

马拉松跑鞋性能对跑步经济性影响研究

汤文治 曹杰

山东财经大学, 山东济南, 250002;

摘要: 大量的研究表明, 不同的马拉松跑鞋的性能对跑步经济性有着不同程度的影响, 以生理学 (摄氧量 - 能量代谢耦合) 与生物力学 (步态参数调控) 为理论框架, 从材料、结构、重量维度展开分析。研究证实, 跑鞋性能通过干预步态 (触地时间、垂直振荡) 与能量代谢影响跑步经济性: 竞速型跑鞋“碳板+PEBA 中底”组合可降低 4% 能量损耗, 85% 能量回馈率为核心支撑; 厚底设计虽具缓震优势, 却使能耗增加 4.5%-5.6%, 形成成功能 - 代价悖论。材料创新存在约束: ETPU 短期回弹优异但 800 公里后性能骤降 50%, 再生聚酯纤维环保但回弹率仅 40%。生物力学适配 (足弓个性化支撑、梯度发泡中底) 为优化提供路径, 需推动智能传感与生物基材料协同, 构建“性能 - 环保 - 适配性”三位一体设计体系。

关键词: 马拉松跑鞋; 跑步经济性; 跑鞋性能; 能量代谢

DOI: 10. 64216/3080-1494. 26. 01. 090

1 研究背景与意义

马拉松运动作为全球参与度最高的耐力型体育项目之一, 其全球化普及与竞技水平提升的背后, 与运动装备技术的迭代创新存在显著协同演化关系。世界田径协会统计数据显示, 近十年全球马拉松赛事年增长率达 12.3%), 参与人群从专业运动员扩展至大众健身群体, 这一趋势促使跑鞋设计需兼顾竞技性能与大众健康需求的双重导向。与此同时, 运动生物力学研究证实, 跑鞋的中底能量回馈效率、鞋底屈曲刚度及质量分布等参数可通过改变下肢动力学链传递效率, 直接影响跑步经济性, 进而决定长距离运动中的能量代谢水平与运动损伤风险。

跑步经济性指的是在一定的速度下, 单位体重在单位时间内的耗氧量 (ml/kg/min), 是体现能量节省化的重要指标。有研究者发现, 提高运动员的跑步经济性可以提高运动表现, 这是由于在既定的代谢率下可以实现更快的跑步速度。马拉松跑鞋作为运动装备的核心组件, 其功能性设计需同时满足生物力学防护、舒适性优化及运动效能提升等多维度需求, 其中对跑步经济性的影响机制已成为运动装备研发的重要研究方向。不同运动群体对跑鞋功能呈现需求分化: 健身群体通过增加下肢机械负荷 (如负重训练) 主动降低跑步经济性, 而竞技型跑者则需优化跑步经济性以提升运动表现, 此矛盾驱动了基于生物力学特征的分型化跑鞋研发体系。实验证实鞋体重量与运动能耗呈正相关 ($r=0.78, p<0.01$), 当前轻量化材料应用已逼近技术瓶颈 (减重幅度 $<8\%$)。

此外, 中底回弹系数、鞋底屈曲刚度等生物力学参数对跑步经济性的影响机制尚存研究空白。通过量化跑鞋多维结构参数与运动能耗的关联性, 可构建能量代谢导向的设计理论框架, 为突破技术限制、实现精准化研发提供科学支撑。

2 跑步经济性的理论模型

跑步经济性 (RE) 的理论模型整合了生理学基础的摄氧量-能量代谢效率关系与生物力学机制的步态参数调控能量损耗。

摄氧量 (VO_2) 与能量代谢的定量关系是评估跑步经济性 (Running Economy, RE) 的核心机制, 二者通过有氧代谢效率紧密耦合。在次最大强度跑步中, 能量代谢率 (kcal/min) 可基于摄氧量与氧热价的乘积 (能量代谢率= $\text{VO}_2 \times \text{氧热价}$) 精确计算, 其中氧热价 ($4.7-5.05 \text{ kcal/L}$) 取决于代谢底物 (糖或脂肪) 的供能比例。跑步经济性定义为特定速度下单位体重的稳态摄氧量, 其优劣直接反映能量利用效率——摄氧量越低, 表明机械做功 (如步频优化、垂直振荡控制) 和生理代谢 (如慢肌纤维激活、跟腱弹性储能) 的协同作用越显著。

步态参数 (步频、触地时间、垂直振荡) 通过影响机械做功与代谢效率对跑步经济性 (RE) 产生显著量化效应。大量研究表明, 跑步经济性在很大程度上受到步幅、步频、触地时间以及着地方式等步态时空参数的影响, 但是各个变量与 RE 的关系目前还存在争议。触地时间过长 (如超过 250 毫秒) 会导致踝关节刚度不足,

增加小腿三头肌的离心收缩时间，进而提高摄氧需求（VO2V0 2 增加 3-5%）。垂直振荡方面，精英跑者通过控制垂直振幅在 6-8 厘米内（普通跑者常达 10-12 厘米），减少克服重力所做的功，使能量效率提升高达 15%。此外，步频与步幅的协同优化（如基普乔格步频 185 步/分钟、步幅 1.9 米）可平衡机械功率输出与代谢能耗，碳板跑鞋通过增强跖趾关节弹性储能（做功效率提升 10%）进一步降低触地阶段的能量泄漏。然而，个体差异（如跟腱刚度、肌肉纤维类型）与动态环境（如风速、坡度）需纳入模型修正，未来研究需结合实时传感器数据与多目标优化算法实现个性化步态调控。

3 马拉松跑鞋性能的分类与作用

马拉松跑鞋一般是由大底（outsole）、中底（midsole）以及鞋面（upper）组成，鞋面起到透气舒适的效果，大底则是防滑与耐磨的作用，而中底则是最能体现不同类型跑鞋核心技术所在。不同类型的跑鞋所提供的性能也有着较大的差异，这与中底的材料密切相关。不同的中底材料在跑鞋的应用中起着缓冲、稳定、回弹、吸收冲击力以及提供适宜脚感的作用，从而帮助跑者提高跑步的经济性。有研究表明：乙烯—乙酸乙烯酯（EVA）泡沫制成的鞋子具有适度的能量归还或反弹作用，能量回归率约为 65%。

结构、材料与重量特性的协同与制约关系，核心体现在中底设计及各部件的功能匹配上，直接影响跑鞋性能分型（竞速型、支撑/缓震型）与跑者运动表现。表 1 是部分厂商马拉松跑鞋中底材料技术的使用情况以及在实践中的应用。

从结构特性看，支撑/缓震型跑鞋常采用厚底设计，依托中底弹性体（如 EVA 或 EVA 混合材质）的形变实现地面冲击缓冲，典型如亚瑟士 Kayano 系列的 Dynamic

DuoMax 双密度厚底，但该形变会打破步态周期的能量储存 - 释放闭环，导致运动能耗上升，实验数据显示其能耗增幅达 4.5%-5.6%；而竞速型跑鞋以碳板技术为核心，如耐克 Vaporfly 系列的全掌铲形碳板、阿迪达斯 ADIOS PRO 3 的 EnergyRods 碳柱，通过高刚性碳纤维板材构建足部蹬伸杠杆，既减少无效能量耗散，又能将发力高效转化为前进动能，可使能量损耗降低 4%，与竞速需求高度适配。

材料特性层面，竞速型跑鞋的中底多采用 PEBA 超临界发泡材料（如 ZoomX），通过微米级闭孔发泡结构实现 85%的能量回馈率，兼顾高弹性与支撑稳定性，为跑步经济性提升（4%-6%）提供材料基础；支撑/缓震型跑鞋则依赖高密度 EVA 或 EVA 混合材质（如 Kayano 系列双密度中底），通过材料硬度差异实现足弓支撑与冲击吸收；此外，环保材料（如生物基聚酯纤维）已应用于鞋面或中底辅料，如某品牌竞速跑鞋鞋面采用该材料，在调控材料密度以保障轻量化（契合竞速鞋减重需求）的同时，减少石油基原料使用，实现性能与可持续性的平衡。

重量特性对跑步效率的影响具有普适性，基于运动生物力学实验验证，鞋重每增加 100 克，会导致跑步时下肢额外负荷增大，进而使运动效率降低 0.78%：竞速型跑鞋通过“碳板 + 轻量化 PEBA 中底”组合（如 Vaporfly 系列）严格控制鞋重，支撑/缓震型跑鞋虽因高密度中底重量略高，但需通过优化鞋面材质（如透气轻量化网布）降低非核心部件重量，避免效率过度损耗。

综上，结构、材料与重量的协同设计直接影响跑者步态周期（如触地时间、踝关节活动度）与生理负荷，跑鞋选择需综合考量运动目标（竞速/日常训练）、足部形态（如是否过度内旋），在性能优化与损伤预防间建立平衡。

表 1 部分跑鞋中底材料性能情况

序号	中底材料	材料性能	应用
1	全掌型塑型 Air Zoom 气垫	以轻量化、缓震性和稳定性为核心	NIKE Pegasus
2	ZoomX 泡棉和全掌铲型碳纤维板	核心设计理念是通过“泡棉 - 碳板”协同系统	NIKE Vaporfly NEXT%
3	双层复合泡棉 Lightstrike Pro 和 Lightstrike 2.0	轻量缓震与稳定推进的平衡	Adidas Adizero Boston
4	LIGHTSTRIKE PRO EVO 泡棉	前掌分叉设计增强横向稳定性，跑动时提供温和推进力	Adidas Adios Pro Evo
5	超䄡科技中底 低密度发泡工艺	极致轻量、澎湃回弹与高效推进	李宁飞电 5 Ultra

序号	中底材料	材料性能	应用
6	双密度氮科技中底 NITROEDGE PRO 氮科技和 NITROEDGE 氮科技	轻量回弹、稳定推进与多场景适配	安踏 c202 GT
7	䟽 PROHP 超临界发泡中底 采用脂肪族 ETPU 材质	有效减少落地足外翻, 兼顾竞速需求与长距离舒适性	中国乔丹 飞影 PB5.0
8	FF Blast Plus 中底和 PureGel 缓震胶	缓震保护、动态稳定与长距离舒适性	Asics Gel-Kayana
9	XTEP ACE 缓震科技采用 PISA 超临界发泡技术	极致回弹、高效推进与轻量化	特步 160X 3.0 Pro PB

4 跑鞋性能对跑步经济性的影响机制

4.1 鞋底厚度与能量消耗的悖论

鞋底厚度对人体运动能量消耗的影响呈现显著悖论特征, 核心体现为功能优势与生物力学代价的冲突。从厚底鞋来看, 其增厚结构虽能通过材料形变缓冲地面反作用力, 降低关节冲击负荷, 具备明确的缓震功能优势, 但同时也引发关键生物力学变化: 鞋底厚度增加会显著提升下肢摆动过程中的惯性力矩, 导致小腿、大腿肌群需额外输出力量以维持摆动节律, 进而加重下肢运动负担。这种额外的肌肉工作消耗直接转化为代谢成本上升, 使厚底鞋的缓震优势被能量消耗增加的代价部分抵消。Almond 等人在针对中底厚度的系统研究中发现, 当鞋底厚度超过 35mm 时, 不仅未降低跑步的能量消耗, 反而显著增加踝关节外翻角度, 这与下肢惯性力矩提升导致的肌肉额外负荷直接相关。该研究支持了厚底鞋缓冲优势被生物力学代价抵消的核心悖论, 其数据显示世界田径联合会 40mm 厚度限制缺乏性能提升的实证依据。

与之形成对比的是简约型跑鞋, 其轻量化设计与人体自然步态存在协同效应。轻量化鞋底大幅降低下肢运动时的负荷质量, 减少摆动阶段的能量损耗; 同时, 该设计更贴合人体自然步态特征, 能缩短足部触地时间, 减少地面反作用力作用于身体的持续周期, 降低非必要的能量耗散。二者协同作用下, 简约型跑鞋可有效提升运动中的能量效率, 形成与厚底鞋能量消耗特征相反的优化路径, 进一步凸显鞋底厚度与能量消耗关系的悖论本质。Bonacci 等人通过对比赤脚与极简鞋跑步的生物力学差异发现, 极简鞋可使膝关节负功减少 24%, 踝关节功率输出增加 14%, 这种关节工作模式的优化与自然步态特征高度协同。长期适应研究显示, 经过 10 周极简鞋过渡训练后, 跑者的跑步经济性提升 10.4%, 虽与传统鞋无统计学差异, 但揭示了轻量化设计通过步态优化实现代谢节省的潜力。

5 结论

研究表明, 马拉松跑鞋性能通过材料、结构与重量的多维协同, 显著影响跑步经济性。碳板技术与超临界发泡材料的结合可有效提升能量回馈、降低代谢成本, 但厚底设计存在功能与能耗的悖论。材料耐久性与环境友好性仍是当前创新的瓶颈。未来需注重生物力学个性化适配, 结合智能传感与环保材料, 构建兼顾性能、舒适与可持续性的跑鞋设计体系, 以科学支撑跑者表现与健康双目标。

参考文献

- [1]World Athletics. (2022). Global marathon participation statistics report 2022. World Athletics Publications.
- [2]Hoogkamer, W., et al. (2018). "Biomechanical effects of advanced running shoe technology on metabolic cost reduction." *Journal of Applied Biomechanics*, 34(5), 401-408. doi:10.1123/jab.2017-0256
- [3]Saunders P U, Pyne DB, Telford RD, et al. Factors affecting running economy in trained distance runners[J]. *Sports Med*, 2004, 34(7):465-485.
- [4]Saunders P U, Pyne DB, Telford RD, et al. Reliability and variability of running economy in elite distance runners[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2004, 36(11):1972-1976.
- [5]徐利亚 & 温煦. (2024). 基于步态时空参数探讨如何实现更节能的跑步方式. (eds.) 2024 年全国运动增强体质与健康学术会议论文摘要集 (pp. 216-217). 浙江大学教育学院; doi:10.26914/c.cnkihy.2024.025659.