

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.09.015

# 天然气直燃系统在BOPET薄膜生产线中的应用

宁媛松<sup>1</sup>, 霍达<sup>1</sup>, 王珂<sup>1</sup>, 张仲阳<sup>2</sup>

(1.北京机械工业自动化研究所有限公司,北京 100120; 2.北京思灵机器人科技有限责任公司,北京 100192)

**摘要:**为降低传统电加热热风循环系统在双向拉伸聚酯薄膜(BOPET)生产线中的高能耗,同时避免传统油加热热风循环系统额外增加设备成本、热效率低、污染物多的缺点,降本增效,实现BOPET的绿色生产,探索采用天然气直燃系统替代传统电加热、油加热系统的可行性。首先利用能耗转化进行天然气直燃系统与电加热系统的经济性对比分析,结果表明采用天然气直燃系统可节约成本约50%。根据能量公式建立天然气直燃系统在烘箱循环系统中的数学模型,根据温度计算结果,优化烘箱循环系统的循环方式,最终结果表明通过引出烘箱内热风混合新风后再进行燃气加热,在少量增加内循环风机功率的情况下,天然气直燃系统即可满足使用要求。根据上述结论优化天然气直燃系统结构,对循环系统进行计算流体动力学仿真模拟,仿真结果符合预期,满足使用的温度要求。天然气直燃系统替代方案最终在某宽幅BOPET薄膜生产线上改造实施,能够替代改造区原电加热系统,满足薄膜生产的使用要求,生产线整体能耗明显降低。

**关键词:**双向拉伸聚酯薄膜;天然气直燃系统;能量公式;烘箱循环系统;计算流体动力学

**中图分类号:** TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)09-0090-06

## Application of Natural Gas Direct Combustion System in BOPET Film Production Line

Ning Yuansong<sup>1</sup>, Huo Da<sup>1</sup>, Wang Ke<sup>1</sup>, Zhang Zhongyang<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Automation for Machinery, Beijing 100120, China;

2. Beijing Siling Robot Technology Co. Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract :** In order to reduce the high energy consumption of the traditional electric heating hot air circulation system in the biaxially stretched polyester film (BOPET) production line, while avoiding the disadvantages of the traditional oil heating hot air circulation system such as additional equipment costs, low thermal efficiency, and high pollutants, reducing costs and increasing efficiency, and achieving green production of BOPET, the feasibility of using natural gas direct combustion system to replace traditional electric heating and oil heating systems was explored. Firstly, a comparative analysis of the economy between natural gas direct combustion systems and electric heating systems was conducted using energy consumption conversion. The results show that using natural gas direct combustion systems can save about 50% of costs. Based on the energy formula, a mathematical model of the natural gas direct combustion system in the oven circulation system was established. Based on the temperature calculation results, the circulation mode of the oven circulation system was optimized. Finally, it is shown that by introducing hot air mixed with fresh air in the oven and then heating with gas, the natural gas direct combustion system can meet the usage requirements with a small increase in the power of the internal circulation fan. Based on the above conclusions, the structure of the natural gas direct combustion system was optimized, and computational fluid dynamics simulation was conducted on the circulating system. The simulation results met the expected temperature requirements for use. The replacement plan for the natural gas direct combustion system was ultimately implemented on a wide BOPET film production line, replacing the original electric heating system in the renovation area, meeting the usage requirements of film production, and significantly reducing the overall energy consumption of the production line.

**Keywords :** biaxially stretched polyester film ; natural gas direct combustion system ; energy formula ; oven circulation system ; computational fluid dynamics

**基金项目:** 北京机械工业自动化研究所基金项目(101S-2229)

**通信作者:** 宁媛松,工程师,主要研究方向为单、双向拉伸薄膜生产线开发

**收稿日期:** 2023-07-02

**引用格式:** 宁媛松,霍达,王珂,等.天然气直燃系统在BOPET薄膜生产线中的应用[J].工程塑料应用,2023,51(9):90-95.

Ning Yuansong, Huo Da, Wang Ke, et al. The application of natural gas direct combustion system in BOPET film production line[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 90-95.

双向拉伸聚酯(BOPET)薄膜具有力学强度高、光学性能好、使用温度广、阻隔性优良、耐油、耐腐蚀等特点<sup>[1-2]</sup>。因其优良的综合性能,BOPET薄膜在包装、印刷、复合、真空镀铝等方面的应用最为普遍。双向拉伸薄膜的制备主要使用平膜拉伸法,平膜拉伸法又分为同步拉伸、分步拉伸两种方法<sup>[3-4]</sup>。两种方法在薄膜拉伸领域均有广泛应用。在薄膜拉伸过程中,薄膜的结晶、定向程度以及均匀性完全依靠温度控制进行调节,因此热历程是决定拉伸薄膜产品质量的关键因素。烘箱热风循环系统作为薄膜热历程的关键设备,直接对薄膜进行加热,其热效率、温度与传热的均匀性控制成为拉伸薄膜领域的一项关键技术。

目前BOPET薄膜生产线的烘箱热风循环系统,主要采用电加热、油加热两种加热方式,其热源分别是电阻加热器以及导热油加热器,前者通过电阻丝通电发热,后者则通过循环热油进行热交换<sup>[5-6]</sup>。采用电加热方式需要消耗大量电能,通常一条采用电加热方式的BOPET薄膜生产线的能耗大部分集中于热风循环系统。导热油加热,尽管解决了电耗的问题,但是需要增加燃煤或燃油锅炉、热油泵、热交换器等相关设备,总体热效率仅为60%~70%左右,另外锅炉工作过程中,产生大量二氧化硫、烟尘、氮氧化合物等有害物质,热油管道的泄漏、脏污等也会对正常生产造成影响。

天然气的主要成分是CH<sub>4</sub>,属于清洁能源。天然气直燃热风系统已经开始应用在纺织印染行业<sup>[7]</sup>、精密涂布行业。目前在BOPET薄膜生产线上的应用较少,为响应行业节能降耗、建设资源节约型和环境友好型社会的号召,笔者基于某宽幅BOPET薄膜生产线的天然气改造项目,针对天然气直燃系统在BOPET薄膜生产线中的应用进行了相应的探索研究。

1 经济性对比

基于某宽幅BOPET薄膜生产线改造项目,原生产线采用电加热方式,按照天然气95%燃烧效率将电功率转化为相应每小时天然气消耗量,见表1。天然气燃烧热值为8 000 kcal/m<sup>3</sup>。

当前工业用电高峰期电价1.025元/度,生产线所在地工业用天然气价格为4.69元/m<sup>3</sup>,进行成本核算,该生产线每小时用电成本为297元,对应天然气

表1 电功率折合天然气耗用量

| 电加热器位置   | 设计功率/kW | 折合天然气数量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------|--------------------------------------------|
| 主干燥大循环风机 | 122     | 13.8                                       |
| 主干燥小加热器  | 48      | 3.8                                        |
| 辅燥大循环风机  | 48      | 5.4                                        |
| 辅助小加热器   | 24      | 2.7                                        |
| 脱湿再生加热器  | 48      | 5.4                                        |
| 合计       | 290     | 31.1                                       |

成本为146元。因此采用天然气替换电加热成本节约50%。

2 天然气直燃系统设计

2.1 补风温度计算

BOPET薄膜生产线热风循环系统,通常由循环风机、风机室、热源、静压箱等几部分组成<sup>[8-10]</sup>,通过对其工作过程进行分析<sup>[11]</sup>,最终将热风循环系统的工作过程简化为简单的混风过程,如图1所示。

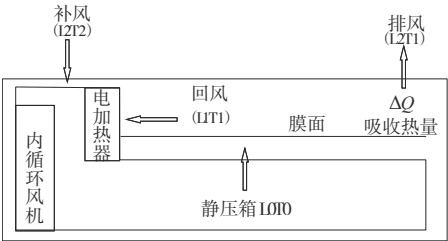


图1 电加热系统简化示意图

天然气直燃系统,即将天然气燃烧器(如图2所示)的燃烧端直接布置在风道内,通过天然气的燃烧对风道内的空气进行加热。由于天然气的燃烧产生二氧化碳、水以及极少量的二氧化硫,通过过滤器的过滤其中的二氧化硫不会对薄膜质量产生影响,因天然气直燃系统避免了换热系统带来的低效率<sup>[12]</sup>,同时不会对产品质量产生影响。

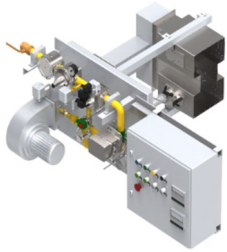


图2 天然气燃烧器

原生产线电加热系统通过直接在烘箱内部对回风进行加热,再与补风进行混合,若采用天然气直燃系统替换原有电加热系统,天然气系统不能直接在烘箱内燃烧,需要布置在烘箱外部的进风管道内,因此选择将天然气燃烧系统布置在补风管道上对补风进行加热来达到升温的目的,如图3所示。

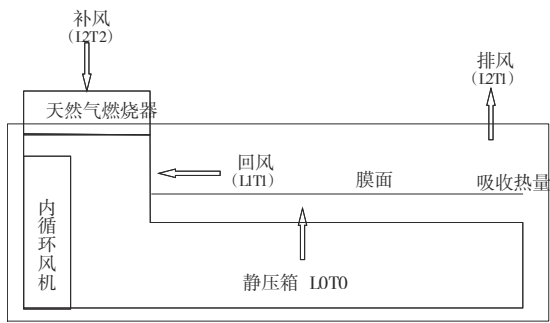


图3 天然气直燃系统简化示意图

综上天然气直燃系统能否满足使用要求关键在于能否使补风温度达到要求,与回风进行混合后使得静压箱吹出的热风达到工艺温度。

首先,需根据能量公式进行简化计算,能量公式为:

$$Q = Cm\Delta t \quad (1)$$

式中: $Q$ 为总能量; $C$ 为比热容; $m$ 为质量; $\Delta t$ 为温度变化。

则上述混风过程的能量公式简化为:

$$L_0(T_0 + 273) = L_1(T_1 + 273) + L_2(T_2 + 273) \quad (2)$$

式中: $T_0$ 为膜面温度即工艺温度, $T_1$ 为回风温度, $T_2$ 为补风温度; $L_0, L_1, L_2$ 分别对应 $T_0, T_1, T_2$ 温度下的体积流量。

等质量的低温和高温空气体积(体积流量)不同,其不同温度下体积流量可根据式(3)进行转换。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(t_1 + 273)}{(t_2 + 273)} \quad (3)$$

仅从体积流量角度考虑,则 $L_1, L_2$ 进行混风,均应转换为相同温度下(这里选择 $0^\circ\text{C}$ )的体积流量加和后再转换为 $T_0$ 温度下的体积流量 $L_0$ 。

$$L_0 = \left[ L_1 \times \frac{273}{(T_1 + 273)} + L_2 \times \frac{273}{(T_2 + 273)} \right] \times \frac{(T_0 + 273)}{273} \quad (4)$$

则将 $L_0$ 带入混风能量公式得:

$$\left[ L_1 \times \frac{273}{(T_1 + 273)} + L_2 \times \frac{273}{(T_2 + 273)} \right] \times \frac{(T_0 + 273)^2}{273} = L_1(T_1 + 273) + L_2(T_2 + 273) \quad (5)$$

进一步推导简化:

$$T_2 = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{L_1 \times [(T_0')^2 - (T_1')^2]}{L_2 \times (T_1')^2} + \sqrt{\left[ \frac{L_1 \times [(T_0')^2 - (T_1')^2]}{L_2 \times (T_1')^2} \right]^2 + 4 \times (T_0')^2} \right\} - 273 \quad (6)$$

式中: $T_0' = T_0 + 273, T_1' = T_1 + 273$

## 2.2 天然气燃烧温度计算

原电加热生产线正常生产情况下:

$L_1=16\,140\,\text{m}^3/\text{h}; L_2=250\,\text{m}^3/\text{h};$

$T_0=220\,^\circ\text{C}$ (温度传感器显示温度,亦即工艺温度);

$T_1=203\,^\circ\text{C}$ (温度传感器显示温度);

改为天然气直燃系统加热方案后计算结果见表2。

表2 天然气加热补风计算结果

| $L_0/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $T_0/^\circ\text{C}$ | $L_2/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $L_1/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $T_1/^\circ\text{C}$ | $T_2/^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 16 849                                 | 220                  | 250                                    | 16 140                                 | 200                  | 2 416                |

天然气加热需将补风温度加热至 $2\,000\,^\circ\text{C}$ 以上,实际天然气加热火焰焰心温度最高仅 $600\,^\circ\text{C}$ ,且风道金属材料以及管道保温材料的耐温最高为 $400\,^\circ\text{C}$ ,现有条件下天然气直燃系统不能满足使用要求,这是因为补风风量与静压箱出风风量相差较大,补风不足以将回风温度提高至工艺温度。

综上,首先考虑采取增加补风风量的方式降低补风温度,假定补风温度 $400\,^\circ\text{C}$ 情况下反推补风风量,结果见表3。

表3 增加补风风量计算结果

| $L_0/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $T_0/^\circ\text{C}$ | $L_2/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $L_1/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$ | $T_1/^\circ\text{C}$ | $T_2/^\circ\text{C}$ |
|----------------------------------------|----------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 17 684                                 | 220                  | 1 611                                  | 16 140                                 | 200                  | 400                  |

当补风风量提高至原补风风量6.4倍时,加热器加热温度 $400\,^\circ\text{C}$ 以下,因此若采取提高补风风量的方案,则原新风风机至少增大原功率6.4倍以上,因此单纯增加补风风量,尽管能够使用天然气直燃系统,但补风风机功率增加过多,反而增加生产线整体能耗。

## 2.3 增加回风利用

在不增加外部补风风量的情况下,可以通过引出烘箱内部的热风与补风混合,增加进入烘箱内的

补风风量,从而满足使用要求。整套天然气燃烧系统三维模型如图4所示,在天然气炉上增加回风风道,为保证在燃气炉上部形成负压空间,在原风机室回风口处增加插板阀用以调整回风风量,因此一部分回风将由烘箱内引出后与补风混合共同加热后由风机室吸回,从而降低加热器加热温度。

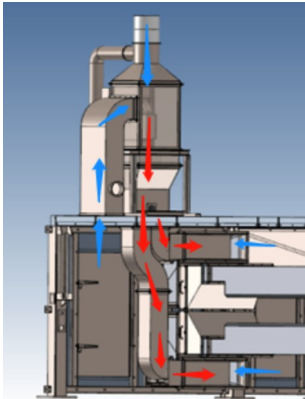


图4 天然气直燃系统模型

另一方面,回风引出管道增加了回风的管路风阻,需增加风机室离心风机功率,形成负压,满足吸风要求,根据现有条件计算回风管路风阻以及全压,从而计算离心风机增加功率:

管道动压 $P_0$ :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho v^2 \tag{7}$$

式中: $v$ 为管道流速,m/s; $\rho$ 为空气密度,1.23 kg/m<sup>3</sup>。

局部阻力 $P_1$ :

$$P_1 = \zeta \times P_0 \tag{8}$$

式中: $\zeta$ 为局部阻力系数,查简易管道通风设计表可知。

摩擦阻力 $P_2$ :

$$P_2 = L \times p \tag{9}$$

式中: $L$ 为管道长度, $p$ 为单位长度摩擦阻力,根据风速、风量、管道直径查图可得。

管道全压 $P$ :

$$P = P_0 + P_1 + P_2 \tag{10}$$

式中: $P_0$ 为管路最大动压, $P_1 + P_2$ 为管路阻力。

插板阀风阻计算:

插板阀风阻计算公式同上, $\zeta$ 根据插板开度( $h/D$ )确定, $h$ 为插板深入管道内的长度; $D$ 为插板插入方向上的管道直径(圆管)或高度(方管),见表4。

表4 插板阀 $\zeta$ 计算表

| 项目          | $h/D$ |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | 0.1   | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
| 圆管型 $\zeta$ | 97.8  | 35   | 10   | 4.6  | 2.06 | 0.98 | 0.44 | 0.17 | 0.06 | 0.05 |
| 方管型 $\zeta$ | 193   | 44.6 | 17.8 | 8.12 | 4.0  | 2.1  | 0.95 | 0.39 | 0.29 | 0    |

风机额外增加功率 $W$ :

$$W = \frac{P \times Q}{3600 \times 1000 \times \eta_1 \times \eta_2} \tag{11}$$

式中: $\eta_1=0.75$ 风机内效率(0.75~0.85); $\eta_2=0.95$ 风机机械效率(三角皮带传动取值0.95)。

管路简化分为1,2,3,4,5,6,7段,如图5所示,根据管路布置情况以及上述计算公式计算可得:

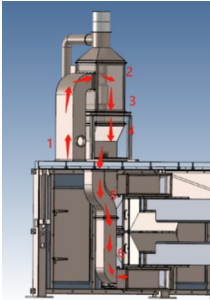


图5 天然气系统管道划分

(1) 当原回风口插板阀全部关闭,全部依靠原风机室进行回风。根据计算结果回风风量全部依靠风机引出,风机需额外增加功率过高15.83 kW(见表5)。

(2) 经过反复计算,当回风利用20%时,即引出4 140 m<sup>3</sup>/h与新风混合加热,计算见表6,功率增加2.15 kW。

表5 全回风风机增加功率计算表

| 管段编号 | $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$ | $L/m$ | $W/mm$ | $h/mm$ | 截面积 $A/m^2$ | $v/(m \cdot s^{-1})$ | $P_0/Pa$ | $\zeta$ | $P_1/Pa$ | 单位长度摩擦阻力/ $P_a$ | $P_2/Pa$ | 管段阻力/ $P_a$ |
|------|------------------------|-------|--------|--------|-------------|----------------------|----------|---------|----------|-----------------|----------|-------------|
| 1    | 16 140                 | 2.03  | 610    | 310    | 0.19        | 23.71                | 345.7    | 0.20    | 69.14    | 8               | 16.27    | 85.41       |
| 2    | 16 140                 | 0.42  | 674    | 674    | 0.45        | 9.87                 | 59.90    | 0.18    | 10.78    | 8               | 3.32     | 14.11       |
| 3    | 16 390                 | 1.19  | 674    | 674    | 0.45        | 10.02                | 61.77    | 0.02    | 0.99     | 1.5             | 1.79     | 2.78        |
| 4    | 16 390                 | 0.75  | 600    | 300    | 0.18        | 25.29                | 393.44   | 0.10    | 39.34    | 12              | 9.00     | 48.34       |
| 5    | 16 390                 | 0.96  | 300    | 300    | 0.09        | 50.59                | 1 573.78 | 0.28    | 440.65   | 16              | 15.28    | 455.94      |
| 6    | 16 390                 | 1.29  | 300    | 300    | 0.09        | 50.59                | 1 573.78 | 0.20    | 314.76   | 16              | 20.64    | 335.4       |

全压2 516 Pa,风机额外增加功率15.83 kW

表 6 回风利用 20% 风机增加功率计算表

| 管段编号 | $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$ | $L/m$ | $W/mm$ | $h/mm$ | 截面积 $A/m^2$ | $v/(m \cdot s^{-1})$ | $P_0/Pa$ | $\zeta$ | $P_1/Pa$ | 单位长度摩擦阻力/ $Pa$ | $P_2/Pa$ | 管段阻力/ $Pa$ |
|------|------------------------|-------|--------|--------|-------------|----------------------|----------|---------|----------|----------------|----------|------------|
| 1    | 4 140                  | 2.03  | 610    | 310    | 0.19        | 6.08                 | 22.75    | 0.20    | 4.55     | 8              | 16.27    | 20.82      |
| 2    | 4 140                  | 0.42  | 674    | 674    | 0.45        | 2.53                 | 3.94     | 0.18    | 0.71     | 8              | 3.33     | 4.04       |
| 3    | 4 390                  | 1.19  | 674    | 674    | 0.45        | 2.68                 | 4.432    | 0.02    | 0.07     | 1.5            | 1.79     | 1.86       |
| 4    | 4 390                  | 0.75  | 600    | 300    | 0.18        | 6.77                 | 28.23    | 0.10    | 2.82     | 12             | 9.00     | 11.82      |
| 5    | 4 390                  | 0.96  | 300    | 300    | 0.09        | 13.55                | 112.91   | 0.28    | 31.61    | 16             | 15.28    | 46.89      |
| 6    | 4 390                  | 1.29  | 300    | 300    | 0.09        | 13.55                | 112.91   | 0.20    | 22.58    | 16             | 20.64    | 43.22      |
| 7    | 12 000                 | 0.01  | 700    | 375    | 0.26        | 12.70                | 99.17    | 1.00    | 99.17    | 30             | 0.30     | 99.47      |

全压 341 Pa, 风机额外增加功率 2.15 kW

当功率增加 2.15 kW, 此时补风温度计算见表 7, 加热温度 266 °C 即满足使用要求。

表 7 天然气加热补风计算结果

| 序号 | $L_0/(m^3 \cdot h^{-1})$ | $T_0/^\circ C$ | $L_2/(m^3 \cdot h^{-1})$ | $L_1/(m^3 \cdot h^{-1})$ | $T_1/^\circ C$ | $T_2/^\circ C$ |
|----|--------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|----------------|----------------|
| 1  | 16 390                   | 220            | 4 390                    | 12 000                   | 203            | 266            |

综上所述, 通过引出烘箱内热风混合新风后再进行燃气加热, 在少量增加内循环风机功率的情况下, 天然气直燃系统即可满足使用要求。后续, 由于生产线空间限制, 针对上述模型继续进行结构优化, 在原有内循环风机功率不变情况下, 增加一台 3 kW 风机直接从烘箱内引出热风结构上更为合理紧凑, 且循环回路内风阻更低, 最终模型如图 6 所示。

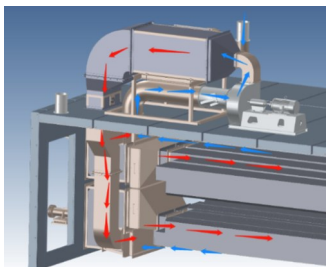


图 6 改进后的天然气直燃系统模型

### 3 天然气直燃系统 CFD 仿真

改进方案确定后, 通过流体仿真软件对天然气直燃系统进行 CFD 仿真分析<sup>[13]</sup>。

本生产线为上下双风机模式, 因此为简化模型, 只对风道较长的下风机管道进行仿真, 天然气直燃管道部分只绘制一半模型, 对于流量参数设定也取值为计算数值的一半。初始边界条件设定, 天然气燃烧温度设定 400 °C, 燃烧空气流量设定为 125 m<sup>3</sup>/h, 烘箱内抽出热风温度设定为 200 °C, 烘箱内抽出热风流量 2 000 m<sup>3</sup>/h, 回风口设定风量 6 000 m<sup>3</sup>/h。最终结果如图 7 ~ 图 9 所示。

通过温度场云图可以看到, 在燃烧器喷口位置附近颜色较深, 显示温度达到 650 K (即 377 °C) 左

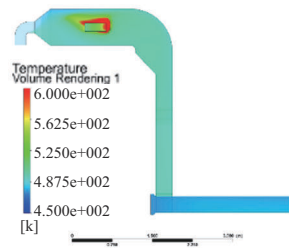


图 7 天然气直燃系统温度场仿真结果

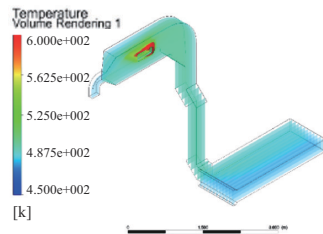


图 8 天然气直燃系统温度场仿真结果轴测视图

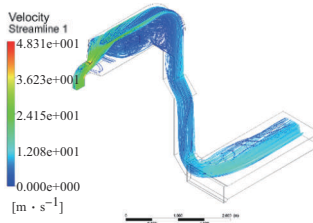


图 9 天然气直燃系统速度场仿真结果轴测视图

右, 随管道延伸至出口位置时颜色明显变化并趋于稳定, 显示温度 490 K (即 217 °C)。通过速度场云图可看到尽管在管道转弯位置处存在小的扰动, 大部分气体随管道平稳流动至出口位置, 出口位置出风均匀。综上, 仿真结果符合预期, 循环风通过天然气燃烧器的加热, 温度达到使用温度后, 顺利进入风机室进行后续混风。仿真结果证明该方案可行。

### 4 应用

天然气直燃加热系统最终在某宽幅 BOPET 薄膜生产线上进行了应用实验, 对原生产线定型 2 区进行改造, 增加了天然气直燃系统以及热风循环管道, 如图 10 所示。

天然气直燃系统运行过程中膜面温度传感器



图10 天然气直燃系统生产试验图

检测膜面温度为 $219.5^{\circ}\text{C}$ 。通过记录24 h天然气表显消耗量,计算天然气平均消耗量为 $11.05\text{ m}^3/\text{h}$ ,则天然气使用成本为52元。

相邻定型3区未进行天然气直燃系统改造,仍使用原电加热器,膜面检测温度为 $226.0^{\circ}\text{C}$ ,电加热器运行总功率80 kW,则用电成本为82元。

尽管只进行了单个烘箱的改造,但通过对比发现其基本满足本区的温度要求,完全能够替换原有电加热器使用,且达到了降低能耗节约成本的目标。

## 5 结论

首先,采用天然气直燃系统替代原有电加热、油加热的加热方式直接解决了BOPET薄膜生产线的高能耗问题,同时降低了生产成本;其次天然气直燃系统相较于天然气间燃换热系统结构简化的同时避免了换热效率低等问题,燃烧后的气体并不会对薄膜质量产生影响;最后目前市场上天然气直燃系统已经成熟,智能化温度控制系统能够像电加热一样实现生产线工艺温度的精准控制。

另一方面,天然气直燃系统在BOPET薄膜生产线上的应用,仍然存在一些问题。首先天然气系统工作过程中若控制不得当,将造成燃气不充分燃烧,从而产生易燃有害气体以及炭黑等,污染薄膜的同时也会带来安全隐患。因此在使用过程中如何避免其不充分燃烧,且在使用过程中能够及时发现其燃烧不充分情况,并进行修正成为后续需要研究解决的问题。此外天然气燃烧系统对使用厂家的安全性要求相对其他生产线更为严格。尽管天然气直燃系统的使用仍然存在问题,但作为清洁能源,符合现今企业降本增效、绿色生产的要求,依然具有推广使用的价值<sup>[4]</sup>,也对今后天然气直燃系统在薄膜拉伸领域的推广使用提供一定参考和借鉴。

## 参考文献

[1] 张友根.双向拉伸薄膜工程技术的创新现状和进展(上)[J].橡塑

技术与装备,2018,40(20):24-28.

Zhang Yougen. Innovation status and progress of biaxial oriented film engineering technology (Part 1)[J] China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2018, 40(20):24-28.

[2] 张友根.双向拉伸薄膜工程技术的创新现状和进展(下)[J].橡塑技术与装备,2018,40(22):34-39.

Zhang Yougen. Innovation status and progress of biaxial oriented film engineering technology (Part 2)[J] China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2018, 40 (22):34-39.

[3] 邹锦洪.双向拉伸薄膜用静压箱流场数值模拟及优化研究[D].广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2019.

Zou Jinhong. Numerical simulation and optimization study on plenum chamber used in biaxially oriented plastics film's production[D] Guangzhou: School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, 2019.

[4] 邹锦洪,麻向军,郑振钦.双向拉伸薄膜横向拉伸段静压箱研究进展[J].广东化工,2019,8(46):97-98.

Zou Jinhong, Ma Xiangjun, Zheng Zhenqin. Research progress of plenum chamber in transverse stretching section of biaxially stretched film[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 8(46): 97-98.

[5] 陶爱荣,丁轲轲,杲东彦.双向拉伸薄膜生产线工艺加热方案的比较[J].工业加热,2005,34(4):58-59.

Tao Airong, Ding Keke, Gao Dongyan. Comparison of heating schemes for biaxially stretched film production lines[J] Industrial Heating, 2005, 34(4):58-59.

[6] 章凯,柳和生,赖家美.横向拉伸时温度场对双向拉伸塑料薄膜结构及性能的影响[J].橡塑技术与装备,2005,31(8):9-12.

Zhang Kai, Liu Hesheng, Lai Jiamei. Film structure and performance while lateral tensile[J] China Rubber/Plastics Technology and Equipment (Plastics), 2005, 31(8):9-12.

[7] 汪琦,张慧芬,俞红嘯,等.热定型机采用天然气直燃热风烘干定形的研究[J].染整技术,2023,45(1):53-56.

Wang Qi, Zhang Huifen, Yu Hongxiao, et al. Study on the heat setting machine drying and setting with natural gas direct combustion hot air[J] Textile Dyeing and Finishing Journal, 2023, 45(1): 53-56.

[8] 端木琳,舒海文,杜国付.工位空调送风静压箱及其送风气流性能评价[J].暖通空调,2004,34(10):17-20.

Duanmu Lin, Shu Haiwen, Du Guofu. Evaluation of air supply plenum chamber and its air distribution performance of task air conditioning[J] HVAC, 2004, 34(10):17-20.

[9] 夏良志,刘青,邵继东,等.静压箱流场的数值模拟与实验研究[J].高校化学工程学报,2017,31(3):712-719.

Xia Liangzhi, Liu Qing, Shao Jidong, et al. Numerical simulation and experimental study on flow fields of plenum chamber[J] Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2017, 31 (3):712-719.

(下转第107页)