

可持续发展与轮胎制造路

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

0 前言

可持续发展已成为社会的一种期望和价值观。它涵盖生态实践、健康、资源保护和资源安全。推动可持续发展的宏观驱动力是多维的, 各利益相关方(如中央政府、地方政府、人口群体和制造商)各有不同的优先事项。然而, 共同的主要因素包括: 人口增长(到2050年可能达到100亿人)、对更高出行便利性和自由度的需求, 以及教育水平的提升。零污染是社会的一项诉求, 此外还包括清洁的水源、安全的食品供应, 以及低成本的医疗和健康服务。

气候变化虽存在争议, 但已成为政策指导的主题, 而这些政策往往缺乏充分的同行评审和有效的沟通。但这并不免除相关行业和监管机构在排放控制和废物处理等方面的责任。另一个方面是能源和食品供应, 包括获取渠道、按需运输、低成本清洁能源以及清洁无污染的食品供应。轮胎行业已认识到追求可持续发展的必要性。然而, 对于具体目标及其实现方式, 行业内尚未达成共识。

轮胎行业是全球工业生态系统的一部分。全球轮胎市场规模目前约为2650亿美元, 预计到2030年将达到3940亿美元, 年均增长率接近7%。由于制造商在报告政策、统计范围以及机构和国家层面的报告要求方面存在差异, 全球轮胎产量报告的数据差异较大。然而, 综合估算涵盖汽车和商用充气轮胎、非充气工业轮胎及其他特种轮胎产品的总产量, 全球年产量已远超30亿条。因此, 这无疑是一个高速增长的行业(图1)。产品种类繁多, 其中高性能充气轮胎是批量生产中最复杂的聚合物复合材料产品。

可持续轮胎产品具有多项特性, 其中四项包括: 低滚动阻力(从而有助于最大限度地减少轮胎对车辆燃油消耗和二氧化碳排放的影响)、安全可靠

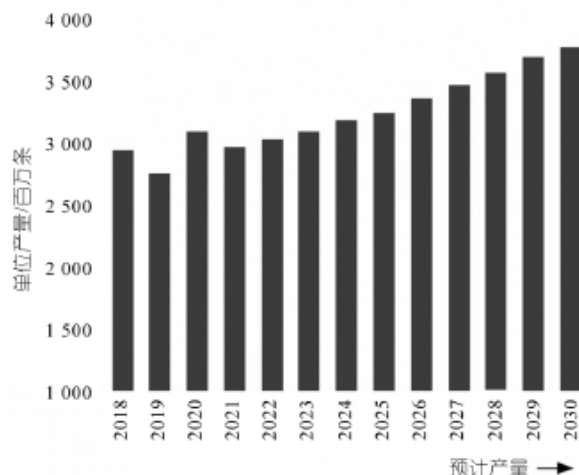


图1 全球轮胎总产量估计值

地运行、在轮胎使用寿命期间将挥发性有机化合物(VOC)排放降至最低, 以及延长使用寿命并便于“报废”处理(ELT)。在制造过程中, 这首先取决于以下几个关键要素:

- (1) 以“零污染”为核心的环保措施, 包括将工厂排放降至最低甚至完全消除, 以及处理工业废弃物;
- (2) 资源节约, 例如提高制造设备的能效和生产率、优化吞吐量以及高效利用原材料;
- (3) 制造责任管理, 重点关注员工, 认可企业在当地社区及股东中的作用。

关于排放, 这是发展可持续运营的重要参数之一, 国际协议已制定相关定义, 从而能够描述和量化排放量, 进而制定内部流程以减少排放。简而言之:

- (1) 范围1排放是指制造商资产(例如轮胎工厂、仓储、后台运营)产生的直接排放;
- (2) 范围2排放源于(例如)从电网购买并提取的用于为轮胎工厂供电的电力; 具体包括用电量及能源来源;

(3) 范围3涵盖其余所有排放；其中很大一部分来自轮胎工厂的供应链及其运营活动。

作为制造作业复杂性的又一因素，现代轮胎制造作业正变得日益专业化。例如，新建工厂通常会专门设计和建造生产线以生产某一类轮胎。乘用车轮胎工厂可生产乘用车轮胎（PCR）、轻型卡车轮胎（LT），有时还生产农用轮胎；而卡车轮胎工厂则生产中重型卡车轮胎（RMT 或 TBR）、越野轮胎

（OTR）以及飞机轮胎。这种分工主要源于材料、胶料配方、生产计划效率以及设备类型（如钢丝压延机和挤出机）和设备规模的差异。由于赛车轮胎需要频繁更新且生产批次极短，通常在轮胎公司的研发中心制造。然而，对于所有工厂而言，生产过程均可描述为一系列单元操作，从原材料接收开始，直至最终产品完成（见图2）。

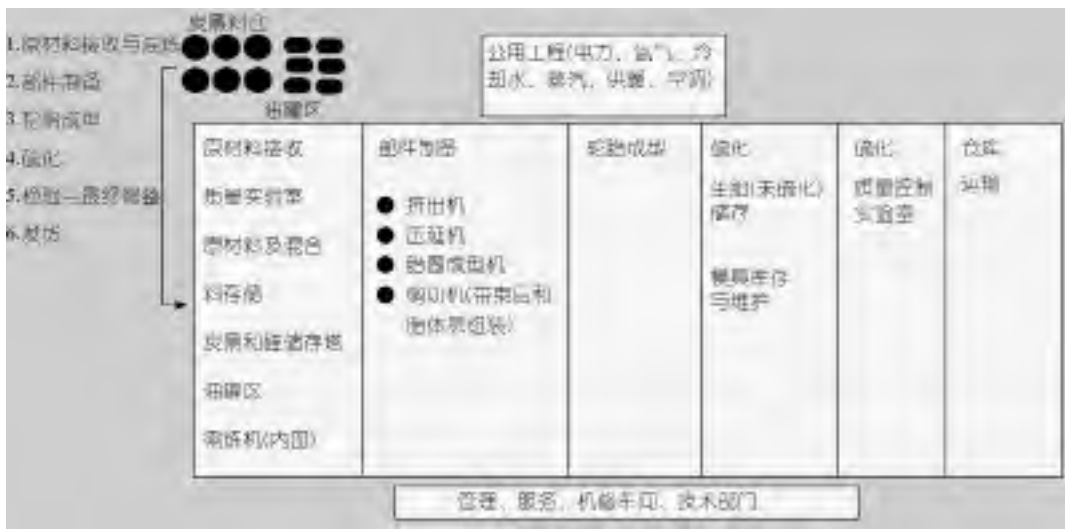


图2 轮胎制造工序

鉴于轮胎复合材料的复杂性以及必须满足的性能要求，轮胎的可持续性比单纯（但重要的）环境保护主义更为多样化。它包括：

- (1) 原材料与复合材料技术；
- (2) 制造效率与材料转化；
- (3) 产品性能以及在“报废”（ELT）期限内将最终产品退出使用。

因此，这是一个多维度的领域。对于轮胎工程师和技术人员而言，其涵盖范围包括工业废料的处理、消费后产品的处置以及ELT处理，还涉及水和电力的高效利用等公用设施管理，以及轮胎滚动阻力与安全性（耐久性和使用可靠性）；工业卫生、制造效率和生产效率在确保终端消费者获得投资回报方面变得至关重要。

因此，可以提出一套可持续性价值观，用以规范轮胎制造商的生产运营。这些价值观包括：

- (1) 安全与工业卫生；干净的工厂就是安全的工厂，干净的工厂也是盈利的工厂；
- (2) 节水；
- (3) 电力与能源效率；
- (4) 减排；
- (5) 材料转化效率：100% 转化率目标；
- (6) 设备可靠性、预防性维护、效率和正常运行时间；
- (7) 生物材料；
- (8) 工业废料的回收或处置，例如橡胶混炼料、增强材料及未通过最终检验的轮胎，即工业废料、水，以及消费后废弃物的处置；
- (9) 二次污染控制；托盘和纸板包装的处置、过剩化学品库存、有毒物质处理、生产过程中产生的模具毛边和边角料；
- (10) 社会意识、员工参与、社区承诺以及企业

对社会的贡献。

1 节能

节能理念是制造运营不可或缺的一部分。所有轮胎制造工序中自动化程度的不断提高带来了诸多益处。在混炼和轮胎成型环节安装新设备，可使能耗降低多达30%。此外，与传统设备相比，新型自动化成型机等新设备的占地面积可减少多达50%。新型混炼车间系统和轮胎成型设备在可持续性方面的优势包括：借助自动称重系统减少浪费，以及提高成型机成型部件的精度。

可持续制造运营的另一项要求是实施积极主动的预防性维护计划。这不仅有助于延长设备使用寿命，还能确保在最高质量水平下保持生产吞吐率。

轮胎厂生产工程师的众多目标之一是实现原材料的完全转化并防止浪费。因此，应制定相应的政策和程序，确保过剩的橡胶混炼胶能够以“x”%的比例在密炼机中，或以“y”%的比例在挤出机进料系统中，重新混入原始胶料中。通过实验确定的x和y百分比值表明，原始胶料的性能不会下降。其他控制例外情况的规定可能仅允许将原始胶料重新混入，例如钢丝覆胶或内衬胶中。工程师还可以将多余的复合材料用于其他用途，例如添加到隔离层/复合层/粘合层或条状复合

材料中，同时仍需确保关键复合材料性能不会发生变化。此类用途还可带来额外好处，例如防止内衬层起泡并提高组件黏合性。

同样，也可以制定相关政策，允许将多余材料掺入胎面橡胶配方中，同时确保不会影响耐磨性或其他性能指标。因此，循环利用在轮胎制造的可持续性方面发挥着关键作用，但为了确保最终产品的性能得到维持，制定明确的规则至关重要。复用材料分为三种类型：在密炼机、压延机或挤出机中将原始胶料重新加入新胶料中；将非原始胶料重新加入新胶料中；以及处理多余的原材料。

例如，可以提出一个简单的矩阵，说明哪些组分可以接受再加工或废料利用，再加工的类型，以及可以添加多少（见表1）。这个简单的矩阵将成为制定再加工方案的基石，涵盖每种原材料、产品线中的每种橡胶配方以及其他物料，例如来自混炼设备的溶剂和润滑剂。该方案还将包括胶料的保质期和储存规范、加工规范以及工厂胶料的物理性能。这些内容将因制造商、胶料、轮胎使用环境和轮胎设计而异。在确定哪些胶料可以接受复用材料后，该方案应进一步规定每种具体胶料的返工比例、最大允许添加量，并确认胶料的力学性能不会因此受损。

表 1 循环利用方案的概念概述

轮胎组件	乘用车轮胎（PCR）	轻型卡车轮胎（RLT）	商用卡车轮胎（TBR）	翻新（TBR）和可翻新胎体	关于非原始配方胶料的管控政策
胎面	是	是	是	是	
子胎面	否	否	否	是	
带束层、帘布层	否	否	否	否	*
胎圈衬里	是	是	否	否	*
胎侧	是	是	否	否	
楔形片	是	否	否	否	
刮水器	是	是	是	是	
内衬层	否	否	否	否	*

针对每种材料、胶料及轮胎生产线部件，均已制定循环利用方案

业内有一些统称用于描述资源节约策略，可概括如下：

(1) 轻量化

a.材料轻量化，侧重于材料的优化利用、重量优化以及部件厚度优化；

b.相关技术，例如电子束辐射（EBR）。

(2) 再利用

a.报废轮胎（ELT）和工业橡胶制品的再利用；

b.废旧轮胎已被用于作为燃料、翻新、沥青生产，以及转化为新的高附加值产品，如石墨烯和再生炭黑。

(3) 回收利用

将现有橡胶制品回收利用制成新产品，例如通过常温研磨、低温研磨或湿法研磨。其优势在于能够控

制成本，并在添加到新胶料中时改善加工性能。

(4) 回收

可用于生产此类材料的技术包括超声和化学脱硫化、催化降解、热脱硫化或热解，以及化学机械法和热机械法。

回收利用策略现已成为一项增长机遇，新的生产设施每年可生产多达100 000 t的回收炭黑（rCB）、油料和钢铁，这些产品可被重新加工成新钢丝及其他钢铁产品。一个典型的例子是大陆碳素公司位于阿拉巴马州菲尼克斯城的工厂，该工厂预计将于 2026 年投产，届时每年将生产 30 000 t再生炭黑、35,000 吨轮胎热解油和 2 300 t钢帘子线（这三类产品均以报废轮胎为原料）。预计到2030年~2035年期间，再生炭黑（rCB）的产量增长率和利用率将达到35%左右。

2 公用事业

在公用事业领域，与可持续性和资源节约最密切相关的两大要素是电力和水资源。几乎所有国家的电网都因信息技术和数据挖掘行业的需求而面临压力；水资源方面的情况也类似。包括计算机数据中心和计算机零部件制造商在内的这些行业，对水资源的需求量很大。

各轮胎制造商的电力消耗情况各不相同，尽管近期采取的措施已使能耗显著降低（表2）。用水问题更为关键，但与电力消耗一样，不同制造商之间的用水量也存在很大差异。水资源管理主要分为两类：

表2 效用函数

2012~2016年间		用水量	
制造商	千瓦时/吨成品	制造商	升/吨成品
1	4 000	X	12272
2	3 839	Y	8590
3	4 978	Z	7000
4	3 678		
5	3 960		

- (1) 生产过程中每吨成品的用水；
- (2) 来自洗涤器和冷却系统的废水处理。

令人鼓舞的是，近期可持续发展报告中的新数据显示，每吨成品的用水量正逐渐降至5 000 L及以下。

在制造业务中，排放是公用事业的一部分。监管机构和社会目前对二氧化碳、其他温室气体（GHG）排放以及挥发性有机化合物（VOC）提出

了期望，即应通过使用洗涤塔将其降至最低，或者在可能的情况下最好在源头予以消除。预计美国环保署（EPA）将很快开始监测轮胎厂的排放情况，此后这可能会成为未来监管关注的焦点。此外，还有与终端产品性能相关的排放，包括滚动阻力、车辆燃油消耗以及车辆轮胎系统产生的排放。

工业化国家正在采取两种措施，包括减少制造业排放（即节能）以及温室气体捕获。在美国，温室气体减排和捕获方面取得了巨大进展。雪佛龙和埃克森美孚在北美的设施目前已能将碳以二氧化碳形式捕获，其捕获量相当于整个电动汽车所减少的二氧化碳排放量。工业界已制订计划，旨在近期内将二氧化碳排放量减少2亿t。随着二氧化碳转化为烃类物质的科学技术不断发展，这也为未来提供了潜在的原料来源。支持将捕获的二氧化碳用作新原料的研究，有望在未来吸引大学和研究机构的资金支持。

3 原材料

用于生产轮胎的材料在不断发展，供应商行业在材料科学领域取得了积极的进展，从而不断提升了最终产品的性能。新一代溶液丁苯橡胶（SBR）的开发就是一个例子。最新的具有链端官能团的丁苯橡胶聚合物大幅降低了胶料的佩恩效应以及胶料的滞后参数，如损耗模量和损耗角正切值。然而，其他现有材料在可持续性战略中发挥着同等甚至更重要的作用。例如，内衬层是现代轮胎中最重要的部件之一，它既影响耐久性，又影响燃油消耗。内衬层的成分和结构是关键参数。纳米技术可以促进内衬层性能的下一步必要变革，并且可以围绕有机粘土，尤其是石墨烯来构建。

4 卤化丁基橡胶气密层

现代子午线轮胎有两项关键的技术。一是钢丝束层，它为胎面提供结构刚性和扁平的着地面积，从而实现均匀磨损和在磨损前的高里程数；二是卤化丁基内衬层，它能够保持轮胎气压，进而提高耐久性、延长轮胎寿命、提升安全性，最重要的是，由于保持了充气压力，还提高了燃油效率。所有这些因素都属于可持续性范畴。汽车轮胎的内衬层胶料应由100份溴

丁基橡胶组成，具有优化的均匀厚度，从胎圈到胎圈为1.0 mm。卡车轮胎的内衬层胶料也应由100份溴丁基橡胶组成，具有优化的均匀厚度，从一侧胎圈延伸到另一侧胎圈，全腔覆盖，确保轮胎无故障运行。关于轮胎内衬层的关键胶料性能和制造参数如下：

- (1) 胶料黏度；
- (2) 抗疲劳性（模量目标）；
- (3) 黏附力，特别是组件之间的黏附力；
- (4) 脆点；
- (5) 渗透性。

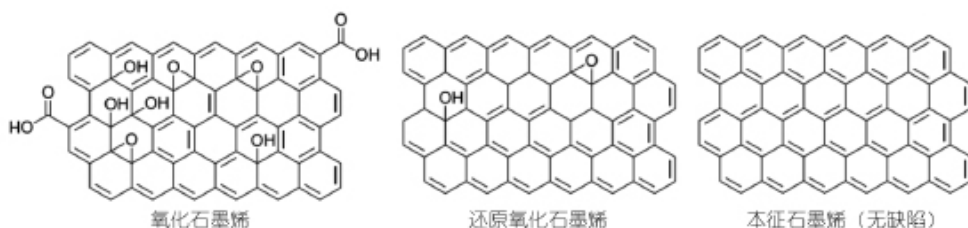


图3 石墨烯的基本类别

此外，还出现了新的石墨烯形态，例如通过废轮胎的闪热焦耳加热设备制备的多面体石墨烯，或是由纤维素基生物废料制备的涡流石墨烯。原始石墨烯是一种惰性石墨烯，可作为直接替代品添加到橡胶混合物中，无需重新配制，因为它不会改变混合物的硫化动力学、黏度或基本力学性能。此外，还有一些已报道的显著优势，例如：

- (1) 抗氧化性能（可替代高达100%的TMQ，以及高达70%的6PPD）；
- (2) 热导率和电导率；
- (3) 提高抗疲劳强度和抗撕裂强度；
- (4) 降低渗透性；
- (5) 耐磨性。

当原始石墨烯片层与橡胶膜（如内衬）中的气体流动方向垂直排列时，其独特的性能可降低渗透性，从而显著提高轮胎充气压力的保持能力（图4）。由于原始石墨烯具有惰性，因此无需更改橡胶配方或加工规范；即使添加量较低也能发挥显著作用，同时还能带来撕裂强度和黏合性等橡胶复合材料的次要性能提升。

原始石墨烯片层也可能发生重排，或转变为三维构型；通过功能化处理可以改变化合物的力学性能，从而满足特定的预设目标（图5）。这种三维几何结

有多篇出版物进一步明确了这些性能的具体目标，以及能够满足这些性能目标的气密层胶料成分。丁基橡胶制造商还提供了详细的技术手册，为获得最佳的胶料性能提供了全面的指导。

5 石墨烯

石墨烯主要有三种基本类型（图3）：

- (1) 氧化石墨烯（GO）；
- (2) 还原氧化石墨烯（RGO）；
- (3) 原始石墨烯。

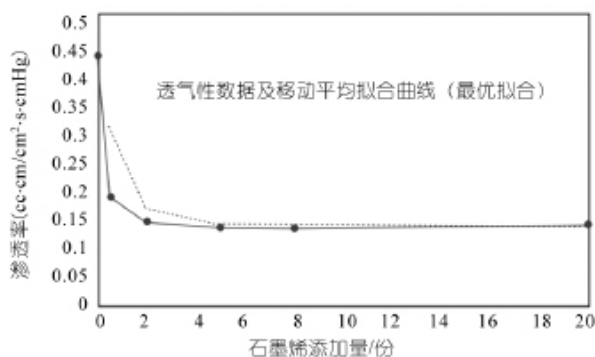


图4 最佳拟合内衬材料渗透率降低情况

构会形成空间分布的强电场，该电场由构建三维结构的石墨烯表面的三维等离激元杂化诱导产生。多面体石墨烯不仅可以实现与原始石墨烯薄片相当的性能提升，还更易于进行功能化改性，为提高复合材料性能开辟了新的可能性。

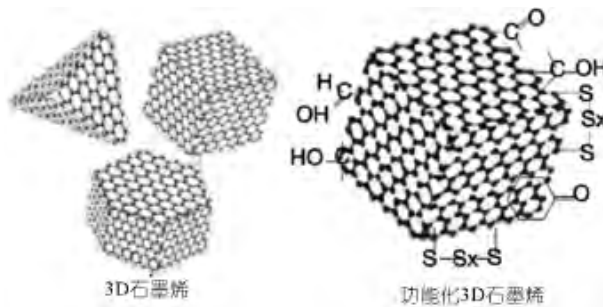


图5 多面体石墨烯

6 炭黑

历史上,橡胶混炼胶所用的填料体系一直以炭黑为主,目前新型二氧化硅已开始应用于乘用车轮胎胎面胶料中。炭黑在混炼胶配方中具有三项功能:改善聚合物的力学性能;通过调节黏度及挤出型材的质量等,提高聚合物的加工性能以及优化混炼胶成本。在乘用车轮胎胎面配方中,将二氧化硅和高分散性二氧化硅(HDS)与硅烷偶联剂结合使用,显著改善了轮胎的滚动阻力并提高了湿地牵引力。为了匹配HDS二氧化硅配方的性能、改善轮胎工厂的配方加工工艺并弥补耐磨性不足,炭黑制造商开发了两种方法:对炭黑表面进行功能化改性,以及原位制备宽粒径分布的炭黑。大陆炭黑公司利用氨基酸开发了一种生物改性炭黑,其佩恩效应显著降低,并接近所有二氧化硅胎面橡胶配方的水准(图6)。这表明该炭黑不仅能提高轮胎与车辆的燃油经济性,还能具备更优异的耐磨性能。

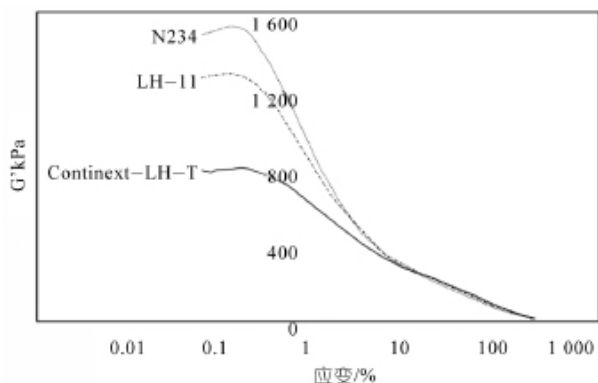


图6 功能化炭黑在减弱佩恩效应中的应用

改善炭黑性能的第二种方法是通过原位扩大炭黑颗粒尺寸。以碘值衡量的炭黑粒径越大,轮胎胶料的热积聚和滞后现象就越小,从而使轮胎的滚动阻力越

低。然而,其他参数(如耐磨性)可能会因此下降。通过混合不同粒径的炭黑以获得双峰粒径分布,可以弥补耐磨性能的损失,但这可能会在许多胎面设计和胎侧胶料中引发次级疲劳开裂。原位制备粒径分布较宽且平均碘值与相应ASTM等级相匹配的炭黑,既可解决潜在的耐磨性损失问题,又能改善胶料滞后性能,从而降低轮胎滚动阻力(图7)。

此外,相较于二氧化硅胎面胶料,炭黑胎面胶料在阻碍抗臭氧剂6PPD向表面迁移方面效果更为显著。6PPD,以及它与大气臭氧反应生成的醌类衍生物6PPD-Q,会对水生生物造成危害,引发环境问题,因此有必要严格防控这类物质进入自然水体。到目前为止,除石墨烯被认为是具有潜力的安全替代品外,尚未研发出其他成熟替代方案,因此在轮胎胶料中保留6PPD是更具可行性的策略。

7 安全

安全是任何制造业可持续发展战略的核心组成部分。轮胎制造中的安全包含两大支柱,即生产操作和最终产品。与现场管理及工业卫生实践一样,安全文化也是管理良好的轮胎生产工厂的共同特征。据称,那些旨在确保安全操作的系统,通过以下方式保障了高品质:

- (1) 员工的勤勉尽责;
- (2) 设备可靠性的提升;
- (3) 更完善的工艺监控,减少废品;
- (4) 公用设施高效运行,例如蒸汽管道无泄漏、电力线路有防护措施。

其他无形效益,例如员工敬业度,也会对最终产品的质量产生额外影响。因此,安全程序应成为制造

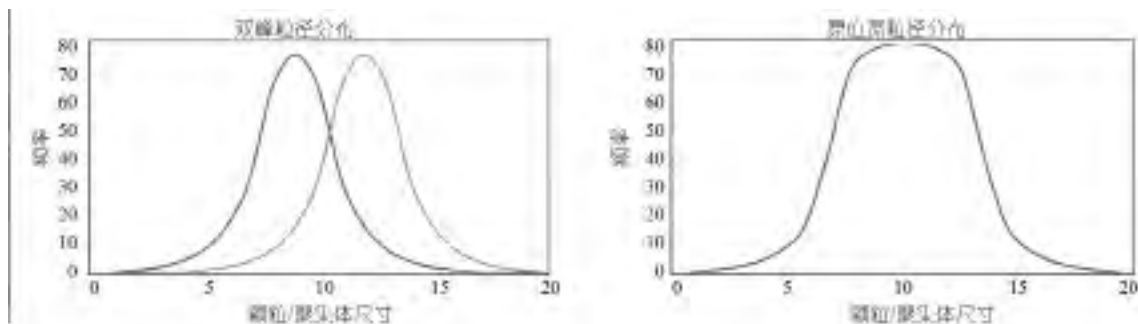


图7 炭黑粒度分布

商可持续发展计划的一部分。石油和天然气行业的安全程序被视为“业界最佳”，其中一个典型例子就是该行业广泛采用的员工“基于行为的安全观察”系统。该系统的操作规程不仅有助于营造安全的工作环境，还提供了一种手段，能够快速识别并报告偏离规范的操作行为，并抓住持续改进运营的契机。

为了确保最终产品的安全性，许多因素共同作用以确保轮胎安全运行，从而实现足够的耐用性和使用寿命。不过，其中有两个因素尤为重要：

(1) 内衬层的质量对于维持充气压力、最大限度地减少充气压力损失以及防止胎体内部压力（ICP）积聚至关重要。100 份溴丁基内衬层以及优化的内衬层厚度，对ICP具有积极影响，进而提高轮胎耐久性、延长产品生命周期、延长最终使用期限（ELT）并减少废旧轮胎产生量。

(2) 无论是新轮胎还是老化轮胎，部件间的黏合性都是第二个关键因素。在轮胎整个生命周期内维持黏合水平，对于轮胎的耐久性和安全性至关重要。橡胶胶料的黏合机制较为复杂，但影响该机制的因素包括：相邻胶料的硫化动力学等效性、组件厚度以及相邻胶料成分的相容性等。

因此，前瞻性的可持续发展计划应同时涵盖产品性能的提升和轮胎生命周期的延长。

8 工业4.0

“工业4.0”这一术语在很大程度上是一个统称，涵盖了行业内已经开展的许多流程和自动化应用。不过，它更加重视数据采集、分析和效率提升。尽管引入工业4.0战略不会改变制造业的总劳动力规模，但由于对不同技能组合的需求，劳动力结构将发生变化。该战略由四个要素构成，包括仪器仪表、互联互通、行业知识和机器学习。

图8展示了四个核心要素。这些要素进而界定了工厂的单元操作基础设施，例如原材料自动称重和胶料混合（包括胶料批次处理系统）、最大限度地利用组件预装配、机器人技术与自动成型机、硫化区的自动化搬运、机器人质量检测，以及轮胎集装箱的自动化装载和最终发货。贯穿整个生产流程、确保一致性和均匀性的质量控制点仍位于传统位置，例如在进入部件制备环节之前，用于原材料接收和胶料测试的质量控制实验室，以及随后进行轮胎切片分析和相关测试功机测试的轮胎质量保证实验室。此外，“工业 4.0”还涵盖了 ISO 9000 系列规范、QS9000 以及最近针对汽车行业质量管理体系的 TS16949 和 IATF 16949 技术规范中的政策和指南。这些规范描述了一套非常全面的要素，涵盖质量方针、设计、可追溯性、控制和校准程序、纠正措施以及审核。这些流程的基础建立在“改

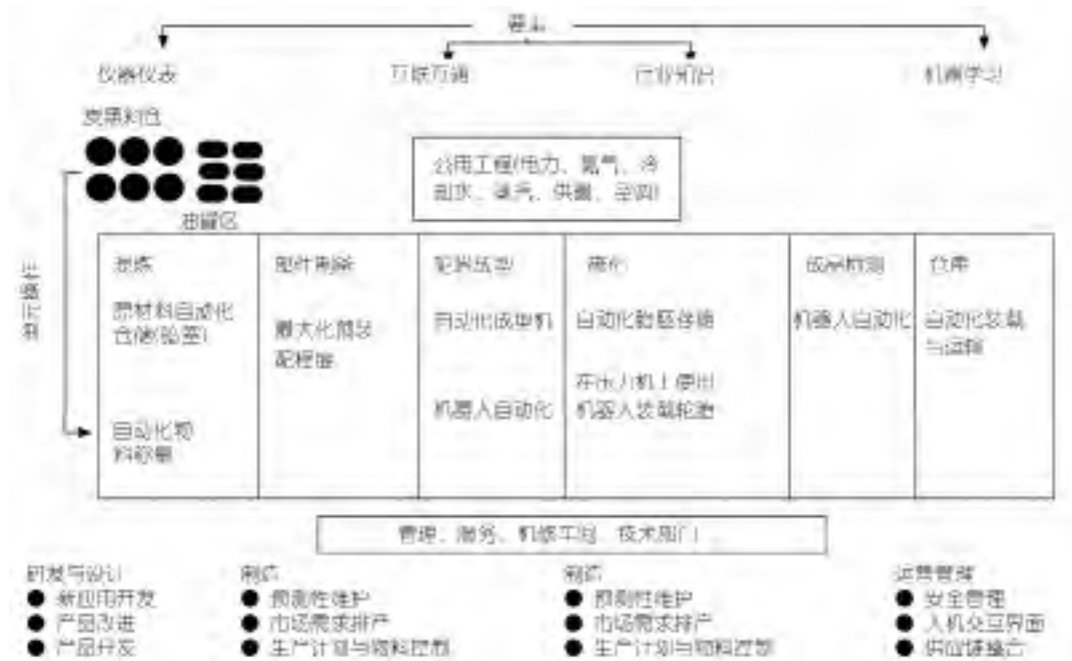


图8 工业4.0的构成要素、基础设施和投入

善”(Kaizen)哲学之上,即持续改进、缺陷预防以及减少变异和浪费。

还有其他三个影响“工业4.0”的因素,这些因素直接影响可持续发展和制造运营。它们是:

(1) 产品设计,它决定了新产品的功能定位、现有产品的改进以及新产品的应用;

(2) 制造实践,包括预测性维护、贴合市场需求的生产流程、生产计划以及物料控制;

(3) 运营(特别是安全)、人机界面和供应链整合。

“物联网”(IoT)的概念正被融入“工业4.0”,这带来了新的挑战。迄今为止,出于安全考虑,制造操作系统一直通过“物理隔离”与外部网络隔绝。物联网的概念建立在互联性基础上,导致信息技术(IT)与物联网的融合。如今,互联的可持续运营必须具备相应的控制措施和防护屏障,以应对国家支持的攻击者、网络犯罪分子、非关联威胁以及恶意软件——2015年左右的“震网”(Stuxnet)病毒便是最近的一个例子。应对这些威胁需要采取充分的控制措施,并确保公司治理和监督机制完善,同时加强员工培训和安全意识。

9 总结

有许多方案可用于促进轮胎制造的可持续发展。

自动化和机器人技术是当前正在应用的方案之一。操作建模和仿真有助于更深入地了解影响生产和产品性能的参数。

对质量的最佳定义之一是“一致性”。就此而言,必须利用多元分析、主成分分析以及结合计算工具的组合分析方法等手段,对原材料数据质量和供应商进行监测与改进。

石墨烯等新型材料技术概念是碳纤维增强材料领域最新的创新型聚合物。这些材料可再生以实现循环利用,也可采用生物基材料和生物改性技术,正在为提升可持续性开辟新的机遇。

轮胎制造中可持续性的另一个要素是企业能否长期安全、持续地维持和支持各项生产流程。因此,制造领域的可持续性涉及多方面因素,因为它与轮胎制造效率直接相关。若能成功实施,它还将对企业的长期财务状况产生积极影响。此外,它还包括社会对资源保护、材料高效利用以及产品安全的期望。一个强大、健全的可持续制造计划具有运营上的优势,这一点在石油和天然气行业中已得到了充分证明。因此,产品安全、工业卫生、废弃物消除、操作安全以及公用设施的高效利用,是可持续计划的关键基石。“清洁的工厂就是安全且盈利的工厂”这一说法也颇有道理,这应当成为任何可持续发展计划的基石之一。

