

基于摆动液压阻尼的肩袖训练器设计

王英豪, 吴剑锋, 杨红春, 唐智川

(浙江工业大学, 杭州 310023)

摘要: **目的** 研究一种针对肩袖肌群抗阻力量训练的肩袖训练器。**方法** 通过研究肩袖肌群的生物力学特征, 分析肩袖肌力锻炼的最佳方式, 提出基于摆动液压阻尼的训练方式, 创造性地设计了基于阻尼大小输出的控制方式, 并结合人体尺寸设计了肩袖训练器。通过肩袖肌群的抗阻训练, 利用表面肌电测试仪对肩袖训练器和拉力器进行肌电实验测试, 对比验证设计的可行性。**结果** 使用肩袖训练器训练时, 目标肌肉激活顺序为大圆肌—冈下肌—前三角肌—尺侧腕伸肌—肱三头肌, 更符合专业的旋肩运动发力顺序。使用肩袖训练器训练时, 矢状轴旋转姿势下, 冈下肌的做功占比为 $36.2\% \pm 11.9\%$; 冠状轴旋转姿势下, 冈下肌做功占比为 $37.2\% \pm 13.6\%$ 。**结论** 使用肩袖训练器进行肩袖抗阻训练的动作模式更为科学, 并且无效做功少, 更能激活肩袖肌群, 达到更好的训练效果, 对预防肩袖损伤和损伤修复具有一定的现实意义。

关键词: 肩袖肌群; 抗阻训练; 摆动液压阻尼; 肌电实验

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)06-0151-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.06.021

Design of Rotator Cuff Trainer Based on Oscillating Hydraulic Damping

WANG Ying-hao, WU Jian-feng, YANG Hong-chun, TANG Zhi-chuan

(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: The work aims to study a rotator cuff trainer for resistance training of rotator cuff muscles. By researching the biomechanical characteristics of rotator cuff muscles, an analysis was made to find the best way to exercise the rotator cuff muscles. Then, a training method based on oscillating hydraulic damping was proposed. Then, a control method based on damping output was designed creatively and a rotator cuff trainer was also designed according to the human body size. Through the resistance training of rotator cuff muscles, myoelectric test was carried out to the rotator cuff trainer and chest expander with myoelectric tester to verify the feasibility of design. When rotator cuff trainer was used for exercise, the muscle mobilization sequence was teres major-infraspinatus-anterior deltoid-extensor carpi ulnaris-triceps brachii, which was more in line with the sequence of professional shoulder rotation. When the rotator cuff trainer was used to rotate on sagittal axis, the percentage of infraspinatus's work was $36.2\% \pm 11.9\%$. For coronall axis, the percentage of infraspinatus's work was $37.2\% \pm 13.6\%$. The exercise mode of using rotator cuff trainer for resistance training of rotator cuff muscles is more scientific with less invalid work, which can activate the rotator cuff muscles better and realize better training effects, thus having practical significance for preventing rotator cuff injury and repairing injury.

KEY WORDS: rotator cuff muscles; resistance training; oscillating hydraulic damping; myoelectric testing

随着社会生活水平的提高, 消费健身愈发流行, 专业的体育活动(如羽毛球、网球等)也逐渐平民化。据调查, 随着健身和体育运动的流行, 由运动中上肢

过度外展、突然性扭伤、盂肱关节疲劳性损伤等原因引起的肩袖损伤的发生率大大提高^[1]。肩袖, 也称为旋转肌袖, 对肩关节的稳定性及肩关节活动的顺畅性

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 浙江省重大科技专项(2019C0314); 国家自然科学基金(61702454)

作者简介: 王英豪(1990—), 男, 浙江人, 浙江工业大学博士生, 主要研究方向为人因工程与工业设计。

起着关键性作用^[2]。肩袖损伤将导致肩部肌群稳定性受损,表现为人体肩部疼痛和肩关节活动受限,会对正常的工作生活产生较大影响。如何预防运动中肩袖损伤、促进肩袖损伤修复成为近年来学者关注的热点。研究发现,肩袖肌群的力量训练能加强肩关节的柔韧性和稳定性,在上肢外展类运动前加入肩袖肌群的激活,可有效避免肩关节慢性损伤的发生^[3]。长期的术后康复研究也提出,在安全范围内,对肩袖进行适当的抗阻训练,明显有助于肩袖损伤恢复^[4]。然而,现阶段普通肩袖训练主要借助哑铃、拉力器等辅助性器材进行,在健身训练的器材系列中,缺乏针对性的肩袖训练器;而治疗肩袖损伤的医疗康复设备,由于技术复杂、造价高昂、操作繁琐,无法适用于大范围的普通锻炼者。基于此,从运动者预防肩袖损伤的需求出发,结合肩袖的生物力学特征及成年人的人机尺寸,设计一款经济适用的肩袖肌群专用训练器。此训练器将填补现有健身路径中肩袖训练的空白,促进普通运动者增强肩袖肌力,从而预防肩袖损伤。

1 肩袖肌群的训练方式分析

肩袖肌群主要由肩胛肌、冈上肌、冈下肌、小圆肌四块肌肉组成,主导完成外旋内旋、前屈后伸、外展内收及环转等肩关节运动。其中,肩胛肌嵌于肱骨,主要负责肱骨内旋、内收、伸展及保持盂肱关节下方和前方的稳定性;冈上肌负责协助肱骨外展;冈下肌和小圆肌协同负责肱骨外旋、水平外展、伸展及盂肱关节后方的稳定性^[5]。肩袖肌群的训练依托肩关节运动展开。研究发现,以内旋和外旋动作做抗阻力量训练更能有效刺激激活冈下肌、小圆肌、冈上肌和后三角肌,相对其他肩关节运动更适合作为肩袖肌群的训练动作^[6]。肩关节结构、肩袖肌群及相关肌肉见图1。

从生物力学角度,将肘关节弯屈90°,保持肩肘关节位置不变,肩袖肌群连同相关肌肉(三角肌、肱二头肌、前锯肌等)使肱骨向内、向外旋转的动作称

为内旋和外旋^[7]。基于内旋外旋动作,按肱骨旋转方向施加阻力,即可达到抗阻训练效果。目前,人们主要通过哑铃和拉力器提供阻力,训练肩袖肌力。由于旋转轨迹是圆弧状,导致运动过程中两种器材提供的有效阻力不断变化,阻力大小只能按最小肌力矩设置,而不能全程给肌肉以最大的刺激。因为增强肩袖肌力,需要同时增强肌肉的主动肌力和拮抗张力^[8],所以使用现有器材时,运动者还需切换姿势,分别做外旋与内旋动作的单独训练。由此可见,使用现有的训练器材,训练效果存在一定不足,并且训练过程较为低效。

由上述分析可知,如果运动器材能在内旋外旋训练中提供与旋转方向始终相反且恒定大小的阻力,并且在一个运动来回中对肌肉的拮抗和主动肌力均起到训练效果,将是最适合肩袖肌群的训练方式。

2 摆动液压阻尼器原理及设计

肩袖训练器的核心是符合肩袖训练的阻尼设计,现有提供运动阻尼的方式有多种:重力式、电磁式、弹力式、液压式等,其中单叶片摆动液压阻尼的形式与肩袖内旋外旋的训练方式最为契合。单叶片摆动液压缸见图2,通过一个固定子和一个与转轴相连的旋转叶片将内部分为两个腔体,腔体内均充满液压油,并且两个腔体均设有出流口,通过管道将出流口相连。当转轴受到旋转的外力驱动时,带动叶片旋转,对应腔体迅速受到挤压,在叶片上形成与其旋转方向相反的作用力。该作用力的方向与叶片旋转方向始终相反,因此摆动液压阻尼能够提供旋肩训练中与运动方向始终相反的阻力,可持续对目标肌群产生充分的刺激。由于液压装置阻尼输出反应迅速,当旋转方向发生改变时,运动的阻力随之发生改变,所以以摆动液压阻尼分别做内旋外旋动作时,无需切换姿势,只需切换运动方向,即可在一组动作来回中同时训练肌肉的拮抗张力和主动肌力。

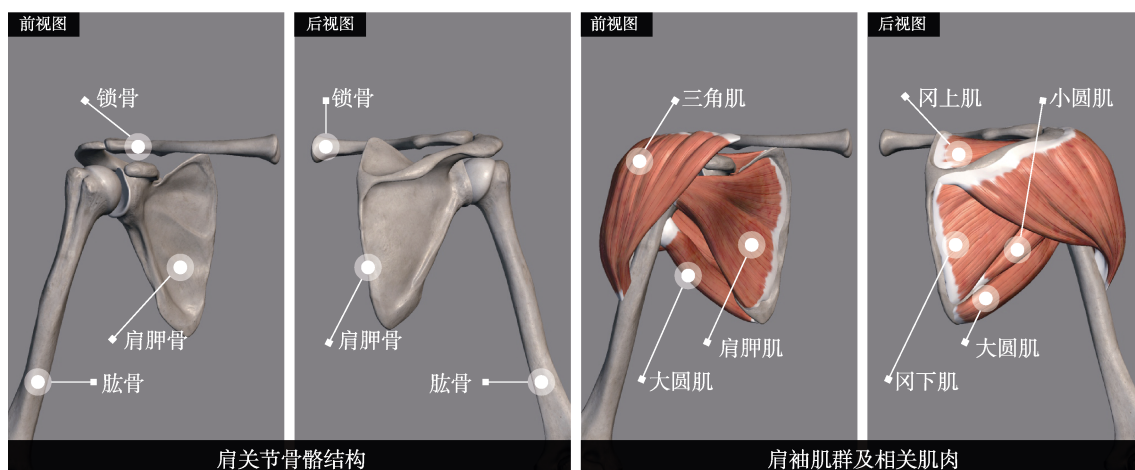


图1 肩关节结构、肩袖肌群及相关肌肉

Fig.1 Shoulder joint structure, rotator cuff muscle group and related muscles

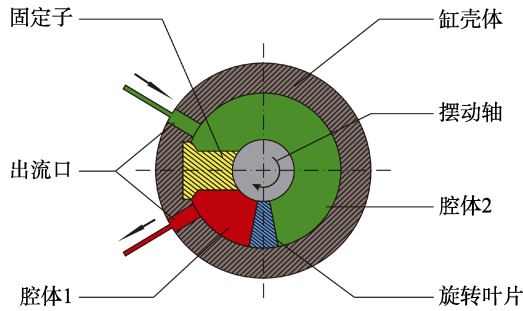


图 2 单叶片摆动液压缸
Fig.2 Single-blade oscillating hydraulic cylinder

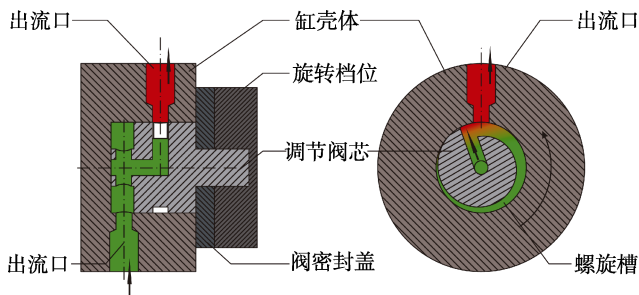


图 3 螺旋式流量调节阀
Fig.3 Spiral flow regulating valve

基于上述摆动液压阻尼的特性,对适合肩袖训练的摆动液压阻尼器展开设计。由于不同个体的肩袖肌力不同,在训练前,训练者需要根据自身肌力状况选择对应的阻尼大小,所以摆动液压阻尼输出的大小需要可调节。上述摆动液压缸内液压油受挤压流出的流量方程如下:

$$Q = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} b \omega \quad (1)$$

其中: Q 为流量; R_2 为流量摆缸内径; R_1 为摆动轴半径; b 为摆动叶片宽度; ω 为摆动叶片转速。

考虑到摆动缸的机械效率时,腔体内液压油受挤压后产生的阻力力矩方程如下:

$$T_M = \frac{b}{2} (R_2^2 - R_1^2) (p_1 - p_2) \eta_m \quad (2)$$

其中: T_M 为阻力矩; p_1 为出流压力; p_2 为回流压力; η_m 为摆动缸机械效率。

而液压油经过出流口的流动方程如下:

$$Q = cs \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (3)$$

其中: c 为出流口过流系数; s 为出流口面积; ρ 为液压油密度。

由上述方程可得:

$$T_M = \frac{\rho b^3 \omega^2 (R_2^2 - R_1^2)^3}{16 c^2 s^2} \eta_m \quad (4)$$

由此可见,当叶片转速 ω 恒定时,摆动液压阻尼的大小主要由出流口的面积 s 决定,增设调节阀控制出流口的面积,即可以达到通过调节阻尼输出大小满足不同运动者的需求的目的。



图 4 摆动式液压阻尼器实际效果
Fig.4 Oscillating hydraulic damping device

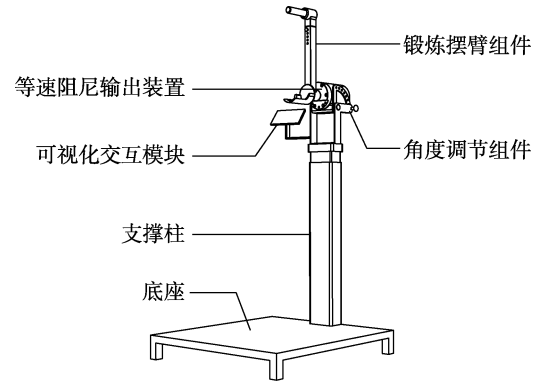


图 5 总体结构设计
Fig.5 Overall structural design

为了在实际训练中满足不同训练者的力量需求,调节阀需要实现多档位、大范围的力矩调节。本研究结合《中国成年人人体尺寸》^[9]中前臂和手掌尺寸、个体旋肩力量范围,创新设计了单圈螺旋式流量调节阀,通过旋转阀渐变式改变出流口面积。螺旋式流量调节阀见图 3。

节流口面积计算方程如下:

$$s = l[r - (r_0 + k\theta)] \quad (5)$$

其中: l 为螺旋槽的宽度; r 为调节阀芯半径; r_0 为螺旋槽起始点的半径; k 为螺旋旋转系数; θ 为旋转角度。由上述方程可知,节流口面积 s 与调节阀芯旋转角度 θ 成线性关系,由于旋转角度 θ 是无极变化的,所以旋转阀芯时,节流口面积 s 呈线性无极变化,使摆动液压缸输出持续变化的阻尼。

根据上述原理,选取 46 号液压油,结合训练者实际的肩袖力量范围,设计并制作了摆动液压阻尼器。同时为了适应不同个体的锻炼需求,设置了 20 个调节档位,并增设了油压传感器,方便检测与后期维护,摆动式液压阻尼器实际效果见图 4。

3 整体肩袖训练器设计

3.1 总体设计规划

总体结构设计见图 5,肩袖训练器主要由摆动液压阻尼器、锻炼摆臂组件、角度调节组件、支撑柱、底座等 5 个部分组成。其中,摆动液压阻尼器提供训练阻尼;摆臂组件连接阻尼器旋转轴,训练时肘关节

对准旋转轴,由肩袖肌群发力驱动摆臂完成抗阻运动;角度调节组件用以调节摆动液压阻尼器的固定角度,适应不同训练姿势的需求;支撑柱连接底座形成支撑结构,稳固支撑整个训练器。

3.2 锻炼摆臂组件设计

根据中国 18~55 岁成年人人体尺寸,前臂长 185~268 mm,手掌长度 152~205 mm,手掌宽 66~93 mm^[9],设计摆臂长度可调节,摆臂长度调节范围 260~370 mm,握柄宽度 100 mm,长度通过方管套管与弹力插销的形式调节。同时,在摆臂根处设计肘托,提供舒适的肘关节支撑。

3.3 角度调节组件设计

内旋外旋训练主要围绕矢状轴和冠状轴展开^[10]。根据人体肩肘关节的活动角度,设计角度调节组件,以调节摆动液压阻尼器,满足不同的姿势需求,调节角度为 0°~90°,并设置 8 个档位,通过弹力插销的形式切换和固定档位。

3.4 可升降支撑柱设计

根据中国 18~55 岁成年人人体尺寸,当上肢大臂垂直矢状面时,肘部距离地面高度为 900~1 096 mm;当上肢大臂垂直冠状面时,肘部距离地面高度为 1 200~1 450 mm^[9]。结合以上尺寸,为满足不同身高个体与不同的动作姿势,摆动液压阻尼器的高度需要在 900~1 450 mm 可调节。为此,本研究设计了电动升降支撑柱,内设电动推杆,通电后按下开关即可无极调控高度。

4 肌电实验验证

4.1 肌电实验

通过对各部件装置的理论计算,设计的肩袖训练器基本满足内旋外旋训练需求,在此基础上进行实物样机制作,并与传统的拉力器展开肌电实验。产品样机及肌电实验见图 6。

实验以 10 名健康男性在读研究生为被试(无肩关节相关的骨骼肌肉方面疾病或受伤情况)。为减少身体素质差异化给实验带来的干扰,所选被试的身体素质要较为接近,基本情况如下:年龄 24±2 岁,身高 175.3±3.8 cm,体重 67.7±3.3 kg。从实验前 3 天开始,所有被试者不能进行剧烈运动,以避免产生肌肉疲劳而影响实验结果。

实验中,被试采用肩袖训练器,以固定第 12 档位(中等阻力)的阻尼及 60°/s 的恒定角速度,做冠状轴和矢状轴两种姿势的内旋外旋训练 10 组。此后,主观选取近似阻力的拉力器以同样的角速度,并分别做同种姿势的训练动作 10 组。实时采集目标肌肉冈下肌、大圆肌、肱三头肌、尺侧腕伸肌及前三角肌的

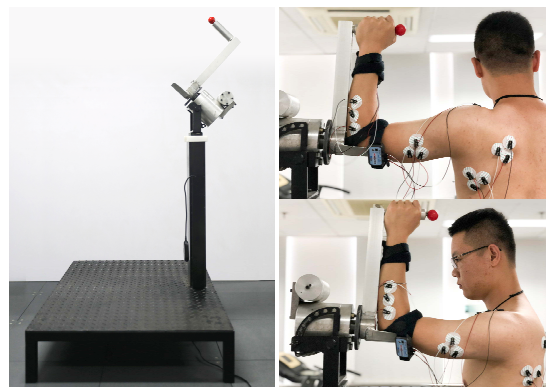


图 6 产品样机及肌电实验

Fig.6 Product prototype and EMG experiment

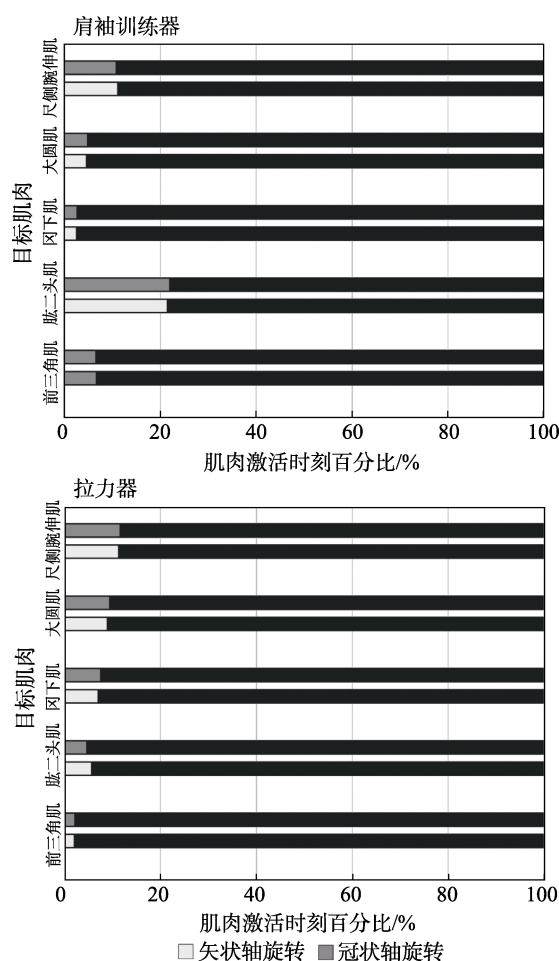


图 7 肌肉发力顺序结果

Fig.7 Result of muscle mobilization sequence

肌电信号指标,并提取肌肉发力顺序和肌肉做功百分比的两种指标数据进行数据分析。

4.2 肌肉发力顺序结果

肌肉发力顺序指训练者在完成某一指定动作时,参与该动作完成的非活动肌肉在大脑神经中枢的控制下被激活的时间顺序,一般用以分析运动动作是否到位^[11]。实验中,使用两种器材做内旋外旋训练时肌肉发力顺序结果,见图 7。结果显示,同种器材的两

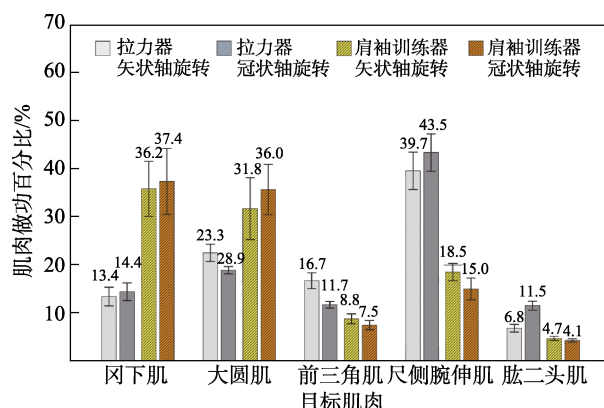


图 8 肌肉做功百分比结果

Fig.8 Result of muscle work percentage

种训练姿势对发力顺序几乎无影响。使用肩袖训练器训练时,被测的目标肌肉发力顺序为:冈下肌—大圆肌—三角肌—尺侧腕伸肌—肱三头肌;使用拉力器时,肌肉发力顺序为:三角肌—肱三头肌—冈下肌—大圆肌—尺侧腕伸肌。现有研究指出,在做旋肩运动时,肌体正确的发力顺序一般以胸大肌、背阔肌等大肌群先行发力,带动肩袖肌群发力,从而带动大臂和前臂小肌群发力^[12]。由此可见,使用肩袖训练器时发力顺序更为科学,更符合生物力学规律。

4.3 肌肉做功百分比结果

肌肉做功百分比指某肌肉在完成一个指定运动周期的动作时,其整个过程中做的功占所有肌肉做功总和的百分比,一般通过肌电积分值(iEMG)计算,反映肌肉完成该动作时的贡献率,一定程度上可说明该运动对肌肉的训练效果^[13]。本实验中,以冈下肌为目标训练肌群的肌肉代表,并深入分析其做功情况。肌肉做功百分比结果见图 8,实验结果显示,采用矢状轴旋转姿势时,肩袖训练器训练的冈下肌做功占比为 $36.2\% \pm 11.9\%$,拉力器训练的冈下肌做功占比为 $13.4\% \pm 4.7\%$ 。通过 T 检验,两者具有显著性差异 ($P < 0.05$)。采用冠状轴旋转姿势时,肩袖训练器训练的冈下肌做功占比为 $37.2\% \pm 13.6\%$,而使用拉力器时,冈下肌的做功占比仅为 $14.4\% \pm 4.8\%$,通过 T 检验,两者具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

进一步地,对每块肌肉采用 MANOVA(2 器材×2 姿势)进行器材和姿势的主效应(Main Effect)分析。统计结果发现,对于冈下肌、大圆肌、前三角肌、尺侧腕伸肌、肱三头肌 5 块肌肉而言,器材 ($F=7.863$, $P<0.05$; $F=5.431$, $P<0.05$; $F=2.424$, $P<0.05$; $F=7.651$, $P<0.05$; $F=2.051$, $P<0.05$) 均对肌肉做功百分比具有显著影响;而姿势 ($F=0.268$, $P>0.05$; $F=0.372$, $P>0.05$; $F=0.337$, $P>0.05$; $F=0.451$, $P>0.05$; $F=0.309$, $P>0.05$) 对肌肉做功百分比无显著影响。

将实验结果展开分析,使用肩袖训练器时,因器材设置有肘部支撑,训练中,被试者肘关节全程固定,

消除了肢体本身的重力影响,使整体运动较为稳定。而使用拉力器时,运动者需要通过自身力量保持姿势,在三角肌、肱三头肌、尺侧腕伸肌协调作用保持关节稳定的前提下,开展肩袖训练,导致目标训练肌肉做功百分比减小。并且由拉力形成的旋肩阻力矩存在明显的角度效应,在前臂与拉力绳处于接近平行位置时已无法发挥有效的旋肩阻力矩,锻炼目的产生偏差,因此以不同器材训练时,被测肌肉做功百分比差异性较大。与拉力器不同,肩袖训练器在内旋外旋的运动中均提供了与运动方向相反的均衡阻力。在一个运动来回中,目标肌肉被作为拮抗肌和主动肌均能得到有效训练,从而使目标训练肌肉的做功百分比显著高于拉力器训练。由此可见,肩袖训练器更有助于旋肩训练的稳定执行,减少无效做功,使目标训练肌肉的做功百分比更高,对于目标训练肌群的刺激更大,训练效果更佳。

5 结语

近年来,运动性肩袖损伤的发生率居高不下,肩袖损伤的预防研究是临床医学和运动生理学的研究热门。本文针对肩袖肌群的生物力学特征,设计了基于摆动液压阻尼的肩袖肌力训练器,以较为经济的手段提供了肩袖肌群针对性训练。使用肩袖训练器进行抗阻运动训练时,相关肌肉的发力顺序比较符合旋肩运动的发力特征,能够帮助训练者以更科学的发力模式进行肩袖训练,避免发力不当造成肩部损伤。同时,实验证明,使用肩袖训练器训练时,相关肌肉的无效做功较小,肩袖肌群的参与度较高,进而能有效刺激肩袖肌群,达到更好的训练效果。可见,肩袖训练器适合训练者针对性地进行肩袖肌力强化训练,有助于预防个体的肩袖损伤,其经济的实现方式为大范围的训练开展提供了可能,有较高的现实意义。

参考文献:

- [1] 武文帅,陈崇民. 肩袖损伤诊疗进展[J]. 辽宁中医药大学学报, 2015, 17(10): 208-211.
WU Wen-shuai, CHEN Chong-min. Progress of Diagnosis and Treatment of Rotator Cuff Injury[J]. Journal of Liaoning University of TCM, 2015, 17(10): 208-211.
- [2] FUKUDE H, HAMADA K, YAMANAKA K. Pathology and Pathogenesis of Bursal Side Rotator Cuff Tears Viewed from Enbloc Histologic Sections[J]. Clinical Orthopaedics and Related Research, 1990, 254: 75-80.
- [3] 陈斌. 肌肉加固训练对乒乓球运动员肩关节损伤肌肉群影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
CHEN Bin. The Effect of Muscle Strengthening Exercise on Table Tennis Players' Shoulder Damage Muscles Group[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [4] 张荣花. 创伤性肩袖损伤患者术后不同时间开始康复

- 训练效果观察[J]. 护理学报, 2010, 17(2): 41-45.
- ZHANG Rong-hua. Effects Observation of Different Time of Setting up Rehabilitation Training on Shoulder Joint Function Recovery among Patients with Traumatic Rotator Cuff Injury after Arthroscopy[J]. Journal of Nursing, 2010, 17(2): 41-45.
- [5] 许苑晶, 杨泽政, 刘至原, 等. 肩袖的有限元建模及其生物力学分析[J]. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(4): 279-285.
- XU Yuan-jing, YANG Ze-zheng, LIU Zhi-yuang, et al. Biomechanical Analysis of a Finite Element Model of Rotator Cuff[J]. Chinese Journal of Orthopaedics Trauma, 2017, 19(4): 279-285.
- [6] MALLIOU P C, GIANNAKOPOULOS K, BENEKA A G, et al. Effective Ways of Restoring Muscular Imbalances of the Rotator Cuff Muscle Group: a Comparative Study of Various Training Methods[J]. British Journal of Sports Medicine, 2004, 38: 766-772.
- [7] 朱鸣镝, 汤娜波, 凌树才, 等. 肩关节运动时肌肉力臂改变的实验研究[M]. 中国临床医学, 2007, 14(2): 221-225.
- ZHU Ming-di, TANG Na-bo, LING Shu-cai, et al. The Experiential Study of Muscles Arms Changes during the Movement of the Glenohumeral Joint[M]. Clinical Medical Journal of China, 2007, 14(2): 221-225.
- [8] 甘昔林. 中老年人常见肩关节功能受限的运动康复处方设计与效果验证[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2016.
- GAN Xi-lin. The Design and Verification of Sports Rehabilitation Prescription of Common Shoulder Joint Function Limitation among Middle-aged and Old People[D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2016.
- [9] 中国国家技术监督局. GB/T 10000-1988, 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- China National Bureau of Technical Supervision. GB/T 10000-1988, Human Dimensions of Chinese Adults[S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [10] 林斌, 张海参, 郭志民, 等. 正常国人活体肩锁关节的运动特点[J]. 临床骨科杂志, 2009, 12(4): 451-454.
- LIN Bin, ZHANG Hai-shen, Guo Zhi-min, et al. The Character of Normal Acromioclavicular Joint's Motion in Chinese Body[J]. Journal of Clinical Orthopaedics, 2009, 12(4): 451-454.
- [11] 宋琳, 于跃, 王瑶, 等. 排球运动员肩袖损伤后扣球发力顺序分析及受伤原因探讨[J]. 北京体育大学学报, 2017, 40(5): 59-65.
- SONG Lin, YU Yue, WANG Yao, et al. Analysis of Muscle Mobilization Order of Smash After Rotator Cuff Injury in Volleyball Players and Causes of Injury[J]. Journal of Beijing Sport University, 2017, 40(5): 59-65.
- [12] 陆爱云. 运动生物力学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2006.
- LU Ai-yun. Sports Biomechanics[M]. Beijing: People's Physical Culture Publishing House, 2006.
- [13] 王健. sEMG 信号分析及其应用研究进展[J]. 体育科学, 2000, 20(4): 56-60.
- WANG Jian. Some Advances in the Research of sEMG Signal Analysis and its Application[J]. Sport Science, 2000, 20(4): 56-60.