

轮胎使用对环境影响的研究——印度视角

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

1 引言

轮胎是车辆不可或缺的组成部分, 是车辆与路面之间的桥梁。其主要功能包括: 承载负荷(车辆+货物); 提供路面附着力, 保障行驶牵引力与制动安全性; 实现缓冲减震功能(吸收冲击); 赋予车辆转向控制能力等。此外, 人们对轮胎还期望具备: 高里程耐用性、抗擦伤与损伤能力、零故障稳定性能、多次翻新潜力、燃油消耗节约等特性。

轮胎技术是科学、技术/工程与工艺的复杂结合, 融合了多种学科领域。轮胎科学涉及复合结构与几何学领域的知识体系, 这些概念已被用于建立轮胎力学的数学模型。

2 研究背景

2.1 轮胎/路面相互作用与磨损

充气轮胎是由柔性粘弹性材料(橡胶)与刚性材料(尼龙/聚乙烯/钢丝/芳纶帘布层)组成的复合结构, 轮胎设计师必须综合考量所有这些材料的特性。轮胎作为道路与车辆之间的中间体, 通过充入轮胎内的空气(压力)承载负荷(车辆+货物), 同时需兼顾所有限制因素。

轮胎的胎面由橡胶/增强剂(填料, 如炭黑、二氧化硅)、加工助剂/加工油/化学物质(氧化锌、硬脂酸、促进剂——硫胺/硫脲/二苯基胍/巯基胶料)和填料(如炭黑、二氧化硅)制成, 其磨损部分。加工助剂/工艺油/多种化学物质(氧化锌、硬脂酸、促进剂——硫脲类/硫胺类/二苯基胍/巯基苯并噻唑衍生物等, 抗氧化剂和抗臭氧剂主要为对苯二胺及喹啉衍生物, 粘合剂-间苯二酚类产品/苯酸钴等)蜡类。这些(除二氧化硅和氧化锌外)均为石油产品。

车辆行驶时, 轮胎必须与路面产生摩擦(抓地力), 使车辆能够滚动并实现转向和制动效果, 同时

提供最低滚动阻力以降低发动机阻力, 从而降低主要污染因素——油耗。在行驶过程中, 轮胎会磨损, 防滑深度(NSD)会逐渐降低, 当达到一定程度时, 由于各种因素的影响, 轮胎将不再安全。该值随轮胎尺寸、类型及应用场景显著变化。当轮胎磨损导致NSD降低时——磨损的橡胶材料流向何处? 显然会进入大气层, 橡胶与化学物质颗粒随空气流动, 并被人类吸入。许多石油产品受REACH法规及其他法律限制, 其中大部分由技术人员处理。但并非全部。

驾驶汽车会产生轮胎磨损颗粒, 这些颗粒被风吹入环境, 被雨水冲入河流和污水中——平均每位市民每年产生约1公斤。这些颗粒物通过大气层, 或随废水、污水污泥进入农业领域, 最终进入农田土壤。在土壤中, 轮胎可能释放出潜在有害化学物质: 轮胎磨损颗粒及其他微塑料含有添加剂, 这些添加剂确保了塑料的特定性能、质地及耐久性。

轮胎磨损颗粒含有若干有机化学物质, 其中部分具有一定毒性。若这些化学物质释放到食用植物的根系区域, 且被植物吸收, 则可能对消费者健康构成威胁。化学物质6PPD-醌(源自6PPD)已被证实与美国三文鱼大规模死亡事件相关。现需考量整体影响。单一类别(如卡车/巴士轮胎)下存在过多变量: 尺寸、载重、花纹、层级评级、防滑深度(NSD)。由于此类数据未公开, 无法逐项处理。因此需通过取各类别轮胎的“平均值”进行近似估算。现采用有限范围内的以下信息, 分别计算各类轮胎的橡胶损失量, 再汇总总影响。

(1) 印度轮胎总产量(表1)。按类别划分(如乘用车、轻型商用车、卡车/客车、二/三轮车等)。

(2) 这些轮胎的平均新销售量(NSD)及其平均重量——根据自身过往经验估算(表2)。

(3) 计算时考虑了各类别轮胎磨损至剩余新胎

直径的磨损量。

(4) 需考虑乘用车单条轮胎或4条轮胎组、卡车/客车6条轮胎组、两轮/三轮车2~3条轮胎组的平均行驶里程——目前尚无可靠数据。

(5) 覆盖该里程(公里)或磨损至剩余NSD的时间框架,同第4点所述——目前尚无可靠数据可用。

(6) 上述类别轮胎的平均胎面磨损(DIN磨损)值或指数——公共领域无相关数据。

过去五年按年度划分的轮胎总产量见表1和图1。按类别划分的轮胎产量见表2(来源:汽车轮胎制造商协会-ATMA)。



图1 印度轮胎总产量

表1 印度轮胎总产量

年	(百万/条)	%变化量
2018-19	191.98	9%
2019-20	176.80	-8%
2020-21	169.07	-4%
2021-22	205.13	21%
2022-23	217.35	6%

所有这些信息仅能由轮胎行业提供。因此,我们不得不带着这些限制条件继续推进。借助这些数据,可推算出大气中橡胶化学颗粒的合理数量。

轮胎磨损导致的橡胶损失(环境中的碎屑/颗粒)可通过以下关系式表示:

$$RL \propto (TR_o - TR_i) \cdot (AI \cdot Km \cdot t \cdot \tan \delta \cdot RR) \cdot C$$

在特定轮胎行驶中,当(AI,Km,t,tanδ&RR)视为常量时,RL与磨损相关。

$$\text{即 } RL \propto C \cdot (TR_o - TR_i).$$

RL——Rubber Loss (橡胶损失)

TR_o——胎面NSD原始值

TR_i——胎面NSD剩余值NSD(如CV车型为2米)

AI——磨损指数

Km——行驶公里数

t——运行时间

$\tan \delta$ ——轮胎发热量

RR——滚动阻力

C——常数(与驱动伸长率/车辆载荷/驾驶特性/大气条件等相关)

$$Or = RL \cdot C \cdot (x \cdot TW) / TR_o$$

其中 $x = (TR_o - TR_i)$ 单位为毫米,TW为该轮胎的胎面宽度

3 轮胎使用造成的污染

数据显示,2021年印度生产了1.9572亿条轮胎,较上年增长24%,其中6%的轮胎最终被填埋或焚烧处理。

“研究指出,‘气泡效应’可能破坏垃圾填埋场内用于控制污染物的防渗衬垫,从而不仅增加地表污染风险,更可能导致地下水污染。”

“报废轮胎的激增迫使橡胶必须进入道路领域才能得到有效管控。若要通过环保方案管理填埋场并控制空气与土地污染,技术必须发挥作用。”橡胶燃烧过程会释放多环芳烃、二噁英、呋喃及氮氧化物等致癌污染物,这些物质对环境和人类健康构成极大危害。”

在行驶过程中,轮胎磨损会导致环境中产生颗粒物。这些颗粒物(PM)主要由橡胶基料(RHC)构成,此外还包含化学物质及硫(硫化橡胶中的游离硫,因胶料中的所有硫均不会与RHC发生交联或化学键合)。它们可能与大气中的氧气反应产生一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物和二氧化硫,这些物质又可能与大气中的水分反应形成酸性物质。所有这些物质均对人体健康有害。关键在于这些污染物的浓度水平——以ppm(百万分率)或pphm(百万分之几)计——以及允许的排放限值是多少。

4 注意事项

每类轮胎均包含多种尺寸、花纹及应用场景,难以获取平均重量与NSD值。我们尽力通过取用最广泛使用的热门型号进行折中计算,得出平均数值。

乘用车(1)轮胎几乎全部为子午线结构(98%),主流规格为175/65R14。卡车(2)斜交胎在10.00-20规格范围内重量为55-58kg,故取平均值56kg。10.00-20规格子午线轮胎重量范围为61-62kg。

鉴于卡车轮胎斜交/子午线比例近50:50,故取平均值。卡车轮胎(斜交/子午线)平均胎面厚度为

18-21毫米，故取平均值19毫米。

轻型商用车(3)约60%为斜交胎，40%为子午线胎。主流规格为7.50-16和8.25-16。拖拉机(5)与工程轮胎(6)因尺寸重量差异极大，无法通过平均轮胎重量计算总吨位。仅当行业提供总吨位产量数据时方可进行计算。

欧洲已开始研究该课题。联合国欧洲经济委员会W.P29工作组（污染与能源工作组）已成立了颗粒物测量计划（PMP）非正式工作组。该小组正在积极研究发动机尾气中的颗粒物测量以及非尾气颗粒物排放（刹车磨损、轮胎和道路磨损）。印度需要考虑成立一个工作组来分析和处理此事。

欧盟委员会近期委托联合研究中心（JRC）开展的科学政策研究发现，“交通相关的PM10总排放量中，尾气排放源与非尾气排放源的贡献几乎相当”。科学界有些人更进一步指出，从整个车队平均来看，交通产生的非排气颗粒物排放量现已超过发动机排气产生的颗粒物排放量。

2012年，哈里森教授及其研究团队成功计算出伦敦市中心玛丽莱本路上车辆产生的轮胎磨损颗粒物质量。我们在伦敦的测量数据显示，仅轮胎粉尘就占非尾气颗粒物的11%左右。这相当于所有PM10颗粒物的2%，虽然占比不大，但仍然具有重要意义。”

“学术界和政府必须认识到：轮胎磨损颗粒源于轮胎与路面之间的摩擦，其组成是轮胎材料与路面材料以近乎等质量比例形成的聚集体。”

世界可持续发展工商理事会（WBSCD）下属的轮胎行业项目（TIP）研究发现，轮胎磨损本身占轮胎和道路磨损颗粒（TRWP）的一半，而道路矿物、有机物、混凝土和沥青在TRWP中的百分比则以等量形式存在，混凝土和沥青的占比相当。

通过全球采样工作，已经证明TRWP在环境空气中的PM10总含量中占不到1%，在PM2.5总含量中占0.3%左右。因此，TRWP对PM10和PM2.5的贡献并不显著。”

然而，空气污染科学家最近的研究证明，轮胎磨损不仅会产生PM10和PM2.5颗粒物，还会产生微小的纳米颗粒物——其中一些颗粒物只有几百万分之一毫米那么小。哈里森指出，有强有力证据表明这些超细颗粒确实存在。他表示：“部分研究认为其具有特殊性”，因此可能危害人体健康。

奥迪环境基金会与柏林工业大学共同研发了城市径流过滤器，以防止轮胎磨损颗粒及其他环境有害物质被雨水冲刷入下水道。

该系统能在雨水冲刷前，尽可能在污染物产生地附近“捕获”污垢颗粒。这些颗粒原本会被风吹散或随雨水作为城市径流通过下水道流入土壤和河流。

美国轮胎制造商协会（USTMA）宣布支持加州有毒物质管理局（DTSC）提出的拟议规则制定，该规则旨在将汽车轮胎中的6PPD列为该州“更安全消费产品绿色化学计划”的优先审查产品。

USTMA及其会员企业建议立即将6PPD纳入优先产品工作计划，此举紧随2020年12月Tian等人的研究——该研究揭示了鲑鱼死亡率与6PPD转化之间的关联。-2020年12月Tian等人的研究表明，鲑鱼死亡率与轮胎和道路磨损颗粒（TRWP）中6PPD的转化产物6PPD-醌存在关联。

韩国机械材料研究院（KIMM）宣称，该机构率先实现了对内燃机（ICE）和电动汽车排放的非尾气——轮胎和刹车磨损、道路磨损及道路粉尘的测量。

研究团队使用自主研发的轮胎磨损模拟器、刹车磨损模拟器和移动道路粉尘测量车，测量了紧凑型SUV的PM排放量。

轮胎胶料中使用的成分如何可能受到REACH法规约束？文献中提供了REACH法规限制化学品的详尽清单。接下来最重要的疑问是：这些成分能否被限制/减少使用？若可行，具体实施方式为何？

（1）开发高耐磨性复合材料——国际上大多数轮胎公司都在朝着这个方向进行研发。

（2）减少材料用量。

（3）替代石油基原料——主要指碳黑和加工油，目前正逐步采用二氧化硅和无多环芳烃加工油。需关注技术性能与成本因素。

（4）增加再生材料和生物降解材料的使用比例。

5 轮胎胎面（橡胶）损失

表2给出了轮胎损失及废弃物产生量的基本计算方法。该方法被认为过于简化，需要进一步改进，为此行业必须提供更多信息，至少应提供总产量吨位数据，以便尝试将其范围缩小至更精确区间。

表2 2022-23年度轮胎产量及其他橡胶损耗计算数据信息

	乘用车 (1)	卡车/巴士(2)	轻型商用车(3)	2/3-轮车(4)	拖拉机(5)	OTR(6)	其它(7)
	数量庞大/无法一一列举	10.00-20/11.00-20	7.50.16/8.25-16				
轮胎产量 (百万/条)	58.24	21.00	11.11	114.63	10.38	2.22	0.47
轮胎重量 (平均公斤)	7.00	56.00	24.00	3.50			
总吨位 (吨)	407680	1176000	266640	401205			
平均新胎厚度 (毫米)	7.00	19.00	15.00	5.00			
胎面重量 (平均公斤)	3.50	22.00	16.00	1.50			
总吨位 (公吨) 胎面	203840	462000	177760	171945			
剩余新胎厚度 (毫米)	1.60	2.00	2.00	1.00			
新胎厚度损失 (毫米)	5.40	17.00	14.00	4.00			
胎面重量损失 (平均公斤)	2.70	19.68	14.93	1.20			
橡胶损失 (吨)	157248	413280	165872	137556			
总计 (1+2+3+4)				716766.54			

橡胶损失总量累计达873,956吨。此数据未包含拖拉机轮胎、工程轮胎及其他小尺寸轮胎。因此，实际总量远高于此。然而，拖拉机轮胎和工程轮胎不用于公路行驶，它们主要应用于农业、采矿和建筑领域，其使用过程中产生的颗粒物相较于这些活动产生的其他粉尘/颗粒物而言微乎其微。在考虑的总产量中，卡车/巴士占80%以上。因此，所有关注点都应集中在卡车/巴士上。

我们试图展示典型交叉层胎面型商用车轮胎可能释放的各类化学物质。为此考虑了典型的橡胶配方（表3）。橡胶（胎面）硫化过程中，多数化学物质虽

与橡胶结合但未完全固化。大量游离化学物质（尤其是硫、氧化锌、芳香加工油、抗氧化剂等游离化学物质可能进入大气，随后与大气中的湿度及臭氧发生反应，可能形成多种物质：如二氧化硫（SO₂）转化为硫酸（H₂SO₄），芳香油可能释放多环芳烃（PAH），氧化锌分解产生的锌颗粒，抗氧化剂和促进剂分解产生的胺类等物质均可能对人体造成危害。最后，炭黑和橡胶烃（RHC）可能产生CO/CO₂。此类污染物的具体含量尚不明确，其转化产物亦不清晰。所有这些都需要在实验室中进行分析，以准确掌握实际情况。

表3 来自CV（卡车+轻型商用车）轮胎胎面的化学损失，斜交胎块型——典型配方，平均胎面重量22 kg

成分	份	每条轮胎平均原料损失 (千克)	原料总损失 (百万千克)
天然橡胶	80	9.14	293.50
聚丁二烯橡胶	20	2.29	73.53
炭黑N339/220	50	5.71	183.35
加工油 (芳香族)	6.0	0.69	22.16
氧化锌	4.0	0.46	14.77
硬脂酸	3.0	0.34	10.92
中碳蜡	1.0	0.11	3.53
抗TDQ (2,2,4-三甲基-1,2-二氢喹啉低聚物)	1.0	0.11	3.53
抗氧化剂6PPD (N-1,3-二甲基丁基-N'-苯基-对苯二胺)	3.0	0.34	10.92
促进剂CBS或MOR (N-环己基-2-苯并噻唑磺酰胺) 或 (N-氧代二苯基-2-苯并噻唑磺酰胺)	0.7	0.08	2.57
硫	2.4	0.27	8.67
延缓剂 (PVI) (N-环己基硫代邻苯二甲酰亚胺)	0.15	0.02	0.64
	171.25	19.57	628.09
			628090MT

计算基于每条轮胎平均胎面重量损失为19.68千克，以及商用车轮胎产量为3211万条。

硫化过程如下：

(1) 氧化锌与硬脂酸反应形成硬脂酸锌，后者再与促进剂基团反应，该基团随后与呈八面体构型的硫发生反应，在加热提供至少64千卡能量的情况下，形成双自由基，与橡胶分子的RHC链反应，从橡胶分子中夺取氢原子，在橡胶分子链之间形成交联，从而赋予硫化橡胶所有物理机械性能。该过程中存在大量

游离硫，可被提取。

(2) 抗氧化剂不参与硫化过程，会迁移至产品表面（MC蜡有助于此迁移过程），并与大气中的氧气和臭氧反应，在这些物质攻击橡胶链导致降解前将其中和。该过程持续进行直至抗氧化剂浓度降至可用水平。

然而，显然仅卡车/巴士轮胎就向大气排放了约

6,28,090吨此类物质。所有类型轮胎向大气排放的此类物质的累积效应将更高。

本工作文件基于近似估算，因轮胎类型、尺寸、胎压比及花纹存在广泛差异这一公认事实所致。显然，此估算未能完整呈现其对环境污染的影响。根据这个简单的计算，62.8万至90万t橡胶材料（不含拖拉机轮胎和OTR轮胎）在时间框架内进入大气层，而这个时间框架本身也不甚明确。有些轮胎在短时间内（例如6个月）就会磨损，而其他轮胎则需要更长时间，从1年到3年不等。大部分斜交轮胎被翻新/重铺，其余轮胎（包括斜交轮胎和子午线轮胎）则用于生产再生橡胶，或进入焚化炉、填埋场等处理。

建议对这些颗粒物进行仪器分析（GPC、质谱、AAS、TLC、HPLC）和化学分析，以了解环境污染方面的情况。只有这样，橡胶/轮胎技术人员才能采取纠正措施。

表4 轮胎行业：销量与收入细分

轮胎类型	销量%	收入%
卡车/巴士	11	54
轻型商用车	05	09
乘用车	26	14
两轮/三轮车	53	13
农用车	04	08
其他	01	02

表4提供了基本计算，说明了随胎面磨损可能进入环境的各种化学物质及其分解产物，需要进行适当评估并确定这些分解产物的数量。

（1）根据促进剂的类型及其分解，可产生胺、亚硝酸盐等物质。某些促进剂已在欧洲国家被禁止使用（例如NOBS）。促进剂参与硫化过程，需要评估

硫化物中的可萃取化学物质。轮胎在长时间运行中达到的温度有时会超过这些促进剂的熔点。

硫脲类加速剂易受潮。硫脲是2-巯基苯并噻唑与胺/吗啉等物质的反应产物。当其分子受热分解时，会形成2-巯基苯并噻唑和碱。

（2）抗氧化剂不会与硫化物结合（特殊类型除外），而是迁移到表面与大气中的氧气和臭氧发生反应，从而保护硫化物。因此，这些化学物质会随着轮胎温度和磨损而逃逸到环境中。

据研究表明，通过丙酮萃取从硫化物中回收胺类抗氧化剂的效果甚微，仅能回收约一半的抗氧化剂。据报道，酚类抗氧化剂不会被消耗，但胺类抗氧化剂会被消耗。作者在早期出版物中也对此进行了说明。

（3）硫是二烯橡胶的主要硫化剂。如前所述，硫在硫化过程中形成交联结构，赋予橡胶物理机械性能。然而，硫磺并非全部用于硫化过程，所有硫化物中均存在游离硫（无硫硫化体系除外）。该游离硫可通过丙酮萃取并估算。

这意味着部分硫磺会排放到环境中，与大气中的水分反应，与O₂和O₃结合形成硫氧化物和酸。

6 总结

轮胎磨损产生的含有有机化学物质的颗粒物会危害植物及吸入这些颗粒物的人类。本文从印度视角出发，阐述了此类成分的生成机制。

译者：章羽

原文：KGK No.5/2024, by Shomnath Chakravarty.

