

工艺·设备

非等温包覆机头胶料流场挤出均匀性的研究

焦冬梅,许晓培,苑诗帅,吴程旺,秦 健

(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要: 对非等温包覆机头胶料流场挤出均匀性进行研究。结果表明:非等温包覆机头胶料流场压力、温度和流动速度的模拟变化趋势与实际相似,模拟试验是分析包覆机头胶料流场的一种有效方法;确定了影响胶料包覆均匀性的包覆机头流道参数(进料口位置、进料口直径和芯线牵引速度)的相关变化规律,为包覆工艺及包覆机头流道参数的合理选择提供了理论依据;确定了包覆过程中芯线牵引速度与进料口胶料流量匹配性的评价方法。该研究为包覆工艺及包覆机头流道参数的确定提供了理论指导。

关键词: 包覆机头;胶料流场;非等温;挤出均匀性;进料口;芯线牵引速度;胶料流量

中图分类号: TQ330.4⁺6;O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)04-0292-08

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.04.0292



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着社会经济的发展,电力和通讯行业迅速崛起,电线和电缆需求量日益增大,通过包覆工艺成型胶料包覆层在电线和电缆中的应用日益广泛^[1-3]。由于包覆机头胶料挤出不均匀会造成电线和电缆包覆偏心、包覆层厚度不均匀、表面粗糙等质量问题,甚至出现漏电和击穿等安全问题,对电线和电缆包覆质量提出了越来越高的要求。

国内外学者对包覆机头胶料流场做了大量研究。R. PONALAGUSAMY等^[4]发现采用Bezier曲线比采用多项式方程设计的包覆机头流道挤出压力更小。阮杨等^[5-7]定量分析了包覆机头压缩段及直线段结构参数对胶料流场挤出均匀性的影响规律,为包覆机头的优化设计奠定了基础。这些分析均假设包覆机头胶料流场为等温场,忽略了温度的影响,而实际上温度对胶料流动速度分布和压力分布具有不可忽视的影响,进而影响胶料包覆层质量。同时,芯线牵引速度与进料口胶料流量的匹配性也决定了胶料包覆层的稳定性和均匀

性,所以非常有必要分析探究各因素之间的关系,以得到规律性结论,从而提高电线和电缆包覆质量和生产效率以及延长模具使用寿命。

1 有限元分析

1.1 有限元模型

包覆机头胶料流场有限元模型如图1所示。胶料依次经过歧管区^[8]、扩展区、压缩区,在成型区包覆在移动芯线上,设胶料包覆层厚度为4 mm和芯线牵引速度为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

由于包覆机头胶料流场为轴对称结构,为提高计算速度,仅对1/2流场划分网格,对评价结果的重要影响区(压缩区和成型区)网格加密,网格数量为40 823个。

包覆胶料采用丁基橡胶胶料,其参数如下:密度 $0.920 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热容为 $2\,900 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。本构模型采用Bird-Carreau模型,材料幂律指数为0.325,零剪切粘度为 0.922×10^8 Pa·s。

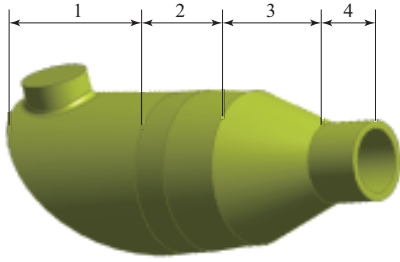
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52101401)

作者简介: 焦冬梅(1978—),女,山东烟台人,青岛科技大学副教授,博士,主要从事高分子材料加工理论及机械设计方面的研究工作。

E-mail: jiaodongmei@gmail.com

引用本文: 焦冬梅,许晓培,苑诗帅,等.非等温包覆机头胶料流场挤出均匀性的研究[J].橡胶工业,2023,70(4):292-299.

Citation: JIAO Dongmei, XU Xiaopei, YUAN Shishuai, et al. Study on extrusion uniformity of compound flow field in non-isothermal cladding head[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 292-299.



1—歧管区;2—扩展区;3—压缩区;4—成型区。

图1 包覆机头胶料流场有限元模型

Fig. 1 Finite element model of compound flow field in cladding head

Pa · s, 松弛时间为5 s。

1.2 边界条件

合理的边界条件可以决定模拟结果的有效性和准确性^[9-11]。根据包覆原理、机头结构特征及芯线牵引特性将包覆机头内流体内壁面分为移动壁面 (Wall1) 及固定壁面 (Wall2), 如图2所示。其中 Wall1 移动速度与芯线牵引速度关联, 选择流量入口和压力出口为边界^[7]。Wall2 温度由高温流动的胶料与模芯座对流换热获得 (忽略热损失), 考虑对流传热达到平衡, 各壁面可作固定温度边界条件。

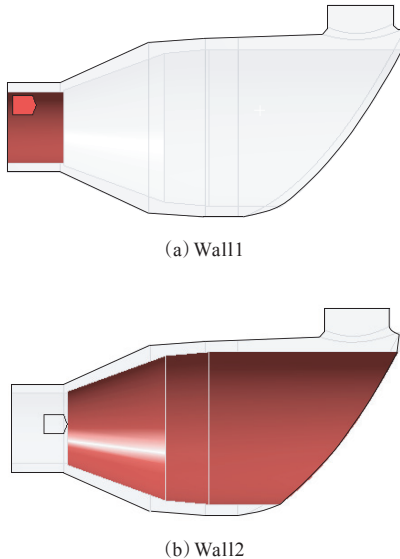


图2 包覆机头壁面边界

Fig. 2 Wall boundaries of cladding head

包覆机头内流体热力学方程——流体外掠平板层流换热类型特征参数方程如下:

$$\begin{cases} Nu = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \\ \frac{hl}{\lambda} = 0.664 \left(\frac{ul}{\nu} \right)^{1/2} (\rho c_p)^{1/3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, Nu 为努塞尔数, Re 为雷诺数, Pr 为普朗特数, h 为平均传热系数, l 为胶料与模芯座壁面接触长度, λ 为胶料热导率, u 为胶料流动速度, ν 为胶料粘度, ρ 为胶料密度, c_p 为胶料质量定压热容。

根据式 (1) 可以得到 h 的表达式为

$$h = 0.664 \lambda^{1/2} l^{-1/2} u^{1/2} \nu^{-1/6} \rho^{1/3} c_p^{1/3} \quad (2)$$

多层圆筒壁的热传导公式和牛顿冷却公式分别为

$$\varphi = \frac{T_1 - T_c}{\frac{1}{2\pi\lambda_a l} \ln \frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{2\pi\lambda_j l} \ln \frac{r_2}{r_a}} \quad (3)$$

$$\varphi = 2\pi r_2 h l (T_f - T_i) \quad (4)$$

式中, φ 为筒壁导热速率, T_1 为热传导平衡时壁面温度, T_c 为筒壁最外层温度, λ_a 为内层材料传热系数, λ_j 为外层材料传热系数, r_1, r_2, r_a 为各层筒壁半径, T_f 为筒壁中间层温度。

结合丁基橡胶胶料参数及式 (3) 和 (4) 求解而确定壁面温度。各边界温度设定如下: 进料口 100 °C, Wall1 75 °C, Wall2 81.74 °C, 外边界 110 °C, 出料口 75 °C。

2 流动分析

包覆机头胶料流场压力分布云图如图3所示, 胶料流场流动速度流线图如图4所示, 出料口胶料流动速度分布云图如图5所示, 胶料流场温度分布云图如图6所示, 出料口胶料温度分布云图如图7所示。

从图3可以看出, 在进料口胶料压力最大, 沿胶料流动方向压力逐渐减小。

从图4可以看出, 胶料从进料口经过扩展区 (均匀分布) 到达压缩区, 最后流出, 胶料流动速度逐渐提高。

从图5可以看出, 沿机头径向胶料流动速度降低, 但其差异较小, 近芯线位置的胶料流动速度与芯线牵引速度相当。

胶料压力和流动速度趋势与生产实际相符。

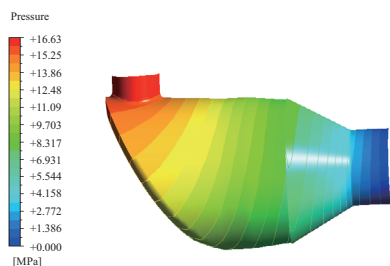


图3 胶料流场压力分布云图

Fig. 3 Pressure distribution nephogram of compound flow field

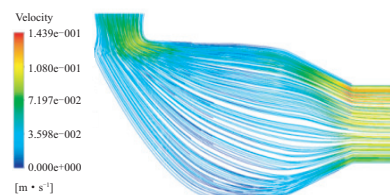


图4 胶料流场流动速度流线图

Fig. 4 Flow velocity streamline diagram of compound flow field

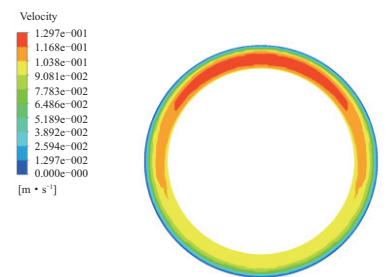


图5 出料口胶料流动速度分布云图

Fig. 5 Flow velocity distribution nephogram of compound at feed outlet

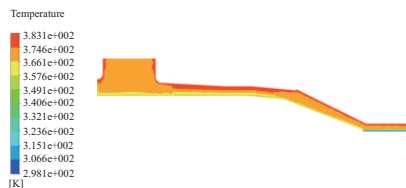


图6 胶料流场温度分布云图

Fig. 6 Temperature distribution nephogram of compound flow field

从图6可以看出,胶料在机头流道中的温度分布沿径向分层,从外至内温度逐渐降低,且机头流道上方的温度高于流道下方。分析原因是由于机头歧管区的结构特点使进料口轴线两侧胶料流量

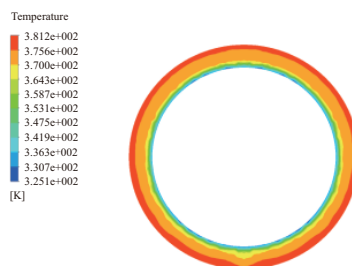


图7 出料口胶料温度分布云图

Fig. 7 Temperature distribution nephogram of compound at feed outlet

不同,导致机头轴线下侧流道通过模芯座与外界空气进行对流传热的表面积增大,从而造成内部胶料温度降低。

从图7可以看出,出料口沿圆周方向胶料温度分布均匀,但沿机头径向从外至内温度逐渐降低。分析原因如下:(1)机头结构导致胶料内外表面温度控制难易程度不同,从而覆胶内外表面初始温度不同;(2)胶料粘度较大,导热率小,热量传递效果差。温度分布特征会影响胶料流场挤出均匀性的变化。

3 胶料流场挤出均匀性影响因素的研究

芯线包覆层各流径上胶料均匀的流动速度、压力和流量使芯线周围有均匀的熔体流动,是保证芯线包覆层厚度均匀、无偏心的基本条件。本工作通过包覆机头成型区出料口特征点(出料口截面中间层胶料分布点)的流动速度标准差(σ)来表征胶料流场挤出均匀性,公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (v_i - \bar{v})^2} \quad (5)$$

式中, v_i 为第*i*个特征点的胶料流动速度, $\bar{v}$ 为10个特征点的胶料平均流动速度。

在一定条件下, σ 越小,出料口胶料流动速度越均匀。胶料 σ 与流场压力分布结合,可以综合评定胶料包覆质量的好坏。

3.1 进料口位置对胶料流场的影响

在包覆机头圆周方向上胶料流动速度分布差异表现为圆周上方的胶料流动速度高于下方的胶料,即进料口位置影响了胶料流场速度分布,进而影响覆胶的均匀性。为验证分析的正确性,

本工作对比研究了进料口位置(机头下方、左侧和右侧)与出料口胶料流动速度的关系。

进料口在不同位置时出料口胶料流动速度云图如图8所示。

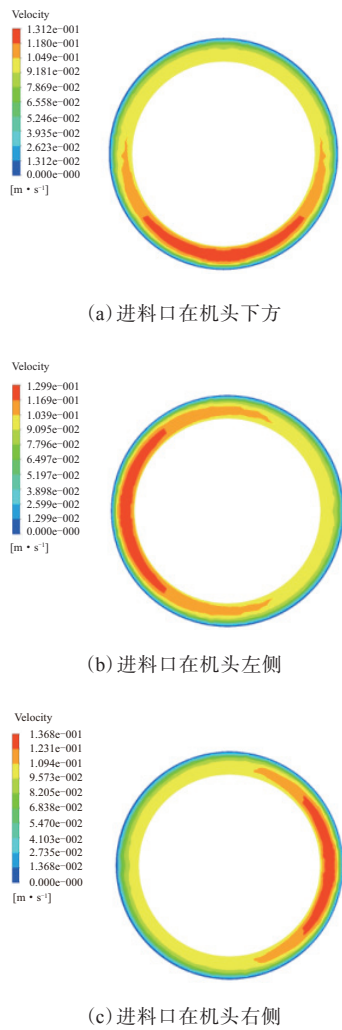


图8 进料口在不同位置时出料口胶料流动速度分布云图
Fig. 8 Flow velocity distribution nephograms of compound at feed outlet with different positions of feed inlets

从图8可以看出,进料口所在位置与出料口胶料高流动速度区域相对应,当进料口在机头下方时,机头出料口下方的胶料流动得快,进料口在机头左侧和右侧时,也遵循类似的规律。分析原因是胶料进入进料口后经歧管区分流器的分流,进料口轴线两侧的胶料压力损失不同,从而引起出料口胶料流动速度改变^[12-13]。因此,分流器结构参数的设计是控制胶料包覆质量的重要因素之一,

应引起足够的重视。

3.2 进料口直径对胶料流场的影响

不同进料口直径下胶料出料口速度分布云图如图9所示,进料口直径与胶料最大压力和 σ 的关系如图10所示。

从图9和10可以看出:随着进料口直径的增大,胶料最大压力和 σ 逐渐减小,出料口胶料流动速度分布更加均匀;当进料口直径为37 mm时,胶料 $\sigma < 0.010$,最大压力为16.35 MPa,胶料挤出均匀性好且能满足包覆致密性的需求。这一趋势与理论推导结果相似:当进料口直径增大时,进料口

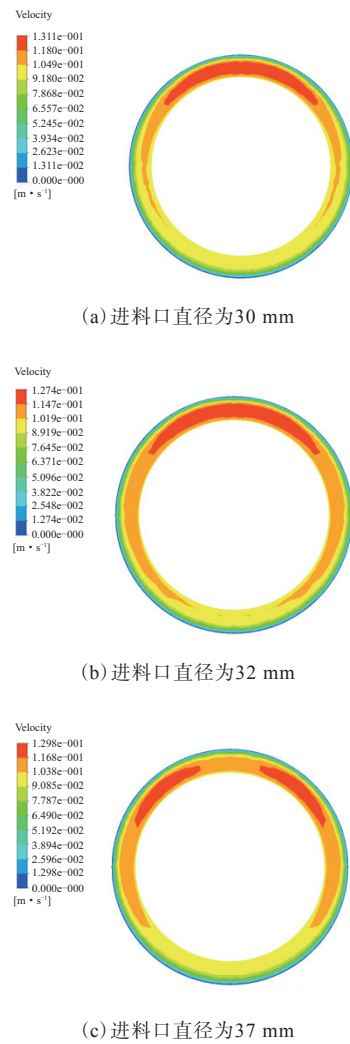


图9 不同进料口直径下出料口胶料流动速度分布云图
Fig. 9 Flow velocity distribution nephograms of compound at feed outlet with different diameters of feed inlet

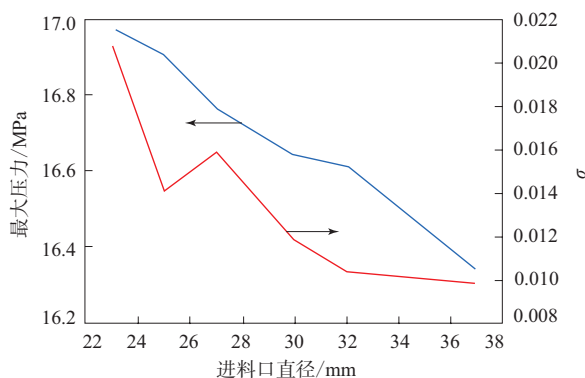


图10 进料口直径与胶料最大压力和 σ 的关系
Fig. 10 Relationships of feed inlet diameters and maximum pressures and σ of compound

面积增大,在胶料流量不变的情况下,根据胶料流量与流动速度公式($Q=Sv$, Q 为胶料流量, S 为进料口截面积, v 为胶料流动速度),进料口胶料流动速度降低,胶料在歧管区的停留时间将延长,胶料挤出均匀性变好,有利于改善处胶料挤出均匀性。

3.3 芯线牵引速度对胶料流场的影响

3.3.1 最佳芯线牵引速度分析

几种芯线牵引速度下胶料流场压力分布云图和出料口胶料流动速度分布云图分别如图11和12所示,芯线牵引速度与胶料最大压力和 σ 的关系如图13所示。

从图11—13可以看出,随着芯线牵引速度的增大,胶料最大压力增大, σ 总体增大,胶料挤出生产率增大,但是并不意味着胶料挤出均匀性下降。这是因为根据胶料流量与流动速度公式,当芯线牵引速度提高时,要保证覆胶厚度不变,必然要求胶料流量增大,而在输送螺杆结构参数不变的情况下,增大胶料流量,必然需要提高胶料流动速度,进而影响出料口处覆胶速度,使 σ 增大,这并不一定说明胶料挤出均匀性下降。因此,当芯线牵引速度变化时,并不能仅通过 σ 变化来判断胶料挤出均匀性。

定义无量纲胶料流动速度相对标准差(ξ)为

$$\xi = \frac{\sigma}{v_q} \quad (6)$$

式中, v_q 为芯线牵引速度。

ξ 可以反映覆胶速度波动相对于芯线牵引速

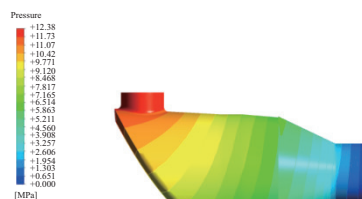
度(或胶料挤出速度)的比例变化。芯线牵引速度一定时, ξ 较大表明出料口胶料在圆周方向上的覆胶速度波动大,胶料挤出均匀性相对较差; ξ 较小则表明出料口在胶料圆周方向上的覆胶速度波动小,胶料挤出均匀性相对较好。

芯线牵引速度与胶料 ξ 关系曲线如图14所示。

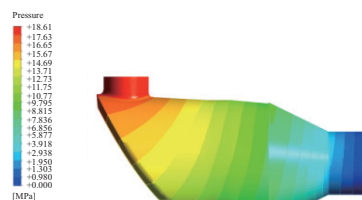
从图13和14可以看出,当芯线牵引速度为 0.08 和 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, ξ 较小,表明胶料挤出均匀性更好,但这两种速度下生产率却相差1倍,胶料最大压力分别为 15.54 和 19.47 MPa 。综合考察产品质量、生产率及设备承载能力,选择最佳芯线牵引速度为 $0.16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3.2 芯线牵引速度与进料口胶料流量的匹配性

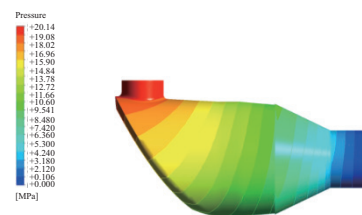
胶料流量大和芯线牵引速度低会导致胶料在



(a) 芯线牵引速度为 $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



(b) 芯线牵引速度为 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



(c) 芯线牵引速度为 $0.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

图11 几种芯线牵引速度下胶料流场压力分布云图
Fig. 11 Pressure distribution nephograms of compound flow fields under several core wire traction speeds

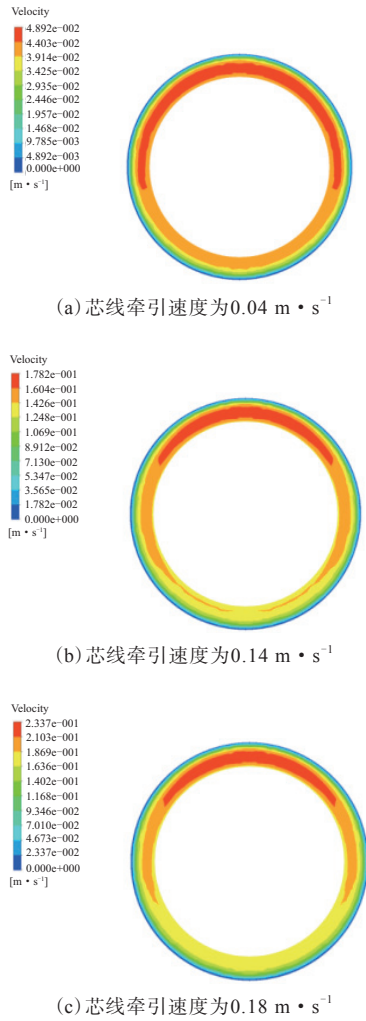


图12 几种芯线牵引速度下出口口胶料流动速度分布云图

Fig. 12 Flow velocity distribution nephograms of compound at feed outlet under several core wire traction speeds

芯线上沉积,造成包覆层厚度不均;胶料流量小和芯线牵引速度高会造成包覆层过薄,难以保证顺利覆胶^[14-16]。研究芯线牵引速度与进料口胶料流量匹配的合理性,对提高电线和电缆包覆质量至关重要。

初步设定进料口胶料流量为 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,调整芯线牵引速度,模拟得到出口口胶料流动速度分布。综合考虑芯线牵引速度、进料口胶料流量、胶料挤出均匀性,定义 n_1 和 n_2 以判断芯线牵引速度与进料口胶料流量的匹配性:

$$\begin{cases} n_1 = \frac{\bar{v}_1}{v_q} \\ n_2 = \frac{v_q}{v_{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

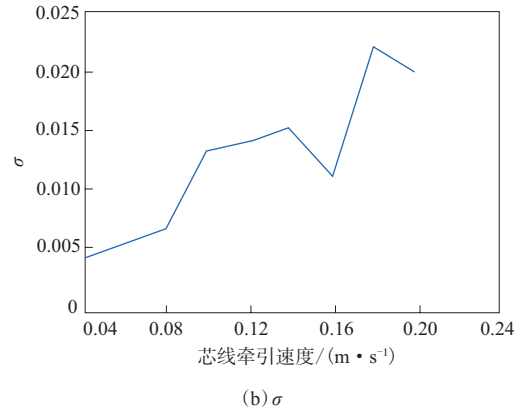
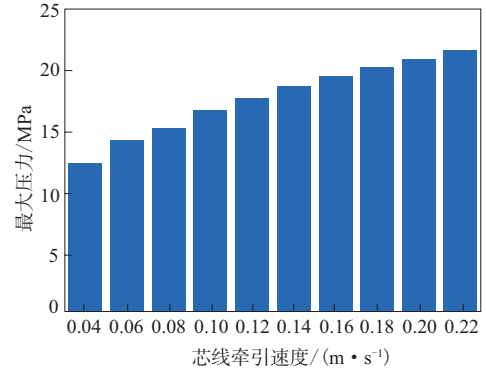


图13 芯线牵引速度与胶料最大压力和 σ 的关系
Fig. 13 Relationships of core wire traction speeds and maximum pressures and σ of compound

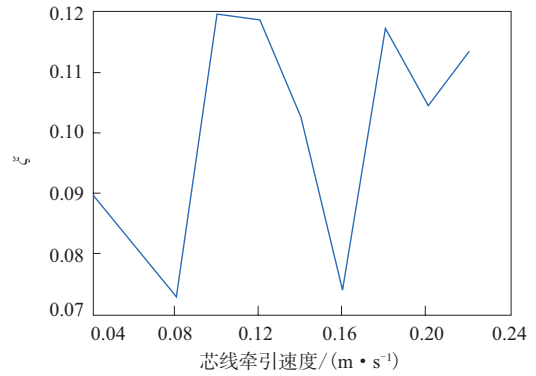
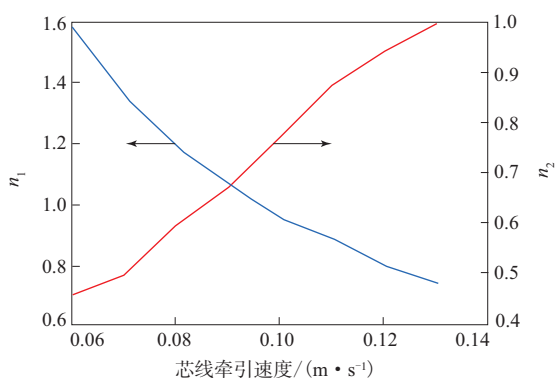


图14 芯线牵引速度与胶料 ξ 关系曲线
Fig. 14 Relationship curve of core wire traction speeds and ξ of compound

式中, $\bar{v}_1$ 为出口口胶料平均流动速度, $v_{\max}$ 为出口口胶料最高流动速度。

当 $n_1 \rightarrow 1$ 及 $n_2 \rightarrow 1$ 时,可以认为芯线牵引速度与进料口胶料流量匹配合理。本工作芯线牵引速度与 n_1 和 n_2 的关系如图15所示。

图15 芯线牵引速度与 n_1 和 n_2 的关系Fig. 15 Relationships of core wire traction speeds and n_1 and n_2

从图15可以看出:当 $n_1 \rightarrow 1$ 时, $\bar{v}_1$ 与芯线牵引速度相当,此时包覆层均匀性好,但此时 $n_2 \approx 0.7$,即 $v_q \approx 0.7v_{\max}$,包覆产量小于进料口胶料流量,胶料易在芯线上沉积,造成包覆层厚度不均;当 $n_2 \rightarrow 1$ 时, $v_{\max}$ 与芯线牵引速度相当,包覆产量与进料口胶料流量相当,但 $n_1 \approx 0.739$,即 $\bar{v}_1 \approx 0.739v_q$,包覆层均匀性差; $n_1 = n_2 \approx 0.86$ 时,进料口胶料流量、芯线牵引速度及包覆层均匀性最优,此时芯线牵引速度为 $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此,当进料口胶料流量为 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,芯线牵引速度为 $0.11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 与之最为匹配,这一结果跟实际生产工艺参数设定相当,证明了本工作方法有效。

综上,当包覆机头结构不变、芯线牵引速度改变时,需要相应改变进料口胶料流量,才能获得高质量的电线和电缆包覆层。

4 结论

(1) 非等温包覆机头胶料流场压力、温度和流动速度的模拟变化趋势与实际相似,模拟试验是分析包覆机头胶料流场的一种有效方法。

(2) 确定了影响胶料包覆均匀性的包覆机头流道参数(进料口位置、进料口直径以及芯线牵引速度)的相关变化规律,为包覆工艺及机头流道参数的合理选择提供了理论依据。

(3) 确定了包覆过程中芯线牵引速度与进料口胶料流量匹配性的评价方法。包覆过程中芯线牵引速度与进料口胶料流量匹配性是影响胶

料挤出均匀性的重要因素。

参考文献:

- [1] 吴越,王广成,张斌武. 复合挤出生产线胎面部件质量波动原因对比分析[J]. 轮胎工业, 2022, 42 (5): 306-309.
WU Y, WANG G C, ZHANG B W. Comparative analysis on quality fluctuation causes of tread components produced by co-extrusion line[J]. Tire Industry, 2022, 42 (5): 306-309.
- [2] 王乾彬. 挤出机机头流道优化设计以及机头的流固耦合[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
WANG Q B. Optimization design of extruder die runner and fluid-solid coupling of die[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2022.
- [3] 孙学鹏. 双层挤出技术在电线电缆生产中的应用[J]. 电子技术, 2022, 51 (3): 130-131.
SUN X P. Application of double layer extrusion technology in wire and cable production[J]. Electronic Technology, 2022, 51 (3): 130-131.
- [4] PONALAGUSAMY R, NARAYANASAMY R, SRINIVASAN P. Design and development of streamlined extrusion dies a Bezier curve approach[J]. Materials Processing Technology, 2005, 161 (3): 375-380.
- [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 Y, SONG J Q. Influence of head runner structure on tube extrusion[J]. Shandong Industrial Technology, 2018 (15): 9-10.
- [6] 葛正浩, 常红利, 任珊珊. 基于CAE的木塑异形材挤出机机头流道优化分析[J]. 塑料, 2020, 49 (4): 41-44.
GE Z H, CHANG H L, REN S S. Optimization analysis of the flow path of the head of wood-plastic profile extrusion machine based on CAE[J]. Plastics, 2020, 49 (4): 41-44.
- [7] BARANOVSKII E S. On flows of viscoelastic fluids under threshold-slip boundary conditions[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 973 (1): 012051.
- [8] 吴晓芳. 双层复合挤出机头数值模拟辅助设计及实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
WU X F. Numerical simulation aided design and experimental study of double layer composite extrusion die[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [9] 李冬燕. 宽幅挤出流场稳定性研究及优化[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
LI D Y. Study and optimization of stability of wide extrusion flow field[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021.

- [10] 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 J W, LUO X, JING B, et al. Numerical analysis of extrusion swell of double-layer microtubule[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(5):65-68.
- [11] 焦冬梅,李冬燕,张涛,等. 电线包覆机头优化设计[J]. 橡胶工业, 2021,68(2):128-133.
JIAO D M, LI D Y, ZHANG T, et al. Optimization design of wire cladding head[J]. China Rubber Industry, 2021, 68(2):128-133.
- [12] 尹洪娜,黄兴元,柳和生,等. 线缆包覆气辅挤出成型的黏弹性数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程,2021,37(3):114-122.
YIN H N, HUANG X Y, LIU H S, et al. Viscoelastic numerical simulation of gas-assisted extrusion process of cable cladding[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(3):114-122.
- [13] 陆万祥,王静. 聚合物共挤专利技术综述[J]. 河南科技,2017(11):144-145.
LU W X, WANG J. Review on the patent technology of polymer coextrusion[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2017 (11):144-145.
- [14] 焦志伟,王立胜,张义成,等. 三层共挤吹膜机头流道流场的数值模拟[J]. 塑料,2020,49(5):116-120.
JIAO Z W, WANG L S, ZHANG Y C, et al. Numerical simulation of three-layer coextrusion blown film[J]. Plastics, 2020, 49(5):116-120.
- [15] 吕炜帅. 基于POLYFLOW挤出制品宽度对机头流道性能的影响研究[J]. 机械设计,2019,36(z1):158-161.
LYU W S. Study on the influence of the width of POLYFLOW extrusion products on the performance of the head flow channel[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(z1):158-161.
- [16] 朱玉珩,黄瑶,邹鲲,等. 单螺杆挤出的进料均匀性分析及其结构优化设计[J]. 塑料工业,2022,50(2):80-86.
ZHU Y H, HUANG Y, ZOU K, et al. Feed uniformity analysis and structure optimization design of single screw extrusion[J]. Plastics Industry, 2022, 50(2):80-86.

收稿日期:2022-11-11

Study on Extrusion Uniformity of Compound Flow Field in Non-isothermal Cladding Head

JIAO Dongmei, XU Xiaopei, YUAN Shishuai, WU Chengwang, QIN Jian

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The extrusion uniformity of the compound flow field in the non-isothermal cladding head was studied. The results showed that the simulated variation trends of the pressure, temperature and flow velocity of the compound flow field in the non-isothermal cladding head were similar to those of the actual situation, and the simulation test was an effective method to analyze the compound flow field of the cladding head. The effects of the flow channel parameters in the cladding head (feed inlet position, feed inlet diameter and core wire traction speed) which affected the cladding uniformity were determined, which provided a theoretical basis for the optimization of the cladding process and the flow channel parameters of the cladding head. Moreover, the evaluation method of the matching between the core wire traction speed and the compound flow at the feed inlet during the cladding process was established. This study provided theoretical guidance for the determination of the cladding process and the flow channel parameters of the cladding head.

Key words: cladding head; compound flow field; non-isothermal; extrusion uniformity; feed inlet; core wire traction speed; compound flow