

足球运动防护装备智能化设计、制造与性能提升

刘敏¹ 尤佳¹ 杨庚²

1. 武汉体育学院, 湖北 武汉 430079

2. 萍乡学院, 江西 萍乡 337055

[摘要]作为世界第一运动, 足球所具有的高度对抗性特点使得人们越来越关注其运动损伤风险。在数字化和智能化的时代背景下, 新型防护装备, 作为减少损伤发生的最核心工具, 正在经历从传统制造向数字化和智能化方向的革命性转变。本文对目前足球运动中所运用的防护装备技术进行了系统细致的梳理, 并围绕智能化设计方法、增材制造技术及性能评价三个维度进行了深入探究, 得出了相关成果。通过对国内外已发表文献的检索发现, 关于运动员身体机能方面的研究已取得一定进展, 但对于如何通过多种材料的组合适配个体身体条件以预防损伤, 相关研究却鲜有关注。本论文通过全面调研现有研究结果指出: 其一, 传统防护装备难以满足多样化的需求; 其二, 现有制造技术尚不能完全适应现代足球对防护装备的高标准要求; 其三, 各类制造技术与高性能检测监测设备之间缺乏有效协调; 其四, 数字化和智能化的发展仍存在诸多局限性。综上所述, 体育装备行业有必要加强对智能化与个性化竞技体育保护产品和装备的研发, 这不仅是我国体育产业未来发展的必然趋势, 也是保障广大运动员特别是职业球员运动安全的重要基础。

[关键词]足球防护装备; 增材制造; 智能化设计; 运动生物力学

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20198

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Intelligent Design, Manufacturing, and Performance Improvement of Football Protective Equipment

LIU Min¹, YOU Jia¹, YANG Geng²

1. Wuhan Sports College, Wuhan, Hubei, 430065, China

2. Pingxiang University, Pingxiang, Jiangxi, 337055, China

Abstract: As the world's number one sport, football's highly competitive nature has led people to pay increasing attention to its risk of sports injuries. In the context of digitalization and intelligence, new protective equipment: as the most essential tool for reducing damage: it is undergoing a revolutionary transformation from traditional manufacturing to digitalization and intelligence. This article provides a systematic and detailed review of the protective equipment technology currently used in football, and conducts in-depth exploration around three dimensions: intelligent design methods, additive manufacturing technology, and performance evaluation, resulting in relevant achievements. Through a search of published literature both domestically and internationally, it has been found that research on athletes' physical functions has made some progress. However, there is little attention paid to how to prevent injuries by combining multiple materials to adapt to individual physical conditions. This paper points out through a comprehensive investigation of existing research results that: firstly, traditional protective equipment is difficult to meet diverse needs; Secondly, the existing manufacturing technology cannot fully meet the high standard requirements for protective equipment in modern football; Thirdly, there is a lack of effective coordination between various manufacturing technologies and high-performance testing and monitoring equipment; Fourthly, there are still many limitations in the development of digitization and intelligence. In summary, it is necessary for the sports equipment industry to strengthen the research and development of intelligent and personalized sports protection products and equipment. This is not only an inevitable trend for the future development of Chinese sports industry, but also an important foundation for ensuring the safety of athletes, especially professional players.

Keywords: football protective equipment; additive manufacturing; intelligent design; sports biomechanics

引言

足球是世界上最受欢迎的运动项目，全球拥有超过2.65亿运动员。然而，高强度的身体对抗与频繁的变速变向使得运动损伤风险不容忽视。流行病学调查显示，足球运动员损伤主要集中于下肢（约占87%），骨折占有所有损伤的2%~11%，而下肢骨折又占骨折病例的30%~33%^[1]。在这些损伤中，胫骨骨折尤为值得关注——Cattermole等的研究表明57%的胫骨骨折由三点弯曲载荷所致^[2]，约14.1%发生在抢断动作中，32.9%发生在被抢断时，50%发生在双方对等争抢情境下。关于导致胫骨骨折所需的冲击条件，学术界尚未达成共识。通过尸体试验发现男性胫骨骨折需约0.320kN·m的弯曲力矩，而对209名逝者的测试则显示60岁以下个体在峰值载荷达7kN时仍未发生骨折。这种差异提示胫骨骨折风险受载荷速率、骨密度及软组织保护等多因素影响。

国际足联自1990年起强制要求足球运动员佩戴护腿板，此举有力推动了运动防护装备向更高标准发展。1990年至2000年间，足球运动员的腿部受伤比例较规定实施前下降了20%；至2005年，该比例进一步降至25%。尽

管有研究对护腿板预防严重腿部损伤的有效性仍存质疑，部分业内人士认为这类设备主要旨在减少钝力冲击与穿透性创伤，但距离实现更深层的预防作用仍有较大距离。

近年来，材料科学、数字化设计与增材制造等领域的快速发展为防护装备带来了新的革新机遇。三维扫描技术可精确采集人体解剖数据，结合CAD工具可设计出复杂的吸能结构，而增材制造则能将数字模型直接转化为实体产品。同时，微型传感技术的不断进步使防护装备从被动屏障向主动监测系统转型成为现实。本研究系统梳理了足球防护装备领域的前沿进展，重点围绕三大维度——智能化设计手段、增材制造技术及性能评价——展开论述，并构建了“设计-制造-评价”的综合研究框架，以期为该领域的进一步突破提供理论支撑与方法指引。

1 足球防护装备的类型与功能

防护型装备分为强制性和选择性防护装备两种类型，例如护腿板是属于必须配备的装备而比如在比赛中头部受到伤害则需要佩戴面部保护装置，头部保护装备以及守门员用的手套等等，见图1，如图1展示了一些常见情况下由于足球运动而导致伤害的情况及其相关保护装备。



(a) 高速足球造成的头部伤害；(b) 常见的足球运动损伤部位；(c) 以一名足球运动员为中心，从左上角顺时针方向依次为：1 减震头盔、2-3 标准款和环绕款运动护目镜、4 面罩（用于治疗鼻部或眼眶骨折）、5 脚蹼、6 定制足部矫形器、7 护膝、8 护膝、9 守门员手套和 10 牙套

图1 足球运动损伤及防护装备。

1.1 护腿板

护腿板是足球唯一由竞赛规则强制规定的防护装备。根据国际足球协会理事会《比赛规则》第4条,护腿板须被球袜完全覆盖,由适当材料制成,提供合理的防护程度。其核心功能是将作用于胫骨嵴的集中冲击载荷分散至更大面积,降低局部应力峰值。

现代护腿板普遍采用复合结构:外层为刚性壳体(聚丙烯、聚乙烯或碳纤维复合材料),承担冲击能量的初步分散;内层为柔性缓冲层(乙烯-醋酸乙烯酯共聚物泡沫或粘弹性材料),进一步衰减传递至胫骨的载荷;高端产品在壳体和缓冲层之间增设特殊几何构型的中间层以改善吸能效率。不同产品间的性能差异显著——Tatar 等对三种聚丙烯和两种碳纤维护腿板的对比测试表明,高冲击力(3kN)条件下普通聚丙烯产品的防护能力明显不足。

1.2 面部护具

面部护具是一种主要应用于鼻骨、眼眶或颧骨等部位骨折后,辅助运动员回归赛场的防护设备。其作用机理在于将冲击载荷传导至面部坚硬区域(如额骨和颧弓),从而对骨折愈合部位提供有效保护,这是智能化设计与个性化制造的典型实例(见图2)。目前,主流面部护具多采用碳纤维、聚碳酸酯及热塑性复合材料,这些材料在保证足够强度的同时,能够有效实现轻量化。临床反馈显示,部分运动员在使用过程中存在周边视野受限、长期佩戴不适,以及在高温高湿环境下汗液大量积聚等问题^[3]。近年来,三维扫描与增材制造技术的快速发展显著提升了护具的定制化水平:通过面部扫描获取精确的解剖数据,结合CAD建模与3D打印等手段,可在短期内制造出具有高贴合度的个性化护具。



图2 足球运动中面部防护口罩的个性化智能化设计

1.3 头部护具

头部护具在足球中的应用针对的是青少年群体以及守门员,一般为闭孔泡沫材料,通过压缩变形来吸收冲击能量。McGuine 等研究结果显示头部护具对于青少年足球运动员脑震荡的发生率没有达到统计学显著的水平^[4],在最新的2023年阿姆斯特丹共识中该共识明确表示现有证据不足以证明头部护具对于运动相关的脑震荡有预防效果^[5]。

1.4 守门员手套

守门员手套具有抓握的功能,同时还能起到手部的防护效果。现代手套将分段式衬垫设于指背侧以缓冲冲击力,并在手指两侧内嵌刚性支撑条以防手指过度弯曲。掌面为天然或者合成乳胶的复合材质,并通过表面纹理来改善摩擦特性。需指出的是,乳胶材料的性能会由于汗液的渗透以及多次的清洗等原因慢慢劣化^[6],因此制定一个合理的更换周期对于保持保护功能非常重要。

1.5 护齿套

护齿套不属于足球比赛的强制装备,其使用率较橄榄球和冰球低得多。考虑到赛场上肘部撞击、球击面部等意外事件频发,护齿套对于预防牙齿外伤及口腔软组织损伤具有实际价值。定制式护齿套由热塑性材料真空成型而成,与煮沸咬合型制品相比,其贴合度与舒适性显著提高。近年来,已有研究尝试将微型传感器集成于护齿套,用于检测头部冲击加速度或监测水合状态,这显示出护齿套由被动防护向多功能智能平台发展的潜力。

1.6 护踝与护膝

护踝、护膝普遍用于足球的训练及恢复阶段。系统综述及Meta分析发现,系带式护踝明显减少了有扭伤史的运动员踝关节再损伤的发生率;与传统的贴扎相比,护踝可以起到较为显著甚至更好的支持作用,且支撑性能衰减较小。功能性护膝和压缩套筒是前交叉韧带重建术后恢复期比较常用的膝关节护具。虽然一些研究认为其生物力学预防效果有限,但很多运动员表示佩戴后运动信心有所提高,这一心理效应对回归赛场的决策具有一定的参考意义。

1.7 矫形鞋垫与护目镜

矫形鞋垫被设计用来解决足部的生物力学问题,比如过度内旋和下肢不对称,其目的主要是使足底压力均匀分布,并显著减少因过度负荷而导致损伤的风险。然而,在选择定制版还是预制版产品方面,目前尚未达成统一共识。护目眼镜虽然主要用于那些存在视力问题而无法舒适佩戴隐形眼镜的运动员,并采用了能抵御剧烈撞击的材料,且安装了弹性头部绑带以增强稳固性,但由于起雾、不适感或心理抗拒等因素,仍然是阻碍其广泛使用的主要障碍。

2 防护装备的智能化设计方法

2.1 数字化人体数据采集

三维扫描是个性化防护装备设计的首要步骤。例如,在消费级扫描设备 Sense 的辅助下,运动员只需直立 10s 左右,技术团队移动扫描仪即可完整采集双腿的数据,继而输出约由 178394 个三角形面片构成的 STL 三维模型,各边边长约为 2.4mm。与传统石膏制模技术相比,三维扫描具有非侵入性、耐用性和可远程操作等特点,同时还能将数字化的几何数据无缝整合进 CAD 设计软件中,为后续的设计阶段提供有力支持。

对于需要精准模拟骨骼结构的应用(如面部护具设计验证),CT 图像提供了解剖学基础。在扫描 IP 软件中,通过设置灰度阈值以区分骨骼和软组织、手动修正复杂解剖结构的边界、生成三维表面模型,可建立高保真的骨骼几何。成人颅骨骨缝已愈合,形态通常予以简化处理,但眼眶边缘等关键承重结构的几何特性必须准确保留,因为这些结构直接影响到护具的贴合性及载荷传递路径。

2.2 计算机辅助设计技术

获取扫描数据后,需在 CAD 环境(如 CREO、Rhino、SolidWorks)中完成防护装备的几何建模。基本流程为:将扫描网格模型导入作为参考基准→根据功能要求设计外壳轮廓→依据解剖特征调整内表面以匹配肢体形状→添加固定结构、透气孔等辅助特征。护腿板设计实践中,内表面形状对佩戴舒适性影响最大——过于贴紧可致局部压迫和血液循环障碍,过松则引起滑动摩擦,通常需预留 1~2 mm 间隙量并在边缘设置平滑过渡。

晶格结构是实现轻量化和可控吸能的关键设计元素。以护腿板为例,典型“三明治”构型包括刚性外壳、晶格吸能层和内壳。关键几何参数包括柱体直径(2~3mm)、柱体间距(2.5~3.5mm)及水平连接的有无。柱体直径小而间距大时,晶格刚度低、变形能力大,有利于延长冲击持续时间;柱体直径大而间距小时,结构刚度增大,虽能承受更大载荷但可能因减速过快导致外壳破裂。内壳孔洞不仅有助于支撑材料清除,也利于减轻重量和改善透气性。

2.3 面向增材制造的设计约束

在设计阶段充分考虑增材制造工艺约束是保证可制造性的关键。主要约束包括:支撑材料的可清除性(需在晶格柱体间保留足够间距以便水刀进入);最小特征尺寸限制(柱体直径小于 2mm 时易在支撑清除中损坏或与壳壁分离);打印方向的力学各向异性(增材制造零件在打印面内和层间的力学性能存在差异,需通过合理方向选择优化关键承载方向强度)。此外,打印材料固化收缩率、

分辨率和成型空间尺寸等亦需在设计阶段加以考虑。

3 增材制造技术在防护装备中的应用

3.1 增材制造技术概述

增材制造(三维打印)是基于三维模型数据,通过逐层堆积材料构建三维物体的制造方法,与切削加工等减材制造存在根本区别。其主要优势包括:可构建传统工艺难以实现的复杂几何、材料浪费极少、显著减少零件数量、设计迭代周期大幅缩短。局限性则包括需要 CAD 建模能力、打印精度受设备限制、支撑结构增加工艺复杂性及可用材料范围有限。在足球防护装备领域,较成熟的技术主要包括材料挤出(熔融沉积建模)和材料喷射(PolyJet 多材料打印)。

3.2 多材料增材制造

多材料增材制造技术使刚性外壳与柔性吸能结构的整体打印成为可能。以 Objet Connex 系列为例,该设备通过多个打印头分别喷射不同光聚合物材料,在紫外照射下逐层固化,两种模型材料可按预设比例混合以获得介于两者之间的“数字材料”。外壳采用刚性材料(Fullcure 720,弹性模量 2000~3000MPa,拉伸强度 50~65MPa)确保结构强度,晶格吸能层采用柔性橡胶状材料(TangoPlus, Shore 硬度 26~28)优化吸能效率。两种材料在同一打印任务中交替沉积,界面处形成化学结合,避免了后续组装。

3.3 典型应用案例

Cazon-Martin 等^[7]完整展示了从数字化设计到多材料增材制造的护腿板开发流程。研究团队首先打印 24 种不同晶格构型的圆柱形试样进行筛选,选择性能最优结构(编号#19,柱体直径 2mm,有水平连接)用于全尺寸护腿板制造。护腿板设计参考运动员腿部扫描数据,长 170mm、宽 110mm。打印耗时 6.25h,消耗 234g 刚性材料、32g 柔性材料和 442g 支撑材料,成品重 100g,处于商用护腿板重量范围(37~216g)中间位置。经济性方面,单只增材制造护腿板材料成本约 100 美元,远高于批量生产的普通商用产品(5~60 美元),但与高端定制碳纤维护腿板(约 600 美元)相比已具成本优势,在小批量定制场景下具有可行性。

Mantecón 等利用增材制造开发了用于头盔冲击测试的头部替代物^[8]。基于 CT 数据重建颅骨几何模型,采用 PLA 材料通过熔融沉积建模打印颅骨壳体,内部灌注 Ecoflex 0030 硅胶模拟脑组织。颅骨模型保留三层结构(两层密质骨夹一层松质骨),松质骨区域采用螺旋状填充模拟骨小梁结构。冲击测试中,该替代物与标准 Hybrid III 头部模型在峰值加速度和头部损伤准则方面表现出一致

性, 差异控制在 20%以内, 表明增材制造头部替代物可在一定精度内替代昂贵的商用测试假人, 为防护装备早期研发提供经济可行的测试方案。

4 防护装备的性能评估方法

4.1 冲击测试方法

落锤冲击试验是评估防护装备冲击防护性能最常用的实验室方法。以护腿板测试为例, 典型装置由直径 110mm 钢管(模拟小腿)、质量 1kg 冲击器及冲击器上的圆柱形钢制鞋钉(直径 10mm、突出 19mm)组成。护腿板试样紧贴钢管固定, 冲击器沿导轨从 100~400mm 高度释放, 冲击速度范围 1.4~2.8m/s, 能量范围 1~4J。加速度测量采用压电式加速度计(采样率 10kHz), 部分研究配备高速摄像系统(2000 帧/秒)验证加速度积分所得位移并对变形模式进行可视化分析。

关键评价指标包括: 冲击加速度(反映冲击器减速程度, 峰值越低越好)、穿透深度(通过加速度信号二次积分获得, 反映抵抗尖锐物体穿刺能力)、吸能比/衰减率(传递到模拟肢体的力与冲击力之比, 越低说明吸能效率越高)及接触时间(越长越有利于降低峰值力)。

4.2 生物力学评价指标

头部损伤准则是评估头部冲击损伤风险的最常用指标。HIC 值越高, 头部承受的冲击越严重。自行车头盔标准 UNE-EN 1078 中 HIC 限值为 1000, 多数现代头盔实际测试值远低于此阈值。

胫骨骨折风险评估更为复杂, 受载荷大小、加载速率、作用位置、方向及骨骼几何和材料特性等多因素影响。防护装备研究中通常采用“损伤风险曲线”方法建立冲击参数与损伤概率的关系, 这需要在生物力学模拟与装备性能评估之间建立可靠桥梁。

4.3 增材制造装备与商用装备的对比评估

将 24 种增材制造晶格试样在四个冲击高度下与两款商用护腿板(Adidas Predator Lite 和 Ghost Guard)进行了系统对比。低冲击高度(100、200mm)下大部分增材制造试样表现良好, 仅少数外壳破裂; 300mm 高度下通过数量显著减少; 最终仅两种设计通过 400mm 最严苛测试, 两者共同特征为外壳厚度 3mm 且晶格柱体间距较大(3.5mm)。

在冲击加速度方面, 两种设计在 400mm 高度下的加速度值分别为 967m/s² 和 970m/s², 两款商用产品分别为 2880m/s² 和 1213m/s²——增材制造试样较商用产品低 42%~68%。穿透深度方面, 增材制造试样为 3.2~4.2mm, 商用产品为 5.3~6.7mm, 改善 13%~32%。接触时间方

面, 增材制造试样(8.6~9.3ms)与商用产品(8.5~9.3ms)无显著差异。

5 智能化防护装备的发展趋势

5.1 智能传感技术的融合

将微型传感器集成到防护装备中实现冲击载荷实时监测和运动员状态动态评估, 是防护装备智能化的重要方向。传感器可嵌入护腿板夹层、头部护具衬垫或护齿套本体中, 测量加速度、角速度、力或应变等物理量。

5.2 新型吸能材料与结构

在材料层面, 粘弹性泡沫在较宽应变率范围内保持稳定能量耗散能力, 已被广泛应用于头盔衬垫和护具缓冲层; 碳纤维复合材料以其卓越比强度和比刚度实现结构轻量化的同时提供优异载荷分散性能; 一些研究正探索具有应变率敏感特性的智能材料(如剪切增稠流体), 在低应变率下保持柔软舒适, 高应变率冲击下迅速硬化以提供额外防护。

在结构层面, 增材制造的自由成形能力为开发新型能量吸收结构开辟了广阔空间。Liu 等近期提出的折纸启发屈曲调控结构展示了优异吸能特性, 通过可展开折叠、单元排列和伪刚性特征的协同作用实现整体吸能效率提升^[9], 有望在未来被引入足球防护装备设计。

5.3 个性化的设计范式

三维扫描、增材制造和性能评估的有机结合正在催生全新的个性化防护装备设计范式——装备设计不再依赖标准化尺码体系, 而是基于个体解剖数据和运动特征量身定制, 通过建立设计参数—制造参数—性能指标的映射关系实现快速设计迭代和优化。良好的贴合度不仅提升佩戴舒适性, 也改善了冲击载荷传递路径, 对预防局部应力集中导致的软组织损伤有重要意义。

6 结论

本文系统构建了足球运动防护装备“智能化设计-增材制造-性能评估”三位一体的研究框架。三维数字化扫描与个性化 CAD 建模使防护装备可根据运动员个体解剖特征精确适配, 为优化冲击载荷传递路径奠定基础。多材料增材制造实现了刚性外壳与柔性晶格吸能结构的一体化集成, 护腿板应用中增材制造试样在冲击加速度(降低 42%~68%)和穿透深度(减少 13%~32%)两项关键指标上均优于部分商用对照产品; 头部替代物验证表明增材制造模型与标准测试假人冲击响应差异可控制在 20%以内。基于冲击动力学的性能评估方法通过加速度、穿透深度、吸能比和接触时间等多指标综合评价, 为设计方案的系统比较和关键参数的识别提供了量化依据。智能传感技

术与防护装备的融合代表了从被动屏障向主动监测工具转变的未来方向。

然而,增材制造材料在反复冲击和长期使用下的性能稳定性尚需系统验证,多材料界面可靠性需深入研究,装备成本与性能的优化平衡仍需持续探索,使用者依从性则需从人体工学设计和心理接受度两个维度协同解决。未来,增材制造与智能传感的深度融合、多尺度仿真方法的应用及基于真实使用场景的长期跟踪研究,将共同推动足球防护装备向更安全、更舒适、更智能的方向持续演进。

[参考文献]

- [1]Ekstrand J,Hagglund M,Walden M.Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study[J].British Journal of Sports Medicine,2011(45): 553-558.
- [2]Cattermole HR,Hardy JRW,Gregg PJ. The footballer's fracture[J].British Journal of Sports Medicine,1996(30): 171-175.
- [3]Critelli K,Demiris V,Klatt BN,et al.Facemasks block lower visual field in youth ice hockey[J].Frontiers in Sports and Active Living,2021(3):787182.
- [4]McGuine T,Post E,Pfaller AY,et al.Does soccer headgear reduce the incidence of sport-related concussion? A cluster, randomised controlled trial of adolescent athletes[J].British Journal of Sports Medicine,2020(54):408-413.

[5]Davis GA,Schneider KJ,Anderson V,et al.Pediatric sport-related concussion: recommendations from the Amsterdam Consensus Statement 2023[J].Pediatrics, 2024(153):89.

[6]Tomas Ferreira J,Bartoletti A,Franca de Sa S,et al.Proof-of-concept study on the feasibility of supercritical carbon dioxide-assisted consolidation treatment for a pair of goalkeeper gloves[J].Sustainability,2024(16):1562.

[7]Cazon-Martin A,Iturriza-Campelo M,Matey-Munoz L,et al.Design and manufacturing of shin pads with multi-material additive manufactured features for football players[J].Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part P,2018,1(233):160.

[8]Mantecón R,Valverde-Marcos B,Rubio I,et al.Additive manufacturing of polymeric head surrogates for impact testing of sports protective equipment[J].Polymers, 2024,16(12):1753.

[9]Liu K,Li P,Wang Z.Buckling-regulated origami materials with synergy of deployable and undeployable features[J].International Journal of Mechanical Sciences, 2023(247):108167.

作者简介:刘敏(1999—),女,汉族,江西赣州人,在读研究生,就读于武汉体育学院体育理论专业,研究方向:运动设备,体育装备研发。