

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.02.018

PVC-U 管材共用挤出机头设计与分析

张王康,于玉真,荆孟杰,陈远晟,张长森

(盐城工学院机械工程学院,江苏盐城 224051)

摘要: 为了生产不同直径的管材可以使用相同的挤出机头,减少机头的制造成本和生产周期,通过对硬质聚氯乙烯 (PVC-U) 材料的特性、机头的结构参数等进行分析的基础上,设计了一款压缩模座弧形过渡的 PVC-U 管材共用挤出机头。采用 ANSYS FLUENT 软件对机头流道进行了数值模拟,并利用 CFD-POST 对流场的压力、速度和壁面剪切应力分布等进行分析。结果表明,管材共用挤出机头的压缩模座采用弧形过渡后,流道成型段压力、速度分布没有明显的波动,熔体流动性较好。内外壁面剪切应力相差 0.004 MPa,且熔体在成型段壁面剪切速率更高,不易发生粘滞,生产的制品更密实,表面质量更高,更符合实际生产的需求。

关键词: 硬质聚氯乙烯;管材挤出;共用挤出机头;弧形过渡;数值模拟

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)02-0106-06

Design and Analysis of Common Die for Extrusion of PVC-U Pipe

Zhang Wangkang, Yu Yuzhen, Jing Mengjie, Chen Yuansheng, Zhang Changsen

(College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract : The characteristics of rigid polyvinyl chloride (PVC-U) and the parameters of the head of extruder were analyzed and a common die with arc transition for pipe extrusion was designed in order to use the same die for the production of pipes with different diameters to reduce the manufacturing cost and production cycle for die of extruder. By using FLUENT of ANSYS software perform numerical simulation and by using CFD-POST, the pressure, velocity and shear stress distribution of runner were analyzed. As a result, the compressed mould of arc transition is more suitable for pipe manufacturing, melt pressure and velocity is stable. The shear stress between inner and outer wall only differ by 0.004 MPa. The shear rate in forming part is higher and the viscous resistance is less. The pipe manufactured is more compact and the quality of pipe surface is higher.

Keywords : PVC-U ; pipe extrusion ; common die for extrusion ; arc transition ; simulation

由于硬质聚氯乙烯 (PVC-U) 管材具有耐腐蚀性能优良、力学强度高、流动阻力小、安装方便、造价低等特点,已经广泛应用在人们日常生活中^[1]。中国是世界上最大的 PVC 生产国,年产量达到 2 400 万 t,根据 Global Data 公司预测,到 2024 年,全球的 PVC 年产量将由 2019 年的 5 613 万 t 增加到 6 560 万 t^[2]。PVC 作为一种资源节约型、耐用、安全和可回收的材料,大量用在给排水管材上。管材的直径系列有很多,生产不同直径的管材一般需要不同的挤出模具,导致很多管材挤出模具投入大、制造周期长。因此,研究一种 PVC-U 管材机头共用模具具有

较大意义。

目前对挤出机头的研究主要是利用数值模拟优化管材机头的结构,但是对于共用挤出机头的具体研究比较少。Huang 等^[3]在机头分流器支架上设置了一个额外的应力松弛区,减少了熔体在到达口模前应力松弛的时间,从而提高了管材熔接痕附近的力学性能。张文明等^[4]对螺旋式管材机头内的流道进行数值模拟,发现由于螺旋分配器的存在可以降低压缩段的设计要求。丁晚景等^[5]提出了管材模具的可重构设计,即在可重构范围内,尽量少更换零件,构成新的机头模具。张友新^[6]对共挤双

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51672236),盐城工学院博士启动基金项目 (xjr2021011)

通信作者: 于玉真,博士,教授,主要研究方向为弹塑性有限元仿真

收稿日期: 2021-12-03

引用格式: 张王康,于玉真,荆孟杰,等. PVC-U 管材共用挤出机头设计与分析 [J]. 工程塑料应用,2022,50(2):106-111.

Zhang Wangkang, Yu Yuzhen, Jing Mengjie, et al. Design and analysis of common die for extrusion of PVC-U pipe [J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(2):106-111.

层复合管机头进行优化设计,在芯棒处增设了双阻流和缓冲槽装置,提高了物料的塑化性能和料流的稳定性。阮杨^[7]使用 POLYFLOW 对 PVC 熔体在不同压缩比和压缩角的直角式机头中的流动进行数值模拟,优化了机头的设计变量,熔体在机头中的流动性得到了改善。潘建武等^[8]对双层微管的挤出胀大进行数值分析,得出了内外层熔体的黏度和松弛时间的变化对微管尺寸的影响规律,对微型管材机头的设计具有指导意义。

利用机头经验设计公式,笔者设计了一种 PVC-U 管材共用挤出机头,通过数值模拟的方法对机头流道的压力、速度和壁面剪切应力分布等进行分析,对管材共用挤出机头的设计具有一定的指导作用。

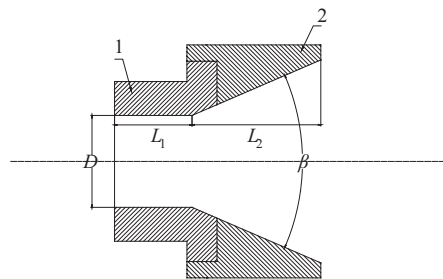
1 管材共用挤出机头的设计

1.1 机头材料的选型

机头材料的选择要考虑到加工 PVC-U 的材料特性和机头内工作状态。由于 PVC-U 材料具有流动性差、易分解且具有非结晶性^[9],同时机头内工作温度非常高,选择机头的材料为 38CrMoAL。38CrMoA 是调质钢,耐磨性和耐腐蚀性较好^[10]。

1.2 口模的设计计算

口模是成型管材外部轮廓的机头零件,其结构如图 1 所示,由于管材离开口模后会发生离模膨胀导致管材的断面积增大^[8],且后续对管材的冷却又会使其断面面积减小,管材断面面积增大和缩小的结果很难在理论上进行计算,通常是根据要求的管材截面尺寸,结合经验公式和拉伸比确定口模成型段内径^[11]。



1—成型模套;2—压缩模套

图1 共用口模结构图

(1) 口模内径。

口模内径(D)的计算公式为:

$$D = \frac{d_1}{k} \quad (1)$$

式中: D 为口模内径,mm; d_1 为塑料管材外径,

mm; k 为经验系数。

(2) 口模成型段长度。

口模成型段长度(L_1)计算公式为:

$$L_1 = (0.3 - 3.0)d_1 \quad (2)$$

$$\text{或} \quad L_1 = (18:33)t \quad (3)$$

式中: L_1 为口模成型段长度,mm; d_1 为塑料管材的外径,mm; t 为管材壁厚,mm。

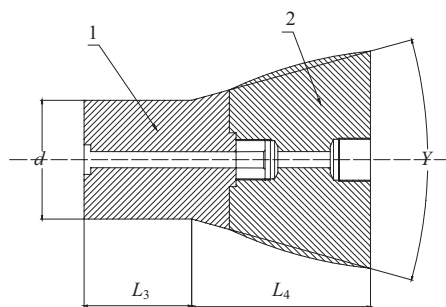
(3) 压缩区压缩角。

为了使熔体流经支撑板后得到充分的剪切与混合,需要对熔体在流经成型段前,进行一定比例的压缩^[3]。因此应设有压缩角,压缩角的选取与熔体的黏度有关^[12]。

由于考虑到口模的共用性,在口模压缩段靠近成型段的部分将口模分成压缩模套与成型模套,将口模分成两段模套之后,可以在日后的生产活动中生产不同管径的管材,只有当尺寸影响到了拉伸比、压缩比^[13]等要求使其不在规定范围内再继续更换压缩模套。

1.3 芯棒的设计计算

芯棒是成型管材内部轮廓的机头零件,与压缩模座通过螺纹联接,其结构如图 2 所示, PVC-U 管材芯棒收缩角 γ 一般取 $30^\circ \sim 50^\circ$ ^[14]。



1—成型模芯;2—压缩模座

图2 共用芯棒结构图

芯棒的外径 d 可按式计算:

$$d = D - 2\delta \quad (4)$$

式中: D 为口模内径,mm; δ 为芯棒与口模的间隙,mm。

芯棒的内部设置加热棒,可以缩短加热时间,减少管材内外层温度差^[7]。考虑到芯棒的共用性,在芯棒压缩段靠近成型段的地方将芯棒分成两部分,即压缩模座与成型模芯,压缩模座和成型模芯通过螺纹连接。生产不同壁厚的管材,只需要调换不同直径的成型模芯。

压缩模座的轮廓做成弧形过渡的形状,当

PVC-U 熔体通过压缩模座时,流道横截面积减小,物料被压缩,管材密度增加,塑化性能提升,可有效减少熔体流过分流器支架产生熔接痕的影响^[15]。

1.4 分流锥和支撑板的设计计算

分流锥的主要作用是改变物料流动方向,同时将料层变薄,为物料的进一步塑化做准备,其结构如图3所示,分流锥中轴穿过支撑板,与压缩模座通过螺纹连接。

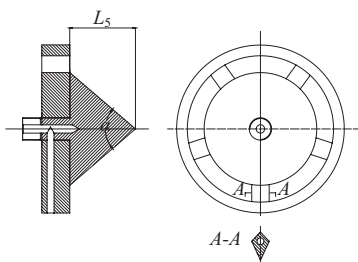


图3 分流器及支架结构图

分流器的扩张角 α 一般大于收缩角 γ , α 过大会使熔体流动阻力增加,甚至造成PVC-U物料分解; α 过小,会使机头过于笨重^[14]。分流锥的长度一般按下式确定:

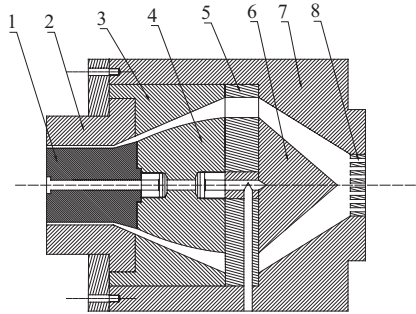
$$L_5 = (1 \sim 1.5)D_0 \quad (5)$$

式中: D_0 为过滤板出口处的流道直径。

为减少挤出管材熔接痕,支撑板上分流筋的轮廓应设置成流线型^[11],以便熔体内部应力在支架段后端松弛,从而提高熔体在压缩段内的结合质量^[3]。

1.5 管材共用挤出机头的特性

PVC-U 管材共用挤出机头由成型芯棒、成型口模、压缩模套、压缩模座、分流器支架、分流锥、机头体和过滤板等组成,其结构如图4所示。



1—成型芯棒;2—成型口模;3—压缩模套;4—压缩模座;
5—分流器支架;6—分流锥;7—机头体;8—过滤板

图4 PVC-U 管材共用挤出机头结构图

管材共用挤出机头使用性能的好坏取决于机头流道设计参数,机头参数一旦确定直接影响管材的挤出质量,因此不能盲目地根据管材的管径和壁厚更换不同的成型模套和成型模芯。比如说对于外

径90 mm,壁厚不同的PVC-U排水管,不只是更换不同直径的成型模芯来获得不同口模间隙的模具,且要根据其压缩比和拉伸比的要求更换不同长度的成型模套和成型模芯,因此对于使用相同共用部分模具的管材进行分组可以提高生产效率^[5]。

2 机头流道的数值模拟

为了验证压缩模座弧形过渡的PVC-U管材共用挤出机头可以适用于PVC-U管材的实际生产需求,以生产直径90 mm且壁厚3.5 mm的PVC-U管材为例,选用ANSYS软件中的FLUENT模块对机头内的熔体流动进行了数值模拟,分析流道中的压力、速度和剪切应力的分布。

2.1 几何模型

采用ANSYS中的Design Modeler模块对PVC-U熔体流道按1:1建模,如图5所示。熔体通过过滤网从挤出机进入机头体,经过分流锥由螺旋运动转为直线运动,经过压缩段时,流道横截面面积不断减小,熔体在压缩段充分熔融混合,塑化性能得到提升,最后进入成型段充分均化,挤出高分子塑料管材。

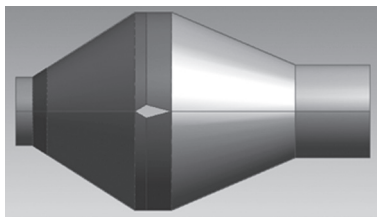


图5 管材机头流道模型

2.2 网格划分

用ANSYS软件中的meshing模块对模型进行网格划分,使用狭缝控制函数对网格进行总体尺寸控制,将扩张段划分为四面体单元,其余部分划分为六面体单元,最后划分好的网格如图6所示,其中有321 510个单元,206 467个节点。

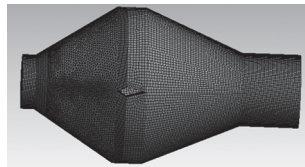


图6 管材机头流道网格划分

2.3 数学模型

由于PVC-U熔体为拟塑性流体,采用幂律流体黏度模型来描述熔体的黏度^[16]。为简化实际工况并建立数学模型,在满足工程要求前提下,做出如下假设^[17]:①熔体为不可压缩流体;②机头内熔体为

等温流动;③熔体在机头内的流动为定常流动;④机头模腔壁面无滑移;⑤熔体在机头内为层流流动。

管材共用挤出机头流道的熔体在流动过程中需要满足连续性方程,力学运动方程以及幂律流体本构方程^[7]。

2.4 边界条件

管材所用的材料为 PVC-U, 它的密度为 $\rho=1400 \text{ kg/m}^3$, 加工温度为 180°C , 稠度 $m=14000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 幂律指数 $n=0.19$ 。边界条件如下:

入口边界: 流道入口压力为 11 MPa 。

出口边界: 流道出口压力为 0 MPa 。

壁面边界: 模腔壁面设置为无滑移边界条件。

2.5 控制方程求解

由于所研究的 PVC-U 熔体为定常不可压缩的黏性流体, 控制方程是定常不可压缩的纳维-斯托克斯方程, 采用 SIMPLE 算法 (压力耦合方程的半隐式算法) 求解^[18]。

3 模拟结果与分析

分别对管材机头内流道的压力分布、速度分布和剪切应力进行分析, 以验证管材机头设计的合理性, 并对不合理的地方进行改进。

3.1 压力分析

图 7 所示为压缩模座为弧形过渡的流道整体压力分布图。从图 7 可以看出, 压力损失主要发生在成型段上, 且沿着挤出方向压力逐渐减小。

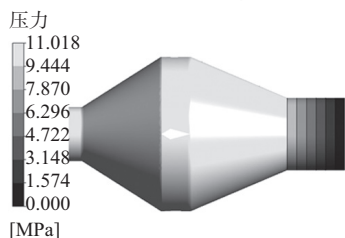


图 7 机头流道压力分布云图

为了直观地分析流道的压力变化, 取熔体中间层为研究对象, 绘制沿着熔体沿挤出方向的压力曲线, 如图 8 所示。

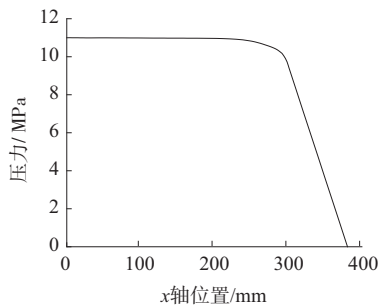


图 8 机头流道压力曲线

从图 8 可以看出, 机头内熔体的压力从成型段入口附近开始沿着挤出方向呈线性下降, 直至成型段出口压力降为 0 MPa 。

3.2 速度分析

图 9 为机头流道截面的速度分布图。从图 9 可知, 熔体在入口处以一定的初始速度进入机头, 经过分流锥时, 速度减小, 进入压缩段后开始加速, 进入成型段后速度趋于稳定。



图 9 机头流道速度分布云图

为了更加直观地分析机头流道内的速度分布, 沿挤出方向取中间层熔体为研究对象, 绘制速度曲线, 如图 10 所示。从图 10 可知, PVC-U 熔体在压力作用下以一定的初始速度进入机头体, 在流经分流锥时速度逐渐下降, 随后以 0.18 mm/s 的速度缓慢流过分流器支架, 熔体进入压缩段后, 由于压缩段横截面积沿挤出方向不断减小, 熔体在机头流道内各处流量一致, 熔体流速不断增加, 再以稳定的流速经过成型段, 流出机头体。

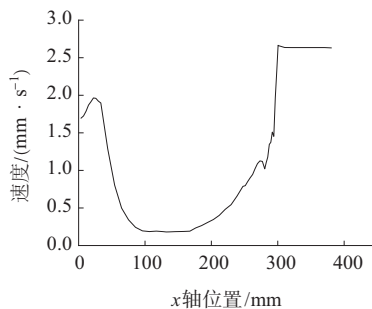


图 10 机头流道速度分布曲线

成型段的速度分布直接影响管材的挤出质量, 因此单独绘制了机头流道中间层熔体沿挤出方向的速度曲线, 如图 11 所示。从图 11 可知, 经过弧形过渡的压缩模座后, 熔体进入成型段, 速度由 2.665 mm/s 降低到 2.635 mm/s , 再以 2.635 mm/s 的速度平稳地沿挤出方向流动, 在靠近成型段出口附近, 熔体速度进一步减小到 2.63 mm/s , 最终以 2.63 mm/s 的速度流出成型段。从图 11 可以看出, 熔体在成型段内速度基本稳定, 最大速度和最小速度仅仅相差 0.035 mm/s , 熔体经过弧形过渡的压缩模座后, 在成型段内的流速更加平稳。

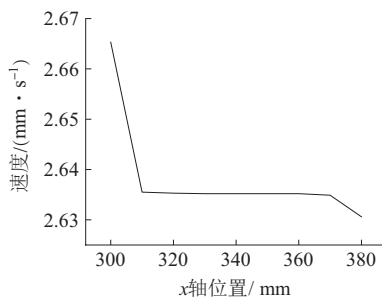


图11 机头流道成型段速度分布曲线

图12为成型段上入口截面、中间截面和出口截面上熔体沿流道半径方向上的速度对比图。从图12可以看出,熔体中间截面和出口截面上熔体沿半径方向速度分布基本重合,由于熔体在入口截面上刚刚进入成型段,流道横截面上面积发生了变化,外壁面和内壁面的壁面剪切速率不一样,入口截面流速分布略有不同,整体上成型段上沿挤出方向各处的流速是均匀分布的。

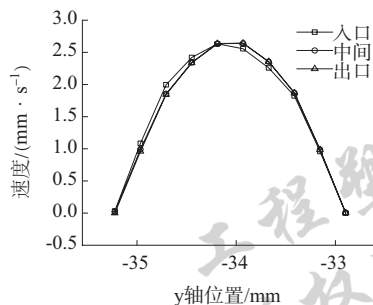


图12 成型段上不同截面的速度分布

3.3 壁面剪切应力分析

图13和图14分别是机头流道外壁面剪切应力与内壁面剪切应力分布云图。从图13和图14可以看出,内壁面和外壁面剪切应力变化基本一致,主要是从压缩段后端开始明显增大,随后以最大的壁面剪切应力流经成型段,从机头流道流出。

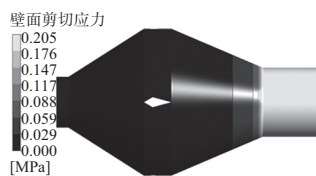


图13 流道外壁面剪切应力云图

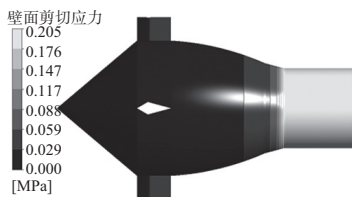


图14 流道内壁面剪切应力云图

为了更加直观地看出壁面剪切应力在机头流道内的分布情况,绘制了外壁面剪切应力沿挤出方向的分布曲线,如图15所示。从图15可看出,壁面剪切应力在压缩段之前几乎不变,从进入压缩段开始增大,到压缩段后端沿挤出方向呈线性增大,熔体在成型段内以稳定的剪切应力从机头流道内挤出。

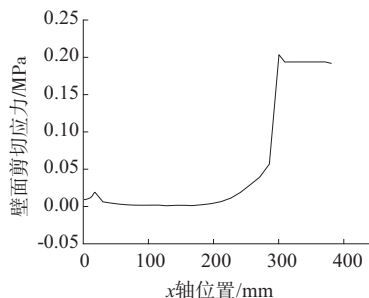


图15 流道外壁面剪切应力分布曲线

由于成型段对管材的成型至关重要,因此单独绘制了内外壁面剪切应力在成型段内的分布曲线,如图16所示。从图16可以看出,外壁面剪切应力在成型段入口从0.204 MPa下降到0.194 MPa,熔体在0.194 MPa的壁面剪切应力的作用下经过成型段,在成型段出口,剪切应力值略有下降,在0.192 MPa的剪切应力下流出成型段;内壁面剪切应力在成型段入口从0.182 MPa上升到0.198 MPa,熔体在0.198 MPa的作用下经过成型段,在成型段出口,壁面剪切应力值略有下降,在0.196 MPa的剪切应力下流出成型段。

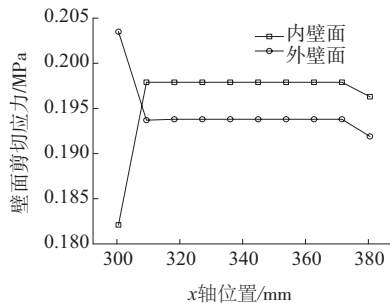


图16 成型段壁面剪切应力分布

从图16还可以看出,外壁面与内壁面剪切应力在成型段中间段的剪切应力非常平稳,且内外壁面的剪切应力值仅仅相差0.004 MPa。剪切应力是剪切速率的函数,成型段上高的剪切应力意味着高的剪切速率。根据幂律流体的黏度模型,高的剪切速率意味着低的黏度,成型段壁上熔体的黏度较低,从而熔体不容易在成型段壁上发生粘滞,且挤出管材的壁面更加光滑。

4 结论

(1) 结合管材机头的经验设计公式,设计了一种

压缩模座弧形过渡的 PVC-U 管材共用挤出机头。可以在实际生产中根据管材的尺寸,灵活地更换机头的部件。

(2) 对熔体在机头流道内的压力进行分析,发现压力在损失主要发生在成型段上,且沿挤出方向呈线性下降,压力在机头流道内没有明显的波动。

(3) 对熔体在机头流道内的速度进行分析,熔体在成型段内沿挤出方向流速平稳,中间层熔体最大速度与最小速度相差仅仅 0.035 mm/s,塑料熔体在成型段内可以充分均化。

(4) 对熔体在机头流道内的壁面剪切应力分析,发现壁面剪切应力在压缩段后端开始明显增加,在成型段内剪切应力保持稳定,且成型段内外壁面剪切应力相差仅为 0.004 MPa。成型段内较大的壁面剪切应力,意味着壁面上低的黏度,从而熔体不易在成型段发生粘滞,有利于提高管材表面质量。

参考文献

- [1] Makris K F, Langeveld J, Clemens F H L R. A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(6):880-897.
- [2] 许江菱. 2019~2020 年世界塑料工业进展 (I): 通用塑料[J]. 塑料工业, 2021, 49(3):1-9.
Xu Jiangling. The progress of the world plastics industry from 2019 to 2020 (I): General purposed plastics[J]. China Plastics Industry, 2019, 49(3):1-9.
- [3] Huang Y, Prentice P. Experimental study and computer simulation of the effect of spider shape on the weld-lines in extruded plastic pipe[J]. Polymer Engineering and Science, 1998, 38(9):1506-1522.
- [4] 张文明, 许乾慰, 薛平. 螺旋式管材机头内熔体流动的计算机模拟[J]. 塑料工业, 2006(S1):184-189.
Zhang Wenming, Xu Qianwei, Xue Ping. Computer simulation of melt flow in pipe die with spiral mandrel[J]. China Plastics Industry, 2006(S1):184-189.
- [5] 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. Reconfigurable design of plastic pipe extrusion die[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(9):69-71.
- [6] 张友新. 组合式芯棒在共挤复合管材机头中的设计应用[J]. 塑料工业, 2012, 40(3):78-80.
Zhang Youxin. Design and application of modular mandrel in the co-extruded composite pipe head[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(3):78-80.
- [7] 阮杨. 直角式管材机头结构优化及温控系统设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [8] 潘建武, 罗璇, 敬波, 等. 双层微管挤出胀大的数值分析[J]. 塑料工业, 2021, 49(5):65-68.
Pan Jianwu, Luo Xuan, Jing Bo, et al. Numerical analysis of extrusion swell of double-layer microtubule[J]. China Plastics Industry, 2021 49(5):65-68.
- [9] Smallman R E, Bishop R J. Modern physical metallurgy and materials engineering[M]. Sixth Edition. Butterworth-Heinemann, 1999:351-375.
- [10] Deng Y S, Zhang B Y, Luo W L. The fretting behaviour of a nitrided steel 38CrMoAl[J]. Wear, 1988, 125(1-2):193-204.
- [11] 洪慎章. 实用挤塑成型及模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006:33-42.
Hong Shenzhang. Practical extrusion and mold design[M]. Beijing: China Machine Press, 2006:33-42.
- [12] 王璐. PVC-U 管材挤出机头流道模拟及优化[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
Wang Lu. Simulation and optimization of runner of PVC-U pipe extruder head[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [13] 杨涛. 常用 PVC-U 管材生产设备[J]. 塑料科技, 2007(5):80-85.
Yang Tao. The process equipment of PVC-U pipe[J]. Plastics Science and Technology, 2007(5):80-85.
- [14] 岳潼雁. 基于知识的管材挤出模头智能化设计与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
Yue Tongyan. Research and intelligent design of the pipe extrusion die based on knowledge[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [15] 李学章, 郭奕崇. 管材挤出模具新型压缩段流道的研究[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2005(3):103-105.
Li Xuezhong, Guo Yichong. On a new-style channel of compressing section in tube extrusion die[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2005(3):103-105.
- [16] Salvador T C J. Design, simulation and analysis of extrusion process for thermoplastic rigid PVC profile to optimize the design of the die and the parameters[J]. Materio-Rio De Janeiro, 2018. DOI:10.1590/S1517-707620180002.0478.
- [17] 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. The finite element simulation and optimization of runner for micro-layer extrusion blow molding head[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(1):37-39.
- [18] Anderson J D. Computational fluid dynamics: the basics with applications[M]. 1 st illustrated edition. American: McGraw-Hill Education, 1995:170-172.