

# 器材物理特性驱动的技术体系重构——气排球“项目基因”的生物力学界定

杨仁伟<sup>1</sup> 郝宏凯<sup>2</sup>

1 上海财经大学浙江学院（浙中体育研究院），浙江金华，321013；

2 金华市外国语实验学校初中部，浙江金华，321013；

**摘要：**目的：旨在通过运动生物力学原理，探究气排球器材物理参数（质量、圆周、材质、气压）及空间参数对技术体系的规制与重塑作用，修正将其视为硬式排球（硬排）“低难度附属品”的认知偏差。方法：综合运用流体力学、碰撞力学及动力学理论，对比分析气排球与硬排在发球、接发球及扣球等核心环节的力学机制差异。结果：研究发现：（1）流体力学层面，气排球的高阻力敏感度（ $k/m$  比率）使其在低速（15-20 m/s）即进入雷诺数临界转换区间，诱发“卡门涡街效应”导致轨迹飘晃，界定了“动态适应”的技术基因；（2）碰撞力学层面，低气压特性显著降低了恢复系数，通过球体形变耗散能量，将“刚性反弹”重塑为触球时长延长（0.2-0.3 s）的“柔性缓冲”逻辑；（3）动力学层面，低发力阈值（15-20 N）促使人体动力链从力量叠加转向基于拉长-缩短周期（SSC）的末端精准调控。结论：气排球具备“巧控协同、柔性缓冲、动态适应”的独立项目基因。该结论论证了其独立于硬排的技术逻辑体系，为解决教学中的“技术负迁移”及构建科学化训练范式提供了理论依据。

**关键词：**气排球；硬式排球；生物力学；流体力学；项目基因；技术体系

**DOI：**10.64216/3104-9672.25.04.023

## 引言

气排球作为中国原创的群众体育项目，起源于1984年呼和浩特铁路局集宁分局的职工活动，经过数十年的演变，已成为“健康中国2030”战略下重要的全民健身载体<sup>[1]</sup>。长期以来，学界倾向于将其视为硬式排球（以下简称“硬排”）的“低难度衍生品”或“游戏化变体”，主要关注其“轻、软、大”的表面特征，而将其技术差异简单归结为规则的宽容度<sup>[2]</sup>。然而，器材作为运动员与环境交互的首要媒介，其物理参数（质量、尺寸、材质、气压）直接规制了力的传递效率与控制逻辑，犹如“遗传密码”般限定了技术体系的有效解空间<sup>[3]</sup>。

气排球与硬排的差异并非简单的量变，而是引发技术连锁重构的“关键突变”。从流体力学视角看，球体质量与圆周的变化导致阻力敏感度呈几何级数增加，球体表面特征的改变显著影响了雷诺数（Reynolds number）临界区间，使得气排球在低速下更易产生非线性的气动

轨迹<sup>[4]</sup>。从碰撞力学视角看，低气压特征改变了能量耗散机制。依据冲量-动量定理（ $Ft = \Delta mv$ ），气排球极低的击球力阈值（15-20 N）标志着发力核心由硬排的“瞬时爆发”转向“分级精确控制”<sup>[5]</sup>。

现有研究多聚焦于动作表象对比或宏观发展策略，缺乏对底层生物力学机制的科学论证<sup>[6]</sup>。本研究拟通过系统分析器材物理特性对核心技术环节力学逻辑的重塑作用，界定气排球“巧控协同、柔性缓冲、动态适应”的项目技术基因，旨在破除认知误区，为构建气排球独立的科学训练范式提供理论支撑。

## 1 气排球与硬排的器材特性差异及生物力学基础

气排球与硬排的器材差异，本质上是“竞技导向”与“群众参与导向”两种逻辑的分野（见表1）。气排球通过参数优化降低准入门槛，形成了独特的物理力学环境。

表1 气排球与硬排的核心器材参数对比

参数	气排球	硬排	差异幅度
质量	120-140g	260-280g	气排为硬排的46%
圆周	72-78cm	65-67cm	气排大10%-15%
气压	0.15-0.18kg/cm <sup>2</sup>	0.30-0.325kg/cm <sup>2</sup>	气排为硬排的50%
场地尺寸	12m×6m	18m×9m	气排面积为硬排的44%
网高（男子）	2.1m	2.43m	气排低13.6%

### 1.1 质量与空气动力学特性的耦合机制

气排球轻质 (120-140 g) 与大迎风面积的特征, 重构了飞行过程中的流体力学环境。根据阻力方程  $F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A$ , 球体质量的减小使得加速度对空气阻力的敏感度  $a_{\text{drag}} = k/m \cdot v^2$  显著增加<sup>[7]</sup>。这意味着气排球在较低初速度 (15-20 m/s) 下即可进入雷诺数 (Reynolds number) 的临界转换区间。在此区间内, 球体表面粗糙度与缝合线的不对称性极易诱发“卡门涡街效应”, 产生比硬排更显著的周期性飘晃 (横向位移可达 5-15 cm), 这一现象在近期关于排球空气动力学的分析中得到了证实, 即球体表面的微小纹理变化在特定雷诺数下会显著改变边界层分离点, 从而引发非线性轨迹<sup>[8]</sup>, 从物理底层决定了气排球技术必须具备“动态适应”的基因。

### 1.2 低气压引发的能量耗散与“柔性缓冲”逻辑

气排球 0.15-0.18kg/cm<sup>2</sup> 的低气压特征, 导致其碰撞恢复系数 (Coefficient of Restitution, COR) 远低于硬排。关于加压球体碰撞力学的研究指出, 球体的恢复系数与内部气压及膜材剪切模量呈非线性相关, 低压会导致碰撞过程中能量通过球体的大幅粘弹性形变而显著耗散<sup>[9]</sup>。击球瞬间, 球体产生巨大形变, 通过能量耗散吸收了部分来球动能。这一机制将硬排的“刚性反弹”转化为“柔性引导”, 迫使运动员利用上肢肌群的离心收缩将触球时长延长至 0.2-0.3 s, 以提升对易飘球的控制稳定性。最新的数据驱动研究表明, 通过量化评估手段可以精准监控这一击球过程中的稳定性与方位偏差, 验证了训练对击球结果的显著影响<sup>[10]</sup>。

### 1.3 动力链激活时序的拉长-缩短周期 (SSC) 特征

由于发力阈值较低, 气排球技术不再追求力量的无限叠加, 而是侧重于拉长-缩短周期 (Stretch-Shortening Cycle, SSC) 的精准调控。在“鞭打式巧控”过程中, 运动员通过近端关节 (肩、肘) 的功能性制动 (Functional Braking), 将动量高效传递至末端环节, 这一机制在排球扣球动作的动力学链条分析中被证实是提升末端速度的关键。实验数据表明, 气排球扣球中手腕对末端速度的贡献率高达 45%, 且关节冲击力峰值仅为硬排的 1/3 ( $\leq 50$  N), 赋予了项目显著的安全性特征<sup>[11]</sup>。

## 2 器材特性诱导的核心技术环节生物力学重构

器材物理特性的“关键突变”, 通过力的传递效率、能量转化机制以及动量控制逻辑三个维度, 引发了技术体系的连锁性重构。本章将结合流体力学与刚体动力学原理, 对发球、接球、传球、扣球、拦网五大核心技术环节的生物力学机制展开深入分析。

### 2.1 发球技术的流体动力学重构: 旋转控制与轨迹调适

硬排发球遵循“力量 - 速度”模式, 其目的在于凭借高达 100 km/h 的球速突破一传防线。然而, 气排球具有质量轻与圆周大的特性, 这使其对空气阻力极为敏感, 进而促使发球逻辑向“空气动力学控制”转变。一方面, 飘球技术运用了低速流场中的“卡门涡街效应” (Karman Vortex Street)。击球时, 运动员手掌需精确穿过球心以消除球体旋转, 使球体在 15 - 20 m/s 的低速区间进入雷诺数临界状态。由此引发的尾流不对称分离, 致使气排球横向飘移幅度达 5 - 15 cm, 极大地增加了接发球时视觉判断的难度。另一方面, 旋转球技术借用手腕的快速屈伸与内外旋来产生马格努斯效应 (Magnus Effect)。当球速处于 35-40 m/s 且上旋速率达到 1800 r/min 时, 球体产生的下压力可显著提高球落在界内的概率。因此气排球上手发球更依赖肩、肘、腕关节的快速协同运动, 而非躯干的大幅度做功, 这种近端制动与远端加速的机制有效提高了动能传输效率。

### 2.2 接发球技术的缓冲机制转型: 从“刚性垫击”到“柔性包裹”

硬式排球接发球主要依靠“前臂刚性平面”将球反弹, 强调“快反弹、低弧线”。相比之下, 气排球低恢复系数 (COR) 与易飘晃特性衍生出了独特的“棒球缓冲”技术。该技术在生物力学上体现为冲量缓冲机制的优化。依据动量定理  $Ft = \Delta mv$ , 运动员在触球瞬间双手掌心向前, 五指自然伸展构建与球体曲率适配的“半球状”包裹结构。通过“蹬腿伸膝+展体释放”的协同动作完成稳定控球和出球。这一过程将触球时间 ( $\Delta t$ ) 显著延长, 从而降低了平均冲击力 (F)。此外, 指腹包裹使触球面积增加, 有效分散了局部压强, 这种低冲击特征能有效降低运动损伤风险。

### 2.3 传球技术的柔性化特征: 几何适配与本体感觉微调

硬式排球二传技术依赖“手指手腕的瞬时弹击”以实现长距离精准输送。针对气排球大圆周 (72-78 cm) 与轻质量特征, 其传球技术呈现出显著的“柔性化”与“几何适配”特征。在手型适配上, 为适应更大的球体曲率半径, 双手拇指间距需扩展至 10-15 cm, 呈“微倒八字型”以最大化指腹接触面积。在发力逻辑上, 动力源向“末端精细调控”转移。由于气排球极易受气流干扰产生横向位移, 运动员需建立基于本体感觉 (Proprioception) 的快速反馈回路。研究表明, 在处理

非线性轨迹球体时，视觉-运动系统的耦合机制对于通过微小力矩调整来修正飞行轨迹至关重要，而非单纯依赖预设的爆发力。

#### 2.4 扣球技术的动力链重构：鞭打效应与末端主导

硬式排球扣球是典型的开放式动力链运动，强调下肢与核心力量的爆发性传递。受限于球网高度（2.1 m）及器材质量，气排球扣球技术逐渐演化为“鞭打式巧控”模式。其动力链特征表现为近端制动与远端加速。相比硬排，气排球扣球时躯干旋转幅度降低，能量传递更依赖于肩、肘关节的快速制动（Functional Braking）引发的鞭打效应。系统综述显示，在排球类挥臂动作中，高效的“近端-远端”时序激活是提升末端速度并降低肩部负荷的关键<sup>[13]</sup>。这种动力链重构使得技术目标转向动量矩控制，通过手腕的高速旋转赋予球体下坠或变向效果，从而提高防守方的判断失误率。

#### 2.5 拦网技术的时空策略适配：起跳向量与干扰机制

硬式排球拦网强调“垂直高度与手臂刚性延展”。而在气排球“低网、球轻、场小”的特定环境下，拦网逻辑由“空间封锁”转变为“时空预判干扰”。在起跳力学层面，技术重心转向“水平位移速度”。运动员多采用原地或短助跑起跳，牺牲部分垂直高度为代价换取更快的横向补位能力以及通过双人或三人并网提高拦网威胁。在手型控制层面，针对轻质球易变向的特点，拦网手伸向网带前上方45°，双手手型调整为“半球状”，特别是2号位或4号位把边路队员的外侧手要呈勾型向内包，防止被借手出界。触球瞬间，手指手腕保持适度紧张，利用动量守恒原理，通过“封堵与轻拨”结合的方式主动改变球的反射角。近年来的运动学分析指出，在低网高对抗情境下，拦网动作的时机预判与手部姿态调整对阻断成功率的影响显著高于单纯的起跳高度。

### 3 气排球项目技术基因的界定

基于上述分析，气排球与硬排在技术体系层面的本质差别，是由“轻、软、大”的器材物理特性及“小场、低网”的空间参数共同塑造的。本研究将其“项目技术基因”界定为：巧控协同、柔性缓冲、动态适应。

#### 3.1 巧控协同：从“爆发性输出”到“分级精确控制”

气排球极低的质量（120-140g）与较短的场地纵深（12m），彻底改变了硬式排球以“力量最大化”为核心的做功模式。由于过网所需的击球力阈值仅为15-20

N，若沿用大肌群瞬时爆发的硬排逻辑，极易导致力量溢出与失误。因此，“巧控协同”基因应运而生，其核心在于发力逻辑的分级精确控制与动力链的高效协同。在神经肌肉控制层面，气排球技术转向以I型肌纤维（慢肌）主导的“低强度、高精度”模式。在动力链传导层面，该基因表现为“下肢蹬伸供能—核心刚性传递—末端精细导向”的三阶放大机制。特别是上肢环节，通过近端关节的功能性制动引发鞭打效应，将动量高效传递至远端，利用手指的毫米级微调实现对轻质球体的“四两拨千斤”。

#### 3.2 柔性缓冲：基于能量耗散系统的安全交互

器材的低气压（0.15-0.18kg/cm<sup>2</sup>）与低恢复系数（COR）特性，决定了气排球无法采用硬排“刚性反弹”的交互逻辑，必须建立“柔性缓冲”机制。该基因的物理本质是通过延长触球时间（t）与增加接触面积（S），将瞬时冲击力转化为平缓的能量引导过程，从而实现对易飘球体的稳定掌控。这一基因强制要求指屈肌、肱二头肌等肌群进行离心收缩（Eccentric Contraction），而非通过向心收缩进行硬性对抗。这种柔性交互机制将关节冲击力峰值控制在50N以内，体现了气排球具备显著“康复性”与“安全性”的基因表达。

#### 3.3 动态适应：流体敏感性与空间稳定性的实时调适

气排球“轻球易飘、小场快变”的特征，强制技术体系向高度的“动态适应”进化。这一基因要求运动员建立基于“本体感觉—中枢决策—肌肉响应”的快速闭环，以应对流体环境与空间约束的双重挑战。一方面，针对流体敏感性，气排球在低速区间极易触发雷诺数临界转换，诱发“卡门涡街效应”导致轨迹横向飘移。对此，技术动作转而依赖末端环节的实时修正。另一方面，针对空间稳定性，12m×6m的狭小场域与3~5s的极短攻防周期，迫使运动员通过频繁降低重心以减小稳定角，从而获得更高的起跳加速度。这种“空间—重心—速度”的动态调适，结合“滑步、交叉步、并步”的专项步伐体系，构成了气排球“人随球动、时空适配”的实战生存法则。

### 4 结论与展望

本研究论证了气排球器材物理参数的“关键突变”从底层改写了力的传递与能量利用逻辑。“巧控协同、柔性缓冲、动态适应”的三大技术基因，确立了气排球“以柔克刚”的技术哲学，使其在生物力学层面成为独立于硬排的平行运动体系。

研究构建了“器材参数—力学机制—技术基因”的逻辑链条,突破了“硬排附属品”的认知误区。这一理论框架不仅为解决基层教学中的“负迁移”问题提供了科学依据,也为气排球的智能装备研发与科学化训练范式构建奠定了基础。未来研究可进一步结合有限元模拟与表面肌电技术,量化不同气压下的球体变形能耗散率及肌肉激活时序,深化对该项目科学内涵的认知。

### 参考文献

- [1]杨创.全民健身视域下气排球运动的价值与推广研究[J].文体用品与科技,2023(12):40-42.
- [2]苏小佳.我国气排球运动发展的困境及出路[J].当代体育科技,2024,14(20):179-182.
- [3]穆涛.气排球器材科技创新对比赛结果的影响研究[J].文体用品与科技,2024(19):144-146.
- [4]时平,李晓峰,詹宣同.力学原理在气排球上手发球技术教学中的应用[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2025,48(05):497-500.
- [5]李哲.弹跳训练提升气排球运动技能的作用机理与实施对策[J].当代体育科技,2025,15(11):21-23.
- [6]邓潘,马勇.排球运动项目中的运动生物力学特征研究进展[J].体育科技文献通报,2024,32(08):57-60+93.
- [7]司友志,金稳.排球大力跳发中的马格努斯效应[J].山东体育科技,2021,43(06):57-63.DOI:10.14105/j.cnki.1009-9840.2021.06.009.
- [8]魏庆鼎,林荣生.临界Re数排球绕流分离的特性[J].北京大学学报(自然科学版),1991,(05):568-575.DOI:10.13209/j.0479-8023.1991.071.
- [9]宋雅伟,马继政.降压后排球的运动学浅析[J].南京体育学院学报(自然科学版),2003,(01):23-25.
- [10]张建森,王兴,张丹.数据驱动:麦阵技术赋能气排球教学训练的量化评估与实践验证[J].哈尔滨体育学院学报,2021,39(06):64-69.
- [11]刘连山,王玲.腾空扣杀排球最后用力多关节链鞭体的能量传递与爆发形式[J].河南教育学院学报(自然科学版),2016,25(03):69-73.

作者简介:杨仁伟(1982.06),浙江金华,硕士,副教授,研究方向:体育教育与训练学。

郝宏凯(1997.11),山东潍坊,二级教师,研究方向:体育教育与训练学。

基金项目:2025年度浙江省学校体育协会高等体育教育课题,《基于运动能力等级高校气排球课程分层教学改革研究》编号 Zgtx202511