

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.013

PVC-U 管材挤出机头的流道数值模拟及优化

于玉真,马飞,王璐,赵博,邸海宽,王亚洲

(华北理工大学机械工程学院,河北唐山 063210)

摘要:在管材加工过程中,熔体挤出机头的挤出过程是最为关键的一部分。为了增强其生成管材的力学和物理性能,以直通式机头为本次实验研究对象,采用 Fluent 分析软件进行熔体的流道模拟,选取不同结构参数进行正交试验,并利用后处理软件 CFD-post 进行熔体的流场分析,得出合理的、符合实际工况的最优结构。研究表明,对于直通式机头,优化前后,流道内熔体的最大速度与其中压缩段,成型段压力降具有明显差异,且优化后的模型更加可利用,制品更紧密,更符合实际生产的需求。

关键词:管材挤出机头;结构优化;Fluent;直通式;正交试验

中图分类号:TQ320.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2020)11-0065-05

Numerical Simulation and Optimization of Flow Channel of PVC-U Pipe Extruder Head

Yu Yuzhen, Ma Fei, Wang Lu, Zhao Bo, Di Haikuan, Wang Yazhou

(College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In the process of pipe processing, the process of melt extrusion head is the most critical part. In order to enhance the mechanical and physical properties of the pipe, it is proposed to use the straight head as the experimental research object. Fluent analysis software is used to simulate the flow channel of the melt, and CFD post is used to analyze the flow field of the melt, and a reasonable and practical optimal structure is obtained. The results of this study show that for the straight head, the maximum velocity of the melt in the runner before and after optimization is significantly different from that in the compression section and the pressure drop in the forming section, and the optimized model is more available, the products are more compact, and more in line with the actual production requirements.

Keywords: pipe extruder head; structural optimization; fluent; straight through; orthogonal test

现如今塑料管材无论是在人们的日常生活中还是生产场地上都发挥着举足轻重的作用^[1-4]。随着塑料管材的应用范围越来越广,人们对它的质量方面的要求也随之提高,例如是否具有较长的使用寿命,是否有过硬的物理力学性能等^[5-7]。“挤出成型”作为加工塑料管材的最主要方法,机头的结构以及物料特性在很大程度上决定了挤出制品的质量,合理的流道结构能够使机头内的塑料熔体以完美的状态流动,从而提高挤出制品的质量,并提高生产效率^[8-10]。

笔者对传统挤出机头结构进行建模,通过对速度与压力等因素进行正交试验找出对制品质量影响

比较大的因素,并根据得出的数据找出传统挤出机头模具所存在的问题并加以改进,得出优化后挤出机头模具尺寸再次进行模拟分析并进行比较。

1 直通式机头有限元建模

1.1 工作原理

对于直通式机头来说,其工作原理主要为:熔体经过过滤网进入进口段,通过扩张段使得熔体充分发展并降低其速度。紧接着流经分流段通过分流筋的作用使得熔体分流,从而使熔体分成数股料流。随后通过压缩段给熔体进一步施加压力使得熔体的塑性更好。最后进入成型段,熔体进行减速,使得制品更加紧密,并生成管材^[11-14]。

基金项目:河北省省级专业学位教学案例(库)项目(KCJSZ2018059)

通信作者:马飞,硕士研究生,主要从事弹塑性有限元仿真研究 E-mail: 862303436@qq.com

收稿日期:2020-09-04

引用格式:于玉真,马飞,王璐,等.PVC-U 管材挤出机头的流道数值模拟及优化[J].工程塑料应用,2020,48(11):65-69.

Yu Yuzhen, Ma Fei, Wang Lu, et al. Numerical simulation and optimization of flow channel of PVC-U pipe extruder head[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11): 65-69.

1.2 三维模型

笔者采用Creo软件,根据工厂实际尺寸进行1:1熔体流道建模,并对该模型进行简化。传统直通式机头熔体流道尺寸分别为:入口直径为 $r_1=90$ mm,扩张段扩张角 $\alpha=72^\circ$,压缩段压缩角 $\beta=36^\circ$,成型段长度 $L_1=100$ mm,压缩段长度 $L_2=155$ mm,出口直径 $r_2=115$ mm,成型段壁厚3.2 mm。最终得出传统直通式机头熔体流道三维模型如图1所示。

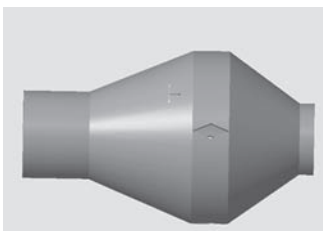


图1 机头流道模型

1.3 正交试验原理

为了减少试验次数,找出最优的搭配方案,可以根据正交试验设计方法,对多因素、多水平的试验进行研究,这是一种高效率、快速、经济的试验设计方法。

1.4 数学模型

本次研究取PVC-U型材料作为研究对象,其主要由硬质聚氯乙烯组成,其主要参数:密度 $\rho=1.36$ g/cm³,黏度 $\eta=58700$ Pa·s。

为考虑实际工况对管材制品加工的影响及便于计算,需在满足流体力学理论下做假设^[15-17]。①流体在制品模具中是充分发展的,且与壁面无滑移。②流体在运动过程中不受时间温度等因素影响。③满足三大方程。如下连续性方程,动量方程,幂律流体本构方程。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(2) 力学运动方程:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial z} + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

上式分别为 x, y, z 各分量。

(3) 幂律流体本构方程:

$$\tau = m|\dot{\gamma}|^{n-1}\dot{\gamma} \quad (5)$$

上式中: τ 为流体剪切应力, Pa; m 为流体稠度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹; n 为幂律流体指数。

1.5 网格划分

用ANSYS有限元分析软件对模型进行网格划分,扩张段处采用四面体网格划分,其余部分为六面体网格划分,网格节点数为48.7万,网格单元数为69.3万,直通式机头网格划分情况如图2所示。

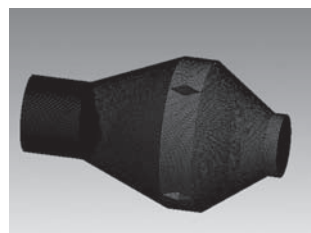


图2 机头流道网格划分

对管材挤出机头进行网格无关性验证,利用Fluent进行流场分析,得出熔体在流道内的最大速度 V_m 与网格数量变化的关系,结果如图3所示。

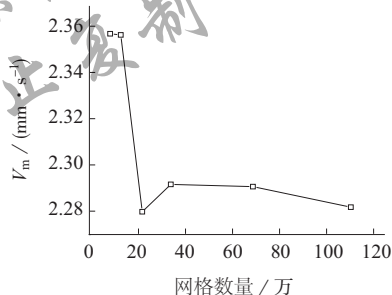


图3 熔体最大速度随网格数量的变化关系

由图3可以得出在网格数量从13.3万过渡到22.4万时,熔体最大速度减小了3%,说明网格精度影响较大,网格数量不合适。网格数量从22.4万过渡到34.5万时,熔体最大速度减小了0.9%,网格数量从34.5万过渡到69.3万时,熔体最大速度减小了约0.2%,网格数量从69.3万过渡到110.8万时,熔体最大速度也增加了约0.2%。从上述分析可以得出,流道网格数量在34.5万到110.8万网格精度对最大速度的影响已经趋于平稳状态,并且考虑到计算机内存问题以及计算时间问题,笔者采用69.3万网格进行计算。

1.6 边界条件

入口边界为压力入口,取12 MPa;出口边界为压力出口,出口压力为0 MPa;壁面边界采用无滑移边界条件,在模壁接触面上,熔体速度设置为0。

2 模拟结果及分析

利用ANSYS软件中Fluent模块,对管材挤出机头流道进行分析计算,分析其压力场和速度场。

管材机头流道模型整体压力分布云图如图 4 所示。

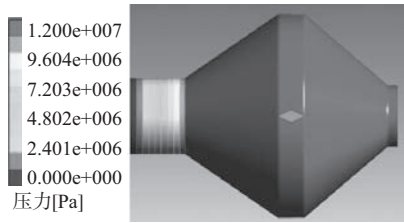


图 4 优化前流道压力分布云图

从图 4 可知,流道压力最大值主要集中在入口段、扩张段、分流区、压缩段等部分,压力变化相对较小,而流道内压力下降最为明显的是在成型区。

为了更为直观体现流道内部熔体速度分布,取 45° 倾斜平面进行更为仔细观察,优化前流道速度分布云图如图 5 所示。

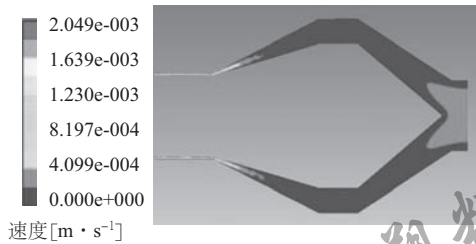


图 5 优化前流道速度分布云图

从图 5 可以看出,熔体在入口处由于压力作用有了初始速度,平稳流经扩张段,分流区,在压缩段后方开始加速,在成型区前方速度达到最大值 2.049 mm/s,并且可以得出熔体在流道中间速度比流经壁面速度大。

3 正交试验分析

3.1 试验指标

为进一步优化管材挤出机头流道,分析不同结构参数对熔体流动均匀性和最大速度 V_m 的影响程度,用更少的试验次数优化管材挤出机头的目的,达到更直观体现流动均匀性的好坏,笔者选用美国相对均方根法 (RMS) 标准的相对标准偏差系数 (C_v) 定量评价机头流道出口速度均匀性,其值越小,速度越均匀,定义如下:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

式中: C_v 为相对标准偏差; σ 为样本速度标准差, mm/s; $\bar{x}$ 为所有样本点平均速度, mm/s; x_i 为每个样本点的速度 ($i=0 \sim n$), mm/s; n 为样本点数。

3.2 因素水平确定

为优化管材挤出机头流道,采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表,分析不同结构参数的成型段长度 (A)、压缩角 (B)、扩张角 (C)、压缩段长度 (D) 和入口压力 (E) 对机头流道流场性能的影响,以使用少的试验次数达到优化管材挤出机头的目的。正交试验为五因素三水平,因素水平见表 1。

表 1 正交试验因素水平

水平	A / mm	B / (°)	C / (°)	D / mm	E / MPa
1	75	30	66	135	10
2	90	36	72	150	12
3	105	42	78	180	14

3.3 正交试验方案及结果

试验方案及结果见表 2。以管材挤出机头流道的出口速度相对标准差 C_v 和最大速度 V_m 为评价指标,对试验结果进行极差分析,极差计算方法如下:

$$k_i = \frac{1}{N_i} K_i \quad (9)$$

$$R = \max(k_1, k_2, \dots, k_i) - \min(k_1, k_2, \dots, k_i) \quad (10)$$

式中: k_i 为每个因素 i 个水平的平均值; N_i 为每个因素 i 水平的重复次数; K_i 为每个因素 i 个水平的数值之和; R 为极差,是将 i 个 k_i 值中的最大值减去最小值。根据极差的大小分析五因素对试验结果的影响顺序。极差值越大,表示该因素对指标的影响程度越大,则该因素就是主要因素。

表 2 正交试验方案及结果

试验号	A / mm	B / (°)	C / (°)	D / mm	E / MPa	C_v / %	V_m / (mm · s ⁻¹)
1 [#]	1	1	1	1	1	0.031	1.570
2 [#]	1	2	2	2	2	0.033	2.017
3 [#]	1	3	3	3	3	0.043	2.555
4 [#]	2	1	1	2	2	0.037	1.752
5 [#]	2	2	2	3	3	0.072	2.196
6 [#]	2	3	3	1	1	0.018	1.241
7 [#]	3	1	2	1	3	0.021	1.057
8 [#]	3	2	3	2	1	0.018	0.955
9 [#]	3	3	1	3	2	0.011	1.680
10 [#]	1	1	3	3	2	0.033	1.946
11 [#]	1	2	1	1	3	0.042	2.565
12 [#]	1	3	2	2	1	0.044	1.729
13 [#]	2	1	2	3	1	0.033	1.345
14 [#]	2	2	3	1	2	0.021	0.495
15 [#]	2	3	1	2	3	0.108	2.303
16 [#]	3	1	3	2	3	0.018	1.543
17 [#]	3	2	1	3	1	0.112	1.319
18 [#]	3	3	2	1	2	0.037	1.572

以管材挤出机头流道的出口速度相对标准差为试验指标,对试验结果进行极差分析,极差见表 3,从表 3 可以看出,因素 C (扩张角) 对结果影响最

大,影响因素的重要顺序为: $C > D > E > B > A$ 。对于评价指标,五因素最优水平为 $A3B1C3D1E2$ 。

表3 指标 C_v 影响因素的极差分析

项目	A/mm	$B/(^{\circ})$	$C/(^{\circ})$	D/mm	E/MPa
k_1	0.038	0.029	0.057	0.028	0.043
k_2	0.048	0.050	0.040	0.043	0.029
k_3	0.036	0.044	0.025	0.051	0.051
R	0.012	0.021	0.032	0.023	0.022

最大速度 V_m 的极差分析见表4,从表4中可以看出,因素 A (入口压力) 对 V_m 影响最大,影响因素的重要顺序为: $A > E > D > C > B$ 。对于评价指标 V_m ,五因素最优水平为 $A1B3C1D3E3$ 。

表4 指标 V_m 影响因素的极差分析

项目	A/mm	$B/(^{\circ})$	$C/(^{\circ})$	D/mm	E/MPa
k_1	2.064	1.536	1.865	1.417	1.36
k_2	1.555	1.591	1.653	1.717	1.577
k_3	1.354	1.847	1.456	1.84	2.037
R	0.71	0.311	0.409	0.423	0.677

3.4 优化方案的确定

两个指标中 C_v 为主要指标,即保证 C_v 尽量小的同时,使 V_m 最大。两指标最优均不相同,因素 C , D 对指标来说是重要影响因素,对 V_m 来说为较次要影响因素,所以按指标选 $C3D1$ 。因素 E 对 C_v 优先顺序为 $E2E1E3$,对 V_m 优先顺序为 $E3E2E1$,因素 E 对 C_v 指标来说是较次要影响因素,对 V_m 为较重要影响因素,但当 $E3$ 时, C_v 指标最差,对速度均匀性影响较大,所以选 $E2$ 。因素 B 对 C_v 指标来说是较次要影响因素,对 V_m 为第二重要影响因素,所以选 $B1$ 。因素 A 对 C_v 指标来说是第二重要影响因素,对 V_m 为最重要影响因素,且因素 A 对流道出口速度均匀性的影响不大,所以选 $A1$ 。综上分析,选 $A1B1C3D1E2$ 为最优化方案。

在保证制品的物理、力学性能的同时,通过改变扩张角及压缩角等因素使得流体在流经扩张段、分流区以及压缩段的速度更加平稳,并且熔体流道具有明显改善,利用成型段的压缩角,使得熔体反作用力增加,提高制品质量。优化后熔体压力及速度云图如图6和图7所示。

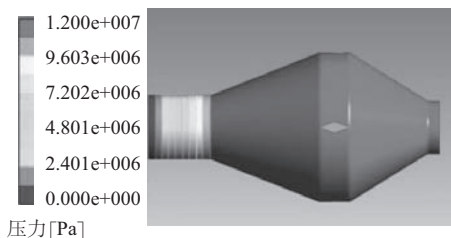


图6 优化后流道压力分布云图

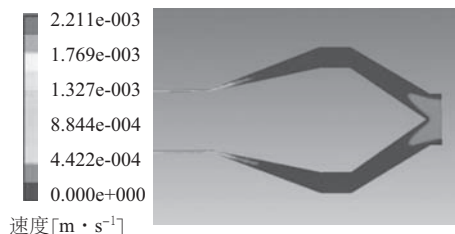


图7 优化后流道速度分布云图

4 优结果前后对比

由于入口压力选取 12 MPa,而出口静压为 0,故总的压力分布云图并无较大改变。应对局部压降进行分析对比,取压缩段以及成型段熔体中间部位进行研究,如图8和图9所示。

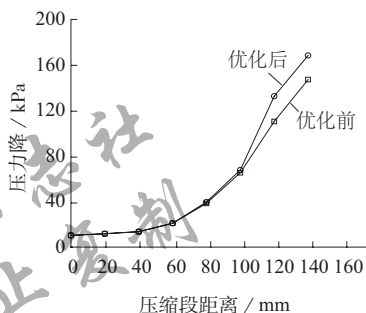


图8 优化前后压缩端压力降对比

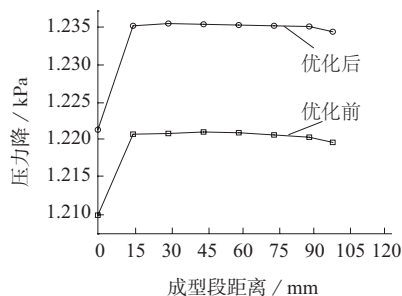


图9 优化前后成型段压力降对比

从图8和图9可以得出,在优化前后压缩段入口部位并无明显压力降变化,从压缩段中部开始压力将逐渐增加。由于优化后增加了压缩角,使得熔体在压力的作用下对模具的反作用力增加,使得优化前后压力降出现明显差距,优化前后压缩端最大压力降相差 91.98 kPa,并且成型段最大压力降相差 0.0149 MPa。对于直通式机头成型段压力降的增大可以使熔体局部速度增加,并且优化后的机头流道在压缩段上有更大的速度。熔体速度变化较为平缓,在成型段上熔体速度并没有产生急剧变化,有利于熔体流动的稳定性,减少熔体在磨具中的停留时间,增强了熔体在模具中的流动性,使得制品物理和力学性能更加优秀。

5 结论

(1) 利用 Fluent 以及 CFD-post 对直通式机头进行流道分析及后处理,对直通式机头的扩张角及压缩角的改变可以直接影响熔体的流动性能及制品质量。

(2) 采用正交试验设计方法,创新性地分析了不同结构参数的成型段长度、压缩段长度、扩张角、压缩角和工艺条件入口压力对机头流道出口速度均匀性和最大速度的影响程度,确定了主要影响因素,选取了最优方案。

(3) 优化前后,熔体在磨具中的最大速度从 2.049 mm/s 增加到 2.211 mm/s,减少了时间、温度等外部因素对熔体成型的影响。

(4) 优化前后,在总压不变的情况下,通过对压缩角及扩张角的改变,使得压缩段压力降最大增加了 91.98 kPa,成型段压力降最大增加了 0.0149 MPa,制品可塑性能得到极大的提升。

参考文献

- [1] 于玉真,王璐,李伟亮. 管材挤出机头的发展现状及趋势[J]. 机械工程与自动化,2019,220(1):225-226.
Yu Yuzhen, Wang Lu, Li Weiliang. Development status and trend of tube extrusion die[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2019 (01):225-226.
- [2] 于玉真,王璐,邸海宽,等. PVC-U 管材挤出机头流道优化设计[J]. 工程塑料应用,2019,47(3):60-64.
Yu Yuzhen, Wang Lu, di Haikuan, et al. Optimization design of die runner for PVC-U pipe extruder[J]. Engineering Plastics Applications, 2019, 47(3):60-64.
- [3] 王远,马秀清. 物性参数对三层共挤出机头流道流场的影响[J]. 塑料,2017,46(1):96-100.
Wang Yuan, Ma Xiuqing. Effect of physical parameters on flow field of three-layer co extrusion die[J]. Plastics, 2017, 46(1):96-100.
- [4] 刘斌,崔志杰. 大直径塑料管道成型牵引装置开发进展[J]. 塑料,2018,46(1):113-117.
Liu Bin, Cui Zhijie. Development progress of large diameter plastic pipe forming traction device[J]. Plastics, 2018, 46(1):113-11.
- [5] 阮杨,宋稼祺. 机头流道结构对管材挤出成型的影响[J]. 山东工业技术,2018,15:9-10.
Ruan Yang, Song Jiaqi. Influence of die runner structure on tube extrusion[J]. Shandong Industrial Technology, 2018, 15:9-10.
- [6] 张礼华,贾辉,邱建成. 微层挤出机头的流道建模与仿真研究[J]. 塑料工业,2018,46(1):37-39.
Zhang Lihua, Jia Hui, Qiu Jiancheng. Flow channel modeling and Simulation of micro extrusion die[J]. Plastics Industry, 2018, 46 (1):37-39.
- [7] 刘斌,江开勇,上官宁. 塑料挤出流动数值分析及其模具结构的设计优化[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008(4):481-489.
Liu Bin, Jiang Kaiyong, Shang Guanning. Numerical analysis of plastic extrusion flow and design optimization of its die structure [J]. Journal of Huaqiao University:Natural Science Edition, 2008(4):481-489.
- [8] 宋稼祺,李治国. 基于 ANSYS 的挤出机头结构优化[J]. 2019, 47(8):78-81.
Song Jiaqi, Li Zhiguo. Structural optimization of extruder head based on ANSYS[J]. 2019, 47 (8):78-81.
- [9] 林丽红,贾晓艳,马铁军. 基于 Fluent 的橡胶挤出机流道设计[J]. 中国机械工程,2016,27(7):944-950.
Lin Lihong, Jia Xiaoyan, Ma Tiejun. Runner design of rubber extruder based on fluent[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27 (7):944-950.
- [10] 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 Bin, Wang Yulong, Yue Tongyan. Development and application of intelligent design system for straight pipe extrusion die[J]. Plastics, 2013, 42(2):10-13.
- [11] 宗大全,朱弟雄. PVC-U 管材模具设计与改进[J]. 工程塑料应用,2000(8):34-36.
Zong Daquan, Zhu Dixiong. Design and improvement of PVC-U pipe mould[J]. Engineering Plastics Application, 2000(8):34-36.
- [12] 齐斌. 挤塑管材成型的计算机优化研究[J]. 塑料科技,2015, 43(10):82-85.
Qi Bin. Computer optimization of extrusion tube forming[J]. Plastics Technology, 2015, 43(10):82-85.
- [13] 林峰,张正红. UPVC 管材挤出成型机头模具的改进设计[J]. 轻工机械,2004(4):121-122.
Lin Feng, Zhang Zhenghong. Improved design of extrusion die for UPVC pipe [J]. Light Industry Machinery, 2004(4):121-122.
- [14] 傅志红,刘卫,易琪,等. 微通道塑料薄膜挤出机头流道优化及整体设计[J]. 塑料,2017,46(2):106-109.
Fu Zhihong, Liu Wei, Yi Qi, et al. Channel optimization and overall design of microchannel plastic film extruder head[J]. Plastics, 2017, 46(2):106-109.
- [15] 谢宇,任金波,黄煌辉,等. CFD 计算网格误差分析的一个算例[J]. 科学技术与工程,2020,20(1):123-127.
Xie Yu, Ren Jinbo, Huang Huanghui, et al. An example of grid error analysis in CFD[J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(1):123-127.
- [16] 王衍,王达,胡琼,等. 基于 CFD 的 T 形槽气膜密封网格无关性分析[J]. 润滑与密封,2018,43(11):70-73+113.
Wang Yan, Wang Da, Hu Qiong, et al. Grid independence analysis of T-groove gas film seal based on CFD[J]. Lubrication and Seal, 2018, 43 (11):70-73+113.
- [17] 汪进南. PVC-U 的流变特性及其管材的高速挤出[J]. 聚氯乙烯,2017,45(6):27-31.
Wang Jinnan. Rheological properties of PVC-U and high-speed extrusion of PVC-U[J]. PVC, 2017, 45(6):27-31.