

橡胶挤出无销钉螺杆替代方案的研究

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

0 引言

橡胶在挤出机上的加工多年来一直是工业的重要分支。技术弹性体产品、轮胎以及橡皮筋等日常用品已成为我们日常生活不可或缺的一部分。2022年, 全球共生产了2 960万t天然橡胶和合成橡胶, 这一吞吐量创下了21世纪以来的最高纪录。

近年来, 随着能源和原材料成本的上升, 成本效益对橡胶挤出过程越来越重要。橡胶挤出机主要有两种类型, 它们在橡胶的温度处理上存在差异。热喂料挤出机使用的是在上游步骤中已加热至约60~80 °C的材料, 因此挤出机只需对材料进行均匀化处理。相比之下, 冷喂料挤出机使用的是常温下的材料, 因此需要对材料进行加热和均匀化处理。冷喂料挤出机在当今工业中主要与销钉配合使用, 因为这种组合能显著提升材料质量。然而, 与带输送螺纹的螺杆相比, 销钉会降低最大吞吐量。此外, 与无销钉挤出机相比, 使用销钉会导致生产、维护和转换的复杂性增加, 进而提高成本。鉴于这一情况, 并结合帕德博恩塑料技术研究所关于具备径向和轴向螺纹偏移特性的螺杆所取得的积极研究成果, 这些替代螺杆概念亟待进一步深入探索。

1 材料

研究中采用了一种基于轮胎生产过程中产生的混炼物而开发的NR混炼物。该混炼物专为这些研究制定, 旨在通过使用不同颜色的材料制作色块以评估混炼质量。因此, 该材料分别以黄色和蓝色两种颜色呈现, 但配方保持一致。为去除炭黑, 开发工作得到了行业内多方合作伙伴的协助, 确保该混炼物仍能准确反映其应用场景。

如表1所示, NR混炼物由90 份 NR和10 份 SBR构成。其填料包括二氧化硅(比例为68.75 份)和滑石粉(比例为15 份)。此外, 还添加了少量增塑剂、着色

剂及其他微量化学品, 这些化学品中含有硫基交联系统, 使得混炼物总含量达到206.45 份。该混炼物虽基于轮胎生产中的混炼物选取, 但不含炭黑。该配方导致 M_{L1+4} (100 °C)的黏度高达93 MU, 因此在加工过程中混炼较为困难。

表1 NR混炼物的成分

成分	配方比例/份
NR	90
SBR	10
塑化剂	3
二氧化硅	68.75
白垩	15
着色剂	3
微量化学品	16.7
总计	206.45

2 设备和螺杆

用于实验研究的设备为60 mm橡胶挤出机QSM 60 k-12 D, 由Troester公司(德国汉诺威)制造。该挤出机可配备模块化筒体部件, 使其长度可调。每个筒体部件长度为4.5 D , 并设有水温控制通道以及4个针位, 每个针位有6个针。进料段和所用的螺杆也具有水温控制功能。本案例中采用的配置如图1所示, 由三个部分组成。

桶形部件的总长度为18.3 D 。在每个安装的桶形部件的第二个销钉位置处, 可以记录压力。此外, 该压力也可以通过额外的测量环直接在螺杆尖端进行记录。螺杆尖端还配备有温度测量刀片, 能够在通道横截面上的七个不同位置记录温度。实验中采用了一个方形节流模, 其开口尺寸为86×86 mm。

对于双色色块评估, 采用了ImageJ软件。Image J是一款开源软件, 适用于多种应用场景, 因此常被用于研究目的。在颜色分析方面, 原生软件可直接使用, 无需修改, 因为它能够分析具有多种颜色光谱的图片。

当橡胶在筒体内进行硫化时, 可以从螺纹通道

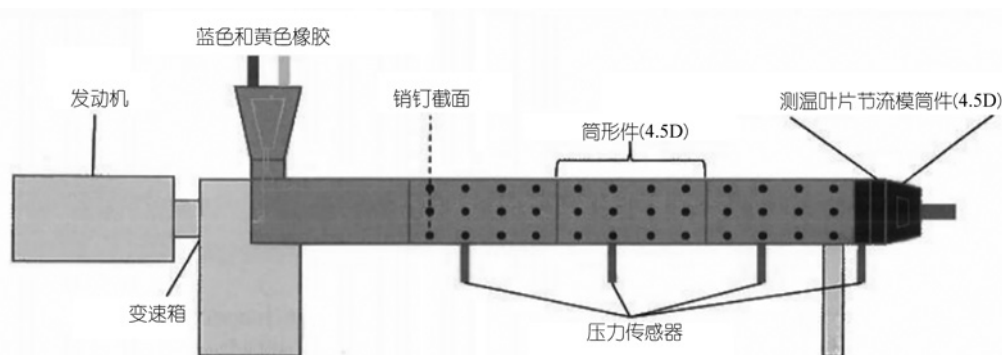


图1 实验装置

中切取小片。这些小片可以通过ImageJ进行扫描和分析，以比较两颗螺杆和不同的运行点。该分析之所以可行，是因为存在蓝色和黄色材料。借助ImageJ的颜色阈值功能，可以检测 剩余蓝色和黄色材料的面积。基于这些面积数据，通过公式1可以计算表面混炼部分：

$$A_m = A_t - (A_y + A_b) \quad (1)$$

式中：\$A_m\$=混炼区；

\$A_t\$=总面积；

\$A_y\$=黄色区域；

\$A_b\$=蓝色区域。

该公式已经经过试验验证，证明其是量化材料均匀性的有效方法。表2中展示的颜色阈值已进行相应调整，因为这些值需针对每种混炼物单独设定。对于红色、绿色和蓝色，可通过复选框决定是否允许该颜色的定义范围通过，具体情况详见表2。因此，蓝色和黄色表面得以分离，如图2所示。



图2 图像中颜色阈值处理产生的总（左）、黄色（中）和蓝色（右）表面

表2 NR 的色彩阈值

	NR蓝色		NR黄色	
	范围	通过	范围	通过
红色	255~255		25~170	
绿色	0~255	X	0~0	
蓝色	0~45	X	0~0	

在实验研究中，采用了两种不同的螺杆，以对比传统概念与基于偏移量的替代概念。螺杆A代表销钉式挤出机，直径为60 mm，长度为18.3 D。该长度选择依据冷喂料挤出机的典型长度。它是一款两通道单节

螺杆，螺距为80 mm，通道深度为12 mm。其特点是每个螺纹段设有12个间断，每个间断长度为10 mm。这12个间断分别对应料筒内的12个平面，每个平面可容纳6个销钉。研究中使用的72个销钉，直径为6 mm，长度为10 mm。螺杆\$A_2\$在无销钉的情况下，具备相同的几何特性，唯一区别在于飞行中断。相反，螺杆\$A_2\$的每个螺纹段设有12个轴向偏移，每个偏移为25 mm。两者结构如图3所示，几何参数详见表3。

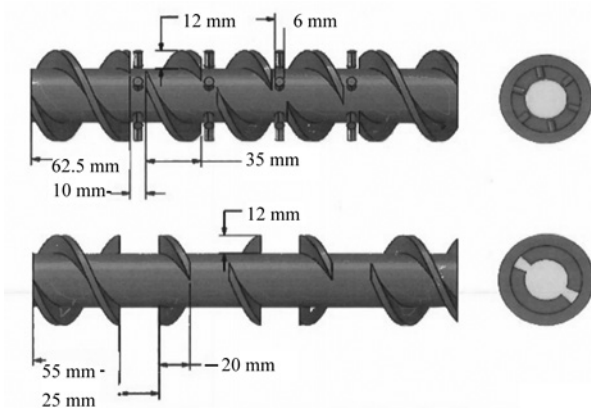


图3 带销钉的螺钉 A（顶部）和无销钉螺钉 A2（底部）的几何形状

表3 两种螺杆的几何参数

		A	B
直径/mm		60	
区域数/mm		1	
长度/mm		18.3D(1 098)	
通道深度/mm		12 mm	
螺距		80 mm	
偏移量	12个引脚层，每层6个引脚：引脚：直径6 mm，长度10 mm		12个偏移层，每个轴向偏移25 mm
通道		2	
直径/mm		60	
通道		2	

4 实验设计

实验设计包含12个试验点，这些试验点由两组螺杆、两种不同的温度曲线以及三种不同的螺杆转速组

合而成。这些变量组合形成了2组螺杆的6个不同运行点,具体见表4。

表4 NR混炼物的实验设计

材料	螺杆	螺杆转速 /rpm	温度分布曲线
NR	A	10	T_1
			T_2
		20	T_1
			T_2
		30	T_1
			T_2
	A_2	10	T_1
		20	T_2
			T_2

如表5所示,两种温度分布的共同点在于,料筒温度从进料段到螺杆尖端逐渐降低。模头温度始终设定为80℃,而螺杆温度则有所变化,因此有时螺杆温度低于料筒温度,有时则高于料筒温度。第一种温度曲线(螺杆温度较高)被选中以实现高吞吐量,而第二种温度曲线(螺杆温度较低)应能更好地混炼材料,每个操作点启动并运行直至过程稳定。吞吐量、压力和温度从稳定过程中的测量值获得。因此,在螺杆尖端使用温度测量叶片记录通道宽度内的七个温度。此外,使用四个压力传感器记录螺杆沿程的压力。随后挤出机被完全停止。随后将所有段的温度设置为140℃,这是由于水温控制系统限制下的最大可能温度。橡胶在料筒内完成硫化后,螺杆连同硫化后的橡胶一同从料筒中取出,以便从通道中取样。

表5 温度分布曲线 T_1 和 T_2

	温度 /℃				
	进料区	料筒 1&2	料筒 3	螺杆	管芯
T_1	70	70	50	80	80
T_2	80	80	60	50	80

5 结果

首先,分析了不同参数对吞吐量的影响,其中首先分析了两种不同螺杆概念对吞吐量的影响。如图4所示,螺杆的影响与加工过程中使用的温度分布密切相关。当使用温度分布1时(该分布用于实现高吞吐量),可以观察到无齿螺杆 A_2 的吞吐量高于通常使用的带齿螺杆A。相比之下,第二种温度分布下的吞吐量则更为接近。螺杆似乎对吞吐量影响较小。有时螺杆A的吞吐量较高,有时是 A_2 ,但从标准差来看,它们实际上非常接近。这与实验中SBR和EPDM混炼物的结果略有不同,因为在那里螺杆 A_2 的吞吐量始终比

带销钉的螺杆A低约10%。因此,材料性能与螺杆设计之间确实存在相互依赖关系。

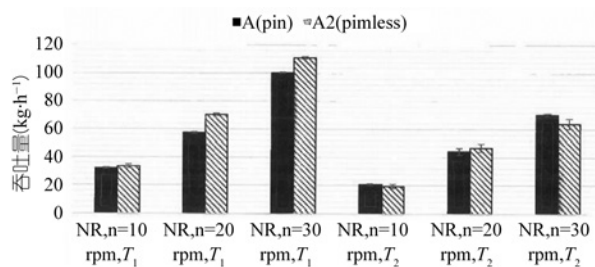


图4 不同机组的NR吞吐量

从图5所示的温度分布情况可以看出,温度分布1所引发的吞吐量显著高于温度分布2。这一结果与所选温度曲线的预期效果相吻合,并且在图10展示的其他材料中也观察到了相似的现象,只不过在那里的效果更为突出。此外,可以明显看出,不同温度分布的影响在无销钉的 A_2 螺杆上表现得尤为显著,这一点由右侧的六列数据所证实。因此,螺杆设计与温度分布的影响之间存在着明显的依赖关系。

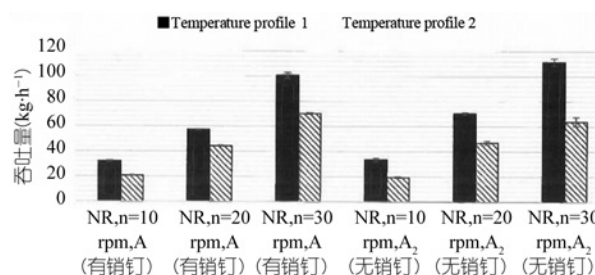


图5 不同温度曲线下NR的吞吐量

较高的螺杆转速通常会导致挤出工艺中吞吐量增加。但这一规律并非无限适用。在高螺杆转速下存在一个极限值。即使尚未达到该极限,这一现象通常也能观察到,因为随着螺杆转速的增加,单位吞吐量会出现下降趋势。对于图6中NR的结果,这种现象无法观察到。单位吞吐量随螺杆转速的提高略有波动,且有增加的趋势。这再次表明了与材料性质的关联,而这种关联在EPDM和SBR之间并未观察到,因为EPDM和SBR彼此之间的相似性远高于与NR的相似性。

因此,就吞吐量而言,可以得出结论,它强烈依赖于螺杆速度、温度分布和螺杆几何形状。此外,这些因素相互影响,因此不能单独考虑。可以认为材料特性也是一个重要因素。挤出物的热学特性对工艺评估同样至关重要。一方面,通道内的最高温度反映了焦烧的风险;另一方面,通道截面内最高温度与最低

温度之间的温差是工艺热混炼质量的指标。温差越小,混炼效果越好。为了确定这些值,实验中自动将螺杆尖端的测量刀片从温度传感器获取的七个值写入协议。

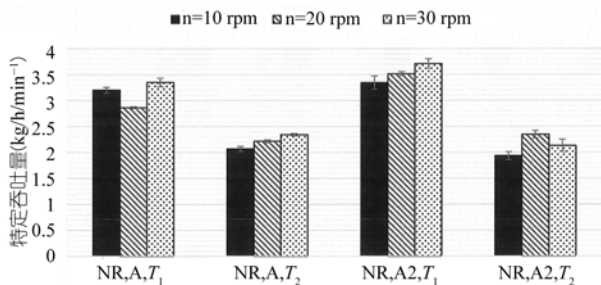


图6 三种螺杆速度下NR的特定吞吐量

从图7可以看出两种不同的效应。首先可以看出,与10、20和30 rpm的柱子相比,更高的螺杆转速会导致热均匀性较差。螺杆转速越高,得到的 A_T 值越高,且与螺杆或温度分布无关。此外,可以看出无键螺杆 A_2 在大多数情况下导致更低的最大温度差。这与其他材料的结果一致。无销钉螺杆 A_2 在热混炼质量方面也表现更优。因此,可以认为螺杆偏移是改善热均匀性的良好混炼部件,甚至比带销的螺杆略胜一筹。然而,温度分布对热混炼质量的影响并未明显体现。

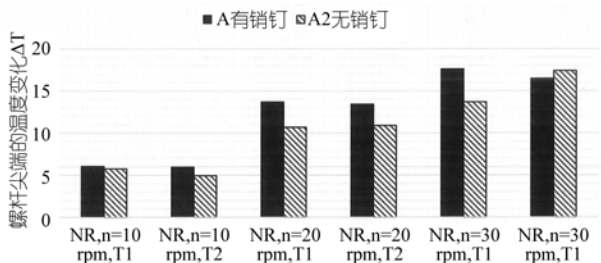


图7 NR和不同试验点的AT

关于最高温度,可以观察到类似的效果。随着螺杆转速的提高,最高温度会因剪切作用导致的热量散发增加而升高,这一点在图8中从左到右比较各柱时可以明显看出。此外,可以观察到温度分布一导致的最大温度比温度分布二略低。观察螺杆时可以发现,两根螺杆的最高温度相差不大,但对于大多数点而言,没有销钉的螺杆温度略低,这一现象在过往实验中对EPDM和SBR材料的观察中也有所体现。这可能由于螺杆 A_2 的螺纹长度较短且缺少销钉导致剪切应力降低。为了获得更可靠的信息,需要对其他几何参数的替代方案(如 A_2)进行进一步研究。

因此,就热混炼质量和最高温度而言,螺杆 A_2 可

能更优,因为较低的最高温度允许提高螺杆转速,从而提升生产效率。

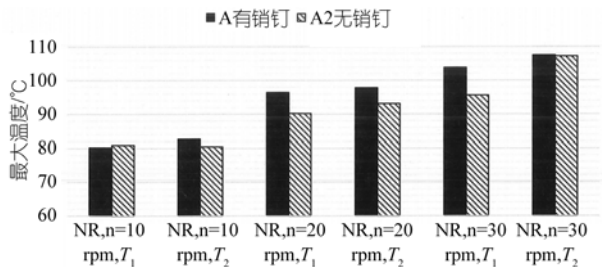


图8 NR和不同试验点的最高温度

第三个需要考虑的重要点是材料混炼质量,可以通过根据方程1计算的混炼表面进行分析。两种研究的材料表现相同,且两种螺杆概念的材料混炼质量均良好且可比。然而,本文研究的NR混炼物情况不同,如表6所示。

表6 不同试验点下螺杆顶端的混炼表面

材料	螺杆	螺杆转速 /rpm	温度分布曲线	螺杆顶端的混炼表面 /%
NR	A	10	T_1	99.35
			T_2	98.11
		20	T_1	99.84
			T_2	99.89
		30	T_1	96.27
			T_2	99.94
NR	A ₂	10	T_1	71.19
			T_2	99.56
		20	T_1	61.66
			T_2	99.67
		30	T_1	60.69
			T_2	99.67

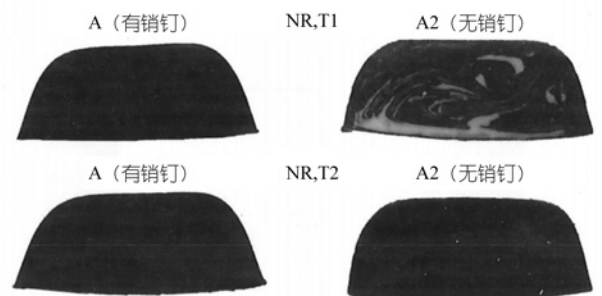


图9 螺钉尖端和温度分布的示例性薄截面

对于NR混炼物,材料的均匀性强烈依赖于与所选温度曲线相关的螺杆设计。对于固定螺杆,螺杆尖端的混炼表面始终非常接近100%,这表明材料具有高均匀性。对于无固定螺杆,在温度曲线2(即为获得更好混炼质量而选择的曲线)下也能观察到类似现象。但若改用为提高吞吐量而选择的温度曲线,可明显观察到混炼质量的显著下降。混炼表面约为60%至70%的

值表明混炼质量非常差，这一点也可通过图9中所示的薄片观察到。

这种无螺纹螺杆在温度分布 T_1 下的混炼质量较差的现象，在考虑螺杆沿长度方向的混炼质量发展时也能观察到。因此，从图10所示的螺杆的4个不同位置进行取样。如图11所示，带销螺杆A沿螺杆长度方向呈现出连续的混炼表面，在螺杆尖端处几乎达到100%。相比之下，无销钉螺杆 A_2 的混炼表面虽然也呈增加趋势，但其发展速度远低于带销螺杆，尤其在30 rpm时差异更为显著。



图10 从螺钉上取下试样的位置

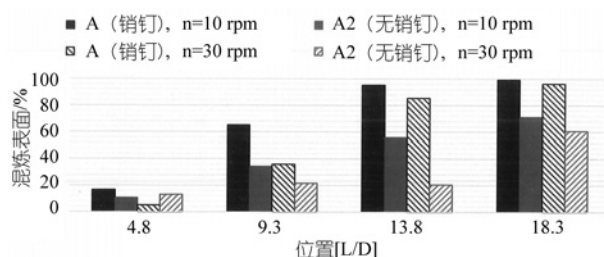


图11 温度分布 T_1 和不同试验点的混炼表面

与之形成鲜明对比的是，图12展示了在温度曲线 T_2 下的混炼表面发展情况。对于该温度分布（其被选中以实现更优的混炼质量），两根螺杆沿螺杆长度方向的混炼表面均呈现大致相等的增长。此外，由于温

度分布的优化，它们在更早阶段便达到了接近100%的混炼效果。

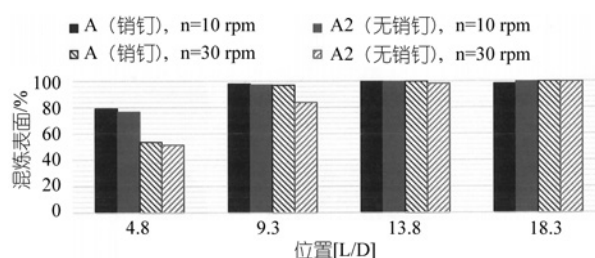


图12 温度分布 T_2 和不同试验点的混炼表面

6 结论与展望

此外，所研究的螺杆展现出显著的吞吐量，这一特性同样受温度分布的影响。然而，在实际应用中，这些标准往往相互冲突。要么追求更高的吞吐量，要么实现优异的混炼效果和热均匀性，后者可通过无销钉螺杆概念在天然橡胶挤出过程中得以实现。因此，不同螺杆概念的适用性不仅取决于加工条件，正如与前次实验对比所揭示的，还受到材料性能的制约。

因此，可以得出结论，无销螺纹概念在工业应用中具有显著的潜力，但需进一步深入研究。这是因为螺纹的几何设计将直接影响到生产效率和混炼质量。鉴于此，应重点研究基于径向和轴向螺纹偏移概念的螺杆几何结构。考虑到实验测试成本较高，计划在模型与已进行的实验测试结果相匹配后，通过CFD模拟对新概念进行全面分析。鉴于评估目标聚焦于螺杆的热混炼及材料混炼性能，模型构建过程中应引入准两相模型，以便全面考量材料因素的影响。

译者：章羽

原文：KGK No.2/2025, by L. Schmidt, F. Bruning, Paderborn.

