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）

摘要：本研究对比分析了传统销钉螺杆与无销钉螺杆在橡胶挤出过程中的性能差异，重点关注吞吐量、热均匀性和混炼质量等关键指标。实验结果表明，无销钉螺杆在特定温度条件下可实现更高的吞吐量和更优的热均匀性，但其混炼质量受温度分布影响显著。研究认为，无销钉螺杆在工业应用中具备潜力，但其性能受材料特性与工艺条件共同制约，需进一步优化螺杆几何设计。

关键词：无销钉螺杆；橡胶挤出；混炼质量；热均匀性
中图分类号：TQ330.41　　**文章编号**：1009-797X(2025)10-0073-06
文献标识码：B　　DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.10.016

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 ℃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定制，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。

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

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 ℃）的黏度高达 93 MU，因此在加工过程中混炼较为困难。

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。

作者简介：章羽（1991—），男，本科，主要从事橡塑技术装备方面的研究，已发表论文多篇。

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

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

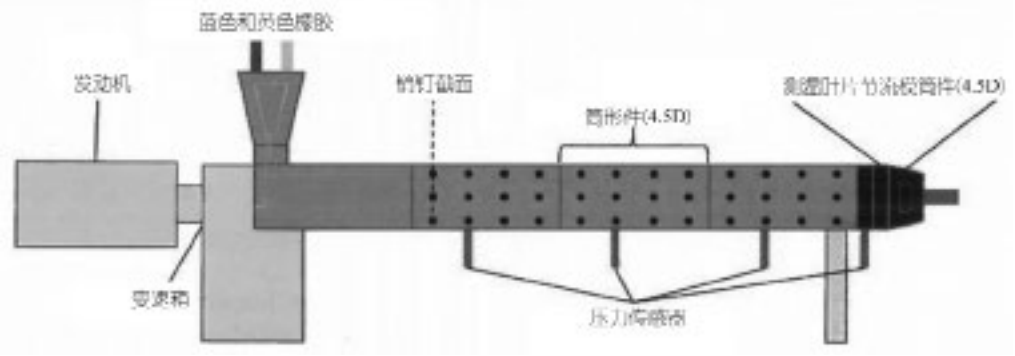

图 1　实验装置

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。

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

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

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。

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	

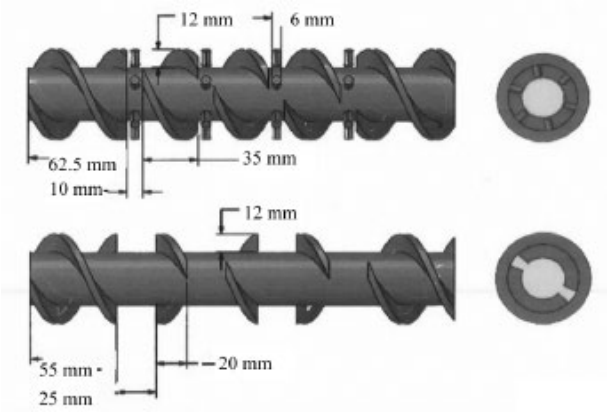

图 3　带销钉的螺钉 A（顶部）和无销钉螺钉 A2（底部）的几何形状

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
			T_2
		20	T_1
			T_2
		30	T_1
			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 T1 和 T2

	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。

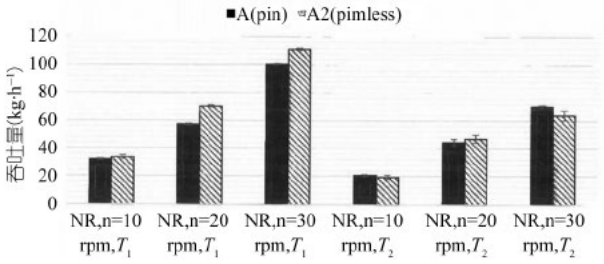

图 4　不同机组的 NR 吞吐量

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 A2 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。

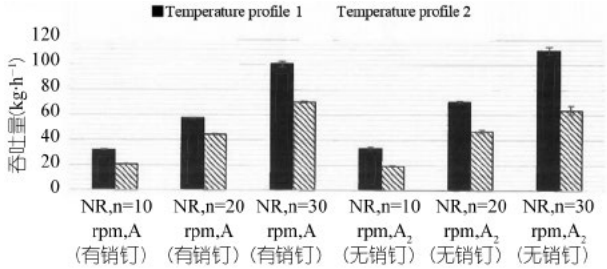

图 5　不同温度曲线下 NR 的吞吐量

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。

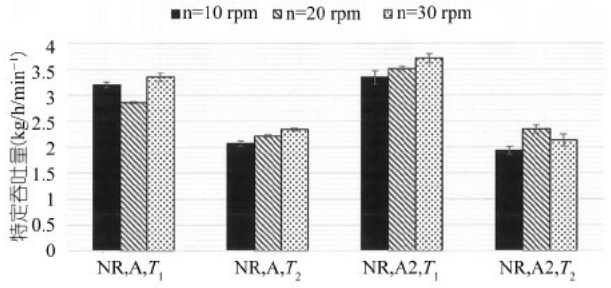

图 6　三种螺杆速度下 NR 的特定吞吐量

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。温度差越小，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。

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。

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，

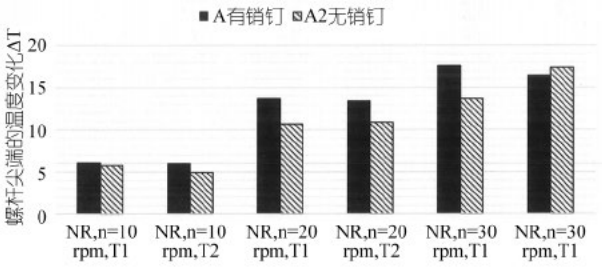

图 7　NR 和不同试验点的 AT

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。

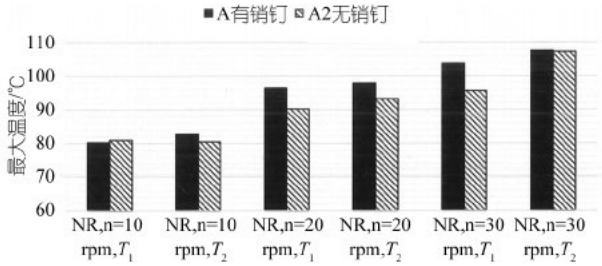

图 8　NR 和不同试验点的最高温度

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。

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
	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

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 中所示的薄切片观察到。

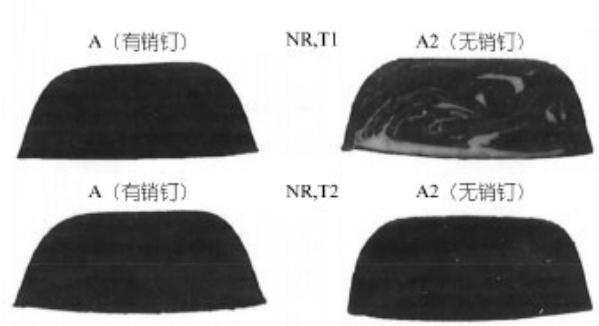

图 9　螺钉尖端和温度分布的示例性薄截面

这种无螺纹螺杆在温度分布 T1 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

与之形成鲜明对比的是，图 12 展示了在温度曲线 T2 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。

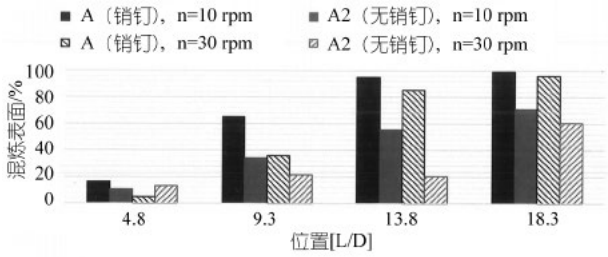

图 11　温度分布 T_1 和不同试验点的混炼表面

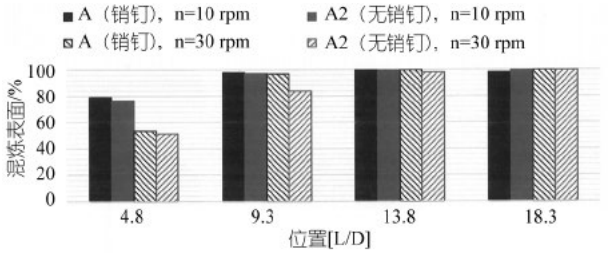

图 12　温度分布 T_2 和不同试验点的混炼表面

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。

Investigation of alternative pinless screw concepts for rubber extrusion

Zhang Yu, compiler

(National Machinery Information Center of Rubber & Plastics, Beijing 100143, China)

Abstract: This article compares and analyzes the performance differences between traditional pin-type screws and pinless screws in the rubber extrusion process, focusing on key indicators such as throughput, thermal uniformity, and mixing quality. Experimental results show that under specific temperature conditions, the pinless screw can achieve higher throughput and better thermal uniformity, but its mixing quality is significantly affected by temperature distribution. The study suggests that the pinless screw has potential in industrial applications, but its performance is constrained by both material characteristics and process conditions, necessitating further optimization of the screw geometry design.

Key words: pinless screw; rubber extrusion; mixing quality; thermal uniformity

(R-03)

首批零关税泰国橡胶，9 月试点

The first batch of Thai rubber enjoying zero tariff will be put into pilot operation in September

据消息，泰国橡胶管理局（RAOT）已与中国有关方面合作，拟通过湄公河通道出口橡胶至中国，并享受零进口关税，首个试点项目计划 2025 年 9 月启动。

首批 400 t 杯状橡胶将于 9 月开始装运，并预计出口量将有所增加。

泰媒称，作为一个试点项目，此举将显著提升泰国橡胶在中国的竞争力，并扩大其市场规模。同时也将探索各种操作流程，包括装船，以及中泰双方的海关手续，为未来常态化运输积累经验。

此外，泰方还计划，首批试运完成后，在 10 月份将商业运输能力提升至 2 400 t，之后每月出口量将超过 1 万 t。

泰国媒体表示，该通道所有橡胶享受零进口税，将提高泰国橡胶价格，并成为增加泰国橡胶出口的重要机制。

摘编自“中国轮胎商务网”

沈阳赛轮新和平项目开工 打造轮胎行业智能制造新标杆

The new Heping project of Shenyang Sailun has commenced, setting a new benchmark for smart manufacturing in the tire industry

2025 年 9 月 9 日上午，沈阳市 2025 年秋季重点项目开工动员大会在于洪区隆重举行。省委常委、市委书记霍步刚，市委副书记、市长吕志成等领导出席大会，与各市直相关部门负责人、各重点企业代表共同见证全市重点项目集中开工。

作为本次开工动员大会的重要组成部分，铁西区（经开区、中德园）秋季重点项目暨赛轮新和平年产 330 万条全钢子午线轮胎及 2 万 t 非公路轮胎项目开工仪式同期举行。

赛轮（沈阳）轮胎有限公司总经理刘汉军作为企业代表上台致辞。他介绍了赛轮新和平项目的建设规划情况，并对省、市、区各级领导在项目推进中提供的支持表示衷心感谢。他表示，赛轮新和平项目总投资近 20 亿元，将打造成为年产 330 万条全钢子午线轮胎及 2 万 t 非公路轮胎的智能化生产基地。项目达产后，预计年产值将突破 32 亿元，带动千余人就业，为沈阳建设先进制造强市、为辽宁全面振兴注入新动能。

大会最后，与会主要领导和企业代表共同上台按下启动柱，标志着包括赛轮新和平年产 330 万条全钢子午线轮胎及 2 万 t 非公路轮胎项目在内的一批重点项目，全面进入建设实施阶段。

赛轮新和平项目的开工，标志着赛轮在东北地区的战略布局迈出关键一步。赛轮集团将以新项目建设为契机，深度融入沈阳市先进制造业发展格局，通过持续创新和智能化升级，为辽宁全面振兴贡献力量。

摘编自“赛轮集团”

(R-03)