综述·专论

运动护具材料的研究进展及其防护性能的评价方法

林金剑[1],崔树阳[1],张继川[1,2],陈百顺[3],胥雪双[3]

(1. 北京化工大学 先进弹性体材料研究中心,北京 100029;2. 北京化工大学 弹性体材料节能和资源化教育部工程研究中心,北京 100029;3. 探路者控股集团股份有限公司,北京 102200)

摘要:综述运动护具材料的研究进展及其防护性能的评价方法。综合国内外有关运动护具设计及其防护性能的检测情况,简介了新型高性能运动护具材料的特点及研究和应用情况,概述了运用摆锤式或落球式冲击试验检测方法以及采用计算机模拟方法及动态力学性能分析方法评价运动护具材料的防护性能。运动护具材料的高性能化发展对减少运动损伤、提高人民健康水平十分重要。

关键词:运动护具;防护材料;防护性能;评价方法

中图分类号:TQ336.9 **文章编号**:1000-890X(2023)00-0000-00

文献标志码:A **DOI**:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.00.0000

OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

为了早日实现建设体育强国的奋斗目标,促进国民身体健康与身体素质的提高,我国特别制订了《全民健身计划(2021—2025年)》[1],而2022年北京冬奥会及冬残奥会的举办更是让全国人民锻炼的热情日益高涨。学校体育和大众健身活动内容不断增多,但人们在运动的同时发生运动损伤的概率也在升高。

为防止或减轻运动中出现损伤,国内外研究人员开发出多种高性能的运动护具,但是在运动护具的设计和测试过程中存在难点,即测试运动护具的防护效果时不可以直接实施对人体造成损伤的临床研究,只能通过其他间接手段检验。运动护具的设计涉及到多个学科,例如材料学、人体工程学、冲击损伤生物力学的交互[2-4]。随着高新技术与体育运动结合的日益紧密,越来越多的科研人员认识到运动防护学的重要性,运动防护学的研究成果极大地促进了运动防护产品的开发和应用[5]。

1 运动损伤类型概述

全世界每年约有7 500万人遭受不同的运动伤害,而这些损伤大多发生于未穿戴防护装备的运动者[6]。例如,人们进行体育运动时未穿戴防护装备,相应的关节、肌肉、韧带在运动过程中可能由于反复、频繁的挤压和伸展动作而发生慢性损伤;强度不足的肌腱在运动过程中可能会由于外界冲击导致急性拉伤或休克损伤[7];在运动过程中动作不规范或负荷超过机体承受上限可能会导致关节发生异常扭转,使关节囊周围或附近其他组织受损发生关节扭伤[8]。在运动创伤学中运动损伤可按照日常训练与运动技术之间的关系分为运动技术性损伤和非运动技术性损伤[9]。美国运动技术性损伤又划分为运动相关性脑震荡、前交叉韧带损伤、关节松弛和过度使用性损伤4个方面[10]。

轻微的运动损伤会对皮肤、肌肉和骨骼等造成一定程度地伤害,而严重的运动损伤则会影响人们的日常生活和身心健康。为了防止运动损伤

作者简介:林金剑(2000—),男,山东聊城人,北京化工大学在读硕士研究生,从事橡胶复合材料的研究。

*通信联系人(dandelion@mail.buct.edu.cn)

引用本文:林金剑,崔树阳,张继川,等. 运动护具材料的研究进展及其防护性能的评价方法[J]. 橡胶工业,2021,68(4):258-262.

Citation: LIN Jinjian, CUI Shuyang, ZHANG Jichuan, et al. Research progress of sports protective equipment materials and evaluation methods of their protective properties[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(4): 258-262.

的发生，一方面是进行专业的运动技巧训练，主动规避风险，提高安全运动意识，避免非运动技术性损伤；另一方面是针对危害性、随机性、意外性较大的运动技术性损伤，合理地使用有针对性的运动防护产品。

2 国内外运动护具的研究现状

运动护具是通过吸能材料吸收和分散外界作用力，保护人体在运动时肌肉和关节等免受外来伤害，一般吸能材料需要与纺织材料复合以制作成防护用品和服装等穿戴在人体上。

叶冬茂[11]提出运动护具主要是通过限制关节活动度、降低皮肤摩擦力和吸收外部冲击能量来实现对人体保护目的。运动护具不仅可以固定肌肉和韧带等部位，作为运动时的辅助用品，减缓肌肉在运动中的过度拉扯；还可以强化关节支撑，以避免运动姿势不当或瞬间压力超过关节承受极限所带来的严重伤害[7]。

运动护具的设计需要将多种因素，例如抗冲击性、质量、整体性、重复使用性等综合考虑。D. TYLER等[12]认为运动护具设计的六大要素为：抗冲击性、灵活性、密度、厚度、透气性、纺织缝合技术，见图1。除了防护性能外，竞技体育中还要求运动护具不能完全限制关节的活动度，以避免技术动作不能按标准完成[13]。由此可见，在运动护具的设计中，舒适性也需考虑在内。一般可通过调整护具的尺寸、质量、透气性、散热性能、贴合性、外观等调节护具的舒适性[14]。

2.1 不同部位运动护具的设计及研究进展

在不同种类的运动中，人体发生损伤的部位

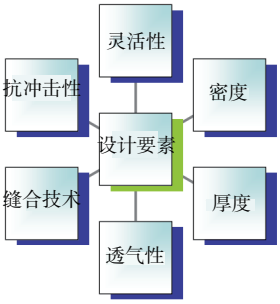

图1 运动护具设计的要素

Fig. 1 Key factors of sports protective equipment design

不同，所以运动护具具有多样性。例如研究人员发现在冰雪运动中，头部、肩部、膝盖和脊柱是运动损伤最严重的部位[15]；足球运动中的损伤部位主要有踝关节、小腿胫骨和膝部韧带[6]；排球运动中的损伤部位主要有膝关节、踝关节和韧带[16]。

因此，根据运动的种类和使用群体，选择合适的个性化运动护具，可更有效地实现护具的防护功能，抵御外界伤害[17]。根据保护部位和从事运动的不同，运动护具主要有2类，头盔类和四肢防护用品类，具体包括护头、护腰、护踝、护腕、护膝，护肩和组合护具等，如图2所示。

为设计综合性能优异的运动护具，国内外学者运用多种手段对身体不同部位的运动防护用品进行了深入研究。

膝盖承受着人体约70%的质量，它起到承载、维持膝关节运动协调和吸收震荡的作用，其是人体运动中容易受伤的部位之一[18]。张峻霞等[19]研究表明，佩戴护膝可略微限制膝关节运动，减少膝关节多余活动量，同时护膝会减小膝关节内收力矩峰值和内旋力矩峰值，在额状面和矢状面上对膝关节的保护效果较为显著。翟文亮[20]研究表

(a)护头；(b)护腰；(c)护踝；(d)护腕；(e)护膝；(f)护肩；(g)组合护具

图2 常见的运动护具

Fig. 2 Common sports protective equipments

明，当膝关节承受来自正面的冲击时，交叉韧带和外侧副韧带容易发生损伤，这将会大大降低膝关节的稳定性，通过对人体组织观察和三维运动测量确定了膝关节损伤的冲击能量阈值为80～160 J。孙清风等[21]开发了一种具有微孔弹性体和慢回弹双重性能的聚氨酯组合料（其中，特种聚醚多元醇为聚氨酯的组成成分之一，1，4-丁二醇为聚氨酯的扩链剂，改变二者用量可改变聚氨酯的结构与性能）制备的护膝材料。结果表明：体系中添加70份特种聚醚多元醇时，护膝材料具有最佳的冲击能量吸收性能，可吸收48. 42%的冲击能量；添加7份1，4-丁二醇时，护膝材料可吸收46. 51%的冲击能量。聚氨酯运动护膝材料解决了传统厚毡材料制成的护膝抗冲击性能与舒适性不可兼得的问题，为避免运动过程中关节损伤提供了保障。

胸部位于人体正中，易受外界冲击引起损伤，因此胸部的防护极其重要。范春满[22]通过在受试者胸骨与肋骨处安置传感器监测胸壁运动发现：可通过胸壁的粘性参数预测和评估胸部伤情，胸壁形变量和形变速度与损伤程度存在一定的相关性；当撞击速度低、形变量大时胸壁易发生挤压型损伤，当撞击速度高、形变量小时胸壁易发生冲击型损伤。在胸部碰撞部位配备能够减小胸壁变形、延长碰撞力作用时间的材料做成的护具，对于防止胸部受到损伤具有重要意义。毛瑞秋等[23]采用无毒无味、透明的硬塑料制备的女子拳击护胸明显降低了拳击过程中运动员胸部所受的打击力，进而减少运动损害。该护胸在2002年国家女子拳击世界锦标赛时被采用，极大地促进中国女子拳击运动不断向健康方向发展。

足球作为第一运动，绿茵场上的运动员们面临着多种可能导致运动损伤的因素，例如激烈的铲球动作对运动员的小腿有极大威胁，因此上场前佩戴护腿板是足球运动员约定成俗的规定之一。张勇等[24]将足球运动中人腿的受力模型简化为简支梁模型，用钢管模拟人腿，使用小球施加冲击，将踢球过程中人腿的受力简化为简支梁钢管受小球冲击模型，以此探究不同厚度与种类的护腿板的防护效果。研究发现，在相同的冲击载荷下，护腿板的厚度可显著影响其防护效果，并且相对于竹片和含有塑料泡沫垫的护腿板，含有海绵垫的塑料护腿板对冲击载荷吸收效果最好。

在滑雪运动中，佩戴运动护具是防止运动员受到标杆撞伤等冲击伤害最有效的方法。传统橡胶护具存在着质量大、透气性差等缺点。曹楠楠等[25]使用热风模压成型工艺，以热熔粘合纤维和三维卷曲中空涤纶纤维为原料，制备了一种透气性优异的后背护具。其中，热熔粘合纤维起到粘合效果，蓬松的三维卷曲中空纤维可使护具具有很好的缓冲防护效果。结果表明，护具质量在400 g左右时兼顾较好的抗冲击性能和透气性，其透气量为320 mm·s^{-1}，相对于传统的橡胶护具，该新型材料护具的透气性和舒适性得到明显改善。

在激烈的拳击和搏击运动中，口腔护具是运动员必备的重要护具。口腔护具又称护齿套，美国材料与试验协会将护齿套定义为放置在口腔中的弹性装置[26]，其作用是减少人体牙齿和周围组织结构的损伤。B. WESTERMAN等[27]以乙烯-醋酸乙烯共聚物（EVA）材料制备的护齿套为研究对象，对不同厚度护齿套的冲击吸收性能和冲击传递性能进行摆锤冲击试验，结果表明EVA护齿套的理想厚度为4 mm。

大脑是人体最重要的器官，所以头部的保护是重中之重，头盔作为头部护具，其材料的力学性能需要足够优异。谢婉晨[28]运用真空辅助树脂传递模塑成型复合工艺一体成型了以环氧树脂为基体、5层角连锁芳纶纤维机织物为增强材料的三维复合材料，对其进行拉伸、弯曲、抗冲击测试。结果表明，材料的拉伸强度为508. 0 MPa，抗冲击强度为187. 1 kJ·m^{-2}，弯曲强度为1 489 MPa。这种强度高、耐冲击的三维复合材料可用于头盔壳体的制备。

2. 2　新型高性能材料的运动护具

近年来，科研人员对于运动护具的研究不再局限于抗冲击性能，护具的舒适性、材料的绿色化、防护的智能化同样成为护具产品开发和设计过程中不可忽视的一部分。高性能材料对制备多功能运动护具及其具备的优异综合性能起到决定性的作用。基于该理念，国内外对高性能材料在运动护具中的应用进行了广泛的研究。

美国道康宁公司开发一种具有积极防护系统的纺织品[29]，该纺织品通过将硅树脂注入三维纺织品中，利用硅树脂的膨胀特性，在普通状态下呈柔软且富有弹性的状态，而一旦受到高能量冲击，其立即转变为坚硬固体，将冲击能量吸收并快速分散。该纺织品的载体通常是由涤纶纤维制备，表面构造为菱形，厚度约为4.5 mm，而该纺织品主要由硅树脂提供防护功能，其具有良好的热稳定性，在－40～80 ℃之间具有良好的防护性能。与采用普通硬塑料制作的摩托车防护服相比，采用该纺织品制作的摩托车防护服具有优良的透气性、弹性和耐洗涤性等，且其抗冲击强度比欧洲最优等级标准高40%。

1999年，英国工程师理查德·帕尔默发明了D3O材料[30]，此后英国赫特福德郡大学创新中心的研究者和D3O Lab公司合作研发了一种基于D3O材料的智能防护服。D3O材料本质是一种以聚硼二甲基硅氧烷（PBDMS）为膨胀剂的闭孔聚氨酯泡沫复合材料，而PBDMS是一种非牛顿流体，在原始状态下可以自由流动，但是受到外界冲击时分子间立刻发生互锁，将冲击能量以热量的形式吸收和分散，材料随后回复到半流体状态，完成循环。由于PBDMS分散在泡沫基体中，使得D3O材料对速率敏感，从而在特定能量水平下比普通聚氨酯材料消耗更多的能量，达到防护效果。D3O材料以PBDMS含量为15%～35%和聚氨酯发泡率为40%～70%为最佳。D3O材料制作的防护服在受到撞击时会迅速变硬以抵抗冲击，并且外部冲击越大，变化越迅速；在不受力状态下则轻而软，这是由于材料内部PBDMS的孤立分子在受到外部碰撞或挤压时，迅速相互锁定而收紧硬化。D3O材料自从开发起就凭其优异的防护性能和宽松的使用条件而备受关注，最早在2006年的都灵冬奥会，美国和加拿大滑雪队就穿着该材料制成的防护服[31]。D3O材料的使用温度范围为－4～122 ℃，超温使用时其使用寿命会受影响，且PBDMS的分子互锁超过10万次极限后，也会使D3O材料逐渐丧失优异的防护性能。

近年来，中国自主研发的P4U材料也备受关注[32]，P4U材料与D3O材料都是基于剪切增稠原理的一种非牛顿流体，P4U材料的特性如同人体的肌肉会对不同力度的冲击作出不同的反应，在常态下柔软且具有弹性，一旦遭受外界碰撞或冲击时，材料就会因分子间发生互锁而迅速变硬；外力消失后，材料又恢复到松弛状态。因此，P4U材料特别适合用于制作足球、篮球和特技等运动的护具。

聚氨酯丙烯酸酯（PUA）分子中含有丙烯酸官能团和氨基甲酸酯官能团，其具有聚氨酯的高耐磨性能、高拉伸强度和耐低温性能，同时还具有聚丙烯酸的光学性能和耐候性能，其在胶粘剂或者涂料领域有着广泛的应用。E. C. CLOUGH等[33]以PUA为原料制作运动护具，研究PUA的微观结构与材料的防护性能之间的关系，并应用增材技术制造基于微点阵网格结构的运动护具（头盔）。相较于现有的发泡材料运动护具，采用PUA材料制作的运动护具具有更好的透气性和更高的抗压强度，冲击能量吸收效率也大大提高；此外，应用增材技术制造结构复杂且规整的防护产品也是PUA材料的优势所在。

杜仲胶作为绿色可再生高分子材料，具有优异的可加工性和力学性能，它是天然橡胶的同分异构体。杜仲胶大分子链有3个特点：柔性、含双键和反式结构，柔性链是保证杜仲胶弹性的基础；双键可以实现杜仲胶硫化；反式结构的有序性使杜仲胶容易结晶[34]。

张继川[35]深入研究了杜仲胶硫化的可行性，发现杜仲胶的结晶性与交联程度可反映硫化过程不同阶段其性能的突变，并提出杜仲胶具有橡塑二重性，因此杜仲胶具有形状记忆特性。运动护通常为大众化生产，但其可能并不适合于每位使用者；而单独定制运动护具价格高昂，不适合普通消费者。杜仲胶的形状记忆特点使其在制作个性化运动护具以及个性化残疾人运动器械方面展现出了良好的发展前景，杜仲胶复合材料的研发大大拓展了杜仲胶在运动护具领域的应用。

夏琳等[36]制备了改性杜仲胶/聚乳酸热塑性弹性体，该热塑性弹性体采用过氧化物作为交联剂，同时引发杜仲胶的交联和杜仲胶与聚乳酸的接枝，形成两相交联网络结构。与常规的海-岛

结构材料相比，该热塑性弹性体不仅具有形状记忆特性，而且具有良好的韧性。谢美然等[37]将杜仲胶溶解在低极性溶剂中得到质量分数约为5%的杜仲胶溶液，然后通过湿纺、电纺等工艺成纤得到直径为10～100 μm的杜仲胶弹性纤维，其强度和拉断伸长率分别为0.3～0.5 cN·dtex^{-1}和300%～700%。杜仲胶纤维作为弹性纤维，可广泛的应用于高弹力运动护具领域。

3　运动护具防护材料的性能检测方法

3.1　针对动态冲击的防护性能

材料的抗高速和高能动态冲击性能的传统评价是通过摆锤式或落球式冲击试验完成的[38]，用摆锤或落球的回弹程度表示吸收冲击能量的大小，回弹程度越大，说明吸收冲击能量越小。该评价方法用传感器记录材料受摆锤或落球的冲击，及其力学响应值（例如速度、位移、加速度等），可直观和定量描述材料的抗冲击能力。

T. TAKEDA等[39]采用摆锤冲击装置测定冲击物体在实际运动中的冲击力，以探究冲击物体的速度、质量和弹性与运动护具防护性能之间的关系。结果表明，在试样无防护的条件下，铁球质量为172.5 g，其造成的冲击力为47 19.7 N，冰球质量为164.9 g，其造成的冲击力为459.6 N；在试样增添厚度为3 mm的EVA材料防护下，铁球和冰球所造成的冲击力分别降低为1 788.5和432.2 N，可进一步计算得出铁球和冰球冲击下EVA运动护具材料的冲击能量吸收效率分别为62.1%和6.0%。相同的运动护具对不同冲击物体的冲击能量吸收效率的不同，表明不同的运动项目需选择合适的运动护具。B. WESTERMAN等[40]采用摆锤冲击装置测定EVA发泡材料（护齿材料）的抗冲击性能。对厚度为4 mm、用量为0，1%，5%和10%的EVA发泡材料表面施加4.4 J的冲击能量，其造成的冲击力分别为4.04，4.12，4.08和3.88 kN，这表明小幅增大发泡剂用量会提高EVA发泡材料的抗冲击性能，但是提升效果并不显著。

魏俊等[41]利用落锤装置对玻璃纤维增强环氧树脂和碳纤维增强环氧树脂进行低速低能的冲击试验，落锤与传感器直接连接以获取落锤的速度信息。在落锤质量为3.6 kg、冲击能量为8 J的条件下，记录落锤的速度随时间变化的曲线，并用落锤的瞬时最大冲击速度和瞬时最大反弹速度计算冲击能量和能量吸收效率，冲击过程中能量的消耗可作为评价运动护具材料的性能指标。包世婕等[42]利用落锤装置研究护齿膜片的能量吸收能力，试验装置采用233 g的半球状冲击压头从不同高度冲击护齿膜片，使用高速相机采集压头落下、压入和回弹的图像，经软件处理后获得冲击压头的入射速度、入射深度及回弹高度。结果表明，冲击压头下落的高度越大，在冲击过程中护齿膜片的能量吸收比越大，并且3 mm厚的软硬结合护齿套的防护性能较佳，可将其应用于正式比赛场合，同时具有轻薄舒适的优势。

D. TAYLOR等[12]采用落球冲击试验评价市售运动防护服的抗冲击能力。将直径为5 cm的钢球在距被测试样1 m高处自由落下，以5 J的冲击能量撞击厚度为3 mm的Poron XRD面料防护服时，钢球造成的冲击力为12.7 kN；将防护服的厚度调整为7.5 mm时，钢球造成的冲击力明显减小至6.0 kN。欧洲EN 1621-1是基于落球法测量运动护具的冲击力峰值[43]，其定义了2个冲击防护等级：在受到50 J的落球冲击能量撞击后，若运动护具的冲击力平均峰值小于9 kN，冲击力最大峰值小于12 kN，则其为最高保护等级二级；若运动护具的冲击力平均峰值小于18 kN，冲击力最大峰值小于24 kN，则其为最低保护等级一级。EN 1621-1最初是针对摩托车驾驶员运动护具制定的，但现在其广泛应用于多种运动护具的设计和评价中。

3.2　针对准静态动力学的防护性能

无论是摆锤式还是落球式冲击试验检验方法，在运动护具开发前期和后期评价中都广泛应用，能够为运动护具的冲击防护性能提供试验数据。冲击试验的测试条件多变，灵活性较大，试验中的压头形状、压头尺寸、冲击速度等都可根据测试需求而改变。在准静态条件下，针对运动护具的防护性能不同，国内外研究者采取不同的评价方法[44-45]。

H. L. FAN等[46]采用力-位移曲线研究圆形结构、方形结构、多层结构、海绵结构和网格结构的

纤维增强织物复合材料的能量吸收能力。结果表明，在压缩速度为5 mm·min^{-1}下，网格结构的纤维增强织物复合材料的能量吸收最大，并且比同密度的聚氨酯泡沫材料还大，因此可用于自行车运动员头盔的制作。S. W. LAM等[47]探究在准静压条件下，多种热塑性泡沫塑料纺织复合材料的能量吸收能力。结果发现，随着聚丙烯发泡材料的泡孔孔壁厚度从1. 15减小至0. 8 mm时，能量吸收效率降低34%；非针织复合材料相比于针织复合材料具有更高的能量吸收能力、更低的成本和更好的加工使用条件。

头盔壳体的主要作用是将外部冲击力分散在壳体表面，起到吸收能量和减少头部集中冲击。头盔壳体的材料主要为聚合物泡沫制成的衬垫，泡沫的密度会很大程度影响其使用性能和体感，泡沫的密度过高或者过低都会影响头盔的保护性能。L. RADZISZEWSKI等[48]对聚乙烯泡沫材料进行加载应力试验，结果表明泡沫材料的弹性模量随着应力加载次数的增大而逐渐减小，能量吸收密度与应变的关系逐渐趋于线性函数，这表明泡沫材料每次被应力加载后都会产生不可逆的损伤，造成能量吸收能力下降。冲击能量吸收能力也可采用Janssen系数进行比较，该系数可通过压头在相同冲击能量下试验材料中产生的最大加速度与标准材料中产生的最大加速度的比值确定。

I. K. HWANG等[49]通过在护腕背部安装微型加速度传感器采集人体手腕受到冲击时加速度随时间的变化，采集数据后对加速度分布曲线积分计算得到冲击速度，再对速度分布曲线积分计算得到冲击位移，护腕的冲击能量吸收效率则为冲击力-冲击位移曲线积分和冲击力-冲击力峰值曲线积分的比值。结果表明，在护腕内侧覆盖PVC材质的气垫能大大提高冲击能量吸收效率。定茜[50]改进了分离式霍普金森杆(SHPB)装置分别对两种密度的软质聚氨酯泡沫材料进行能量吸收效率测试，得到两种材料的应力-应变曲线，结果表明材料的密度和应变对强度有着明显影响，但是密度对能量吸收效率影响不大。

除试验评价外，利用计算机模拟软件进行有限元分析也是评价运动护具防护性能的重要方法，其优势在于快速、便捷，评价结果对运动护具的实际应用具有重要参考价值。I. ZAMAN等[51]采用ANSYS软件对运动护齿套的防护性能进行分析，结果表明，若运动员的运动速度为4. 43 m·s^{-1}时，佩戴厚度为3 mm的护齿套，口腔内外压力差为140. 09 Pa，佩戴厚度为5. 9 mm护齿套，口腔内外压力差会达到401. 86 Pa，这表明通过增大护齿套厚度可提高其防护性能，但厚度增大也会加大口腔内外压力差，使得气流分布不均匀，降低佩戴舒适性。S. SRIDHARAN等[52]按照文献报道的人体皮肤与肌肉的真实参数组合建模，以分析板球运动护具所用的一种典型夹层结构泡沫材料的冲击能量吸收能力，测定各层材料厚度与冲击能量吸收比之间的关系。结果显示，板球的冲击速度为45 m·s^{-1}时，聚碳酸酯外层、EVA泡沫中层和聚碳酸酯内层的最佳厚度分别为4，8，3 mm，皮肤受到的最大冲击力为3 538. 98 N，材料的最大冲击吸收能量是7. 2 J·kg^{-1}。

动态力学性能分析是一种低应变技术，可用于研究聚合物材料的粘弹性，突出温度和频率对材料力学性能的影响，并且损耗因子可体现材料的阻尼性能，一般材料的阻尼性能好，其受冲击时能耗大，减震吸收能量效果明显，因此可用于动态力学性能评价运动护具的防护性能[53-54]。李茂辉等[55]采用动态压缩模式模拟周期性压力对材料动态力学性能的影响，以探究几种低密度聚氨酯泡沫材料在微小交变应力下的防护机理。M. NICOTRA[15]也采用动态力学性能分析研究后背运动护具材料的防护性能。结果表明，测试频率1 Hz增大至50 Hz时，泡沫软壳护具材料的损耗因子和储能模量都明显减小，推测为泡沫软壳护具材料在低速冲击下具有较好的阻尼性能，吸收能量较多；在高速冲击下泡沫软壳护具材料宏观表现为刚性，吸收能量较少，同时也证实热塑性聚烯烃硬壳护具材料的损耗因子明显低于泡沫软壳护具材料。

4 结语

在运动过程中为防止出现运动损伤而采用合适的运动护具是十分必要的。各种新型护具材料

的出现大大拓展了运动护具的种类和提高了运动护具的性能，人们因运动受损伤的概率降低。同时随着运动护具市场的不断扩张，针对运动护具的防护性能评价越来越重要，而不同种类的运动护具需采取不同的测试评价方法，这些方法对于运动护具的研发起到了积极作用，相应的研究成果也极大地促进了运动护具的发展。

参考文献：

[1] 佚名. 国务院关于印发全民健身计划（2021-2025年）的通知（国发〔2021〕11号）[EB/OL]. [2021-07-18]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-08/03/content_5629218.htm.

[2] 王国喜. 人体跟骨冲击损伤的生物力学研究[J]. 医用生物力学，2004，19(4)：240-244.
WANG G X. Biomechanical evaluation on human calcaneus under trauma for impact loading[J]. Journal of Medical Biomechanics，2004，19(4)：240-244.

[3] 郭艳玲. 中国运动生物力学的研究现状和发展趋势[J]. 体育科学研究，2008，12(2)：42-44.
GUO Y L. The current situation and development trend of sports biomechanics in China [J]. Sports Science Research，2008，12(2)：42-44.

[4] 忻鼎亮. 运动生物力学研究方法的发展和瞻望[J]. 体育科学研究，2006，27(6)：78-80.
XIN D L. Development of the researches on sports biomechanics[J]. Sports Science Research，2006，27(6)：78-80.

[5] 马维平，晏冬丽. 体育运动与高科技运动服装[J]. 解放军体育学院学报，2004，23(3)：126-128.
MA W P，YAN D L. Sports and high-tech sportswear[J]. Journal of Military Physical Education and Sports，2004，23(3)：126-128.

[6] DLUGOSCH S，HU H，CHAN A C. Impact protective clothing in sport：Areas of application and level of utilization[J]. Research Journal of Textiles and Apparel，2012，16(3)：18-28.

[7] 季茂源，吴雪，赵云峰. 浅谈运动护具的应用与专利技术[J]. 中国发明与专利，2012(9)：47-48.
JI M Y，WU X，ZHAO Y F. Talking about the application and patent technology of sports protective gear[J]. China Invention & Patent，2012(9)：47-48.

[8] 陈雪.中长跑运动中常见的运动损伤及其预防措施[J].文体用品与科技，2021，24(24)：83-84.
CHEN X. Common sports injuries in middle and long distance running and preventive measures[J].Science & Technology of Stationery & Sporting Goods，2021，24(24)：83-84.

[9] 田佳. 运动创伤学[M]. 北京：北京体育大学出版社，2008.

[10] 邢聪，吴瑛，项贤林. 美国运动损伤前沿研究热点与内容分析——基于科学知识图谱的可视化研究[J]. 体育科学，2016，36(9)：66-72.
XING C，WU Y，XIANG X L. Analysis on the latest hotspot and content about America sports injury——Based on visualization research of scientific knowledge map[J]. China Sport Science，2016，36(9)：66-72.

[11] 叶冬茂. 三维织物复合材料在运动护具上的应用前景[J]. 产业用纺织品，2012，30(2)：1-4.
YE D M. Application prospects of three-dimensional fabric composite in sports protectors[J]. Technical Textiles，2012，30(2)：1-4.

[12] TYLER D，VENKATRAMAN P. Impact resistant materials and design principles for sportswear[C]. Proceeding of 88th Textile Institute World Conference 2012：Bridging Innovation，Research and Enterprise. Shah Alam (MY)：Textile Institute，2012：229-249.

[13] 赵承坤，曲峰. 使用不同踝关节保护措施对足球运动员侧切时支撑腿生物力学特征的影响[J]. 西安体育学院学报，2015，32(2)：212-218.
ZHAO C K，QU F. Effects of different ankle prophylactic supporters on the biomechanical characteristics of football players' landing leg when cutting[J]. Journal of Xi'an Insititude of Physical Education，2015，32(2)：212-218.

[14] 何玲.抗冲击无缝针织物性能研究与防护运动服开发[D].杭州：浙江理工大学，2015.
HE L. Research on the performance of impact-resistant seamless knitted fabrics and development of protective sportswear[D]. Hangzhou：Zhejiang Sci-Tech University，2015.

[15] NICOTRA M，MONCALERO M，MESSORI M，et al. Thermo-mechanical and impact properties of polymeric foams used for snow sports protective equipment[J]. Procedia Engineering，2014，72：678-683.

[16] 蔡雯. 排球运动训练中常见运动损伤与预防措施研究[J]. 青少年体育，2020(5)：53-54.
CAI W. Research on common sports injuries and preventive measures in volleyball training[J]. Youth Sport，2020(5)：53-54.

[17] GIECK J，FRANK C. Fitting of protective football equipment[J]. The American Journal of Sports Medicine，1980，8(3)：192-196.

[18] 虞坚光，沈俊. 浅谈如何避免膝盖在运动中的损伤[J]. 海南开放大学学报，2011，12(4)：151-153.
YU J G，SHEN J. On preventing knee injuring in sports[J]. Journal of Hainan Open University，2011，12(4)：151-153.

[19] 张峻霞，张子倩，邵洋洋，等. 基于运动生物力学的护膝设计评价[J]. 包装工程，2020，41(24)：1-7.
ZHANG J X，ZHANG Z Q，SHAO Y Y，et al. Evaluation of kneepad design based on sports biomechanics[J]. Packaging Engineering，2020，41(24)：1-7.

[20] 翟文亮. 韧带切除与撞击性损伤对膝关节稳定性影响的生物力学与临床研究[D]. 广州：南方医科大学，2002.
ZHAI W L. Biomechanical and clinical research on the influence

of ligament resection and impact injury on knee joint stability[D]. Guangzhou:Southern Medical University,2002.

[21] 孙清风,殷玉鹏,牛富刚,等. 新型聚氨酯运动护膝组合料的开发[J]. 聚氨酯工业,2014,29(6):38-40.
SUN Q F, YIN Y P, NIU F G, et al. The development of polyurethane system for new sport knee pad[J]. Polyurethane Industry,2014,29(6):38-40.

[22] 范春满. 足球运动中胸部受撞击的损伤机制与预防对策[J]. 科技信息,2009(31):164-165.
FAN C M. The injury mechanism and preventive measures of chest impact in football [J]. Science & Technology Information, 2009(31):164-165.

[23] 毛瑞秋,王新坤,王新. 女子拳击护具的研制[J]. 沈阳体育学院学报,2003,22(4):110-111.
MAO R Q, WANG X K, WANG X. Research and manufacture of woman boxing protect tool[J]. Journal of Shenyang Sport University,2003,22(4):110-111.

[24] 张勇,李家琪,王晶. 护腿板功效测量[C]. 北京力学会第18届学术年会论文集. 北京:北京力学会,2012:327-328.

[25] 曹楠楠,陈韶娟. 纤维层压运动护具的抗冲击性和透气性研究[J]. 非织造布,2011,19(2):18-20.
CAO N N, CHEN S J. Research about fiber laminated movement protectors of impact and permeability[J]. Nonwovens,2011,19(2):18-20.

[26] MCNAIR O D, GOULD T E, PILAND S G, et al.Characterization of mouthguard materials: A comparison of a commercial material to a novel thiolene family[J].Journal of Applied Polymer Science, 2014,131(16):178-184.

[27] WESTERMAN B,STRINGFELLOW P M,ECCLESTON J A. EVA mouthguards:How thick should they be?[J]. Dental Traumatology, 2002,18(1):24-27.

[28] 谢婉晨. 三维机织物复合材料头盔壳体的制备及成型[D]. 武汉:武汉纺织大学,2017.
XIE W C. Preparation and molding of 3D woven composite helmet shell[D]. Wuhan:Wuhan Textile University,2017.

[29] BUDDEN G. 防护与舒适并存的新型抗机械冲击防护服[J]. 纺织导报,2006(9):62-63,67.
BUDDEN G. New impact protection textile provides defense and comfort[J]. China Textile Leader,2006(9):62-63,67.

[30] 佚名. 代号D3O材料的前世今生[EB/OL]. [2018-03-21]. https://www. yidianzixun. com/article/0Ib5JyZ1.

[31] 徐晓锋. 新材料D3O造就的神奇滑雪服[J]. 中国纤检,2006(5):48.
XU X F. The magical ski suit created by the new material D3O[J]. China Fiber Inspection,2006(5):48.

[32] 佚名. 苏尔智能P4U新材料:一个守护安全的变形金刚[EB/OL]. [2016-11-25]. https://www.163.com/news/article/C6NDVVRR000187VE.html.

[33] CLOUGH E C, PLAISTED T A, ECKEL Z C, et al. Elastomeric microlattice impact attenuators[J]. Matter,2019,1(6):1519-1531.

[34] 张继川,薛兆弘,严瑞芳,等. 天然高分子材料——杜仲胶的研究进展[J]. 高分子学报,2011(10):1105-1117.
ZHANG J C,XUE Z H,YAN R F,et al. Natural polymer material—Recent studies on eucommia glmoides gum[J]. Acta Polymerica Sinica,2011(10):1105-1117.

[35] 张继川. 杜仲胶及其共混物的动态力学性能及水下吸声性能的研究[D]. 北京:中国科学院大学,2010.
ZHANG J C. Study on dynamic mechanical properties and underwater sound absorption properties of eucommia ulmoides gum and its blends[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences,2010.

[36] 夏琳,马振国,黄兆阁. 一种具有形状记忆效应的改性杜仲胶/聚乳酸热塑性弹性体及其制备方法[P]. 中国:CN 112175365A, 2021-01-05.

[37] 谢美然,康军莉,张衡臣,等. 一种生物基杜仲胶弹性纤维和纤维膜及其制备方法与应用[P]. 中国:CN 108893870B,2021-10-15.

[38] 刘伟. 摆锤式冲击试验机各因素对冲击能示值影响的分析[J]. 轻工标准与质量,2017(2):35-36.
LIU W. Analysis of the influence of various factors of the pendulum impact tester on the value of impact energy[J]. Standard & Quality of Light Industry,2017(2):35-36.

[39] TAKEDA T, ISHIGAMI K, SHINTARO K, et al. The influence of impact object characteristics on impact force and force absorption by mouthguard material[J]. Dental Traumatology,2004,20(1):12-20.

[40] WESTERMAN B, STRINGFELLOW P M, ECCLESTON J A. Effect of ethylene vinyl acetate (EVA) closed cell foam on transmitted forces in mouthguard material[J]. British Journal of Sports Medicine,2002,36(3):205-208.

[41] 魏俊,赵建华. 复合材料板受低速冲击时能量吸收的实验研究[J]. 实验力学,1998,13(2):207-211.
WEI J, ZHAO J H. An experimental research on the energy absorption for laminetes subjected to low velocity impact[J]. Journal of Experimental Mechanics,1998,13(2):207-211.

[42] 包世婕,任笑威,李一涵,等. 不同厚度、不同材质护齿膜片能量吸收特性分析[J]. 上海口腔医学,2019,28(5):484-489.
BAO S J, REN X W, LI Y H, et al. Study on energy absorption of mouthguard splints by impact test[J]. Shanghai Journal of Stomatology,2019,28(5):484-489.

[43] KANNUS P, PARKKARI J, ROBINOVITCH S. The European standard testing method for motorcyclists' protective clothing (EN 1621-1) is unsuitable for hip protectors[J]. Injury,2010,41(4):430-431.

[44] 庞宝君,杨震琦,王立闻,等. 橡胶材料的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型[J]. 高压物理学报,2011,25(5):407-415.

PANG B J, YANG Z Q, WANG L W, et al. Dynamic compression properties and constitutive model with strain rate effect of rubber material[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(5): 407-415.

[45] 高瑞华,范群波,王富耻,等. 钛合金装甲材料动态压缩力学性能及其抗弹能力关系[J]. 稀有金属材料与工程,2015,44(11):2733-2736.
GAO R H, FAN Q B, WANG F C, et al. Relationship between dynamic compressive mechanical properties and ballistic performance of titanium armor materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(11): 2733-2736.

[46] FAN H L, YANG W, ZHOU Q. Experimental research of compressive responses of multi-layered woven textile sandwich panels under quasi-static loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(5): 1151-1156.

[47] LAM S W, TAO X M, YU T X. Comparison of different thermoplastic cellular textile composites on their energy absorption capacity[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(13/14): 2177-2184.

[48] RADZISZEWSKI L, SAGA M. Modeling of non-elastic properties of polymeric foams used in sports helmets[J]. Procedia Engineering, 2017, 177: 314-317.

[49] HWANG I K, KIM K J. Shock-absorbing effects of various padding conditions in improving efficacy of wrist guards[J]. Journal of Sports Science & Medicine, 2004, 3(1): 23-29.

[50] 定茜. 冬季体育运动用软聚合物泡沫背保护器冲击行为的建模与仿真[J]. 粘接,2020,44(10):78-81,137.
DING Q. Modeling and simulation of impact behavior of soft polymer foam back protector for winter sports[J]. Adhesion, 2020, 44(10): 78-81, 137.

[51] ZAMAN I, ROZLAN S A M, MANSHOOR B, et al. Study of mouthguard design for endurance and air-flow intake[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 226: 012007.

[52] SRIDHARAN S, RAO J S, OMKAR S N. Finite element analysis of cricket ball impact on polycarbonate-EVA sandwich[J].Procedia Engineering, 2015, 112: 28-33.

[53] 顾龙鑫,陈晓钢,杨红英,等. 芳纶及其复合材料产品在体育器材上的应用[J]. 合成纤维,2016,45(7):22-25.
GU L X, CHEN X G, YANG H Y, et al. The application of aramid fiber and its composite products in sports equipment[J]. Synthetic Fiber in China, 2016, 45(7): 22-25.

[54] MANTENA P R, MANN R. Impact and dynamic response of high-density structural foams used as filler inside circular steel tube[J]. Composite Structures, 2003, 61(4): 291-302.

[55] 李茂辉,王韬,李成政. 用DMA研究聚氨酯泡沫材料的压缩耗能性能[J]. 中国个体防护装备,2014,1(4):37-44.
LI M H, WANG T, LI C Z. Using DMA to study polyurethane foam compression performance[J]. China Personal Protective Equipment, 2014, 1(4): 37-44.

收稿日期:2022-08-16

Research Progress of Sports Protective Equipment Materials and Evaluation Methods of their Protective Properties

LIN Jinjian[1], *CUI Shuyang*[1], *ZHANG Jichuan*[1], *CHEN Baishun*[2], *XU Xueshuang*[2]

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. Toread Holding Group Co., Ltd, Beijing 102200, China)

Abstract: The research progress and evaluation methods of protective property of sports protective equipment materials were reviewed. Based on the design of sports protective equipment and the testing of its protective property both domestically and internationally, the characteristics, research and application of new high-performance sports protective equipment materials were introduced, the use of pendulum or falling ball impact testing methods, as well as the use of computer simulation methods and dynamic mechanical performance analysis methods to evaluate the protective performance of sports protective equipment materials, had been summarized. The high-performance development of sports protective equipment materials was crucial for reducing sports injuries and improving people's health levels.

Key words: sports protective equipment; protective materials; protective property; evaluation method