

使用Ueshima FPS磨损测试装置 评估材料磨损性能

章羽 编译

(全国橡塑机械信息中心, 北京 100143)

除了柔韧性外, 硫化橡胶的耐用性是其于19世纪和20世纪迅速普及的主要原因之一。尽管其在轮胎中的应用是最为人熟知的用途, 但橡胶固有的耐磨性是材料整体特征的重要组成部分。对于动态应用, 数十年的研究致力于延长橡胶制品的使用寿命, 而耐磨性至今仍是行业技术资源的重要关注点。然而, 橡胶耐久性研究与开发领域中最大的空白之一, 仍是实验室规模的台式测试与产品现场测试之间的关联性。

要弥补这一差距, 可以采取多种途径。只要有足够的时间和资金, 就可以收集到足够的测试数据, 将实验室结果与预测的使用寿命相关联。然而, 这种方法往往存在局限性, 需要大量数据, 且通常需要较长时间。零件设计的一点小改动就可能导致建模失效, 从而不得不回到数据收集阶段。另一方面, 基本标准化测试(如ASTM、ISO等)可产生可用于制定材料质量保证要求的比较数据, 但这些方法往往缺乏所需的定制化, 无法生成更稳健的数据集以理解材料在各种条件下的性能。这两种方法各有优缺点, 但在意图和执行方面往往相互排斥。

基于此, 橡胶配方师的一项常见任务是评估材料的耐磨性, 以及配方变化对这一性能的影响。除轮胎外, 其他需要耐磨性的弹性体材料包括输送带、辊筒、减震支架和软管应用等。随着对产品耐用性预测需求的增加, 磨损测试技术也取得了诸多进展。这些新型测试技术的先进功能可帮助显示材料的耐磨性特征, 这是传统方法(如旋转鼓磨损或旋转平面(Taber)磨损)无法实现的。

这些传统方法在测试输入变量方面相对静态。例如, 鼓式磨损测试的选项仅限于测试过程中试品的旋

转或非旋转状态, 或选择哪种参考材料作为对照。至于Taber磨损测试, 虽然可以使用不同重量的轮子和旋转速度, 但测试结果和失效模式保持不变。这两种方法均依赖于测试前后的重量测量来确定磨损抵抗力, 但它们在中间数据收集方面毫无建树。

1 上岛精密机械株式会社(Ueshima) FPS 磨损测试装置

该测试技术的一项重要进展体现在上岛精密机械株式会社(Ueshima Seisakusho Co., Ltd.)的AB-2012 FPS(现场性能模拟)磨损测试装置(图1)中。该设备采用的测试方法被视为根据ISO 23794标准改进的兰伯恩磨损测试方法, 其采用两个独立旋转的轮子: 一个轮子具有磨料表面, 另一个轮子由测试材料制成。磨料轮的尺寸为宽30 mm, 外径(OD)为250 mm, 而模压橡胶测试轮的宽度为20 mm, 外径为70 mm。值得注意的是, 某些机器还可选配稍小的测试轮, 其宽度为10 mm, 外径为50 mm。该机器设计用于同时控制磨料轮和测试轮的速度, 并测量滑移比、载荷(力)、扭矩(摩擦力)、测试轮直径及表面温度等数据。此外, 还可测量测试前后质量损失及外观变化。

本类测试的指南详述于ISO 23337标准中, 该标准包含通用操作说明及推荐的标准测试设置。然而, FPS装置可针对多种输入设置进行完全定制, 例如正常负载、滑移比、车轮速度、测试环境温度及运行时间。输入范围列表见表1。此前提到的临时数据输出将记录在机器的软件程序中。示例输出见表2。



图1 上岛FPS磨损测试装置

表1 FPS输入变量

	最低	最大值
载荷 (N)	10	80
滑移率 (%)	-30	+30
表面温度 (°C)	环境温度+10	80
试验速度 (m/min)	10	210

表2 FPS输出变量, 示例

试样名称	1	
时间	60	minutes
滑移比	10	%
载荷	40	N
滑石速度	0.4	rpm
试样速度	79.94	(m/minute)
路面速度	71.95	(m/minute)
滑移比	9.98	(%)
载荷	39.9	(N)
扭矩	1.517	(Nm)
试样温度	36.2	(°C)
路面温度	34.5	(°C)
试样直径	68.4	(mm)
切向力 (FY)	44.33	(N)
径向磨损深度 (V)	81.36	(mm/1,000km)
磨损能量 (eW)	0.1029	(N/cm ²)
运行前重量	107.6126	(g)
运行后重量	106.1023	(g)
损失	1.5103	(g)
磨损率	25.20	(mg/minute)

上岛FPS磨损测试装置采用独特的轮形试样, 其中心设有带槽的开口, 可安装金属嵌件。这确保了试样的正确旋转和控制。最多可将24个试样(包括对照试样)装入机器的转塔部分, 随后可编程使其连续运行多个测试循环。每次循环中, 机械臂将新试样从

转塔转移至测试轴。试样就位后, 根据选定的负载设置, 试样与磨料轮被同步靠近, 各电机同时将试样加速至预设旋转速度。采用专利送料装置以受控速率向接触区域施加滑石粉, 有助于防止磨损颗粒聚结并形成堆积物附着于试样或磨料轮表面。运行时间结束后, 磨料轮停止并分离, 机械臂将使用过的试样部件移回试样转塔进行最终分析, 随后予以丢弃。

本研究的目的是探讨上岛FPS磨损测试装置的功能, 并将磨损结果与标准实验室方法(如旋转鼓磨损和基本力学性能)进行比较。研究探讨了FPS参数如何影响不同材料的磨损率。在此情况下, 施加的载荷和滑移比被评估为输入变量。本研究还对比了FPS数据与其他常用机械性能及轮胎性能指标, 旨在识别不同测试方法之间的趋势或相关性。

2 实验

对两种不同类型的配方进行了磨损性能评估。首先, 使用了硅胶填充的SSBR/BR胶料(例如客车轮胎胎面胶中可能使用的胶料), 并调整了硅胶和炭黑的总添加量, 以观察其对性能的影响。其次, 选取了一种通用型SBR输送带覆盖层橡胶, 通过使用聚丁二烯(BR)替代部分SBR来观察性能变化。SSBR/BR橡胶由商业化原料制成的75/25比例SSBR/BR混合胶料组成(表3)。胎面胶经过三道混炼工序。同样, 传送带胶料也是100%SBR炭黑填充胶料, 经过两道混炼工序; 完整的配方见表4。按照ASTM D3182、ASTM D3183和ACE实验室内部程序, 遵循了混炼、硫化和试样制备的一般做法。配方并未根据硬度或模量值进行调整, 而是进行了简单的替换, 以尽量减少本研究中评估的变量数量。

对这些材料进行了标准物理测试, 以便将测试数据作为与FPS磨损结果进行比较的依据。这些测试包括拉伸强度和伸长率(ASTM D412)、A型硬度(ASTM D2240)以及旋转鼓磨损测试(ASTM D5963, 方法A, 非旋转)。硫化性能也按照ASTM D5289标准, 在160°C下使用移动模流变仪(MDR)进行了30 min的测量。为了减少旋转鼓测试中由于磨料表面不一致而导致的结果差异, 报告了耐磨指数(ARI)。ARI是标准材料与试样之间的体积损失

比, 数值越高表明耐磨性越好, 数值越低表明耐磨性越差。

表3 SSBR/BR胎面胶配方

配方	1-1	1-2	1-3
一段混炼			
功能化 SSBR	75.00	75.00	75.00
高顺式 PBD	25.00	25.00	25.00
沉淀二氧化硅 (175m ² /g)	75.00	55.00	35.00
Si-69	6.00	6.00	6.00
TDAE 油	32.00	32.00	32.00
N330	12.00	32.00	52.00
总份数	225.00	225.00	225.00
二段混炼			
第一道母料	225.00	225.00	225.00
TMQ	2.00	2.00	2.00
6PPD	2.00	2.00	2.00
石蜡	1.50	1.50	1.50
氧化锌	2.50	2.50	2.50
硬脂酸	1.00	1.00	1.00
总份数	234.00	234.00	234.00
三段混炼			
第二道母料	225.00	225.00	225.00
硫	1.40	1.40	1.40
TBBS	1.70	1.70	1.70
二甘醇	2.00	2.00	2.00
总份数	239.10	239.10	239.10

表4 SBR输送带胶料

配方	2-1	2-2	2-3
一段混炼			
SBR 1502	100.00	80.00	60.00
CB 22 (PBD)	-	20.00	40.00
N330	52.00	52.00	52.00
Sundex 790TN	10.00	10.00	10.00
氧化锌	3.00	3.00	3.00
硬脂酸	1.50	1.50	1.50
Agerite Superflex	1.00	1.00	1.00
Flexzone	1.00	1.00	1.00
总份数	168.50	168.50	168.50
二段混炼			
第一次通过MB	168.50	168.50	168.50
TBBS	1.00	1.00	1.00
DPG	0.40	0.40	0.40
硫	1.75	1.75	1.75
总份数	171.65	171.65	171.65

表5 DMA轮胎性能指标

DMA数据点	性能指标	指标
E'在-20°C时	冬季牵引力	越低越好
Tan δ在-10°C时	冰面牵引力	越高越好
Tan δ在0°C时	湿地牵引力	越高越好
E'在30°C时	30°C下的干燥路面操控性	越高越好
E''在30°C时	30°C下的干燥路面牵引力	越高越好
Tan δ在30°C时	30°C下的燃油经济性	越低越好

动态机械分析 (DMA) 在拉伸条件下进行的温度扫描也用于比较分析。某些DMA数据点常被用作轮胎性能指标, 这一结论基于多年来多位轮胎研究人员的

研究成果。根据具体性能属性, 原始数据可能与性能属性呈正相关 (即数值越高越好), 也可能与轮胎性能呈反比关系 (即数值越低越好)。表5展示了这些数据点及其对应的性能指标示例。为简化DMA数据分析, 可通过指数化处理将结果与基准值关联, 即将结果表示为比率形式, 其中基准值设为100, 并考虑结果的正相关或负相关性质: 大于100的值表明性能提升, 小于100则表明性能下降。

对于FPS测试部分, 滑移比和施加的载荷是两个主要变量。在载荷保持恒定40N的情况下, 第一轮测试中滑移比在5%、10%和20%之间进行调整。在第二轮测试中, 采用恒定的10%滑移比, 并将载荷调整为20N、40N和60N。其他所有条件均保持恒定, 具体包括: 试品速度 (80 m/min)、试验室温度 (34.5°C) 和运行时间 (60min)。为了达到目标滑移比, 磨料轮的速度被降低到低于试品的设定速度, 以达到相应的转速。每个条件都进行了3次测试, 每个试品和测试条件的平均磨损率都被记录下来。

3 SSBR/BR 胎面胶配方结果

随着配方中二氧化硅被炭黑取代, 硬度和模量均出现上升。结果见表6。这种增强效果在较低的伸长率结果中也有体现, 这可能是由于硅烷与二氧化硅的浓度比更高所致。一个有趣的观察是, 拉伸测试结果的趋势 (先下降后上升) 在湿滑和干燥条件下的牵引性能指标中也有所体现。需要进一步测试以确认该趋势是否可重复。

表6 SSBR/BR物理性能

SSBR/BR胎面胶	1-1	1-2	1-3
DIN非旋转 (ARI)	325.33	211.45	273.04
硬度计A	57.6	62.7	63.2
抗拉强度 (MPa)	16.4	15.2	16.91
伸长率 (%)	360.9	296.29	286.32
100%模量 (MPa)	2.22	3.09	3.46
300%模量 (MPa)	12.3	15.51	17.75

表7 SSBR/BR轮胎胎面性能测试结果, FPS

SSBR/BR胎面胶配方	磨损率 (mg/min)	胶料		
常量	滑移率 (%)	1-1	1-2	1-3
40N	5	7.54	8.05	10.91
80 r/min	10	26.7	29.2	41.6
60min	20	97.27	100.77	95.33
常量	载荷 (N)			
10%滑移	20	5.42	8.57	17.47
80 r/min	40	30.82	29.70	41.88
60min	60	52.41	59.94	68.3

随着炭黑在配方中取代二氧化硅，整体磨损结果恶化，从旋转鼓磨损指数（ARI）中可以看出这一点。FPS 结果也显示了随着炭黑含量的增加，磨损率也会增加的趋势（表7）。FPS 磨损数据似乎与输入设置的变化呈线性趋势，无论是滑移比还是负载都是如此。尽管如此，旋转磨损结果似乎并不存在相同的线性关系。

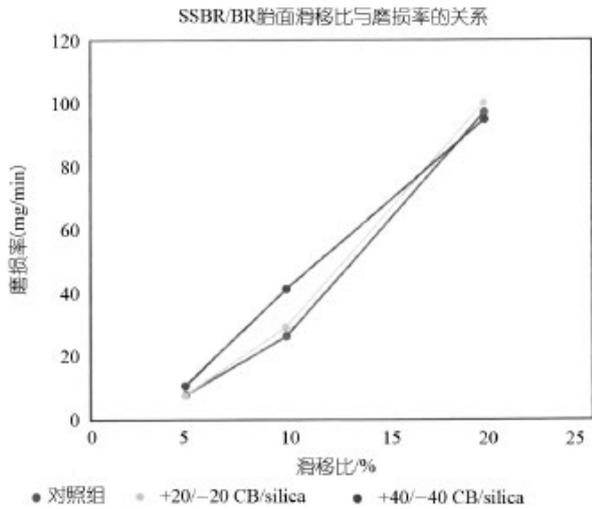


图2 轮胎胎面磨损率与滑移比的关系

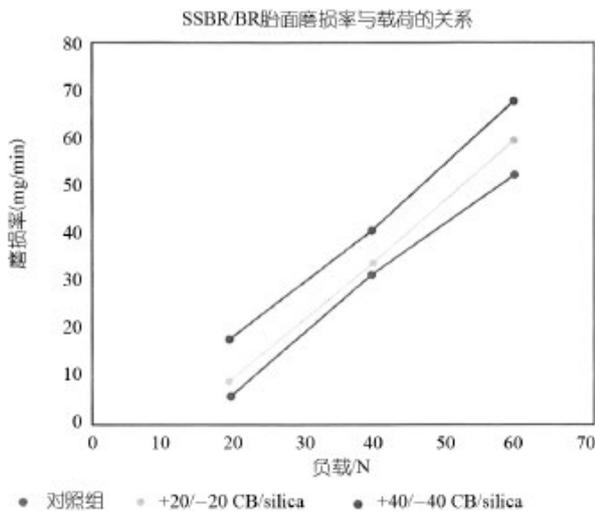


图3 轮胎胎面磨损率与载荷的关系

将两组结果在40N和10%滑移比下进行比较，所得结果相似，表明该测试方法具有潜在的可重复性（图2）。数据表明，增加滑移比对磨损率的影响比增加施加载荷更为显著。值得注意的是，在最严苛的测试条件（20%滑移比）下，各胶料的磨损率差异有所减小。在非环境温度下的tan delta数据中也观察到了类

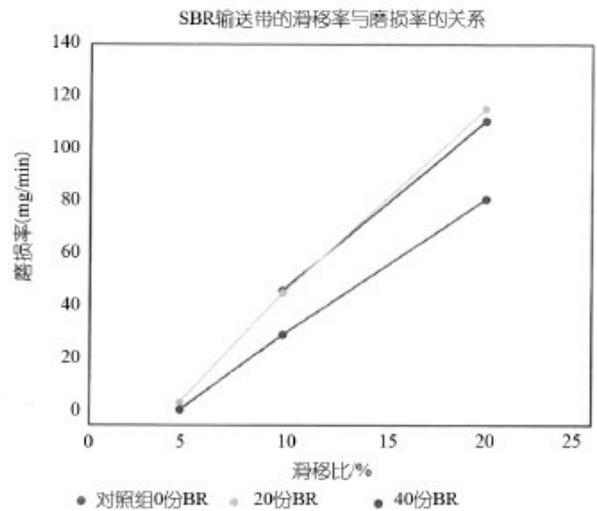


图4 SBR磨损率与滑移比的关系

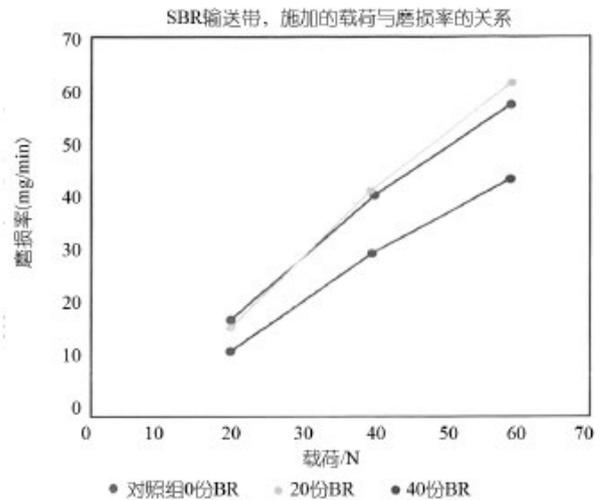


图5 SBR磨损率与载荷的关系

似结果.但需要再次强调，这可能需要进一步测试以确认这些结果。

将图3中的FPS磨损结果与表8中的DMA性能指标进行比较，并未得出明确的结论。在较低严重程度条件下，磨损率似乎与测量参数具有更好的相关性；但这些趋势在较高条件下并未延续。可能在较低严重程度条件下，相关性会更加明显，而非在较高条件下；但需要进一步测试来验证这一假设。

4 SBR 输送带胶料测试结果

在胶料中引入聚丁二烯后，磨损抗性有所提升，但机械性能有所下降。例如，拉伸强度和伸长率均有

表8 SBR/BR DMA测试结果

	DMA	1-1	1-2	1-3
	数据点			
SSBR/BR 胎面橡胶配方	-20°C时的E'	42.63	56.41	47.75
	-10°C时的Tanδ	0.56	0.543	0.536
	0°C时的Tanδ	0.353	0.371	0.337
	30°C时的E'	5.47	7.38	7.59
	30°C时为"E"	0.783	1.411	1.246
	30°C时的Tanδ	0.143	0.191	0.164
性能指标				
	指标	1-1	1-2	1-3
冬季牵引力 (E' 值在-20°C时)	倒置的	100	67.68	87.99
冰面牵引力 (tan δ 值在-10°C时)	按原样	100	96.96	95.71
湿地牵引力 (tan δ 值在0°C时)	按原样	100	105.10	95.47
干燥路面操控性 (E' 值在30°C时)	按原样	100	134.92	138.76
干燥路面牵引力 (E" 值在30°C时)	按原样	100	180.20	159.13
燃油经济性 (tan δ 值在30°C时)	倒置的	100	66.43	85.31

所降低。与胎面配方相比，硬度和模量保持更为稳定。

表9 SBR物理性能

SBR输送带橡胶	2-1	2-2	2-3
DIN非旋转型 (ARI)	180.18	188.73	285.81
硬度A	60.7	60.9	63.6
抗拉强度 (MPa)	25.49	19.61	18.66
伸长率 (%)	491.57	441.44	394.76
100%模量 (MPa)	2.38	2.65	2.7
300%模量 (MPa)	13.07	12.75	12.85

表10 SBR输送带性能测试结果, FPS

SBR输送带胶料		磨损率 (mg/min)			胶料		
常量	滑移率 (%)	1-1	1-2	1-3			
40N	5	7.07	7.15	4.92			
80转/分	10	49.15	48.29	32.86			
60min	20	112.82	117.2	83.85			
常量	载荷 (N)						
10%滑移	20	17.04	15.65	11.01			
80转/分	40	40.71	41.64	29.59			
60min	60	57.83	62.03	43.7			

如预期所示，聚丁二烯的引入提高了耐磨性，这一点从DIN旋转磨损测试（表9）和FPS磨损测试（表10）的结果中可以看出。尽管在引入40份BR时观察到磨损阻力有显著改善，但对于含有20份BR的胶料，改善效果微乎其微。随着FPS测试条件的强度增加，磨损率似乎在滑移比和载荷方面呈现线性趋势（图4和图5）。如胎面橡胶配方中所示，在40N载荷和10%滑移率下测试的两组数据相似，这表明该方法具有可重复性。然而，本研究未包含完整的重复性和再现性研究，因此需要进行额外测试以确定该仪器和测试方法的真实测量不确定度。

虽然轮胎性能指标并不一定适用于传动带，但

DMA测试结果的处理和报告方式与胎面橡胶配方测试结果相同（表11）。数据表明，加入BR后，tan delta测试结果（湿滑/冰面牵引力）发生了变化；但载荷变化似乎对结果影响不大。另一方面，添加BR似乎对冬季牵引力、干燥操控性和干燥牵引力产生了影响。

5 未来研究方向

如前所述，FPS磨损测试装置具有多个输入和输出参数，本文未能对其进行全面探讨。测试温度便是其中一个值得评估的参数；例如，若将测试温度从35°C调整至60°C，是否会观察到相同的趋势？此外，本文未呈现的某些FPS独特输出数据（如切向力、扭矩和磨损能量）应进一步评估，以确定这些数据是否可与其他实验室测试或应用性能建立关联。

本研究旨在观察FPS能力上限条件下的数据趋势，模拟更严苛的测试条件。如前所述，本研究并未设计用于全面评估机器、材料或测试方法的重复性和再现性。基于此，一个合理的后续研究是，在本次研究中测试的严苛条件下，以及在强度较低、更常见的测试条件下，对大量样本进行测试，以观察所使用的设置是否影响仪器的重复性。此外，还应包含对同一胶料进行DIN磨损测试（包括旋转和非旋转模式）的重复性测试，以便将广为人知的测试方法与较少使用的FPS方法进行比较。另一个考虑因素是研究非恒定磨损率下的测试时间。

报告的磨损率是基于完整的60min测试循环计算得出的，因此了解磨损率在测试过程中如何变化可能

具有重要意义。

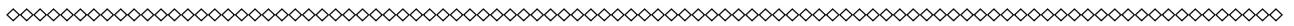
6 结论

FPS 数据表明，随着工况严重程度的增加，磨损率呈现出明显的上升趋势。滑移比和施加载荷的研究似乎都表明存在线性趋势，但需要更多数据来验证这一结论。数据还表明，增加滑移比对磨损率的影响

比增加施加载荷更为严重。如前所述，除了未来研究的领域外，下一步可能包括在较低强度条件下评估结果、尝试新材料类型或研究额外收集的数据。

译者：章羽

原文：RUBBER WORLD No.12/2024, by Eric Britton and Jaden Slovensky, ACE Laboratories



(上接第6页)

装时间为1粒膜/min；人工配置3个人，满足整条输送包装线运行，完全消除了体力劳动；产品保护方面，使用近半年来，没有发现输送包装线损伤产品的案例。

在安装、调试、使用的过程中，我们发现了几个较为突出的问题，比如上位机与ERP之间的通讯经常掉线的问题；打带机的稳定性对于整个包装线的制

约；码垛机械手的空间占用问题等。其中上位机与ERP的通讯问题，已经较好的解决。未来的包装线设计，我们将针对后两个问题重点关注。对于打带机，我们目前已经着手联合专业打带机的厂家开发一体式机芯，自动送带功能的打带机。对于码垛的形式，我们将会评估XYZ三轴的桁架式码垛系统，用于下一条生产线的配套。

