

超临界流体染纱器现状与新型结构

王杰^{1,2}, 王威强^{1,2}, 郭德国³, 曲延鹏^{1,2}

(1. 山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山大鲁南超临界流体技术研究所, 山东 济南 250061; 3. 中国寰球工程公司, 北京 100029)

摘要:总结了超临界流体染纱器的现状,指出了存在的问题,提出了新型的连续式超临界流体染纱器,并给出了关键部件的设计计算方法及流场模拟优化。认为该染纱器具有操作简单、染色均匀、功能齐全等优点。

关键词:超临界流体染纱器; 新型结构; 双向染色; 连续式; 流场模拟

中图分类号: TQ05

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)07-0065-05

Current status and novel structure of supercritical fluid yarn-dyeing device

WANG Jie^{1,2}, WANG Wei-qiang^{1,2}, GUO De-guo³, QU Yan-peng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shanda-Lunan Research Institute of Supercritical Fluid Technology, Jinan 250061, China;

3. China Huanqiu Contracting & Engineering Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: The general situation of supercritical fluid yarn-dyeing devices is summarized in this paper, and the shortcomings of them are also pointed out. A new continuous device of supercritical fluid yarn-dyeing is put forward, and the design method of its key components and a CFD simulation of yarn chamber is given as well. The device is considered as simple operation, multi-function, homogeneity in dyeing, and so on.

Key words: supercritical fluid yarn-dyeing device; new structure; bi-directional dyeing; continuous; CFD simulation

超临界流体染色 (Supercritical Fluid Dyeing, 简称 SFD), 是以超临界流体代替水作为染料载体进行染色的一种新技术。超临界流体是指热力学状态处于临界压力和临界温度以上的流体, 和以水为介质的常规染色相比, 超临界流体染色具有工艺简单、流程短、无污水的优点, 成为人们竞相研究的重点。超临界流体染色器作为超临界流体染色装置的核心设备, 其先进性直接影响着整个装置的工艺流程和性能。

1 超临界流体染纱器现状

相对于超临界流体染色工艺研究, 现阶段对超临界流体染色装置的研究较少。染色装置中的核心设备是染色器。根据其染色对象的不同, 染色器可分为染纱器和染布器。目前无论是既可以染布又可以染纱的染色器还是专用染纱器研究的都较少。

孙传经等^[1]发明了超临界二氧化碳染色工艺中的高压染色釜 (见图 1), Jasper Josef^[2]发明了

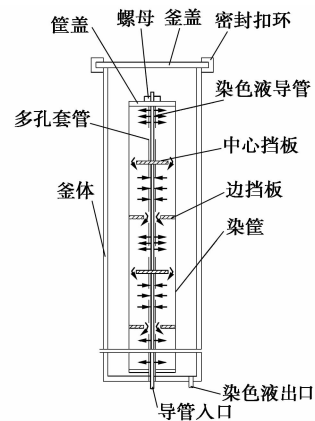


图 1 超临界二氧化碳染色工艺中的高压染色釜

纱线染整工艺中的染色釜 (见图 2)。这 2 个染色釜结构类似, 都是在染色釜中放置染色液导管, 导管外套有多孔管, 利用中心挡板和边挡板实现染色液或正或反穿过纱线团。这种染色釜虽然结构简单, 但是染色液单向穿过纱线团, 染色效果不好, 而且会在一定程度上造成染色液的短路。

收稿日期: 2010-02-03

作者简介: 王杰 (1979-), 男, 博士生, 从事超临界流体技术研究; 王威强 (1959-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事超临界流体技术研究、工程材料断裂与疲劳研究和失效分析工作, 通讯联系人, 0531-88395100, wqwang@sdu.edu.cn.

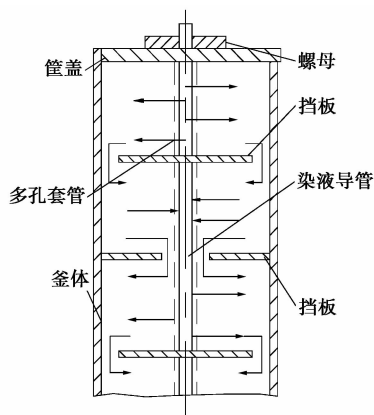


图 2 纱线染整工艺中的染色釜

郑来久等^[3]发明了一种超临界二氧化碳染色装置中的染色釜(见图 3),该设备是在密闭的容器内放置 1 个内筒,筒壁上均匀布置许多渗透孔,待染物缠绕在内筒上,控制系统控制染液换向来实现正向、反向穿过待染物。这种染纱器实现了织物内染与外染工艺的结合,具有匀染性高的特点,但是增加了控制系统,导致了工艺的复杂,而且无论采用轴流泵或是离心泵都存在不可避免的缺点。

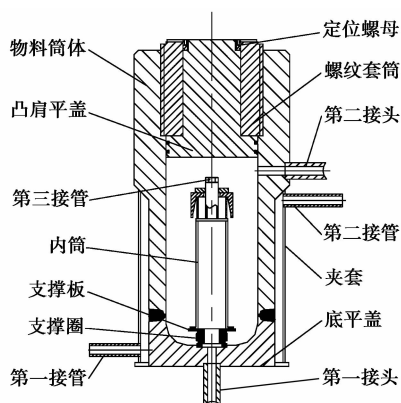


图 3 超临界二氧化碳染色装置中的染色釜

郭晓洁等^[4]也发明了一种超临界二氧化碳染色装置中的染色釜(见图 4),该设备虽然将染料釜与染色釜集成于一体,简化了输送管道,降低了流体流动阻力,但在染色的实现上与郑来久发明的染色

釜结构相似,靠控制系统控制染液换向对待染物正反上染。

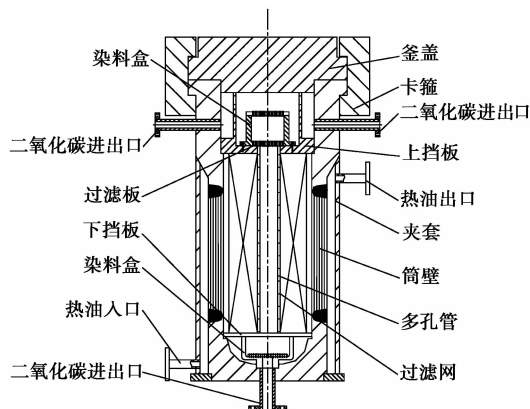


图 4 一种超临界二氧化碳染色装置中的染色釜

以上所有染色釜都为间歇式,生产效率不高,虽然可以采用并联多个染色釜的方式实现连续化生产,但每染完一批纱后都要经过降压、取纱的过程,能量消耗大,生产效率不高。所以笔者致力于研制一种既可以实现正反上染,又可以连续化生产、工艺简单的染纱器。

2 新型超临界流体染纱器结构

2.1 结构简介

借助于王威强等^[5]发明的高压超高压连续固体物料萃取和灭菌装置,笔者发明了一种新型的超临界流体染纱器并获中国发明专利授权(ZL 200710015992.5)。结构如图 5 所示。

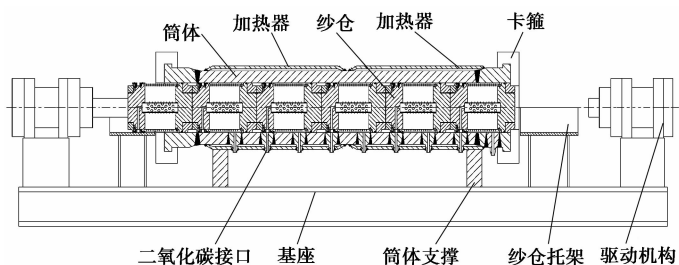


图 5 连续式超临界流体染纱器结构图

(上接第 64 页)

[5] 王振希,郑典模,李建敏,等. 直接沉淀法制备纳米级氧化锌工艺研究[J]. 无机盐工业,2006(9):40-42.
 [6] 石晓波,李春根,汪德先. 制备纳米氧化锌的新方法[J]. 合成化学,2002(10):183-185.
 [7] 郭兴忠,张丙怀,杨辉,等. 从氧化锌矿直接制备纳米氧化锌粉研究[J]. 化学工程,2003(12):47-50.
 [8] 刘家祥,丁德玲,王震,等. 均匀沉淀法制备纳米氧化锌[J]. 有色金属,2006(2):49-52.

[9] 刘琳,田静博,钱建华,等. 纳米氧化锌的均匀沉淀法制备工艺研究[J]. 粉末冶金工业,2008(12):10-13.
 [10] 成庆堂,李峰,姚超,等. 纳米氧化锌的制备[J]. 化工新型材料,2008(2):44-46.
 [11] 李斌,杜芳林. 纳米氧化锌的制备与应用[J]. 无机盐工业,2004(5):7-10.
 [12] 张宪玺,王晓娟,瞿冠杰,等. 碱式碳酸锌煅烧制备纳米氧化锌[J]. 无机化学学报,2002(10):1037-1041. ■

染纱器分为染色工段和浮色清洗工段,两工段为一体结构,由筒体、纱仓、加热器、卡箍、基座、纱仓托架、筒体支撑和液压驱动机构构成。筒体与筒体支撑焊接在一起并固定联接在基座上,筒体外安装加热器,筒体上开有流体进入管道接口和流体流出管道接口,流体进入管道接口和流体流出管道接口相间分布,相邻流体管道接口的距离为纱仓长度的1/2;纱仓安装在筒体内,多个纱仓紧密相连构成纱仓链在筒体内运动,卡箍安装在筒体的两端;液压驱动机构和纱仓托架安装在基座两端,与进出筒体的纱仓相对应。

纱仓作为染纱器的核心部件,结构由左平盖、螺纹套、流体分布筒、右平盖和筒管构成,如图6所示。左平盖与流体分布筒固定联接,右平盖与流体分布器可拆连接,待染纱放置在纱仓空腔中的筒管上。纱仓密封采用聚四氟乙烯O型密封圈,左右螺纹套方便安装更换密封圈。流体分布筒为多孔结构。左平盖上开有环槽,环槽内开有孔道,孔道与筒管相连,环槽与筒体上的流体进出管道接口相连。

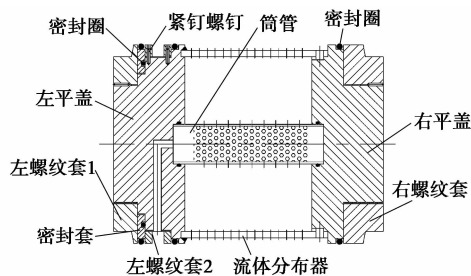


图6 纱仓结构图

2.2 工作原理

纱仓装满染纱器后,接入超临界染色系统。此时染纱器右端卡箍作用纱仓,左端纱仓露出筒体1/2纱仓长度,由左端液压驱动系统施力压紧纱仓,防止纱仓从染纱器中跑出,超临界流体由流体进入管道进入染纱器后,经由左平盖内的孔道进入纱仓空腔中的筒管,然后由筒管穿过待染纱,经由流体分布器后从流体流出管道流出,即为完成超临界流体由内而外穿过待染纱的染色过程;之后右端卡箍停止作用,右端液压驱动系统将放置在纱仓托架上的新纱仓向前驱动纱仓长度的1/2距离,同时左端液压驱动系统同步后退纱仓长度的1/2距离,此时右端纱仓进入筒体1/2纱仓长度,左端纱仓退出筒体,流体进入通道与流体分布器相连,流体流出通道与左平盖上的孔道相连,然后左端卡箍作用纱仓,右端液压驱动系统作用纱仓防止纱仓跑出筒体,这样超

临界流体由流体分布器进入纱仓穿过待染纱,进入筒管后由孔道进出,即为完成超临界流体由外而内穿过待染纱的染色过程;随后左端卡箍停止作用,右端液压驱动系统将纱仓完全推入筒体,左端液压驱动系统同步后退1/2纱仓长度,右端卡箍作用卡箍,左端液压驱动系统作用纱仓防止纱仓跑出筒体,完成由内而外的染色过程,随后重复循环以上过程。

清洗浮色过程与染色过程操作类似,只是流体进入通道连接纯净的超临界流体。

经过以上操作过程,纱仓在筒体内连续进出便可实现筒纱的连续染色和清洗。

3 新型超临界流体染纱器关键部件设计方法

首先,超临界流体染色和清洗都是在高压下进行的,筒体都要承受高压,必须有足够的壁厚,而且染纱器特殊的结构要求保证同体的长度;其次纱仓之间的运动是靠流体分布筒传动的,要避免流体分布筒的失稳,需要足够的厚度;最后纱仓的平盖在筒体两端承受压力,要有足够的壁厚,需要进行强度计算。

3.1 筒体壁厚和长度的计算

筒体的壁厚按照GB150—1998《钢制压力容器》中的内压圆筒壁厚公式进行计算,即:

$$\delta = \frac{p_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - p_c} \quad (1)$$

式(1)中 δ 为筒体的计算厚度(mm); D_i 为筒体的内直径(mm); p_c 为计算压力(MPa); $[\sigma]^t$ 为设计温度下筒体材料的许用应力(MPa); ϕ 为焊接接头系数。

筒体的长度与所放的纱仓的数量有关:

$$L = (N - 0.5)l - l_1 \quad (2)$$

式(2)中 L 为筒体的长度(mm); N 为筒体所放置纱仓的数量; l 为纱仓的长度(mm); l_1 为卡箍的卡面长度(mm)。

3.2 流体分布筒壁厚的计算

最右端的纱仓在推动其他纱仓运动时,其流体分布筒会因为密封圈的摩擦力受到轴向力的作用。

单个密封圈的摩擦力的计算,即^[6]:

$$F = \frac{f\pi Dd}{1 - \mu^2} [0.2\pi eE + \mu(1 + \mu)p] \quad (3)$$

式(3)中: F 为单个密封圈的摩擦力(N); f 为O型圈与筒体的摩擦系数; D 为O型圈外径(mm); d 为O型圈截面直径(mm); μ 为O型圈材料的泊松

系数; e 为 O 型圈预压缩率; E 为材料的弹性模量 (MPa); p 为压力 (MPa)。

流体分布筒的外径计算:

$$\frac{nF}{\pi(D^2 - d^2)/4} \leq R_{eL} \text{ 或 } R_{0.2} \quad (4)$$

式(4)中: n 为密封圈的个数; D 为流体分布筒的外径 (mm); d 为流体分布筒的内径 (由待染纱直径而定, mm); R_{eL} 为流体分布筒材料的下屈服强度 (MPa); $R_{0.2}$ 为流体分布筒材料规定残余延伸率 0.2% 的规定残余延伸强度 (MPa)。

算得流体分布筒的外径后, 流体分布筒的壁厚就自然而然得到了。壁厚确定后需进一步进行流体分布筒在轴向应力作用下的失稳校核计算。目前尚没有关于带孔筒节在轴向应力作用下的失稳校核计算方法, 因此校核过程需借助有限元等数值分析的方法。此内容不在本文的讨论范围之内, 故不做详述。

3.3 纱仓端盖厚度的确定

纱仓平盖厚度的计算没有完全合适的公式进行计算, 这里借用平盖厚度计算公式:

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{Kp_c}{[\sigma]\phi}} \quad (5)$$

式(5)中, δ_p 为纱仓端盖厚度 (mm); D_c 为端盖直径 (mm); K 为结构特征系数, 此处取 0.44。

端盖上的环槽、孔道、凸台等对强度会有一些削弱, 所以应当对端盖计算厚度乘以一定的安全系数。

4 纱仓流场模拟与结构优化

染液流过纱线的均匀程度直接影响着染色的质量 (即匀染性) 和染色时间。本文将扼要介绍用计算流体力学软件 FLUENT 对纱仓进行流场模拟的结果, 并以此为依据优化纱仓的几何参数。

4.1 纱仓模型及边界条件

纱仓内的流场为不可压缩的稳态流动。其中, 将纱线及筒管和流体分布器上的多孔部分设置为多孔介质。FLUENT 软件中多孔介质的模型是在动量方程中附加了表示动量损失的原项, 如式(6)所示。式(6)中右边第 1 项表示黏性损失项, 第 2 项表示惯性损失项。

$$S_i = \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho v_{mag} v_j \right) \quad (6)$$

式(6)中, S_i 是 i 方向动量方程中表示动量损失的原项; D_{ij} 和 C_{ij} 为系数矩阵。

纱仓几何模型如图 7 所示。纱仓被简化成二维

轴对称模型, 染液由染液入口 a-a 流入, 经多孔筒管的分布后流过纱线 c-c-e-e, 最后经过流体分布器 f-f 从流体出口 g-g 流出。表 1 给出了纱仓几何模型的主要尺寸。指定进口管 a-a 为速度进口 (velocity-inlet) 边界条件、筒管开孔区域 b-b 和流体分布器开孔区域 f-f 为多孔跳跃 (porous jump) 边界条件、纱线 c-c-e-e 为多孔区域 (porous zone)、出口管 g-g 为自由出流 (outflow) 边界条件、中心轴 h-h 为轴 (axis) 边界条件, 其他为固壁 (wall) 边界条件。图 8 为划分好的纱仓网格。

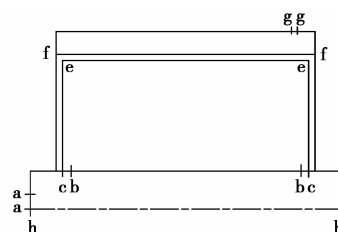


图 7 纱仓几何模型

表 1 纱仓几何模型的主要尺寸

几何参数	筒管开孔区域长度	纱线轴长	流体分布器开孔区域长度	进口管半径	出口管当量槽宽	纱线直径
	b-b	c-c	f-f	a-a	g-g	
尺寸/mm	140	152	160	5	0.2	200

注: 流体出口管直径为 10 mm, 在此将其等价成环向开槽, 其当量槽宽。

$$l_m = \frac{2 \times \frac{\pi}{4} a c^2}{\pi D} = \frac{2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^2}{\pi \times 250} = 0.2 \text{ mm}$$

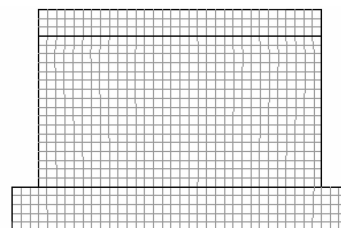


图 8 纱仓网格

4.2 模拟结果及讨论

模拟所采用的初始条件为: 染液密度 441 kg/m³、染液黏度 3.77 × 10⁻⁵ kg/(m·s)、染液入口速度 5 m/s、筒管开孔直径 2.5 mm、筒管开孔率 0.5、流体分布器开孔直径 8 mm、流体分布器开孔率 0.7、纤维直径 0.28 mm、筒纱孔隙率 0.828。其他参数和软件的设计在文献[8]中有更详细的介绍。模拟计算结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出纱仓内部染液流过筒纱的速度场不均匀, 右侧局部区域的

流量较其他区域大数倍,极易造成染色的不均匀性。

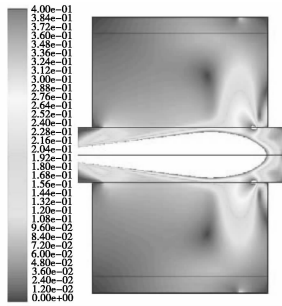


图9 速度场云图

为了优化流场,将均匀开孔的筒管改为非均匀开孔,即将筒管开孔区域分为5段,各段长度(从入口起)分别为45、40、20、20、15 mm,并对后4段在孔径不变的情况下分别取不同的开孔率。以各段开孔率(0.1, 0.2, 0.3, 0.4)为试验因素设计正交试验^[7],得出的最佳结果为:各段开孔率(从入口起)分别为0.5, 0.1, 0.3, 0.1, 0.4。优化后的流场速度云图如图10所示。可以看出非均匀开孔的筒管流场的情况较均匀开孔有较明显的提高。

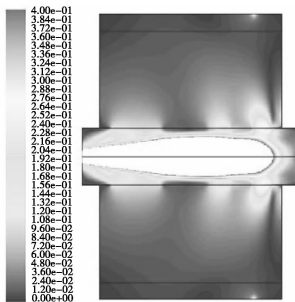


图10 速度场云图

由图10可知,接近筒管的半径范围内流场还存在较大差异。但半径越小,此处的速度就越大,更易消除这种不均匀流场所带来的负面影响。鉴于此及筒管加工的难易性,本文未针对筒管的开孔做更为细致的流场模拟。同时,由图9及图10还可以看

出,流体分布器开孔状态对整个流场的影响很小,所以,本文未对其做进一步分析。

5 结语

连续式超临界流体染纱器具有以下一些优点:

①操作简单。纱仓在筒体中运动,染液正反双向穿过待染纱,不用控制染液的换向就可以实现纱的匀染;②节约资源。纱仓在筒体内连续进出,避免了每染完一批纱后降压、取纱的操作,降低了能量消耗又提高了生产效率。③功能齐全。集成了染纱与清洗浮色功能,在染纱的同时完成清洗浮色,提高了生产效率。

与常规染色方法不同的是,超临界二氧化碳染色工艺需要在30 MPa左右的高压条件下进行,对设备的设计提出了更高要求。本文对提出的设备的设计方法做了简单介绍。其中纱仓的结构直接决定了染色的质量和效率,在设计时有必要进行流场的模拟,优化内部结构。筒管宜采用分段的非均匀的开孔方式。

参考文献

- [1] 孙传经,孙云鹏,孙明华.超临界二氧化碳染色工艺中的高压染色釜:中国,ZL98241718.7[P].1999-11-24.
- [2] Jasper Josef. Textile finishing process where dispersion dyes are applied to reels of in short period using autoclaves with pumps to circulate carbon dioxide instead of water; DE, DE4206954 [P]. 1993-09-09.
- [3] 郑来久,郭友才,姜涛,等.超临界二氧化碳染色装置中的染色釜:中国,ZL200510136782.2[P].2005-12-26.
- [4] 郭晓洁,王金民,包桂莲.一种超临界二氧化碳染色装置中的染色釜:中国,ZL20061012123053.8[P].2006-10-27.
- [5] 王威强,刘燕,李爱菊,等.高压超高压连续固体物料萃取和灭菌装置:中国,ZL200510042542.6[P].2005-03-04.
- [6] 徐辅仁.对O形密封圈引起的摩擦力的计算[J].石油机械,1989,17(8):9-10.
- [7] 郭德国.超临界流体连续染纱流程与装置研究[D].济南:山东大学,2008. ■

朗盛投资美国生物石油和生物化学公司

世界最大的合成橡胶生产商朗盛已向美国生物燃料和生化公司 Gevo 投资,计划与其在利用可再生资源生产异丁烯方面进行合作。该公司致力于寻找源异丁烯的替代品——生产丁基橡胶时所需的主要原料。

异丁烯通常产于蒸汽裂解装置,以石油衍生物为给料。作为选择,Gevo 公司正在开发一种发酵方法,从谷物中的可发酵糖生物量中生产出有机化合物丁醇。Gevo 公司和朗盛计划使用其技术专长,通过丁醇脱水来生产异丁烯。朗盛创新部门的研究人员和丁基橡胶业务部正紧密合作,优化脱水工艺,该工艺已在实验室中获得成功。

朗盛已向位于美国科罗拉多州丹佛市的公司投资 1 000 万美元。作为交换,它也获得了 Gevo 公司的少数股

权并跻身董事会,这一职位将由朗盛丁基橡胶业务部门的负责人 Ron Commander 担任。

其他投资 Gevo 公司的公司包括法国石油天然气集团 Total SA,以及洁净科技产业的领先投资者——航空公司创始人理查德·布兰森的维珍绿色基金。Gevo 公司共有 55 名雇员,与许多世界著名的机构有紧密合作,包括加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)和加州理工学院。

朗盛是世界第二大丁基橡胶的生产商,在加拿大萨尼亚和比利时的兹韦恩德雷赫特均设有工厂。此外,该公司正创纪录地投资 4 亿欧元在新加坡新建一家丁基橡胶工厂,该工厂将于 2013 年第一季度启用。(杨瑞影)