

- [2] Garrett M. Odell and Leslie S. G. Kovaszany, *J. Fluid Mech.* 50, Part 3, (1971), 535—543.
 [3] C. Gary Koop, *J. Fluid Mech.* 113 (1981),

347—386.

(本文于1983年6月4日收到)

节 能 射 流 泵

郑之初

(中国科学院力学研究所)

在纺织印染行业中蒸汽的消耗量很大,如何减小蒸汽消耗或高效地利用它是节能工作的重要环节。蒸汽经过烘筒后温度降低变成了高温的冷凝水,过去它是作为废水排放的,一台机器每小时大约要排走400—500公斤温度为95℃—98℃的冷凝水。另外,机器在执行各种工序的操作过程中又必须不断补充自来水,再用蒸汽把它加热,如果有一种简单的装置能把排放的冷凝水收集起来,补充能量重新流入机器内循环使用,这是既节能、又节水、还可改善车间工作环境的一个好措施,节能射流泵是满足上述要求的一种节能设备。

但是要设计一台高效的节能射流泵并不容易,因为经过疏水器后的冷凝水压力很低,有时表压几乎接近于零;根据不同的工艺要求自来水用量的变化范围也很大,加上季节与各车间满载及不满载时自来水压力有较大的波动和对混合水的爬升高度及混合温度又有一定的要求,因此,一直没有一台高效和理想的冷凝水回收装置。

前一时期,一些印染厂,如上海绒布厂,光华印染厂的节能组都设计或采用过几种形式的射流泵,如图1所示,在回收冷凝水方面收到了一定的效果,但也存在着一定的问题。像图1(a)、(b)所示的引射器它们基本上属同一类型,也就是市面上购买的冷热水交换器,尽管价格便宜,但引射量小、爬升高度低、混合后的水温也低,基本上不适合印染行业中使用。图1(c)所示的射流泵,虽然基本上达到了回收冷凝水

的要求,由于带了一个 $\phi 500$ 毫米的贮水筒,既损失了能量和热量使爬升高度和混合后的水温受到一定的影响;同时,结构复杂、安装困难、而且不能多级使用,因此影响它在要求爬升高度较高的工序如淋喷等方面的使用。

中国科学院力学研究所总结分析了上绒厂设计和使用射流泵的情况,与上海市民用建筑设计院和上海绒布厂联合研制了LJ-1型和LJ-2型圆筒形混合室射流泵,该设备由无锡荡口节油设备厂制作,目前已在上海绒布厂和光华印染厂二个单位的几台机器上顺利运行。

LJ型圆筒形混合室射流泵是一个低压液体的引射装置,由引射器和喷射器二部分组成,略如图2所示。它的工作原理是用普通的自来水作为引射水,经喷管加速在圆筒形混合室中造成一个均匀的低压区,从而把机器中排出的微压冷凝水引走,混合后的二股流体经过喷射器,一方面将冷凝水与自来水均匀混合,另一方面以最小的能耗把动能转化为势能,然后使混合水流入指定的地点。图3和图4给出了二种印染机上试用的回收冷凝水方案,图3给出了流入平洗槽的现场调试布置图,图4给出了混合水用于淋喷的现场调试布置图。

按照无粘、不可压缩一元流动理论,用控制面法见图5,考虑1-1, 2-2二个控制面,用连续方程:

$$Q_1 = Q_2 = \text{常数} \quad (1)$$

和伯努利方程:

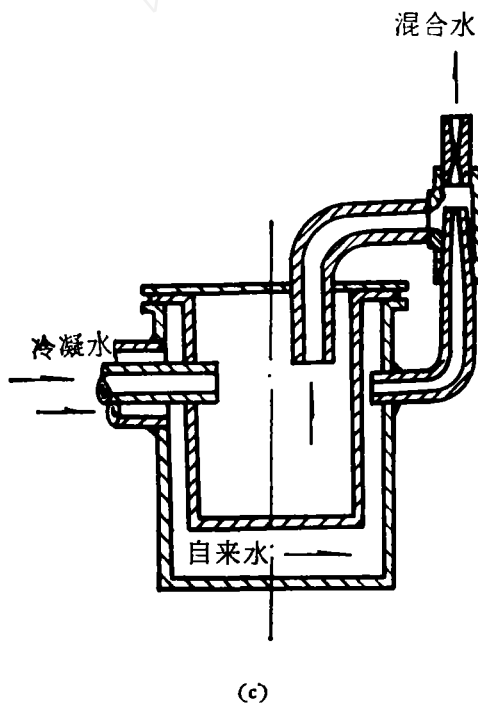
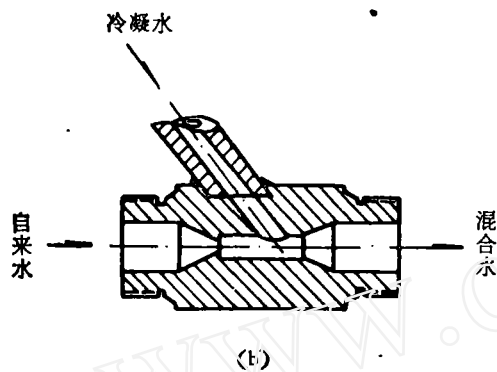
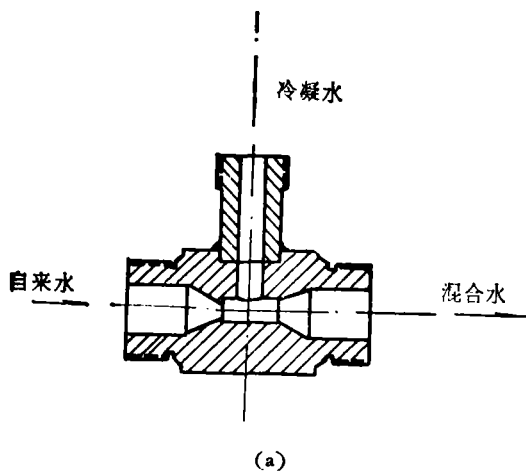


图1 使用过的各种形色的射流泵

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 = \text{常数} \quad (2)$$

其中

$$Q_1 = Q + Q_c, \quad Q = \rho v(F - f_c), \\ Q_c = \rho v_c f_c, \quad Q_2 = v_2 F.$$

由上述方程推得了射流泵后理想流体无量纲的爬升高度和效率公式:

$$\bar{H} = H_{CH} / \frac{v_c^2}{2g} \\ = \frac{2}{S} \left[1 + \frac{1}{S-1} q^2 - \frac{1}{S} (1+q)^2 \right] \quad (3)$$

$$\eta = q \left[\frac{2}{S} + \frac{2}{S(S-1)} q^2 - \frac{2}{S^2} (1+q)^2 \right] \quad (4)$$

其中 $S = F/f_c$, $q = Q/Q_c$, Q_c 为引射水流量, F 为喷射器喉道面积, f_c 为引射器喷管出口面积, H_{CH} 为理想的爬升高度. 图6和图7分别给出了理想无量纲爬升高度 \bar{H} 和效率 η 随流量比 q 和面积比 S 的变化关系. 从图6中可见面积比 S 愈小 \bar{H} 愈大, 引射水的流量 Q_c 不变, 喷管出口面积愈小则 v_c 愈大, 爬升高度也愈高, 因此通常设计射流泵都采用大 v_c 和小 s 的设计方案, 然而实际效果往往并不理想, 其原因主要是没有考虑粘性影响以及在结构设计时没有保证射流泵内流体的流动必须符合计算时采用的一元流动情况.

我们从下述二方面考虑粘性影响:

1. 射流泵的实际爬升高度 \bar{H}_* 应为

$$\bar{H}_* = \bar{H} - h_a - h_b - h_c - \Sigma h_i \quad (5)$$

其中 h_a 为吸入腔粘性损失, h_b 为混合段损失, h_c 为扩压段损失, Σh_i 为射流泵系统的损失, 它与系统中使用的管子长度、三通、弯管、收缩与扩张段等的数量有关.

$$\Sigma h_i = \Sigma \Delta p_i / \rho g \quad (6)$$

而 $\Sigma \Delta p_i = \xi_i \frac{v^2}{2g} \cdot r \cdot 10^{-4}$ (公斤/厘米²), 其中 ξ_i 为管道摩擦损失及各段的局部损失, 随着流

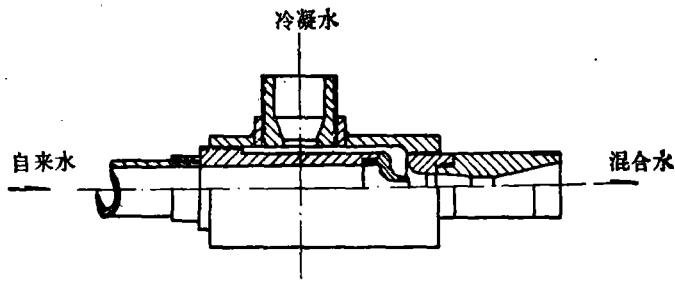


图2 L.J型圆筒形混合室射流泵

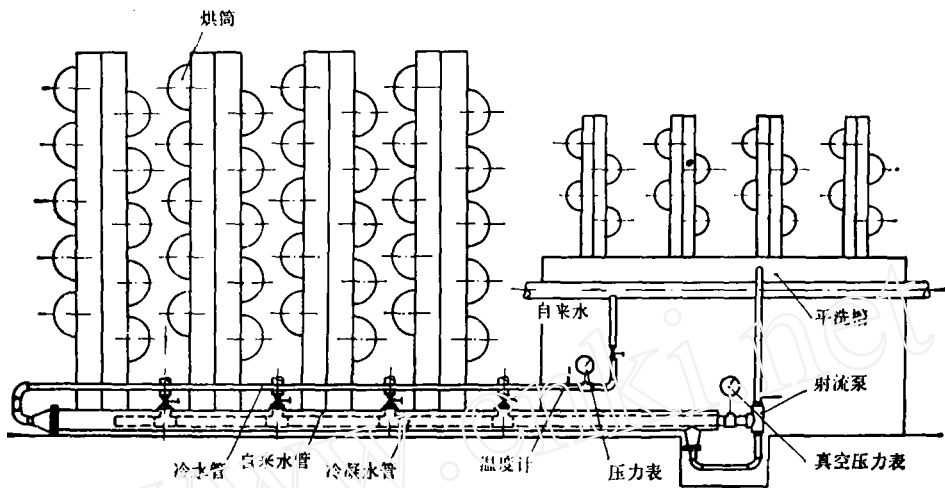


图3 烘筒废水回收入平洗槽调试图

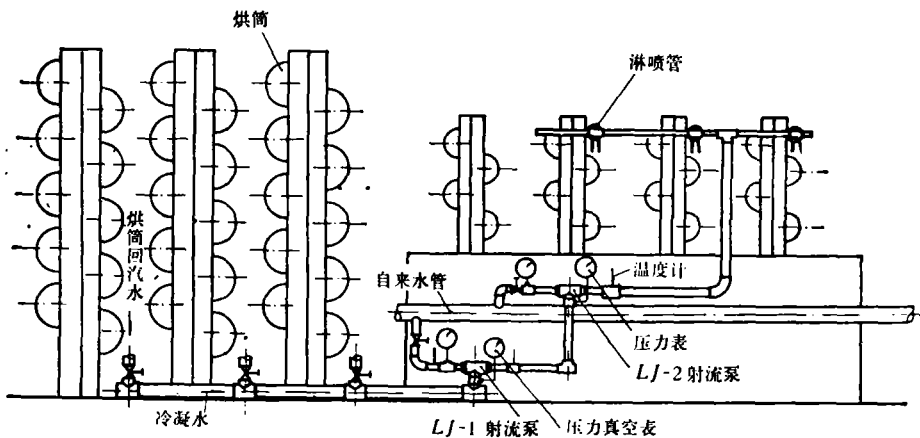


图4 烘筒废水回收供淋喷现场调试安装示意图

速的增加,粘性损失大大地增加,因此,为了得到较高的爬升高度,必须选择合适的管径及喷管的出口尺寸。

2. 考虑粘性对管内速度分布的影响,由于粘性的作用壁面处速度为零,因此必须对无粘

流动计算得的面积作粘性修正。

上述二方面的原因使射流泵喷管的出口尺寸和面积比 S 的值不能太小,否则粘性的影响将使有效的爬升高度大大降低。此外,由于操作工艺的不同 q 值有一定的变化范围,由图 6

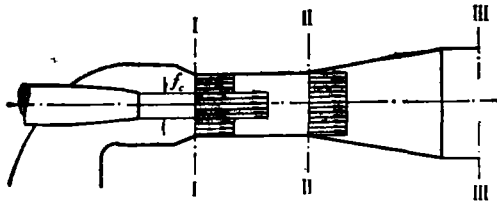


图5 射流混合示意图

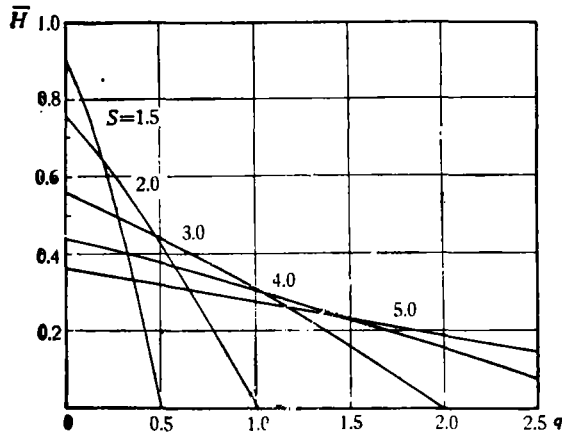


图6 无量纲爬升高度随流量比变化关系

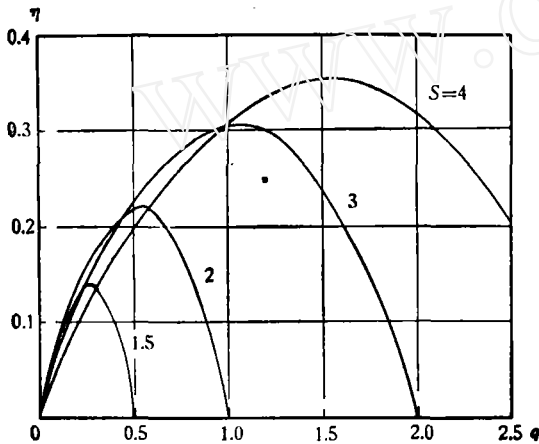


图7 效率随流量比变化关系

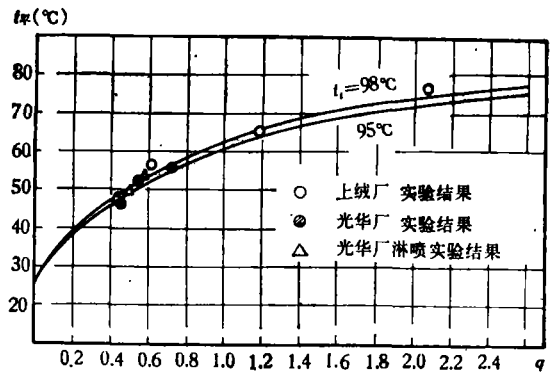


图8 计算与实验温度比较

和图7可见,要得到 \bar{H} 和 η 的最佳值,必须选择合适的 S 值,而此 S 值也不宜过小。

在射流泵的结构设计方面,手册上推荐的喷管,为了加工简单都采用圆锥形,这对水流的轴向加速与截面上速度的均匀分布都不利。我们的射流泵,在引射器中采用型线喷管和型线混合腔。在喷射器中采用小扩张角以减少能量损失。上述这些措施使LJ射流泵结构简单、效率高,采用不锈钢材料不污染水质,在下述工况下通过自来水流量调节可满足不同工艺要求,并保证把每小时500公斤的冷凝水全部引走。引射水(自来水)压力 $p_c > 0.5$ 公斤/厘米²(表压),被引射水(冷凝水)压力 $p_s \geq 0.05$ 公斤/厘米²(表压),流量比 $q \leq 1$,总流量 $Q_1 \leq 2000$ 公斤/小时,爬升高度 $H \leq 1$ 米。通过LJ-1、LJ-2射流泵的组合(见图4)在总流量 Q_1 约为1200公斤/小时而其他工况类似的情况下,能将400—500公斤/小时的冷凝水引向 $H \leq 1.3$ 米处实现三排淋喷。实践证明:在 p_c 、 p_s 稍高的情况下采用合适的管路系统,使用单个射流

表1 上绒厂实验结果

地点	时间	t_c	t_s	Q	Q_c	t_w (°C)		节水	节能	节煤	锅炉效率	备注
		(°C)	(°C)			(实验)	(计算)					
上绒厂	83.5.12	27°	98	500	800	57	54.3	3000	2.34×10^8	55.7	0.70	
上绒厂	83.6.	26	98	500	240	76~78	74.6	3000	2.26×10^8	53.9	0.70	
上绒厂	83.6.18	26	98	500	420	68~65	65.2	3000	2.17×10^8	51.6	0.70	

表 2 光华厂实验结果

地点	时间	t_c	t_i	Q	Q_c	$t_{\text{平}}(\text{°C})$		节水	节能	节煤	锅炉效率
		(°C)	(°C)	(公斤/小时)	(公斤/小时)	实验	计算	(吨/年)	(大卡/年)	(吨/年)	
光华厂	83.6.20	26	95	495.7	692.3	56	54.8	3000	2.13×10^8	50.9	0.70
光华厂	83.6.20	26	95	450	1000	46	47.4	2700	1.74×10^8	41.4	0.70
光华厂	83.7.3	26	95	434	800	53	50.3	2600	2.00×10^8	47.8	0.70
光华厂	83.7.18	26	95	390	680	54	51.1	2340	1.80×10^8	42.9	0.70
光华厂	83.7.24	26	95	390	900	48	46.9	2340	1.70×10^8	40.5	0.70
光华厂	83.7.27	26	95	390	660	56	51.7	2340	1.89×10^8	45.0	0.70

泵也能满足淋喷要求。

混合后水的温度是直接影响到节能射流泵节能指标的重要数据，从图 3 的系统可知：自来水冷却冷凝水的措施可以提高进入射流泵引射水的温度，本文假设：管子的传热损失使水温下降值恰好等于粘性损失使水温升高的值，由此可以求得混合后的水温 $t_{\text{平}}$ ：

$$t_{\text{平}} = \frac{t_c + qt_i}{1 + q} \quad (7)$$

其中 t_i 为被引射水(冷凝水)温度， t_c 为引射水(自来水)温度，图 8 给出了计算与目前得到的实验结果的比较，由图可见：计算与实验结果吻合较好，误差在 5% 左右，由于受工厂车间的环境条件、操作工艺、季节等因素的影响，冷凝水温度 t_i 可在 94—98°C 范围内变化， t_c 也可在 15—26°C 范围内变化，因此混合水的温度在 q 值相同的情况下，还要受到上述这些因素变化的影响。

下面介绍一种计算节能的方法，即：

$$Q = c_p \times Q_1 \times (t_{\text{平}} - t_c) \times T \quad (8)$$

其中 c_p 为水的热容量， T 为射流泵工作时间，根据表 1 和表 2 给出的试验结果，如果机器每天工作 20 小时，每月工作 25 天，可以算得使用射流泵后每年节省的水量和热量，按中国无烟煤标准热值为 6×10^6 大卡/吨，设锅炉效率为 70%，可以算得每年每台射流泵节煤的数量，表 1、表 2 中也给出了上绒厂和光华厂整机调试实测温度及流量得到的节能效果，可见射流泵节能效果是很显著的，射流泵的投资费用约 300 元，在一个多月的节煤和节水费用中即可回收。

以光华厂为标准，该厂拟用 9 台射流泵(需要量属中等)每年可节煤 400 吨，节水 22500 吨，经济效益为二万二千多元，上海印染公司下属有 26 个厂，整个公司每年可节煤一万吨，节水约 60 万吨，经济效益为 59 万元。纺织厂遍及全国，如果全面推广使用，对当前的节能工作将有一定的促进作用。

上述射流泵通过改变引射器和喷射器的尺寸和设计参数，还可使用于蒸汽、空气、固气二相等不同介质，因此它在纺织、化工、建筑、航空、医药、农业等部门甚至在商品性的冷热水混合器中都能得到广泛的应用。

最后，本文指出使用射流泵注意事项：

1. 在冷凝水流量一定的情况下，按总流量大小及爬升高度选择射流泵的型号。
2. 选择合适的射流泵管路系统的管径，尽量减少系统的收缩、扩张及转弯部分，尤其是冷凝水引出管，尽量减少沿程损失，一般情况可按调试图施工。
3. 在实施三排淋喷时，注意各淋喷管应保持相同高度，不要倾斜，以免影响出水均匀。

作者对陆士信、金志棠同志在提出和介绍课题，赵秋生、王效中等同志在结构设计、加工制造方面认真及时的配合，以及上海绒布厂和光华印染厂能源组同志在射流泵现场调试中付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。

(本文于 1983 年 8 月 20 日收到)