

## 瓦楞纸板生产线蒸汽系统压降计算方法分析

曾逸淞, 杜群贵

(华南理工大学, 广州 510640)

**摘要:** **目的** 设计改造瓦楞纸板生产线蒸汽系统, 实现二次蒸汽再利用, 降低能耗。 **方法** 将蒸汽系统拆分成用热单元和管道等2个最基础的组成部分, 并分别对其建立基础数学模型; 以数学模型为基础, 结合工程实例中的蒸汽系统设计方案, 得到该蒸汽系统的压降计算方法。 **结果** 通过工程实例计算, 确定了实例中疏水不畅的原因, 依照压降计算结果, 对系统中的管道进行重新布置, 不仅大幅度减小了不同管路之间的影响, 而且实现了二次蒸汽的合理再利用。 **结论** 建立了一种针对瓦楞蒸汽系统的压降计算方法, 为瓦楞蒸汽系统的节能设计和现场排障提供了理论分析依据, 可供工程设计参考。

**关键词:** 瓦楞纸板生产线; 蒸汽系统; 压降; 数学模型; 计算方法

**中图分类号:** TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0064-05

## Calculating Method Analysis of Pressure Drop for Steam System of Corrugated Board Production Line

ZENG Yi-song, DU Qun-gui

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** To design a steam system for corrugated board production line, in order to realize the reuse of secondary steam and reduce the energy cost. The steam system was dismantled into the two basic components, the heating unit and the pipeline, for which mathematical models were constructed respectively. On the basis of the mathematical models, the calculating method for pressure drop of steam system was derived according to the designing alternative of an engineering example. By practical example calculation, the cause for the non-free dewatering in the example was determined. In line with the calculation result of pressure drop, the influence among different pipelines was greatly reduced and reasonable reuse of the secondary steam was realized by rearranging the pipelines in the system. A calculating method of pressure drop for steam system of corrugated board production line was established to provide a theoretical and analytical basis for energy-saving design and troubleshooting on the site, being available for engineering reference.

**KEY WORDS:** corrugated board production line; steam system; pressure drop; mathematical model; calculation method

随着瓦楞纸板包装行业的快速发展, 高效、节能已经成为瓦楞纸板生产线的主要发展方向<sup>[1-2]</sup>。蒸汽由于具有热容量高、干净无污染等特点, 一直被广泛应用于工业加热。在瓦楞纸板生产线上, 蒸汽供热和凝结水回收是目前应用最为广泛的节能方式<sup>[3]</sup>。国内瓦楞的蒸汽系统设计多数依靠从业人员的经验, 并没有系统的理论依据, 这导致了許多企业自主设计的瓦楞蒸汽系统出现疏水不畅和供热不足问题时找不到原因,

影响了瓦楞纸板的生产质量, 造成了不必要的能源消耗<sup>[4]</sup>。杨皓<sup>[5]</sup>等在对瓦楞纸板生产工艺研究的基础上, 建立了瓦楞蒸汽系统的流量数学模型, 为瓦楞蒸汽元件的选择提供了依据。由于只涉及用热设备热量消耗, 其所建立的模型中并没有包括系统中的蒸汽管道, 也没有对蒸汽传输和使用过后的压力下降情况进行分析, 模型计算精度和对系统中蒸汽压力变化情况的分析程度还有待提高。蒸汽系统压力变化是蒸汽系统运

收稿日期: 2014-08-04

作者简介: 曾逸淞(1991—), 男, 江西吉安人, 华南理工大学硕士生, 主攻数字化设计与制造。

通讯作者: 杜群贵(1965—), 男, 华南理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为CAE及PDM技术。

行状态最直观的参数,其设计合理与否,直接关系系统的供热和冷凝水的回收效果,最终影响瓦楞纸板的生产质量。

基于上述原因,根据瓦线蒸汽系统的工作原理,将整个蒸汽系统拆分成用热单元和管道等2个最基本的组成部分,并建立压降数学模型,结合工程实例进行压降计算,找出实例中的故障问题,并参照计算结果对蒸汽系统管路进行重新设计,消除故障并且二次利用蒸汽,提高了蒸汽利用率,节约了能源。

### 1 蒸汽系统工作原理

瓦楞纸板生产线蒸汽系统是由锅炉、供气管网、用热设备、疏水系统和回收管网组成的热力循环系统<sup>[6]</sup>,

其蒸汽系统气路构成见图1,蒸汽通过主蒸汽管道沿着支路管网进入瓦楞机、预热缸和糊附机等用热设备中,经过用热设备中的供气管道在瓦楞辊、压力辊和面纸热缸等用热单元内腔中冷凝放热,给原纸和成型瓦楞纸升温提供热量。在传热过程中,饱和蒸汽冷凝成同温度下的饱和水,通过蒸汽系统中的疏水系统排放到回收管网中,统一回收到锅炉房重新加热利用。由瓦线蒸汽系统的工作原理可知,整个蒸汽系统可被拆分成最基本的蒸汽管道和用热单元。在蒸汽系统设计中,如何根据工艺要求准确计算出蒸汽系统中一些关键位置的压降,合理布置蒸汽管网,是整个蒸汽系统能够顺利运转及高效节能的关键。为了精确计算压力下降,需要建立用热单元与管道压降模型。

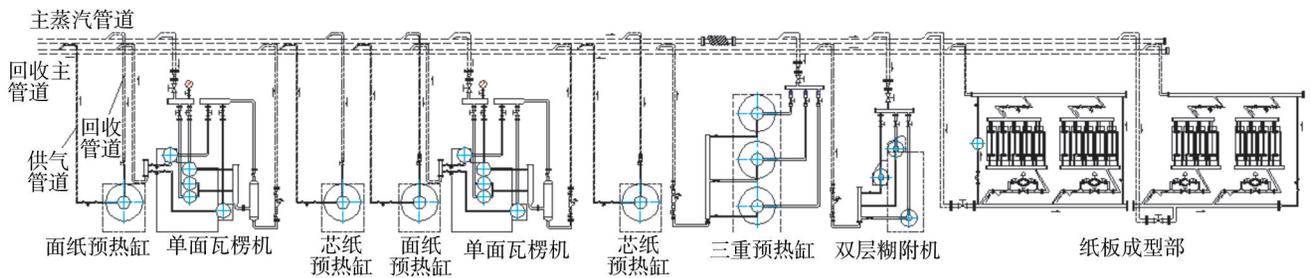


图1 瓦楞纸板生产线蒸汽系统气路

Fig.1 Gas circuit of steam system in corrugated board production line

### 2 蒸汽系统压降建模与计算

#### 2.1 用热单元压降计算模型

瓦楞辊、压力辊等典型用热单元的结构简化示意图见图2。在用热单元内腔中,饱和蒸汽放热冷凝形成同温度下的饱和水,放出的热量通过冷凝水膜层和金属层传递给纸张。由于瓦线的生产速度一般不超过350 m/min,用热单元的转速不高,不能形成冷凝水环<sup>[7]</sup>,因此,用热单元中形成的冷凝水大多沉积在其内腔底部,故瓦线上均采用固定虹吸管排水装置,将用热单元内腔中的水气混合物通入排气管道中。

##### 2.1.1 传热量

蒸汽冷凝放出的热量 $Q$ 需要通过冷凝水膜、金属层传递给纸张,因此,蒸汽传递给冷凝水膜,冷凝水膜传递给金属内壁,再通过金属外壁传递给纸张的热量都是相等的。根据傅里叶定律和牛顿冷却公式<sup>[8]</sup>,推导出单位时间的传热量:蒸汽到用热单元内壁的传热量 $Q=A_1h_1(T_s-T_{w1})$ ;用热单元内壁到外壁的传热量

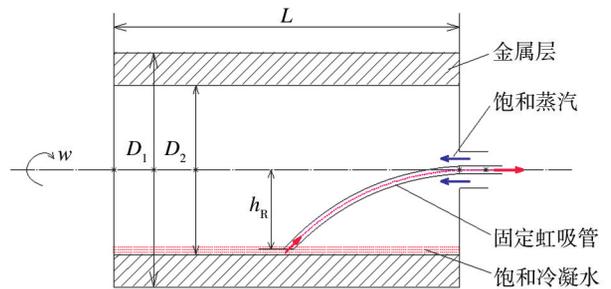


图2 用热单元简化结构示意图

Fig.2 Schematic of simplified structure of the heating unit

$$Q = \frac{A_2\lambda}{\delta}(T_{w1} - T_{w2}) ; \text{用热单元外壁到纸张的传热量 } Q=A_3h_2(T_{w2}-T_p)。$$

联立上述3个方程,消去用热单元内壁和外壁的温度和,化简之后得到单位时间内蒸汽到纸张的传热量计算公式:

$$Q = \frac{T_s - T_p}{\frac{1}{A_1h_1} + \frac{\delta}{A_2\lambda} + \frac{1}{A_3h_2}} \quad (1)$$

式中: $A_1, A_2, A_3$ 分别为用热单元的内腔表面积、对

数传热面积和外壁面积;  $D_1, D_2, L$  分别为用热单元的内、外径及长度(见图2);  $T_s$  为饱和蒸汽温度,  $T_p$  为纸张温度。另外, 蒸汽到用热单元内壁的传热系数  $h_1$  主要受虹吸管间隙、蒸汽压力、转速和冷凝水厚度的影响。由于用热单元是不透明的封闭结构, 冷凝水厚度等内部数据情况无法得知, 因此对传热系数很难估计。文献[9—11]对此进行了研究, 一般取蒸汽冷凝传热系数  $h$  为  $500\sim 3500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。用热单元外壁到纸张界面的接触传热系数取决于用热单元外壁与纸张间空气层间隙的热阻和纸张本身的热阻, 可用以下公式计算<sup>[12]</sup>。

$$h_2 = \frac{1}{\frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_p}{\lambda_p}}$$

式中:  $\delta_a$  为空气层间隙;  $\delta_p$  为纸张厚度;  $\lambda_a$  和  $\lambda_p$  分别为空气和纸张的传热系数。

### 2.1.2 蒸汽总流量和冷凝水量

蒸汽系统均通过疏水阀排出冷凝水, 这相当于蒸汽被“堵”在系统中进行放热, 而冷凝水则被排入回收管道进行资源回收。根据质量守恒, 通入的新鲜蒸汽质量等于消耗的蒸汽质量, 即产生的冷凝水质量。饱和蒸汽冷凝释放热量, 形成同温度下的饱和水, 根据潜热变化可以计算出冷凝水量  $m_1$ :

$$m_1 = \frac{Q}{\gamma_s - \gamma_l} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_s$  为饱和蒸汽的气化潜热;  $\gamma_l$  为与饱和蒸汽同温度的饱和水气化潜热。

### 2.1.3 虹吸管内水气混合物密度

根据蒸汽质量守恒  $m_0 = m_s + m_1$ , 计算出单位时间内管道通入用热单元的蒸汽总质量  $m_0$  和用后蒸汽的质量  $m_s$ , 进而可以得到冷凝水和使用后蒸汽的体积之和, 最终推导出水汽混合物密度  $\rho$  的计算公式:

$$\rho = \frac{m_0 \rho_s}{m_1 \rho_s + m_s \rho_l} \quad (3)$$

式中:  $\rho_s$  为饱和蒸汽密度。注意, 用后蒸汽未二次利用通入其他用热单元中, 而是直接连接疏水阀, 虹吸管中只有冷凝水, 即  $\rho = \rho_l$ 。

### 2.1.4 用热单元压降

见图2, 根据用热单元结构图可知, 其内腔连通供气管道, 用热单元中的蒸汽压力虽然会因为环境变化而发生波动<sup>[13]</sup>, 但是消耗的蒸汽能够得到迅速的补充, 内腔中的蒸汽总是处于饱和状态, 因此蒸汽压力可以认为基本和供气管道一致, 蒸汽通过用热单元的压降

主要考虑通过虹吸管时的压降, 可以采用固定虹吸管压差计算公式<sup>[13]</sup>:

$$\Delta P_d = 9.8 \rho h_R + p_0 \quad (4)$$

式中:  $h_R$  为凝结水由内壁升到内腔中轴线的高度, 约等于用热单元内腔半径;  $p_0$  为水汽混合物流过虹吸管的压降, 一般在  $10\sim 30 \text{ kPa}$  之间<sup>[14]</sup>。

## 2.2 管道压降计算模型

瓦楞纸板生产过程虽然会受到各种各样的因素影响, 是实时动态变化的过程, 但是在瓦线正常运行时, 可把它看成是相对稳定的过程, 因此, 计算蒸汽管道压降时并不需要知道蒸汽压力、温度等随时间变化的规律, 在建模时只需考虑各参数在相对稳定过程中的变化情况即可。另外, 管道中的饱和水蒸汽虽然在传输过程中会产生冷凝水。由于冷凝水量相对蒸汽量很小, 并且在管道上适合的位置安装有疏水阀保证蒸汽品质, 因此模型不考虑蒸汽流动。当蒸汽或者冷凝水沿管道流动时, 需同时考虑沿程损失和局部损失<sup>[15]</sup>。

1) 沿程损失。可用流体力学的威斯巴赫公式推导<sup>[15]</sup>:

$$\Delta P_f = \frac{\lambda \rho_s v^2}{2d} l \quad (5)$$

式中:  $l$  为管道长度;  $d$  为管道口径(m);  $Re$  为流体在管道中流动时的雷诺数;  $\rho_s$  为流体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。摩擦阻力系数  $\lambda$  按照阿里特苏公式计算<sup>[15]</sup>:

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}$$

式中:  $\Delta$  为管道当量绝对粗糙度。

2) 局部损失。管段的局部损失  $\Delta P_j$  计算公式为:

$$\Delta P_j = \frac{\rho_s v^2}{2} \zeta \quad (6)$$

式中:  $\zeta$  为管道的局部阻力系数。

3) 管道总压降:  $\Delta P_g = \Delta P_f + \Delta P_j$ 。将沿程损失和局部损失相加化简得到管道压力损失  $\Delta P_g = \frac{\rho_s v^2}{2} \left( \frac{\lambda}{d} l + \zeta \right)$ 。将管道流量  $G$  带入, 得到管道总压降  $\Delta P_g$ :

$$\Delta P_g = \frac{8G^2}{\pi^2 d^4 \rho} \left( \frac{\lambda}{d} l + \zeta \right) \quad (7)$$

## 3 实例计算及管道布置优化

以某公司瓦线蒸汽系统中瓦楞机部分为例, 气路

图见图3。开机运行一段时间后会发现热缸等用热单元表温上不去、疏水阀排水效果极差的问题,需要经常打开备用疏水阀排出大量冷凝水后才能正常运转。已知主蒸汽管道中饱和蒸汽压力为0.1 MPa,生产纸板宽2.2 m,供气管道和排水管道分别为DN25和DN20无缝钢管。

相关工程实例参数见表1。部分计算参数的测量值:纸张原纸厚度 $\sigma_p$ 为0.18 mm,纸张导热系数为0.2 W/(m<sup>2</sup>·℃),蒸汽冷凝传热系数为2000 W/(m<sup>2</sup>·℃),虹吸管阻力为10 kPa,管道摩擦阻力系数为0.03,无缝钢管当量绝对粗糙度为0.17 mm,理想纸张温度为110℃,生产纸板幅宽为2.2 m。

根据表1和部分计算参数,按照建立的压降数学模型进行计算,结果见表2。

由图3可知,辊组(上下瓦楞辊、压力辊)和热缸组

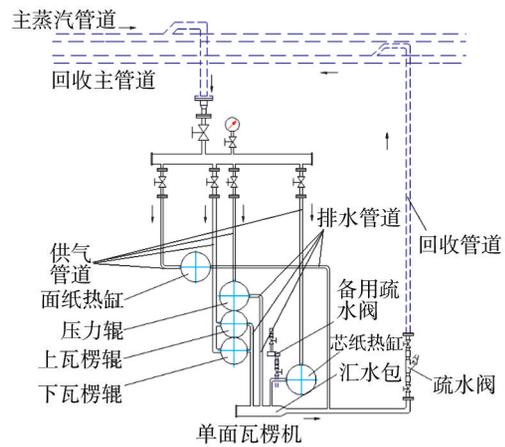


图3 蒸汽系统瓦楞机部分气路

Fig.3 Gas circuit for corrugator in the steam system

(芯纸预热缸、面纸预热缸)使用后的蒸汽均统一排到汇水包内。从表2中可知,在汇汽包处下瓦楞辊与面

表1 工程实例参数

Tab.1 Parameters for an engineering example

	外径/mm	壁厚/mm	材料	供气管道长度/m	排水管道长度/m
上瓦楞辊	380	77.5	48CrMo	2.2	1.2
下瓦楞辊	340	70	48CrMo	2.4	1
压力辊	394	56	45号钢	1.6	1.8
芯纸热缸	400	11	45号钢	3	0.8
面纸热缸	400	11	45号钢	1.3	3.5

表2 计算结果

Tab.2 Calculation results

	传热量/(kJ·s <sup>-1</sup> )	冷凝水量/kg	用热单元压降/Pa	供气管道压降/Pa	排水管道压降/Pa	支路总压降/Pa
上瓦楞辊	47.1	0.023	10977.9	536.6	7.04	11521.5
下瓦楞辊	44.3	0.022	10869.3	562.5	5.37	11437.2
压力辊	62.9	0.031	11225.7	744.6	32.8	12003.1
面纸预热缸	119.5	0.057	11642.9	6687.1	74.4	18404.4
芯纸预热缸	119.5	0.057	11642.9	4012.2	126.1	15781.2

纸预热缸的排气管道压降差最大可达6.97 kPa,这将导致瓦楞辊所在支路中,压力较高的用后蒸汽堵塞芯纸预热缸所在支路的排气,热缸内的冷凝水不能顺利排出,长久下去,支路上疏水不畅的问题扩散影响到整个蒸汽系统,导致用热单元表温上不去,需要不时打开备用疏水阀对外部直接排水而浪费能源,因此需要对管道进行重新设计布置。

根据计算结果分析可知,上、下瓦楞辊和压力辊各自所在的支路总压降大小十分接近,只相差84.3 Pa,并联排气几乎不受影响,可以统一连接到集汽包内;辊组用热单元中的冷凝水量相比预热缸比较小,

其蒸汽品质比较高,除掉水分之后可以二次利用,提高了蒸汽利用率。

依照分析结果对蒸汽系统进行改造,重新设计布置的气路见图4。

在新方案中通入汇汽包处的支路管道长度并未发生改变,而通入集汽包2条支路的压降值差距降为24.3 Pa,相比旧方案的压差6.97 kPa下降了近99%,支路之间的压强影响几乎可以忽略,疏水不畅的故障问题被消除。此外,集汽包内的用后蒸汽经过汽水分离器除掉了水分并提升了蒸汽品质,将辊组使用过后的二次蒸汽继续供给热缸组使用,达到了蒸汽二次利

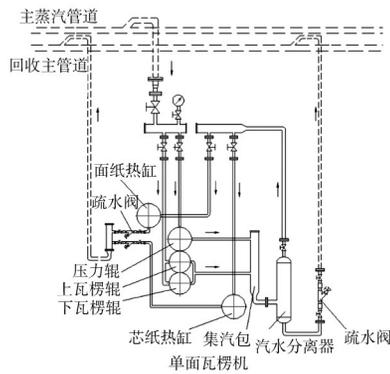


图4 优化气路布置

Fig.4 Arrangement of gas circuits after optimization

用、节约蒸汽能源的目的。

## 4 结语

建立了瓦线蒸汽系统压降数学模型计算,通过压降模型计算,找出了工程实例中的问题所在,根据计算结果重新布置系统蒸汽管道,排除了问题故障,并实现了二次蒸汽再利用,降低了能耗。通过蒸汽系统压降数学模型,可以对整个瓦线蒸汽系统的流量和压降情况进行计算分析,为企业自主研发高效节能的瓦线蒸汽系统提供了理论分析依据。

## 参考文献:

- [1] LIN Bo-qiang, MOUBARAK M. Estimation of Energy Saving Potential in China's Paper Industry[J]. *Energy*, 2014, 65(1): 82—189.
- [2] ANONY M. Global Corrugated Board Market To See 5% Growth to 2015[C]// *Paper, Film and Foil Converter*, 2010.
- [3] 巩桂芬,贾丽平. 关于瓦楞纸板质量控制的研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(19): 126—128.  
GONG Gui-fen, JIA Li-ping. Study of Corrugated Board Quality Control[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(19): 123—128.
- [4] 年鹤. 瓦楞纸箱生产碳足迹的计算方法与实例分析[J]. *包装工程*, 2012, 33(5): 86—89.  
NIAN He. Calculation and Case Analysis of Carbon Footprint in Corrugated Carbon Production[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(5): 86—89.
- [5] 杨皓,杨小俊,张昌汉. 瓦楞纸板生产线的蒸汽系统建模[J]. *包装工程*, 2010, 31(17): 97—100.  
YANG Hao, YANG Xiao-jun, ZHANG Chang-han. Modeling for the Steam System of Corrugated Board Production Line[J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(17): 97—100.
- [6] 陈光群. 瓦楞纸板生产线的技术改造和实践[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.  
CHEN Guang-qun. Technological Transformation and Practice of Corrugated Board Production Line[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [7] 舒清飞,张勇. 卧式旋转筒体内液体稳定运动的试验研究[J]. *流体机械*, 2008(12): 7—10.  
SHU Qing-fei, ZHANG Yong. Experimental Investigation on the Stability of the Rimming Flows Inside the Horizontally Rotating Cylinder[J]. *Fluid Machinery*, 2008(12): 7—10.
- [8] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
YANG Shi-ming, TAO Wen-shuan. Heat Transfer Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [9] BUJAK J. Energy Efficiency in the German Pulp and Paper Industry—A Model-Based Assessment of Saving Potentials[J]. *Energy*, 2012(1): 84—99.
- [10] FLEITER T, FEHRENBACH D, WORRELL E, et al. Energy Efficiency in the German Pulp and Paper Industry—A Model-Based Assessment of Saving Potentials[J]. *Energy*, 2012, 40(1): 84—99.
- [11] LAURIJSEN J, GRAM F J D, WORRELL E, et al. Optimizing the Energy Efficiency of Conventional Multi-Cylinder Dryers in the Paper Industry[J]. *Energy*, 2010, 35(9): 3738—3750.
- [12] 孔令波. 纸页干燥过程传热传质数学模型的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
KONG Ling-bo. Study of the Mathematical Model of Heat and Mass Transfer in Paper-Drying Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [13] 林治作. 纸页干燥过程建模研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
LIN Zhi-zuo. Research on Modeling of Paper Sheet Drying[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 陈克复. 制浆造纸机械与设备[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.  
CHEN Ke-fu. Pulp and Paper-Making Machinery[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2011.
- [15] 贺平,孙刚,王飞,等. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
HE Ping, SUN Gang, WANG Fei, et al. Heat Supply Engineering[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.