P + \nabla \tau = 0 \quad (2)$$

本构方程: 选用 PTT 黏弹性模型^[13], 其方程为:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (3)$$

$$\exp\left[\frac{\varepsilon \lambda}{\eta_1} \text{tr}(\tau_1)\right] \tau_1 + \lambda \left(1 - \frac{\xi}{2}\right) \dot{\tau}_1 + \frac{\xi}{2} \dot{\tau}_1 = 2\eta_1 D \quad (4)$$

$$\tau_2 = 2\eta_2 D \quad (5)$$

式中: ∇ ——哈密顿算子;

v ——速度矢量;

P ——压力;

τ ——偏应力张量;

τ_1, τ_2 ——偏应力张量的弹性分量和黏性分量;

$\dot{\tau}_1$ ——偏应力张量的下随体时间导数;

$\text{tr}(\tau_1)$ —— τ_1 的迹;

λ ——松弛时间;

ε ——拉伸相关材料参数;

ξ ——剪切相关材料参数;

η_1, η_2 ——零剪切黏度弹性和黏性分量;

D ——形变速率张量。

η_1 和 η_2 之间存在如下关系:

$$\eta_0 = \eta_1 + \eta_2 \quad (6)$$

$$s = \frac{\eta_2}{\eta_0} \quad (7)$$

式中: η_0 ——零剪切黏度;

s ——零剪切黏度中黏性分量比例。

1.3 工艺参数和物性参数

聚合物熔体选用高密度聚乙烯 (PE-HD), 其参数为: $\eta_0=10\,000\text{ Pa}\cdot\text{s}$; $\lambda=0.1\text{ s}$; $\varepsilon=0.1$; $\zeta=0$; $s=0.03$ 。

1.4 边界条件

气辅挤出时: A-B 段 $v_s=0$, $v_n=0$; B-C 段 $v_n=0$, $f_s=0$; C-D 段为自由表面。

传统挤出时: A-C 段 $v_s=0$, $v_n=0$; C-D 段为自由表面。

自由表面: 熔体在该段发生挤出胀大, 模拟时软件将对该段进行网格重置等处理。

对称面: $f_s=0$, $v_n=0$ 。

熔体出口面: $f_s=0$, $f_n=0$ 。

其中: v_s 为切向速度; v_n 为法向速度; f_s 为切向力; f_n 为法向力。

2 模拟结果分析及讨论

挤出胀大可用挤出物截面面积和口模截面面积之比来描述, 挤出胀大比如式 (8) 所示。

$$B = \frac{S}{S_0} \quad (8)$$

式中: B —挤出胀大比;

S —挤出制品截面面积;

S_0 —挤出口模截面面积。

2.1 传统挤出和气辅挤出状态下的挤出胀大对比

图 4 为在总挤出流量 $Q=4 \times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 传统挤出和气辅挤出下圆管的离模膨胀三维形貌图。传统挤出时口模出口处各项速度分布不均匀, 存在明显压力降及剪切速率、应力分布。由于正应力效应, 熔体离开口模后产生明显的挤出胀大和翘曲变形。而气辅挤出中, 各场量变化只发生在辅助气体入口处。气辅挤出有效消除了制品的挤出胀大, 同时翘曲变形也得到了极大改善。

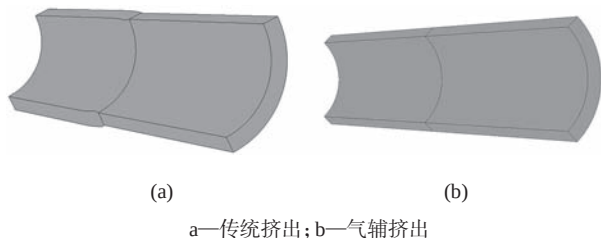


图 4 传统挤出和气辅挤出圆管的离模膨胀三维形貌

2.2 挤出流量对挤出胀大的影响

为研究挤出流量与圆管挤出胀大的关系, 基于上述各参数不变的条件下, 改变其挤出流量 Q 。在 $Q=(4, 8, 12, 16) \times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 分析对比圆管传

统挤出和气辅挤出时挤出胀大的变化, 结果见图 5。从图 5 可以看出, 传统圆管挤出的挤出胀大比随着挤出流量的增加而持续大幅增加, 这充分说明传统挤出限制了挤出制品的生产速率, 经济性低。而相同条件下, 气辅挤出制品的挤出胀大比受挤出流量的影响极其微弱, 随其提高而增长的幅度甚微, 其值始终接近 1, 可忽略不计。由此可得, 相比于传统挤出, 管材气体辅助挤出不仅能有效消除挤出物的挤出胀大, 而且在相对高速地挤出中仍能精确生产, 效率高, 适用性极广。

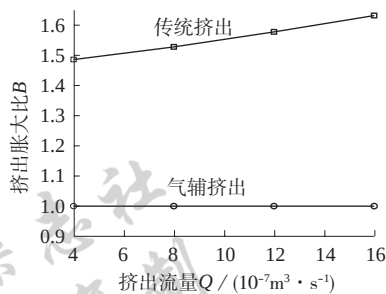


图 5 挤出流量与挤出胀大比的关系

2.3 管径对气辅挤出胀大的影响

首先分析气辅挤出时圆管壁厚 $a=2\text{ mm}$, 挤出流量 $Q=4 \times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 不同管径对气辅挤出胀大的影响。当圆管管径改变时, 口模横截面面积 A 也随之改变, 为研究不同管径单位面积内熔体挤出流量相等 (即挤出流速相等) 的情况下的挤出胀大, 取圆管半径 $R=(10, 14, 18, 22)\text{ mm}$, 计算可得对应 $Q=(4, 5.4544, 6.9088, 8.3636) \times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$, 此时 Q/A 是定值, 大小为 $0.009\,091\text{ m/s}$, 设 $n=0.009\,091\text{ m/s}$ 。

图 6 为不同挤出流量 ($Q/A=1n, 10n, 100n$) 时管径对挤出胀大比的影响。结果表明, 气辅挤出时挤出胀大随管径增大而微弱增加。 Q/A 值越大 (即挤出流量越大), 挤出胀大比受管径影响愈明显, 增幅逐渐变大。但当 Q 单位数量级小于 $10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$

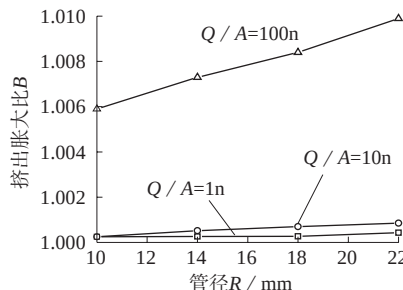


图 6 管径与挤出胀大比的关系

时,其挤出胀大比仍接近于1。因此,应用气体辅助挤出技术仍可基本消除不同管径的小型圆管的挤出胀大,实现对圆管挤出制品尺寸的精确控制,改善产品质量。

2.4 壁厚对气辅挤出胀大的影响

气辅状态下,设定圆管管径 $R=10\text{ mm}$, 挤出流量 $Q=4\times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$ 。圆管壁厚改变,口模横截面面积 A 也随之改变,为研究不同壁厚时挤出流速相等情况下的挤出胀大,取圆管壁厚 $a=(2,3,4,5,6)\text{ mm}$, 对应于 $Q=(4,6.2728,8.7272,11.3636,14.1816)\times 10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$, 此时 Q/A 仍是定值,大小为 $n=0.009091\text{ m/s}$ 。

图7为不同挤出流量 ($Q/A=1n, 10n, 100n$) 时圆管壁厚与挤出胀大比的关系。结果证明,上述工艺参数下,壁厚的增大使挤出胀大比微弱减小。 Q/A 值越大,挤出胀大比受壁厚影响愈明显,当 Q 单位数量级小于 $10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 时,胀大比始终趋近于1。气辅挤出工艺仍可以基本消除上述工艺条件下不同壁厚小型圆管的挤出胀大及翘曲变形。

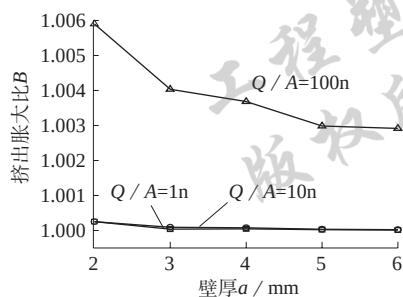


图7 壁厚与挤出胀大比的关系

2.5 气辅段长度对气辅挤出胀大的影响

从上述结果可知,气体辅助挤出中,挤出流量 Q 单位数量级为 $10^{-7}\text{ m}^3/\text{s}$ 、气辅段长度 $L_{BC}=20\text{ mm}$ 时,制品挤出胀大基本得到消除。因此,为研究气辅段长度对挤出胀大比的影响,基于上述各参数不变的条件下 ($a=2\text{ mm}$, $R=10\text{ mm}$) 大幅度提高挤出流量 Q , 在 $Q_1=4\times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_2=2\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q_3=4\times 10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,改变气辅段长度 L_{BC} , 分别取 $L_{BC}=(5,7.5,10,12.5,15,20,25,30)\text{ mm}$, 研究此时挤出物的挤出胀大,其结果见图8。 $Q=Q_3$ 时,在 L_{BC} 小于 20 mm 的情况下挤出胀大比随着气辅段长度的增加大幅度减小;在 L_{BC} 为 20 mm 时,挤出胀大基本得到消除,气辅段所需最短长度;当 L_{BC} 超过 20 mm ,挤出胀大比持续趋近于1,可忽略不计。分析图8可知,不同挤出流量时,挤出胀大比得

到基本消除所需最短气辅段长度不同。因此,为消除挤出胀大比,气辅段长度应随挤出流量增大而增长。

随着气辅段长度的增加,熔体在气辅段的停留时间越长,挤出时口模对其产生的压力和其内应力在该段越能得到更充分地释放,在口模出口处剪切速率、压力降和法向应力差随之减小,当气辅段长度增加到一定值时,上述参数基本趋近于零,挤出胀大因而消除。但有研究表明^[14],气辅段越长越容易引起气体流速、方向、压力、密度、温度等参数的变化,会导致熔体和挤出口模壁面粘连,气垫膜层的稳定性受到影响。因此,综合考虑到各方面因素,在设计气辅口模过程中,应在挤出胀大得到消除所需最短气辅段长度的基础上将气辅段再延长 $10\sim 20\text{ mm}$ ^[15]。

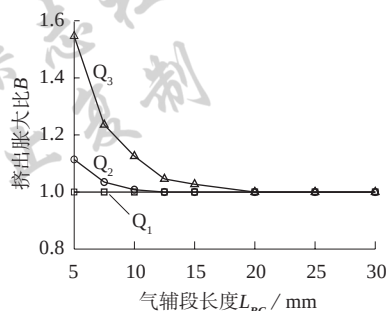


图8 气辅段长度与挤出胀大比的关系

3 结论

(1) 气辅挤出中气垫膜层减黏降阻使聚合物制品的内应力和翘曲变形大为降低,挤出胀大基本得到消除。

(2) 相比于传统挤出中圆管挤出胀大比随挤出流量的增加快速增大,气辅挤出时挤出胀大比随其提高而增长甚微,可忽略不计,其值始终接近于1,气辅挤出有利于圆管在工业化生产中的高速挤出。

(3) 气辅挤出时挤出胀大比随管径增大而微弱增加,随壁厚增大而微弱减小。挤出流量越大,其影响越明显。当 Q 单位数量级小于 $10^{-5}\text{ m}^3/\text{s}$ 时,不同管径、壁厚下的胀大比始终接近1。

(4) 增加口模气辅段长度,熔体挤出时内部压力和内应力在该段得到充分释放,挤出胀大比随之减小。为基本消除挤出胀大,气辅段长度应随挤出流量的增加而增长。

参考文献

- [1] Gifford W A. Compensating for die swell in the design of profile

- dies[J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43(10):1 657–1 665.
- [2] Noberga J M, Carneiro O S, Covas J A, et al. Design of calibrators for extruded profiles. Part I : Modeling the thermal interchanges[J]. Polymer Engineering and Sciences, 2004, 44(12):2 216–2 228.
- [3] 李萍, 马文琦, 孙红轶. 方形口模气辅挤出的数值模拟 [J]. 塑料, 2010, 39(4):18–20.
- Li Ping, Ma Wenqi, Sun Hongyi. The numerical simulation of square die gas-assisted extrusion [J]. Plastics, 2010, 39(4):18–20.
- [4] Liang R F, Mackley M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene[J]. J Rheol, 2001, 45(1):211–226.
- [5] 任海燕. 中空制品挤出成型关键技术及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Reng Haiyan. Study on key technology of hollow products extrusion molding and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [6] 丁晚景, 刘繁, 孙川. 塑料管材挤出模具可重构设计 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(9):69–71.
- Ding Wanjing, Liu Yi, Sun Chuan. Design of reconfigurable extrusion mould for plastic pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(9):69–71.
- [7] 刘斌, 王玉龙, 岳潼雁. 直通式管材挤出模头智能化设计系统开发及应用 [J]. 塑料, 2013, 42(2):10–13.
- Liu Bing, Wang Yulong, Yue Tongyan. Development and application of intelligent design system of straight-through pipe extrusion die[J]. Plastics, 2013, 42(2):10–13.
- [8] 肖建华, 柳和生, 黄兴元, 等. 聚合物在等温圆管口模中流动数值模拟 [J]. 高分子材料科学与工程, 2008, 24(10):21–24.
- Xiao Jianhua, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Numerical simulation of two dimension isothermal circle die flow of polymer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2008, 24(10):21–24.
- [9] 任银娥. 方管聚合物气辅挤出数值模拟和口模设计 [D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- Ren Yine. The Numerical simulation and die swell design of square tube polymer gas-assisted extrusion[D]. Nanchang : Nanchang University, 2014.
- [10] 肖建华, 黄兴元. 方形口模气辅挤出成型的挤出胀大计算机模拟 [J]. 塑料, 2013, 42(3):100–103.
- Xiao Jianhua, Huang Xingyuan. Computer simulation on die swell of gas-assisted extrusion from square die[J]. Plastics, 2013, 42(3):100–103.
- [11] 何建涛, 柳和生, 黄兴元, 等. L 型异型材气辅共挤胀大的三维等温数值模拟 [J]. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(5):118–122.
- He Jiantao, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Three-dimensional isothermal numerical simulation of die swell in L-shaped profile gas-assisted coextrusion[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2014, 30(5):118–122.
- [12] 宋建辉, 黄兴元. T 型口模气辅挤出中挤出胀大和挤出物变形的影响因素 [J]. 工程塑料应用, 2013, 41(10):60–63.
- Song Jianhui, Huang Xingyuan. Influence factors on die-swell and warping of T-shape plastic profile gas-assisted extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(10):60–63.
- [13] Thien N P, Tanner R I. A new constitutive equation derived from network theory[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1977, 2(4):353–365.
- [14] 江波. 我国塑料成型机与辅机的发展现状与技术水平分析 (下) [J]. 橡塑技术与装备, 2002(11):4–11.
- Jiang Bo. The present development status and technical property of plastic extruder and its auxiliary equipment in China (part 2) [J]. China Rubber / Plastics Technology & Equipment, 2002(11):4–11.
- [15] 黄兴元. 聚合物气体辅助口模挤出成型的理论及实验研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2006.
- Huang Xingyuan. Theoretical and experimental study of polymer gas-assisted extrusion from dies[D]. Nanchang: Nanchang University, 2006.

金发科技宣布吸收合并全资子公司

金发科技近日宣布, 为整合公司资源, 规范内部管理, 降低运营成本, 拟吸收合并全资子公司广州德美化工材料有限公司。

德美化工位于广州科学城, 注册资本为人民币 3 100 万元, 属于法人独资的有限责任公司, 法定代表人为金发董事长袁志敏。

其经营范围被定义为: 研究、开发、销售化工原料和化工产品; 电子产品的研究和开发、生产、销售。

该企业在 2013 财年实现净资产 1 695 万元, 但净亏 879 万元。2014 财年实现了扭亏为盈, 但净利润仅为 19 万元。

金发科技通过吸收合并的方式合并德美化工全部资产、负债和业务, 合并完成后金发科技存续经营, 德美化工独立法人资格注销。

合并完成后, 德美化工的所有资产, 包括但不限于固定资产、流动资产等财产合并入金发科技; 德美化工的债权、债务由金发科技继续享有和承担。

金发科技表示, 本次合并有利于整合公司资源, 规范内部管理, 减少管理层级, 降低管理成本。

由于德美化工为金发科技全资子公司, 其财务报表在合并前已按 100% 比例纳入金发科技合并报表范围内, 因此本次合并不会对金发科技当期损益产生实质性影响。(塑新网)