[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.001

表面摩擦驱动收卷的玻纤布卷驱动力特征

范　飞[1]，周香琴[1,2]，王琴龙[2]

（1.浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室，浙江 杭州　310018；
2.万利纺织机械研究院，浙江 杭州　311243）

摘　要：为了提高玻纤布卷的卷装质量，解决其收卷过程中的端面变形、布卷内部布层间打滑以及布卷与驱动辊间打滑等技术难题，课题组开展了布卷收卷过程中的力学行为研究。以玻纤布卷为对象，研究了表面摩擦驱动收卷过程中的正压力、表面摩擦力和卷绕张力的变化规律，以及驱动辊与布卷不打滑的驱动条件及其相关的影响因素。研究表明：布卷收卷过程中，玻纤布卷的正压力、摩擦力和卷绕张力存在极小值，驱动辊与布卷之间不打滑所需要的静摩擦因数和启动瞬时减速机驱动力矩存在极大值。根据分析结果，课题组提出了驱动辊表面包覆材料的选择、收卷过程中电机驱动力矩和玻纤布面张力控制策略的建议。

关　键　词：织布机；卷布机构；玻纤布卷；摩擦驱动；卷绕张力

中图分类号：TP273；TS103.132；TH22　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2020)03-0001-07

Characteristics of Driving Force of Winding Fiberglass Driven by Surface Friction

FAN Fei[1], ZHOU Xiangqin[1,2], WANG Qinlong[2]

(1. Key Laboratory of Modern Textile Machinery & Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Wanli Textile Machinery Research Institute, Hangzhou 311243, China)

Abstract: In order to improve the quality of the package of glass fiber cloth, solve the technical problems of end face deformation, slip between the inner layers of the cloth roll, cloth roll and drive roller slippage during the winding process, the mechanical behavior of the fabric roll winding process was studied by the research group. Using the fiberglass cloth roll as an object, this paper studies the variation of pressure, surface friction and winding tension of fiberglass cloth rolls, driving conditions of driving roller and cloth roll without slipping and related influencing factors during the winding process. The results show that there are minimum values of the pressure, friction force and winding tension the static friction coefficient required for the non-slip between the driving roller and the cloth roll, the instantaneous reduction gear drive torque has a maximum value during the roll winding process. According to the analysis results, the selection of cladding materials for the surface of the drive rolls, the control scheme of the motor driving torque and the fiberglass cloth surface tension during the winding process are proposed.

Keywords: loom; rolling mechanism; fiberglass cloth roll; friction drive; winding tension

织机卷布机构的主要作用是将织物收卷成布卷[1-2]。根据驱动力作用位置的不同，可分为中心驱动卷布和表面摩擦驱动卷布2种类型。力矩直接作用在布卷芯轴上的卷布方式称中心驱动卷布；力矩通过摩擦力作用在布卷表面的卷布方式称为表面摩擦驱动卷布。

表面摩擦驱动卷布因其卷装容量大、容易卸布等优势深受玻纤织造行业的欢迎[3]。但在工程实践中

收稿日期：2019-11-14；**修回日期**：2020-03-18

基金项目：国家自然科学基金(51775514)。

第一作者简介：范飞(1995)，男，浙江丽水人，硕士，主要从事纺织机械机构学方面的研究。**通信作者**：周香琴(1965)，女，浙江金华人，硕士，副教授，主要研究方向为纺织机械机构动力学、机构创新。E-mail：zhouxiangqin@zstu.edu.cn

发现,当织物的经纬纱交织点较少、纱线或布面之间摩擦因数较小、布面张力不合适和驱动辊与布卷之间的摩擦材料不合适时,布卷收卷过程中经常会出现布卷端面变形严重、布层间打滑、纬纱移位、布卷表面磨毛及织物起皱等质量问题[4-6]。当织物材质不同、经纬纱纤度和形态不同、经纬密不同时,控制收卷质量的难易程度差异很大。在粗纱玻纤(如方格布、壁布)织造行业,布卷的质量控制技术是行业内的一大技术难题[7-8]。通过控制设备运行状态和一些工艺参数可以改变布卷的质量。目前针对不同的玻纤织物,基本依靠试凑的方法,确定不同织物的收卷工艺参数。收卷设备生产厂家和使用厂家均在寻找布卷收卷过程中的一些规律。

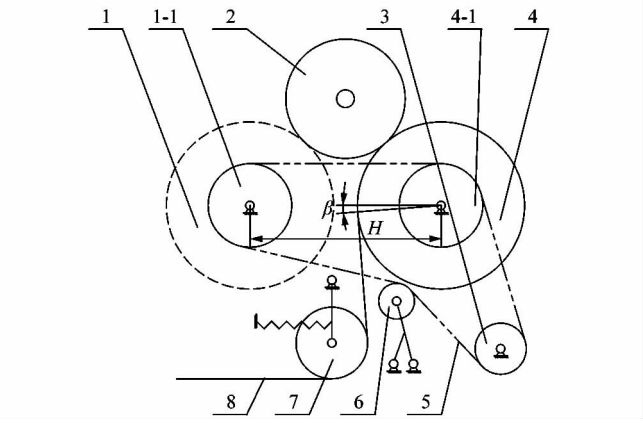
目前有些高档的卷布装置采用伺服电机驱动,实现恒张力或锥度张力收卷,收卷过程中布卷内布面张力变化较复杂[9-11]。尹苗苗等[12]建立了针织物中心驱动卷布过程中的张力变化规律数学模型,分析了采用等张力收卷和锥度张力收卷时,布面张力的变化规律。胥小勇和章领等[13-14]分析了中心驱动卷布过程中张力变化的影响因素,提出了张力控制方法,可通过调节控制参数以保持张力稳定。温雯等[15]建立了中心驱动卷布时柔性膜材的收卷内应力二维模型,对收卷过程进行了有限元仿真,获得了膜卷内部压应力的分布规律。

课题组以玻纤布卷为对象,研究表面摩擦驱动布卷收卷过程中的正压力、卷绕张力和摩擦驱动力随布卷半径的变化规律,获取布卷与驱动辊不打滑的驱动条件等,为卷布装置收卷工艺参数的设计提供理论依据,为后续的布卷内部布层间打滑研究提供基础。

1 表面摩擦驱动卷布机构工作原理

表面摩擦驱动卷布机构示意图如图 1 所示,布卷 2 直接置于通过机架支撑的糙面辊 1 和光面辊 4 之上。电机经过减速器后,带动主动链轮 3 顺时针转动,经链传动带动链轮 1-1 和链轮 4-1 作顺时针转动,从而带动糙面辊 1 和光面辊 4 顺时针转动。从织机下来的布面 8 经过了张力辊 7 和光面辊 4,在糙面辊 1(驱动辊)与布面间的静摩擦力作用下带动布卷芯轴作逆时针转动,将布收卷到布卷 2 上。张力辊 7 由摆臂支撑,在摆臂上安装有布面张力传感器,用于感知布面张力。通过更换链轮 1-1 或链轮 4-1,实现光面辊与糙面辊之间的速差调节。图 1 中 H 为糙面辊和光面辊的中心距,β 为布面喂入角。

进入卷布装置的布面速度由织机决定,卷布机构的控制系统根据布面张力传感器检测到的布面张力,控制驱动电机的转速,从而实现对糙面辊转速的控制;通过糙面辊与布卷之间的静摩擦力实现布卷卷绕速度的控制,确保布面张力符合预先设定的要求。生产中常遇到以下问题:①布卷与糙面辊之间打滑,损坏布面,布卷无法按设定的布面张力卷绕;②布卷直径越大,越容易出现布卷端面变形和层间打滑现象。



1—糙面辊;2—布卷;3—主动链轮;4—光面辊;5—链条;6—张紧轮;7—张力辊;8—布面。

图 1 表面摩擦驱动卷布机构

Figure 1 Rolling mechanism driven by surface friction

2 表面摩擦驱动卷布机构原始参数

选取国内一款表面摩擦驱动玻纤卷布机,根据实物提取机构参数如表 1 所示。

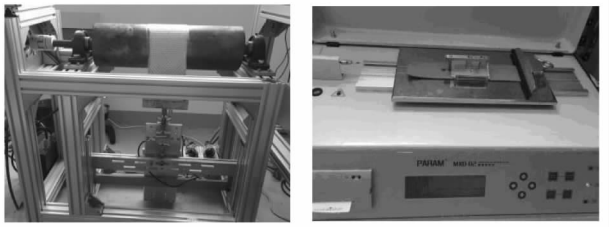
表 1 机构初始参数

Table 1 Initial parameters of institutiol

布面喂入角 β/(°)	布卷半径 r_2/mm	中心距 H/mm	幅宽 L/mm	光面辊半径 r_4/mm	糙面辊半径 r_1/mm	布卷芯轴半径 r_{20}/mm	主动链轮半径 r_3/mm	布卷芯轴重力 G_{20}/kg	主动链轮齿数 z_3
10	43 ~ 600	320	3 400	134	136	43	28	200	19

链轮 1-1 齿数 z_1	链轮 4-1 齿数 z_4	减速器输出最大扭矩 M_{Dmax}/(N·m)	糙面辊转动惯量 J_1/(kg·m^2)	光面辊转动惯量 J_4/(kg·m^2)	主动链轮转动惯量 J_3/(kg·m^2)	布卷芯轴转动惯量 J_{20}/(kg·m^2)	减速器传动比 i	电机额定转速 n/(r·min^{-1})	链条质量 m_5/kg
38	40	641.3	1.570	1.570	0.001	0.090	121	1 500	1.72

织物的布面张力不同,布卷的密度有所差异。通过取样玻纤织物的拉伸实验,测得不同布面张力作用下织物厚度和布卷密度实验装置如图2(a)所示。实验结果表明:作用于织物的布面张力增大,织物厚度减小,密度随之增大,实验结果如表2所示。



(a) 拉伸实验平台　(b) 摩擦因数实验平台

图2　织物参数测试平台

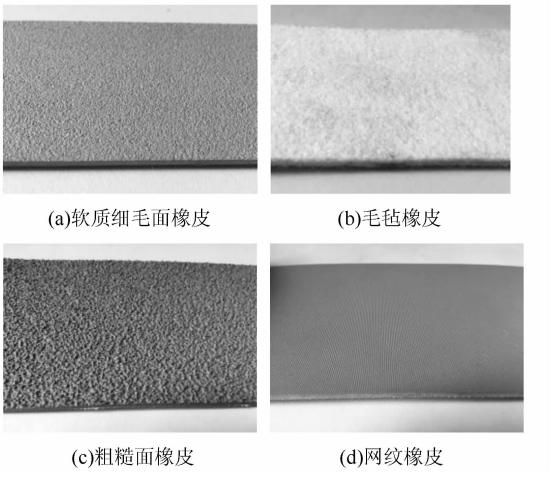
Figure 2　Test platform for fabric parameters

表2　布面张力与织物密度对应表

Table 2　Correspondence between fabric tension and fabric density

样品及规格				布面张力/N	织物厚度/mm	织物密度
织物名称	经纬纱/tex	经纬密/(根·cm^{-1})	样品宽度/cm			ρ/(kg·m^{-3})
玻纤方格布	2 400	2	10	0	1.12	767
				15	1.10	781
				24	1.09	788
				35	1.07	803
				47	1.06	811
				58	1.05	819
				75	1.03	834

使用济南兰光机电技术有限公司生产的MXD-02型摩擦因数仪(见图2(b))分别测定糙面辊表面的不同包覆材料(见图3和镀铬表面与样品玻纤方格布之间的摩擦因数,结果如表3所示。



(a)软质细毛面橡皮　(b)毛毡橡皮

(c)粗糙面橡皮　(d)网纹橡皮

图3　糙面辊包覆材料

Figure 3　Coarse roll coating material

表3　摩擦因数表

Table 3　Table of friction coefficient

名称	静摩擦因数	动摩擦因数
软质细毛面橡皮	0.71	0.58
毛毡橡皮	0.66	0.52
粗糙面橡皮	0.70	0.62
网纹橡皮	0.74	0.61
镀铬表面		0.25

3　布卷受力分析模型的建立

3.1　系统等效转动惯量计算

以主动链轮为等效构件,将糙面辊、布卷、光面辊、链条及整机(忽略电机和减速器)等效到主动链轮轴上。随着收卷过程不断进行,布卷直径逐渐增大,布卷转动惯量也在不断变化。因此布卷的转动惯量

$$J_2 = J_{20} + 0.5\pi l\rho(r_2^4 - r_{20}^4)。$$

式中:J_2为布卷转动惯量;ρ为布卷密度;r^2为布卷半径。

各构件的等效转动惯量如表4所示。

表4　构件的等效转动惯量

Table 4　Equivalent moment of inertia

构件	等效转动惯量公式	等效转动惯量/(kg·m^2)
糙面辊	$J_{e1} = J_1 z_3^2 / z_1^2$	0.392 5
布卷	$J_{e2} = J_2 (z_3 r_1)^2 / (z_1 r_2)^2$	J_{e2}
主动链轮	$J_{e3} = J_3$	0.001 0
光面辊	$J_{e4} = J_4 z_3^2 / z_4^2$	0.354 2
链条	$J_{e5} = m_5 r_3^2$	0.001 3
整机	$J_e = J_{e1} + J_{e2} + J_{e3} + J_{e4} + J_{e5}$	J_{e2} +0.749 0

3.2　系统等效阻力矩计算

以主动链轮为等效构件,将布面张力T_0(经过光面辊前)产生的阻力矩等效到主动链轮轴上(忽略糙面辊与光面辊受到机架的摩擦阻力矩)。系统等效阻力矩

$$M_0 = T_0 r_4 z_3 / z_4。 \tag{1}$$

3.3　系统加速度计算

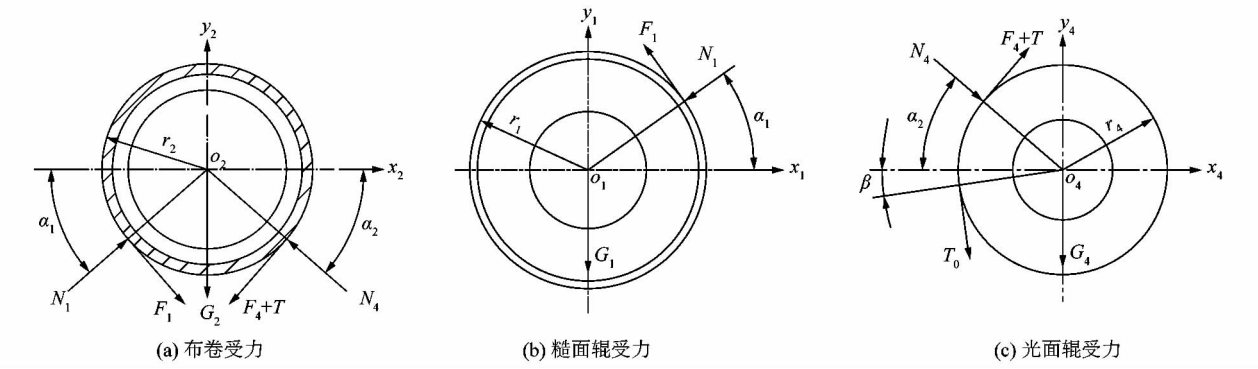
主动链轮角加速度ε和布卷角速度ε_2分别为:

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon &= (M_D - M_0)/J_e; \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon \cdot z_3 r_1 / (z_1 r_2)。 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中M_D为减速器输出扭矩。

3.4　布卷受力分析

以布卷中心为坐标原点建立$o_2x_2y_2$坐标系,布卷的受力情况如图4(a)所示;以糙面辊中心为坐标原点建立$o_1x_1y_1$坐标系,糙面辊的受力情况如图4(b)所示;以光面辊中心为坐标原点建立$o_4x_4y_4$坐标系,光面辊的受力情况如图4(c)所示。



(a) 布卷受力 (b) 糙面辊受力 (c) 光面辊受力

图 4 受力分析示意图

Figure 4 Schematic diagram of force analysis

根据布卷的力和力矩平衡关系,得:

$$\left.\begin{aligned} &N_1\sin\alpha_1+N_4\sin\alpha_2-F_1\cos\alpha_1-(F_4+T)\cos\alpha_2-G_2=0;\\ &N_1\cos\alpha_1-N_4\cos\alpha_2+F_1\sin\alpha_1-(F_4+T)\sin\alpha_2=0;\\ &F_1r_2-(F_4+T)r_2=J_2\varepsilon_2。\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中:N_1为糙面辊对布卷的正压力;F_1为糙面辊对布卷的摩擦力;N_4为光面辊对布卷的正压力;F_4为光面辊对布卷的摩擦力;T为布面张力(经过光面辊后);G_2为卷布辊及布卷质量。

其中,

$$\left.\begin{aligned} &\alpha_1=\cos^{-1}[0.5H/(r_1+r_2)];\\ &\alpha_2=\cos^{-1}[0.5H/(r_4+r_2)];\\ &G_2=G_{20}+\pi L\rho(r_2^2-r_{20}^2)。\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

在玻纤织物的收卷中,布卷与糙面辊间的摩擦力带动布圈转动。正常运动时,布卷与糙面辊间无相对运动,故摩擦力 F_1的最大值 $F_{1\max}=N_1f_{1j}$。式中f_{1j}为糙面辊与布卷之间的静摩擦因数。

在不增加布面张力情况下,为了增加布卷紧度,在实际应用中,经常采用光面辊转速慢于糙面辊的方法。此时光面辊可起到将布面拉紧的作用,故布面与光面辊之间为滑动摩擦。因此:

$$\left.\begin{aligned} &F_4=N_4f_4;\\ &T=T_0e^{(\alpha_2+\beta)\cdot f_4};\\ &F_J=F_4+T。\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中:f_4为光面辊与布卷之间的动摩擦因数;F_J为布卷的卷绕张力。

联立式(2)、式(3)和式(5),求解可得:

$$\left.\begin{aligned} &N_1=(B_2C_1-B_1C_2)/(A_1B_2-A_2B_1);\\ &N_4=(A_2C_1-A_1C_2)/(A_2B_1-A_1B_2);\\ &F_1=N_4f_4+T_0e^{(\alpha_2+\beta)\cdot f_4}+J_2\varepsilon_2/r_2。\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中:

$A_1=\sin\alpha_1$;

$B_1=\sin\alpha_2-f_4\cos\alpha_1-f_4\cos\alpha_2$;

$C_1=(T+J_2\varepsilon_2/r_2)\cos\alpha_1+T\cos\alpha_2+G_2$;

$A_2=\cos\alpha_1$;

$B_2=-\cos\alpha_2+f_4\sin\alpha_1-f_4\sin\alpha_2$;

$C_2=-(T+J_2\varepsilon_2/r_2)\sin\alpha_1+T\sin\alpha_2$。

再联立式(5)和式(6),求解可得

$$D_1T_0+D_2=F_J。 \tag{7}$$

其中:

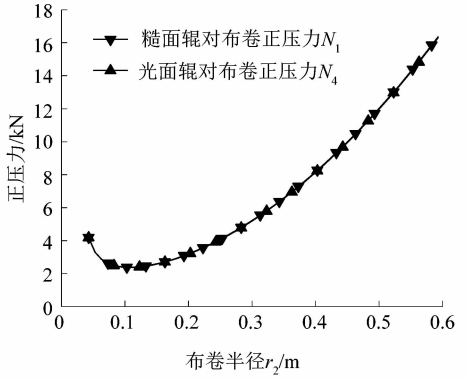
$D_1=e^{(\alpha_2+\beta)\cdot f_4}+[1+\cos(\alpha_1+\alpha_2)]f_4\cdot e^{(\alpha_2+\beta)\cdot f_4}/(A_2B_1-A_1B_2)$;

$D_2=G_2\cos\alpha_1f_4/(A_2B_1-A_1B_2)$。

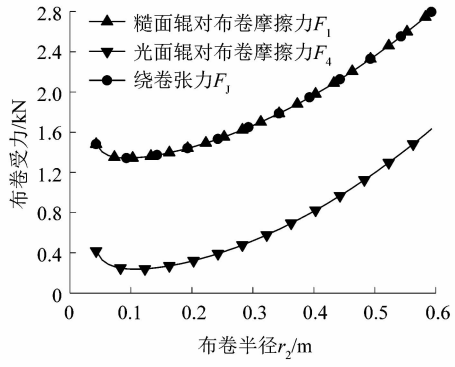
4 布卷受力情况讨论

4.1 匀速过程的布卷受力

机构作匀速运动时,布卷角加速度 $\varepsilon_2=0$。根据测定结果可知,$f_4=0.25$(见表 3),取 $T_0=1\ 000$ N,$\rho=810$ kg/m^3,将表 1 的数据代入式(5)和式(6),计算结果如图 5 所示。



(a) N_1和N_4的变化规律



(b) F_1, F_4和F_J的变化规律

图 5　布卷受力随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 5　Variation of force of cloth roll with r_2

由图 5 可知:N_1 与 N_4 变化规律曲线几乎重叠,在布卷半径为 0.10 m 附近有一极小值。F_1 与 F_J 变化规律曲线也几乎重叠,在布卷半径为 0.10 m 附近也有一极小值。

为实现恒张力收卷,如 F_J = 1 800 N,可根据式(7),获取布面张力 T_0 随布卷半径变化的控制要求,如图 6 所示。T_0 呈抛物线型,存在一个极大值,在布卷半径为 0.10 m 附近。

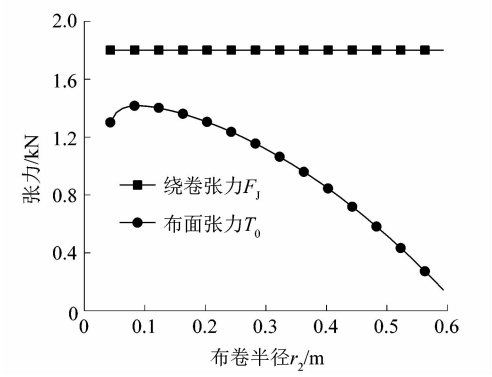


图 6　实现恒张力收卷时 T_0 和 F_J 随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 6　Variation curve of T_0, F_J with r_2 during constant tension winding

为了确保布卷与糙面辊之间不打滑,应满足 $f_{1j} \geqslant F_1/N_1$,令 $f_{10} = F_1/N_1$。

式中 f_{10} 为正常收卷需要的糙面辊与布卷之间的最小静摩擦因数。

对于不同的布面张力 T_0 和布卷芯轴质量 G_{20},f_{10} 差异较大,计算结果如图 7 和图 8 所示。

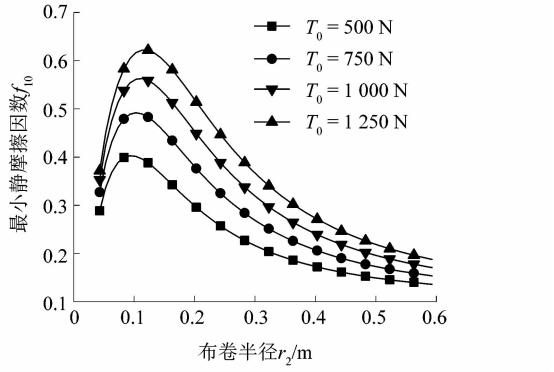


图 7　T_0 不同时 f_{10} 随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 7　Variation curve of f_{10} with r_2 at different T_0

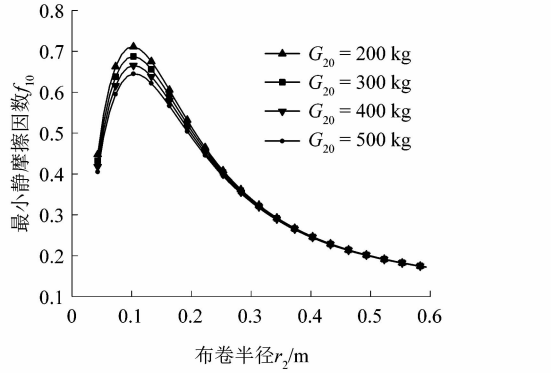


图 8　G_{20} 不同时 f_{10} 随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 8　Variation curve of f_{10} with r_2 at different G_{20}

由图 7 可知:随着布卷半径增大,f_{10} 呈类似抛物线曲线变化,存在一个极大值,位于布卷半径为 0.10 ~ 0.15 m 之间。在极大值点附近时,容易出现布卷打滑。随着布面张力 T_0 减小,f_{10} 也减小,极值点出现的位置逐渐左移,即容易出现打滑现象的布卷半径逐渐减小。在极值点附近,可通过减小布面张力 T_0,来减少布卷打滑。

由图 8 可知:布卷芯轴质量 G_{20} 越大,f_{10} 越小,但极值点位置基本不变。故在极值点附近,也可通过增大布卷芯轴质量 G_{20},来减少布卷打滑。

实际工程应用中发现,布卷在半径为 0.10 ~ 0.15 m 处经常出现打滑现象,如图 9 所示。应用前述分析模型获得的 F_J 和 f_{10} 均在布卷半径为 0.10 ~ 0.15 m 处存在极值,即在该卷径范围内,布卷与驱动辊之间最容易打滑。布卷与驱动辊发生打滑后,F_J 更小,布卷端面也越容易变形。实际工程应用中布卷的打滑位置与分析结果基本一致。

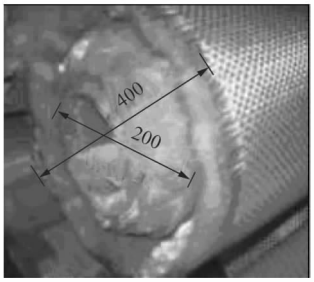


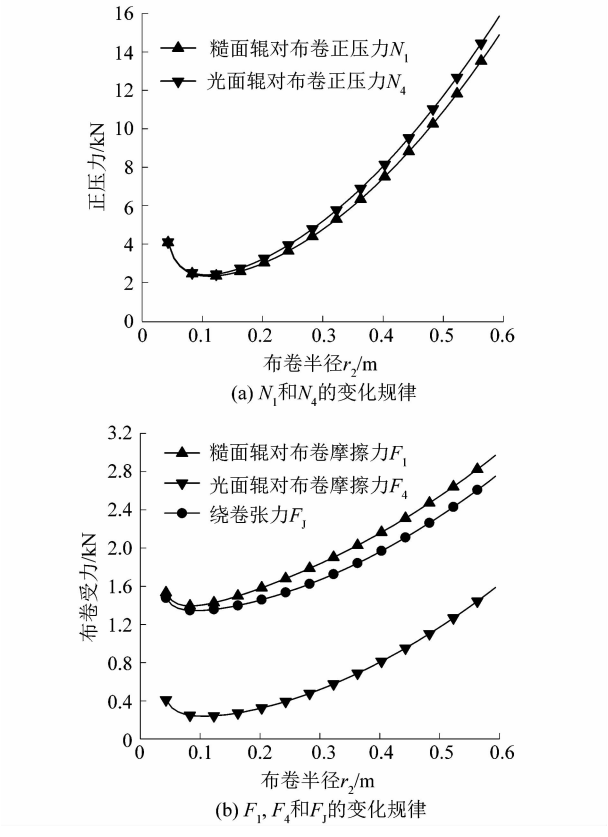
图 9　疵品布卷

Figure 9　Damaged cloth roll

4.2　起动过程的布卷受力

与机构匀速运行时相比，在突然起动时，布卷、糙面辊及光面辊的平衡方程会发生变化。此时，布卷角加速度 $\varepsilon_2 \neq 0$。

起动时，取减速器输出扭矩 $M_D = 80$ N·m，可保证 $M_D \geqslant M_0$，即可保证足够的驱动力矩。取 $T_0 = 1\ 000$ N，$\rho = 810$ kg/m^3，将 M_D 及表 1 的数据代入式(2)、式(5)和式(6)，结果如图 10 所示。



(a) N_1和N_4的变化规律

(b) F_1, F_4和F_J的变化规律

图 10　布卷受力随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 10　Variation curve of force of cloth roll with r_2

与匀速运行时相比，N_1 与 N_4 变化规律曲线不再重叠，F_1 与 F_J 变化规律曲线也不再重叠，但它们在布卷半径为 0.10 m 左右处依旧有一极小值。

改变减速器输出扭矩 M_D，f_{10} 也会变化，如图 11 所示。输出扭矩 M_D 越大，f_{10} 越大，极大值点处的布卷半径也越大。不难看出，启动时的 f_{10} 均大于匀速运动时的 f_{10}，即启动过程更容易发生打滑现象。

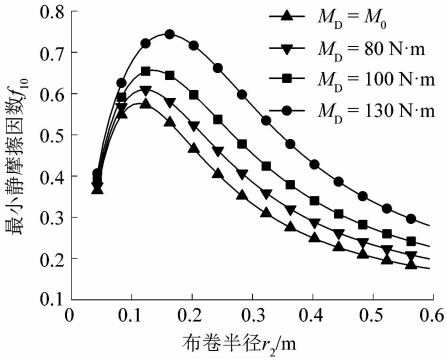


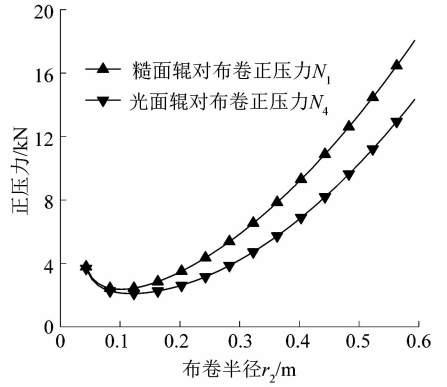
图 11　M_D 不同时 f_{10} 随布卷半径 r_2 变化规律

Figure 11　Variation curve of f_{10} with r_2 at different M_D

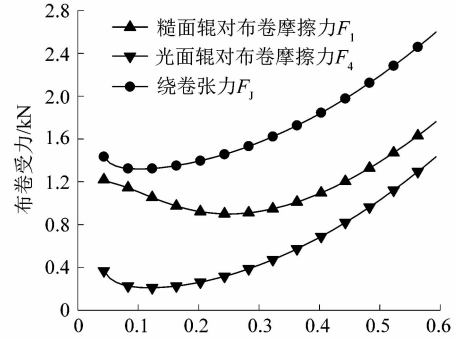
在玻纤方格布生产企业，图 3(d)所示的糙面辊包覆材料用得最多。故取 $f_{1j} = 0.74$(见表 3)，则有 $f_{10} \leqslant 0.74$。从图 11 可知：在输出扭矩 $M_D = 130$ N·m 时，f_{10} 的最大值已经达到 0.74。若继续增大减速器输出扭矩，则糙面辊无法提供足够的驱动力，即布卷与糙面辊之间会发生打滑现象。故启动时，减速器输出扭矩不宜过大。

4.3　刹车过程的布卷受力

与机构匀速运行的情况相比，突然刹车时，糙面辊对布卷作用的摩擦力方向会相反。此时，有 $M_D = 0$ N·m，取 $T_0 = 1\ 000$ N，$\rho = 810$ kg/m^3，将表 1 的数据代入式(2)、式(5)和式(6)，结果如图 12 所示。



(a) N_1和N_4的变化规律



(b) F_1, F_4和F_J的变化规律

图 12　布卷受力随布卷半径 r_2 变化规律曲线

Figure 12　Variation curve of force of cloth roll with r_2

与匀速运行时相比,F_1 的变化较大,但 F_J 的变化较小,其极小值依旧在布卷半径为 0.10 m 附近。

f_{10} 随布卷半径 r_2 变化规律曲线如图 13 所示。从图中可知:刹车时的 f_{10} 均小于匀速运动时的 f_{10}。故只需满足匀速运动时糙面辊与布卷间的最小静摩擦因数条件,刹车时布卷便不会打滑。

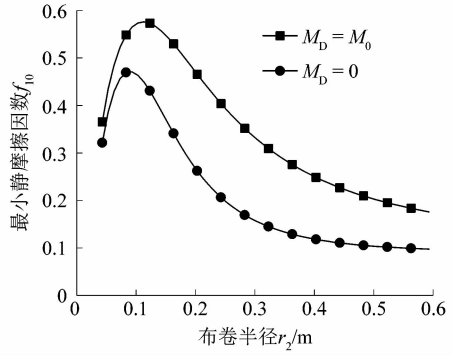


图 13　f_{10} 随布卷半径 r_2 变化规律曲线

Figure 13　Variation curve of f_{10} with r_2

5　结论

课题组通过对玻纤布卷收卷过程中各阶段的布卷受力、正常收卷条件及其影响因素和影响规律的研究分析,获得如下结论:

1) 表面摩擦驱动的收卷过程中,布卷的受力情况较复杂,正压力、摩擦力和卷绕张力随布卷半径的变化而变化,其形态呈"√"型,在布卷半径为 0.10 ~ 0.15 m 时存在极小值。

2) 通过控制布面张力 T_0,可以获得布卷的恒定卷绕张力,此时 T_0 随布卷半径的变化规律呈抛物线型,在布卷半径为 0.10 m 附近存在极大值。同时也可以根据布卷卷绕张力的实际需求,控制 T_0 实现变卷绕张力的收卷。

3) 布卷收卷成型的驱动力为布卷与驱动辊之间的静摩擦力,布卷与驱动辊不发生打滑所需要的布卷与驱动辊之间的最小静摩擦因数 f_{10} 随布卷半径的变化而变化,其形态呈抛物线型,在布卷半径为 0.10 ~ 0.15 m 时存在极大值。选择驱动辊包覆材料时,其摩擦因数应大于该极大值,推荐选择摩擦因数较大的网纹橡皮(见图 3(d))。

4) 布面张力 T_0 增大,f_{10} 增大;布卷芯轴质量 G_{20} 增大,f_{10} 减小。因此可以通过减小布面张力 T_0,或者对布卷向下加压,防止布卷与驱动辊之间打滑。

5) 与匀速运动过程相比,布卷在启动瞬时更容易打滑,此时,需将减速器输出扭矩 M_D 控制在 130 N·m 以内。若匀速运动过程中布卷与驱动辊之间不打滑,制动过程一般不会发生打滑现象。

后续可以通过对布卷内部布层间打滑条件的分析,获取合理的布卷卷绕张力需求,得出最佳收卷效果的布面张力 T_0 的控制方案。

参考文献:

[1] 王友钊,周香琴,黄静. 织机卷布机构的力学分析及其张力控制系统[J]. 纺织学报,2013,34(11):141.

[2] 周香琴,万祖干. 一种中心和摩擦混合驱动卷布装置:201110183470.2[P]. 2011-11-23.

[3] 许期颐,陈英群. 新型高速细针距弹力经编机卷布装置[J]. 针织工业,2011(6):11.

[4] 张志飞. 软包装复合膜收卷张力的优化[J]. 包装工程,2019,40(17):209.

[5] 尹苗苗,岳晓丽,钟毅,等. 织物卷绕张力的优化设计[J]. 东华大学学报(自然科学版),2017,43(5):655.

[6] 徐艳春. 玻璃纤维无捻粗纱布纬纱位移问题的探讨[J]. 玻璃纤维,2013(4):24.

[7] 朱好,郭永洪. 海绵膜复卷机收卷系统建模及张力控制[J]. 计算机仿真,2015,32(12):307.

[8] 曲宝军,范增华,李学伟,等. FFS 重膜印刷机收卷部双锥度张力控制方法[J]. 包装工程,2017,38(23):147.

[9] 陈建魁,金一威,尹周平. 柔性电子卷到卷制造收卷内应力研究综述[J]. 科学通报,2019, 64(5):555.

[10] XU Xiaoming, ZHANG Wuxiang, DING Xilun, et al. Design and analysis of a novel tension control method for winding machine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2018,31(6):79.

[11] HOU Hailiang, NIAN Xiaohong, CHEN Jie, et al. Decentralized coordinated control of elastic web winding systems without tension sensor[J]. ISA Transactions,2018,80:350.

[12] 尹苗苗,岳晓丽,钟毅,等. 针织物冷轧堆染色收卷张力设计[J]. 纺织学报,2017,38(4): 73 - 79.

[13] 胥小勇,孙宇,蒋清海. 薄膜张力控制系统的建模与设计[J]. 中国机械工程,2013,24(18):2452 - 2457.

[14] 章领,刘振兴,廖雪超. 薄膜生产工艺收卷精度优化控制仿真[J]. 计算机仿真,2018,35(2):181 - 185.

[15] 温雯,汤朋朋,陈建魁. 柔性膜材收卷内应力分布分析[J]. 机械设计与研究,2017,33(2):38 - 42.