

引用格式:卢涛,方洋,孙伟成,等. 沥青带材流延工艺冷却过程数值模拟[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 85–90.

LU Tao, FANG Yang, SUN WeiCheng, et al. Numerical simulation of cooling process in asphalt strip casting process[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(3): 85–90.

沥青带材流延工艺冷却过程数值模拟

卢涛¹ 方洋² 孙伟成¹ 单涛² 马祖恺²

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 北京东方雨虹防水技术股份有限公司, 北京 100123)

摘要: 为了探究沥青带材在流延加工时的冷却过程以及优化生产工艺,通过计算流体力学(CFD)数值模拟,将沥青带材的流延加工过程简化成 2D 高黏度流体与传热过程,建立了多层沥青带材-冷却辊二维模型,并分析了带材厚度、进料位置和辊筒直径对沥青流延工艺传热过程的影响。结果表明:沥青厚度对辊筒冷却段的降温过程影响显著,第一层流延沥青的厚度越小,辊筒对其冷却效果越好,越有利于第二层覆膜;适当前移第一次沥青流延的进料位置,并缩短两次进料的间距,能够改善辊筒的冷却效果;增大冷却辊筒直径可以增加冷却时间,提高冷却效果。

关键词: 冷却辊; 沥青带材; 数值模拟; 模型; 流延工艺

中图分类号: TK01+1 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.03.012

引言

沥青是由不同分子量的碳氢化合物及其非金属衍生物组成的黑褐色复杂混合物^[1]。在高于一定温度时,其黏度受剪切速率的影响变小,表现为牛顿流体特性^[2]。沥青具有防水性能高、抗老化性能好等优点,广泛应用于工业与民用建筑防水领域^[3]。沥青通常被加工成薄层防水带状材料,常用的加工方法有冷却辊流延工艺和平板流延工艺。这些流延工艺使用冷却辊或冷却板冷却熔融的沥青,再经过自然冷却与喷淋降温,待沥青冷却至一定温度后覆膜包装,完成沥青防水带材的生产。由于覆膜与包装对温度有一定的要求,沥青在冷却辊覆膜冷却时,大量的高温熔融沥青需要将热量导出,因此流延工艺中沥青的温度控制对于提高产品质量及安全生产具有重要意义。

近年来,众多国内外学者致力于运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法研究流延过程中流动与传热问题,并考虑多种因素对流延工艺冷却效果的影响。Pagnola 等^[4]使用 OpenFOAM 软件模拟了无定形带材通过熔体旋转法冷却

的过程,分析了毕渥数(Bi)对冷块熔融纺丝过程的影响。Sowjanya 等^[5]利用 2D 数值模拟,分析了 Finemet 合金熔融纺丝过程中辊速、压力、间隙以及狭缝的宽度和厚度对熔池的稳定性与带材厚度的影响。Xie 等^[6]对半固态镁合金带材连续流延过程进行了数值模拟,分析了入口温度、轧辊与熔融合金之间的传热、流延速度、凝固终点位置对带材质量的影响。李福森等^[7]使用 Fluent 软件对塑料薄膜在流延辊筒上的冷却过程进行了数值模拟,分析了塑料薄膜在流延辊筒上的传热过程,得到了薄膜及辊面温度的变化规律。郭茜等^[8]对平板流铸工艺中的冷却辊筒进行了温度场数值模拟,分析了辊速、辊外径、辊厚度对辊面传热性能的影响。马文鑫等^[9]将固体胶片设定成流体,应用 Fluent 软件建立了胶片-冷却鼓三维耦合换热模型,得到了胶片及各冷却鼓的温度分布规律。

综上所述,虽然很多学者利用 CFD 方法对流延工艺进行了数值模拟,但是很少对沥青的流延冷却过程进行数值模拟。为了更好地了解沥青流延过程的冷却机理,同时为沥青防水卷材的生产制造提供一定的理论基础,本文将沥青带材的流延加工过程等效成 2D 的高黏度流体流动过程,建立了多层沥青带材-冷却辊筒二维模型,运用 CFD 方法,分析带材厚度、进料点位置、辊筒直径对沥青冷却过程的影响,期望研究结果为沥青流延工艺的温度控制提供

收稿日期: 2021-12-28

第一作者: 男, 1975 年生, 教授

E-mail: lutao@mail.buct.edu.cn

科学指导。

1 数学物理模型

本文以某型复合沥青防水带材为例,该带材结构为聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚乙烯复合膜(PET/PE)薄膜材料中间裹覆两层沥青材料,其流延工艺如图1所示。首先在冷却辊筒的时钟9:00位置处覆第一层PET/PE薄膜,在时钟10:00位置处流延第一层沥青,沥青经过辊筒冷却后,在时钟12:00位置处覆第二层PET/PE薄膜(覆膜温度不超过120℃),带材继续被冷却后,再进行第二次沥青延流,经过两次沥青延流的带材继续被冷却辊筒冷却,直至带材离开辊筒,进入自然冷却阶段和喷淋冷却阶段,待带材风冷干燥后覆第三层PET/PE薄膜。

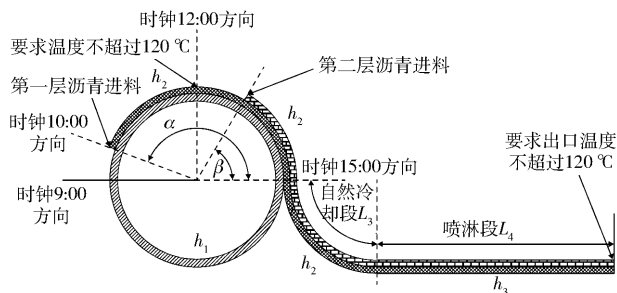


Fig. 1 Casting process of composite asphalt waterproof strip

在实际流延生产工艺中,由于冷却辊筒直径较大,而每层沥青不足1mm,故忽略冷却辊筒的曲率方向变化以简化计算模型,简化的模型如图2所示。其中, L_1 为简化后的第一层沥青前端与第二层沥青前端的距离, L_2 为简化后的第二层沥青前端与辊筒末端的距离,其计算公式如下。

$$L_1 = \frac{\alpha - \beta}{360} \pi d, L_2 = \frac{\beta}{360} \pi d$$

式中: d 为简化后的辊筒厚度。

为了便于计算和设置边界条件,在不失流延工艺本征的基础上,假设原本旋转的冷却辊筒处于静止状态,沥青处于层流的流体流动状态^[10],冷却辊筒外壁与膜层材料完全直接接触,忽略空气夹层带来的空气热阻及PET/PE薄膜热阻,并且压力和密度也不随时间变化,因此可将上述模型简化为二维稳态定常流动与传热问题。

连续性方程为

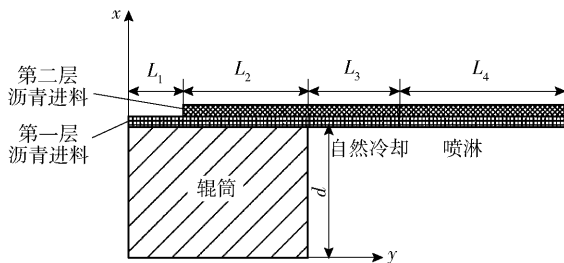


图2 简化的计算模型

Fig. 2 Simplified calculation model

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中: u 为 x 方向的速度, v 为 y 方向的速度。

动量守恒方程为

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, f_x 为 x 方向的体积力, f_y 为 y 方向的体积力, p 为压力, μ 为流体的动力黏度。

能量守恒定律是包含热交换的流动系统必须满足的基本定律,式(4)是以温度 T 为变量的能量守恒方程。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div} \left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T \right) + S_T \quad (4)$$

式中: c_p 是比热容, k 为流体的传热系数, S_T 为黏性耗散项。

对于流动边界,两层沥青流动的速度值均为冷却辊筒旋转外壁线速度。对于第一层沥青的入口速度,边界条件为

$$u_{x=0} = u_0 \quad (5)$$

对于传热边界,冷却水与辊筒内壁采用第三类边界条件^[11],边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_1 (t_{y=0} - t_1) \quad (6)$$

式中: λ 为导热系数, t_1 为冷却水温度。

一般来说,对流传热系数 h 可以根据努塞尔数 $Nu = \frac{hl}{\lambda}$ 得到(l 为传热面的几何特征长度), Nu 可由实验关联式或经验公式求得。对于辊筒内部冷却, Nu 可采用Dittus-Boelter公式^[11]求得。

$$Nu_1 = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^{0.4} \quad (7)$$

式中: Re_1 为辊筒内部冷却水的雷诺数, Pr_1 为辊筒内部冷却水的普朗特数。

对于空气自然冷却阶段,采用横掠圆管 Nu 关

联式^[12]计算 Nu 。

$$Nu_2 = 0.644 Re_g^{0.5} Pr_g^{1/3} \tag{8}$$

式中: Re_g 为空气自然冷却的雷诺数, Pr_g 为空气自然冷却的普朗特数。

对于喷淋冷却阶段,采用喷嘴冲击射流实验 Nu 关联式^[13]计算 Nu 。

$$Nu_3 = \frac{2 Re_d^{0.5} Pr_1^{0.42}}{1 + 0.1 \left(\frac{H}{D} - 6 \right) D/r} (1 + Re_d^{0.55})^{0.5} \times \frac{D}{r} \tag{9}$$

式中: Re_d 为冲击冷却时水的雷诺数, D 为冲击孔直径, r 为射流滞止区半径, H 为冲击孔与表面的距离。

本文采用 Fluent 软件进行数值模拟,取沥青固定熔点为 120 ℃,沥青进料温度为 165 ℃,辊筒厚度为 25 mm,冷却辊筒中水的温度为 10 ℃,喷淋水的温度为 10 ℃。为了便于储存并防止热量堆积,该沥青带材的最终温度在 40 ℃ 以下。

2 计算结果分析

2.1 沥青层厚度对传热过程的影响

建立不同厚度的沥青层网格模型,通过数值模拟分析沥青层厚度对流延工艺沥青降温冷却过程的影响,结果如图 3 所示。从图 3(a)和 3(c)可以看出,在时钟 15:00 方向,厚度为 1 mm 的第二层沥青上表面温度比厚度为 0.5 mm 的第二层沥青上表面高出 40 ℃。从图 3(b)和 3(c)可以看出,在辊筒冷却段(0 ~ 2 m 区间),在时钟 12:00 方向,厚度为 1 mm 的第一层沥青上表面温度比厚度为 0.5 mm 的第一层沥青上表面高出 60 ℃。结果表明,沥青层厚度对辊筒冷却段的降温过程影响显著,第一层流延沥青越薄,底层热阻越小,辊筒对其冷却效果越好,越有利于第二层覆膜。在喷淋冷却段(3 ~ 7 m 区间),图 3(a)与 3(b)沥青带材的整体降温趋势接近,都在 7 m 之后沥青带材的整体温度接近室温,而图 3(c)中沥青在 5 m 之后就已经达到室温。

2.2 进料位置对传热过程的影响

在冷却辊筒的不同方位上,建立沥青带材不同进料位置的网格模型,通过数值模拟分析了进料位置对整体沥青层降温冷却过程的影响,结果如图 4 所示。与图 4(a)相比,图 4(b)的进料位置更靠前,并且两层沥青带材的间距更短,亦即两层沥青带材在辊筒冷却段的冷却时间更长。尽管总体在这两种情况下沥青带材在 7 m 之后均冷却至相同温度,

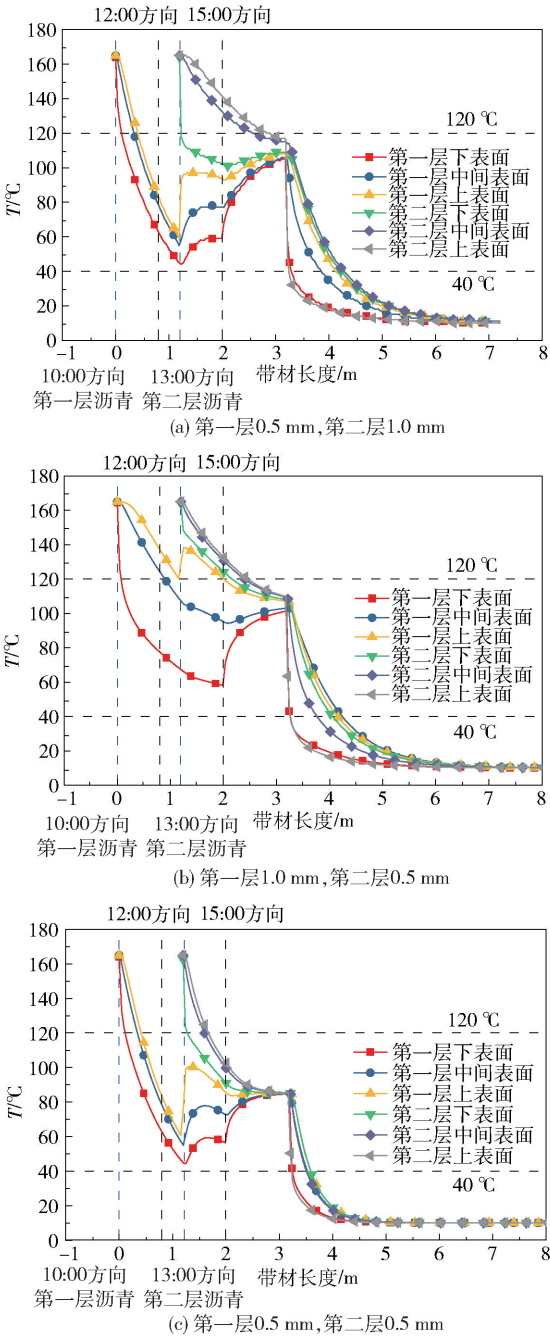


图 3 沥青层厚度对传热过程的影响
Fig. 3 Effect of asphalt layer thicknesses on heat transfer process

喷淋段对于整体的冷却过程贡献更加明显,使得图 4(a)和(b)中喷淋段的温度差别较小,但是在自然冷却段容易看出,图 4(b)的进料位置的降温作用比图 4(a)更明显。沥青流延位置前移,使得第一层流延沥青单独冷却的距离变短,到第二层延流沥青进料口前温度的降低量减少,但是在该工艺条件下,第二层沥青在离开辊筒前温度降低较为显著,因此在

保证第二次 PET/PE 薄膜的覆膜温度不超过 120 ℃ 的条件下,适当前移延流沥青的进料点,并且缩短两次流延沥青进料的间距,可以有效发挥辊筒的冷却作用。

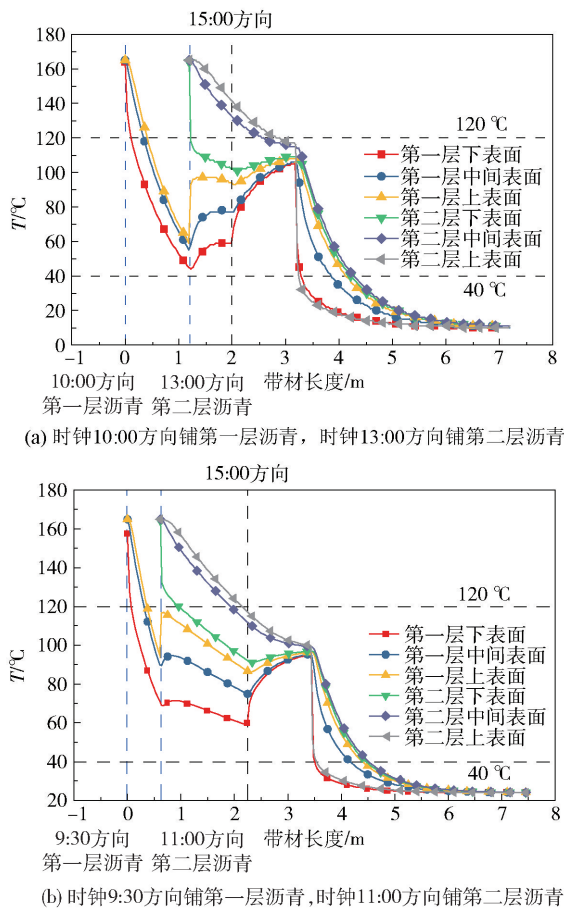


图4 进料位置对传热过程的影响

Fig. 4 Effect of feeding positions on the heat transfer process

2.3 辊筒直径对传热过程的影响

冷却辊筒兼具覆膜、流延和冷却的作用,调整辊筒直径,亦即调整辊筒冷却段的长度,可以为调整流延工艺覆膜及流延位置提供操作空间。建立沥青带材的不同辊筒直径,亦即辊筒冷却段长度的网格模型,通过数值模拟分析不同辊筒直径对沥青带材降温冷却过程的影响,结果如图5所示。当辊筒直径从1.56 m增加到6.24 m时,第一层沥青上表面在时钟10:00方向的温度由155 ℃下降至120 ℃;第二层沥青上表面在时钟15:00方向的温度由150 ℃下降至约80 ℃。随着辊筒直径增大,冷却长度增加,沥青在冷却辊筒上的降温效果增强,并且时钟15:00方向比时钟10:00方向的降温更明显。

图6为辊筒直径对沥青带材在时钟10:00和15:00位置沿带材厚度方向的温度分布的影响。从

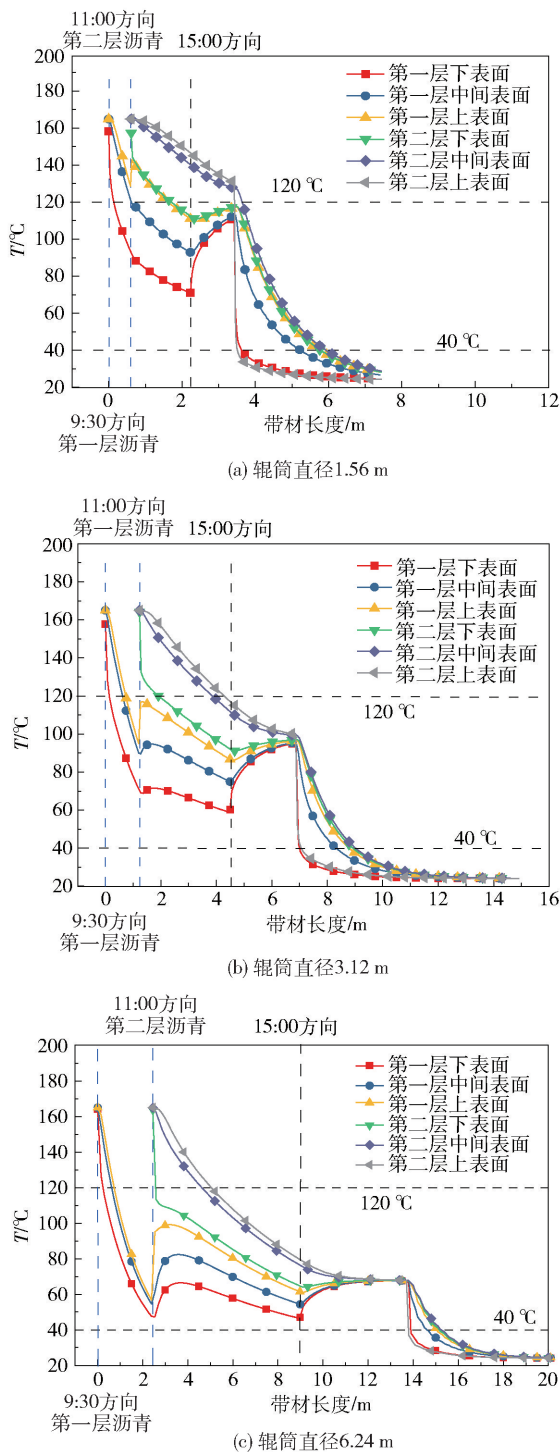


图5 辊筒直径对传热过程的影响

Fig. 5 Effect of steel cylinder diameters on the heat transfer process

图中可以看出,无论在时钟10:00还是15:00位置,辊筒直径越大,沥青带材的整体温度越低。当辊筒直径为1.56 m时,在第二层沥青进料之前,第一层沥青的上表面温度均已经超过120 ℃,因此当辊筒直径较小时,沥青带材上表面得不到有效冷却,从而

影响第二层覆膜工艺。随着辊筒直径的增大,第一层沥青的单独冷却时间更长,可适当前移第二次流延沥青的位置。

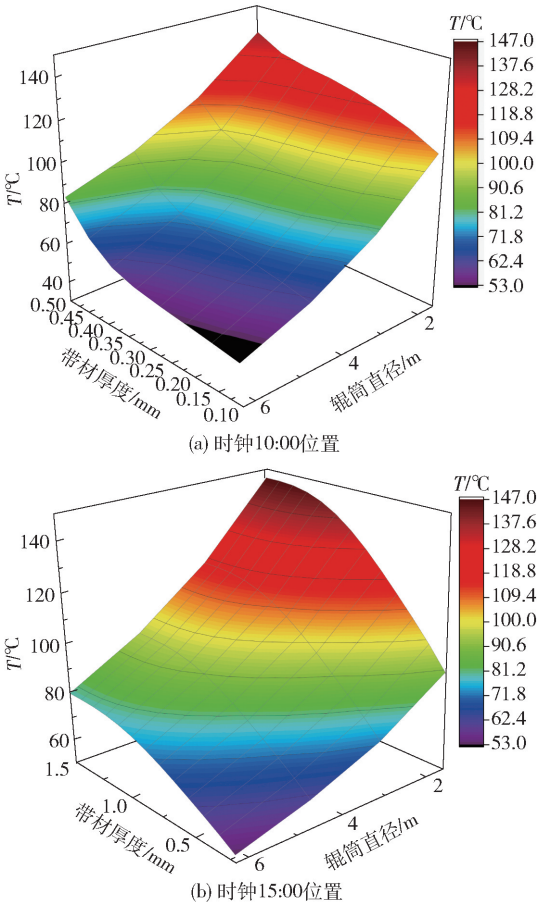


图 6 在时钟 10:00 和 15:00 位置辊筒直径沿带材厚度方向对传热过程的影响

Fig. 6 Effect of steel cylinder diameters along the strip thickness direction on the heat transfer process at the 10:00 and 15:00 clock positions

3 结论

本文通过 CFD 数值模拟,将沥青带材的流延加工过程简化为 2D 高黏度流体与传热过程,建立了多层沥青带材-冷却辊筒流动与传热数学模型,分析了带材厚度、进料点位置、辊筒直径对流延沥青冷却过程的影响,得到如下结论:

- (1) 沥青厚度对辊筒冷却段的降温过程影响显著,第一层流延沥青越薄,底层热阻越小,辊筒对其冷却效果越好,越有利于第二层覆膜。
- (2) 在有限的冷却长度范围内,适当前移第一次沥青流延的进料位置,并且缩短两次进料的间距,能够改善辊筒的冷却效果。

(3) 增大冷却辊筒直径,即增加沥青带材在辊筒上的冷却时间,可以保证流延沥青的充分冷却,为覆膜及流延工艺调整提供较大的操作空间,但冷却辊筒直径的增加会增加设备成本。

上述研究结果可以为类似沥青流延工艺的设计和工艺优化提供一定的理论指导,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] 陈中华,廖前兵,陈剑华,等. 水性沥青防腐涂料的制备[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(22): 1167 – 1171.
CHEN Z H, LIAO Q B, CHEN J H, et al. Preparation of waterborne asphalt anticorrosive coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(22): 1167 – 1171. (in Chinese)

[2] 刘丽,郝培文. 沥青胶浆粘度特性分析[J]. 河北工业大学学报, 2006, 35(2): 109 – 113.
LIU L, HAO P W. Analysis on viscosity character of asphalt mortar[J]. Journal of Heibei University of Technology, 2006, 35(2): 109 – 113. (in Chinese)

[3] 龚春平,袁志欣,邢铭琪. 沥青防水卷材耐热性检测技术分析[C]//国检集团第一届检验检测人员岗位能力提升论文集. 北京:中国建材科技杂志社, 2020.
GONG C P, YUAN Z X, XING M Q. Detection technology analysis of flow resistance at elevated temperature for asphalt waterproofing membrane[C]//Proceedings of the First Session of the National Inspection Group on Improving the Post Ability of Inspection and Testing Personnel. Beijing: China Building Materials Science and Technology Magazine, 2020. (in Chinese)

[4] PAGNOLA M, MALMORIA M, BARONE M. Biot number behaviour in the Chill Block Melt Spinning (CBMS) process[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 807 – 811.

[5] SOWJANYA M, KISHEN K R T. Obtaining stable puddle and thinner ribbons during planar flow melt spinning process[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4(2): 890 – 897.

[6] XIE S S, YANG H Q, LI L, et al. Numerical simulation of semi-solid magnesium alloy in continuous roll-casting process[J]. Solid State Phenomena, 2006, 116 – 117: 583 – 586.

[7] 李福森,王栓虎,李欣兴,等. 塑料薄膜在流延辊上冷却过程的数值模拟[J]. 塑料科技, 2011, 39(2): 35 – 38.
LI F S, WANG S H, LI X X, et al. Numerical simula-

- tion of cooling process of plastic film on casting roller [J]. *Plastics Science and Technology*, 2011, 39(2): 35–38. (in Chinese)
- [8] 郭茜, 严密. 平板流铸工艺中冷却辊的温度场数值模拟[J]. *稀有金属材料与工程*, 2015, 44(8): 2048–2052.
- GUO X, YAN M. Thermal analysis for cooling rolls in planar-flow melt spinning[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2015, 44(8): 2048–2052. (in Chinese)
- [9] 马文鑫, 于洪杰, 刘云云, 等. 压延胶片与冷却鼓传热过程的数值模拟[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(3): 84–92.
- MA W X, YU H J, LIU Y Y, et al. Numerical simulation of the heat transfer between a rolling rubber-film and cooling-drums[J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2020, 47(3): 84–92. (in Chinese)
- [10] 张兆顺, 崔桂香. 流体力学[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- ZHANG Z S, CUI G X. *Fluidmechanics* [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. (in Chinese)
- [11] 陶文铨. 传热学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- TAO W Q. *Heat transfer* [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019. (in Chinese)
- [12] CENGEL Y A. *Heat transfer: a practical approach* [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [13] MARTIN H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces[J]. *Advances in Heat Transfer*, 1977, 13: 1–60.

Numerical simulation of cooling process in asphalt strip casting process

LU Tao¹ FANG Yang² SUN WeiCheng¹ SHAN Tao² MA ZuKai²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Beijing Oriental Yuhong Waterproof Technology Co., Ltd., Beijing 100123, China)

Abstract: In order to explore the cooling process and optimize the production process of the asphalt strip during the casting process, the casting process of the asphalt strip was simplified into a 2D high-viscosity fluid and heat transfer process by the computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation. A two-dimensional model of multi-layer asphalt strip-cooling roll was established, and the influence of strip thickness, feed position and roll diameter on the heat transfer process of asphalt casting process was analyzed. The results showed that the thickness of asphalt has a significant influence on the cooling process of the roller cooling section. The smaller the thickness of the first layer asphalt is, the better the cooling effect of the roller is, and the more favorable the second layer of membrane is. The cooling effect of roller can be improved by appropriately moving forward the feed position of the first asphalt casting and shortening the distance between the two feeds. Increasing the diameter of the cooling roller can increase the cooling time and improve the cooling effect.

Key words: cooling roll; asphalt strip; numerical simulation; model; casting process

(责任编辑: 于少云)