

丙纶短纤维大型环吹风纺丝头浅析

蔡致中

(辽阳石油化纤公司纤维二厂)

对大型环吹风喷丝头的结构、设计原理及运行参数进行了讨论。测定并计算了不同纤度条件下喷丝板面孔分布密度、喷孔流速、喷孔切变速率、纺丝拉伸倍数、吹风口风量与风速分布、冷却效率与热平衡等。并与矩形喷丝板横向吹风冷却进行了对比。提出了优缺点及合理使用该装置的方向。

关键词：环吹风 喷丝头 密度 切变速率

近年来，我国各地从意大利引进了几套大型环吹风丙纶短纤维纺丝设备。辽化纤维二厂从莫登公司引进的八位纺丝机是其中最大的一台，已于1988年末投入生产，产品产量与质量已基本达到合同要求。通过试车，对这种大型环吹风纺丝头有了一些粗浅认识。

1 大型环吹风纺丝头的结构与特点

这种纺丝头是意大利莫登公司顾问 Mario Miani 博士在 1981 年取得的一项专利，已在美国登记^[1]，见图 1。熔体自入口 1 进入纺丝头，经分配腔 2 均匀地流向四周，经分配环 4 再流向环形喷丝板 3。环吹风自纺丝头中心下侧 5 引入，经空气分配器 6，沿环吹风口 8 喷向自环形喷丝板 3 下落的丝束。

1.1 这种纺丝头的几个特点：

a. 熔体自入口 1 至每一个喷丝孔的行进距离几乎相等，这就避免了矩形板或普通大型圆形板熔体行进距离不等，停留时间不等而造成的纤维质量不匀的缺点。

b. 熔体分配腔大体呈圆锥形（见图 2）。据 Mario 博士介绍，其设计原则是熔体离中心任何部位与腔壁的切变速率保持恒定。图 2 中， h 为离中心 r 处的腔高， r 与 h 必须服从下列公式： $\dot{\gamma} = \frac{6Q}{2\pi rh^2} = \text{常数}$ 。

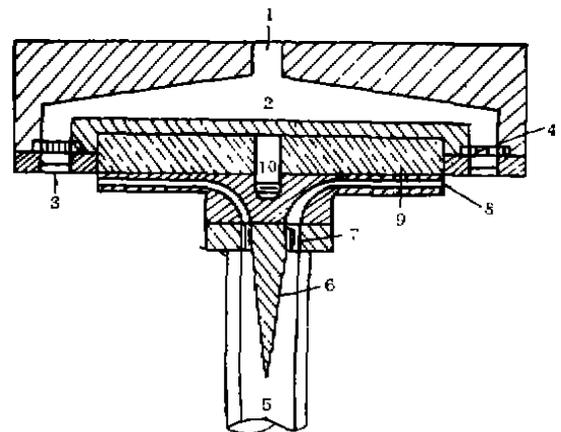


图 1 环吹风结构示意图

1—熔体入口； 2—锥形熔体分配腔； 3—环形喷丝板；
4—熔体分配环； 5—环吹风入口管； 6—空气分配器；
7—导流环； 8—环吹风出口； 9—隔热石棉层；
10—高度调节螺栓

其理由为：在熔体粘度（或温度）相同的条件下，只要 $\dot{\gamma}$ 相同，则熔体受到的阻力相同，就可以保持熔体流动的稳定性，从挤压机到纺丝组件熔体管道的设计也服从这一规律。

c. 由于以上两个原因，可以使喷丝板孔与孔之间熔体质量差异减至最少，从而提高孔排列密度，减少孔与孔之间的距离成为可能，生产能力也可大大提高，孔数最多可达 73800 孔。

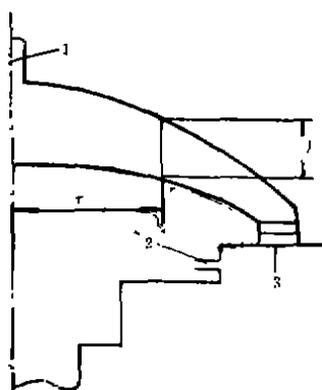


图2 流体分配腔示意图

1—熔体入口；2—吹风口；3—喷丝板

d. 将成形的丝束分为两半，在下部用两个输出辊引至牵伸机构，这样就可以在两片丝束中间引入吹风管，使从内向外吹风方式成为可能。

e. 由于冷却空气由内向外吹，被加热的空气在大气中自然扩散，避免了向内吹风时排风相互干扰而影响板面温度与丝条质量的均匀。

2 工艺剖析

在试车中共试纺了4个品种，有关纺丝的基础数据与联邦德国Automatik公司矩形纺丝头进行对比，见表1。

表1 纺丝工艺基础数据表

项 目	环 形 板				矩 形 板 [2]	
	1.0	2.4	5.5	15	6.7	17
纤度(dtex)	1.0	2.4	5.5	15	6.7	17
负荷率(%)	80	100	100	65	100	100
喷丝板孔数(个)	73800	73800	37200	18144	11260	5672
孔径(mm)	0.35	0.35	0.4	0.6	0.7	1.0
孔长(mm)	2.2	2.2	2.5	3.0	3.5	4.0
长径比	6.29	6.29	6.25	5.0	5.0	4.0
孔分布密度(mm ² /孔)	0.381	0.381	0.755	1.550	1.560	3.195
计量泵规格(cm ³ /r)	150	150	150	150	45.88	45.88
计量泵转数(r/m)	7.2	18.8	18.5	10.9	20.21	20.18
每孔流量(cm ³ /(s×10 ⁻³))	0.244	0.637	1.24	1.50	1.370	2.724
喷孔流速(m/min)	0.1520	0.3973	0.5920	0.3183	0.2135	0.2082
纺丝拉伸倍数	300	121.6	53.4	38.1	154.38	117.2
输出辊速度(m/min)	45.6	48.3	33.4	14.4	32.96	24.4
切变速率 $\dot{\gamma} = 4Q/\pi R^3$	57.97	151.34	197.35	70.74	40.68	27.75

2.1 纺丝工艺特点

a. 这种纺丝头是丙纶短程纺低速多孔纺丝工艺的进一步发展。由于采用环形喷丝板使熔体均匀性增加了，从而使孔的分布密度进一步增加。纺同一类型纤度的环形板孔密度几乎比矩形板大一倍，这就为多孔化创造了条件。实际上同一纤度每块喷丝板总孔数环形板是矩形板的三倍以上。

b. 由于短程纺多孔喷丝板均无导孔，所以孔长即为板厚，而板厚又与喷丝板强度

有关。矩形板有孔部分宽度为38mm，而环形板则仅24mm。因此，在采用相同材料即同一机械剪切强度与抗弯强度条件下，环形板的板厚可以比矩形板薄，这有利于喷丝板孔径与长径比的设计。因为从工艺角度讲，丙纶要求长径比越大越好，而喷丝板的加工工艺又限制了长径比的增加。亦即减少板厚可以在机械加工可能范围内缩小孔径，这对纺细旦丝是必要的。由表1可见，纺同一纤度的环形板孔径比矩形板小一半左右。

c. 由于环形板孔径比矩形板小, 熔体在喷孔壁上的切变速率就相应增大, 17dtex 时增大一倍, 而 6.7dtex 时则增加四倍, 达到 195s^{-1} 。但其绝对值仍大大低于传统纺的 1000s^{-1} 水平, 更远远低于丙纶切变速率临界值 3000s^{-1} 水平, 所以不会由此产生熔体破裂现象。当然对于分子量分布宽与可纺性差的聚丙烯切片来说, 环形板遇到的问题会比矩形板多些。

d. 环形喷丝板孔中熔体流速较快, 而输出辊或第一拉伸辊速度较低, 所以使纺丝拉伸倍数比矩形孔板低得多。17dtex 纤维拉伸倍数从 117.2 倍降至 38.1 倍, 6.7dtex 纤维拉伸倍数从 154.38 倍降至 56.4 倍, 这一现象应该说是利弊各半。有利的是纺丝拉伸作用缓和, 可以减少由于熔体不均匀而造成的不均匀拉伸现象, 结晶过程缓和, 有利于大分子之间的松弛平衡与以后拉伸性能的改善。不利的是喷丝孔口的膨化效应相应增加并由此产生不均匀拉伸, 初生纤维的定向度不足。实际证明环吹风设备生产的纤维在制成针刺地毯时其回弹性能不如矩形板设备生产的纤维, 纤维的刚性较差, 似乎与此有关。

3 环吹风冷却剖析

丙纶一步法低速多孔纺丝采用高风速冷却方法已经实践证明是有效方法^[2], 而自内向外的环吹则是进一步发展。其特点是风速更高, 冷却更强烈。由于是向外排放, 热空气在四周自然扩散, 所以不受排风方式限制。

这种冷却方式的调节参数较多。除风量(风机转数)外, 还可调节冷却吹风口宽度, 冷却风出口与喷丝板面距离。但风源只取室内风, 因为在高速空气冷却高温丝条时, 冷却空气温度对温差 Δt 影响较小, 这样就可以简化由结构复杂而造成价格昂贵的空调装置。

为了更确切地推导环吹风过程中丝条冷却情况, 首先把冷却风的运动规律进行剖析

(见图 3)。图 3 中 w 为风口宽度, a 处为吹风口, 其相应风速为 V_a 。 b 为环形丝束内侧, 风速为 V_b 。 c 为环形丝束外侧, 风速为 V_c 。空气从吹风口出来后, 以 α 角向上下扩散, 同时以扇形向四周扩散, 如果不考虑由于风压下降而导致的体积膨胀(压力低时可以忽略), 离环吹风口不同距离的吹风同心环的面积将与风速成反比, 以此推导出 a 、 b 、 c 三处的风速关系。

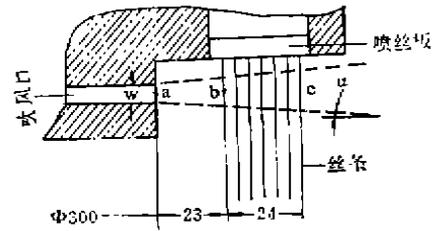


图3 环吹风冷却区示意图

w —吹风宽度; a —吹风口; b —环形丝束内侧; c —环形丝束外侧

设环吹风口宽度为 w , 离环吹中心为 R , 环吹风出口面积为 $2\pi R w$, 离环吹风口距离为 w 的 n 倍处的吹风面积为:

$$2\pi(R + nw)(w + 2nwtg\alpha) =$$

$$2\pi w(R + nw)(1 + 2ntg\alpha)$$

$$\frac{\text{离环吹风口 } nw \text{ 处的吹风面积}}{\text{宽度为 } w \text{ 的吹风面积}} = \frac{V_a}{V_{nw}} =$$

$$(R + nw)(1 + 2ntg\alpha)/R = Z$$

Z 为风速比。由于 ab 与 bc 间距离是固定的, $ab = 23\text{mm}$, $bc = 24\text{mm}$, 而 w 值是随纤度而调整的, 所以 n 值也随纤度而变化。

从环吹风风机进风量与进风管内测得的风速数据计算出吹风口风量与风速 V_a , 然后与实际测得的 V_b 与 V_c (V_a 因位置与风速计量程限制而不能直接测得) 推算出吹风倾角为 7.34 度。从而可以推算出不同纤度的环吹风工艺数据。由表 2 所列数据可知:

a. 吹风口风速非常高, 纺粗旦丝时在 30m/s 以上, 纺细旦丝时达 66m/s 。比矩形板

表2 不同纤度环吹风工艺数据

纤度 (dtex)	2.8	6.7	17
吹风口宽度 w (mm)	7.5	8.0	11.0
吹风口风速 V_a (m/s)	63.2	52.0	34.9
b处风速 V_b (m/s)	33.6	26.0	20.4
c处风速 V_c (m/s)	19.9	15.8	13.4
风量 (m^3/s)	0.3323	0.3045	0.2990
风机转速 (r/min)	1800	1650	1620
n ab	3.06	2.875	2.09
n ac	6.27	5.875	4.27
Z_{ab}	1.99	2.01	1.71
Z_{ac}	3.22	3.3	2.61

纺丝时的 5 m/s 高出 20 倍, 比传统纺高 100 倍以上。风口宽度很小, 冷却速度很高。这是由于短程纺速很慢, 有可能在短时间 (距离) 内冷却, 而高速冷却则有利于次晶结构的形成, 对拉伸有利, 因此更适合于纺细旦纤维。另一方面, 横向强烈吹风冷却会使丝条迎风面与背风面的冷却速度不同, 从而形成不同的轴向与径向温度梯度, 而拉伸粘度又与温度梯度有关, 即

$$\frac{\eta^*}{x} = \frac{d\eta^*}{dT} \cdot \frac{dT}{dx}$$

式中 η^* ——拉伸粘度;
 x ——轴向距离,

T ——温度。

由于丝条两侧冷却速度的差异, 导致丝条结晶状态的差异, 这就赋予丝条以潜在卷曲的性能。实际观察丝束在拉伸后卷曲前已有不同程度的卷曲出现, 与国外某些以同一原理生产超膨体纤维的设备相似。但这种纤维的刚性则较差。

b. 由于环吹风口风速较高, 空气会在较高压下吹出时进行一定的减压扩散, 加上向外呈扇形扩散面的影响, 使丝条内外层风速相差很大, 接近一倍。这种冷却速度的差异会导致纤维质量的差异, 使各种不匀率增大, 这是一个缺点。另外, 风速过快会使环吹外层丝条的薄弱处吹断而造成并丝。

c. 这种冷却机构可以调节的参数为: 风机转数, 风温, 风口宽度以及风口离喷丝板面距离。调节方法简单易行, 可以组合成各种方案以满足不同纤维规格品种的质量要求。环吹风上侧与喷丝板间距离一般为: 2.8 dtex 以下, 细旦纤维 5—6.5 mm; 6.7—17 dtex 以上粗旦纤维 6—9 mm。这个距离太小会将未固化的外层丝束吹散形成并丝, 并且易受喷丝板组件与保温圈的辐射热的影响。距离太大会使丝条成形不稳定, 造成不均匀的纺丝拉伸从而影响纤维质量。冷却风

表3 环形吹风与侧吹风风量计算数据

项目	环 形 板			矩 形 板		
	2.4	5.5	17	3.3	6.7	17
纤度(dtex)	2.4	5.5	17	3.3	6.7	17
喷丝板孔数(个)	73800	37200	18144	21312	11230	5572
负荷率(%)	70	100	65	100	100	100
计量泵转数(r/min)	13.2	18.0	13.8	20.18	20.24	20.2
拉伸速度(m/min)	82	103	44.8	122.6	119	81.5
每位熔体流量(kg/min)	1.485	2.2025	1.5525	0.6925	0.6925	0.6925
每孔熔体流量(g/(min $\times 10^{-2}$))	2.01	5.92	8.56	3.25	6.15	12.2
每位风量(m^3/s)	0.3233	0.3045	0.2990	0.059	0.048	0.094
每孔风量($m^3/s \times 10^{-6}$)	4.38	8.188	16.48	3.25	4.26	16.57
每孔风量($m^3/min \times 10^{-2}$)	0.026	0.049	0.099	0.019	0.025	0.099
折合每克风量($m^3/(g \cdot 10^{-2})$)	1.29	0.827	1.16	0.585	0.405	0.811

量计算结果与矩形板纺丝对比如表3。

由表3可见：大型环吹风纺丝头冷却风量（每克熔体风量）普遍高于矩形板的需风量，尤以细旦丝为甚。其原因为环吹风风速越高，热传递效率越低，所以必须增大风量来达到冷却目的。但风速过大易使丝条不稳定，特别是在外侧，这是环吹风工艺中必须统筹兼顾的问题。另外，又测定了环吹风区内空气温度，发现由于吹风区离喷丝板与组件很近，其幅射热影响很大，所以无法测得正确的空气温度。实测进风空气温度为20℃，纺丝丝条内侧为35℃，外侧为49.5℃，离外侧30mm处为73℃，说明幅射热影响很大。这种幅射作用加剧了内外层温差。实测温差为14.5℃，而根据熔体传递热量（自230℃降至120℃）折算其温差为11.6℃。

4 小结

4.1 大型环吹风纺丝头的优点

a. 熔体分配均匀性好，可保持每一个喷丝孔熔体状态（压力、速度、停留时间等）基本一致。

b. 环吹风可使圆周任何一处的风速一致。（但必须保持圆周上任何一处的吹风口

宽度一致）。

c. 环吹风的结构有利于提高板面孔密度，使每位孔数大大提高，能力增加。

d. 可以获得有一定潜在卷曲性能的纤维。

4.2 大型环吹风纺丝头的不利因素

a. 由于环吹风纺丝头能力增大，迫使冷却风量增加，风速加大，再加上空气扇面扩散，使丝束内外层风速相差太大，导致冷却不匀。

b. 冷却区离喷丝板面与保温环太近，幅射热影响冷却效果。

c. 每个纺丝位均由单独电机加热，计量泵单独传动，易于产生位与位之间的差异。

4.3 要正确运用大型环吹风纺丝设备生产优质纤维，必须充分发挥其优势，加强管理，尽量减少由于上述不利因素造成的影响，寻求最佳生产条件，实行工艺优化。同时要密切与纺织部门配合，开发纺织品应用，特别是在细旦纺织用纤维与无纺布工业用纤维方面，还是有很大潜力的。

5 参考文献

- 1 US, 4 259 048
- 2 张敏等.《合成纤维工业》，1986, [5], 31

ANALYSIS OF LARGE SCALE CIRCULAR QUENCHING SPINNING HEAD FOR PP STAPLE FIBER

Cai Zhizhong

(No.2 Fiber Plant of Liaoyang Petrochemical Fiber Co., Liaoning)

ABSTRACT

The structure, design principle and operating parameter of large scale circular quenching spinning head are discussed. The density of orifice distribution on spinnerets, air flow speed in quenching gap, shear rate in spinneret orifice, draw ratio