

·运动人体科学·

网球拍线径对底线击球效果及持拍臂肘关节的影响

夏永桢¹, 刘晔²

(1.北京体育大学 研究生院, 北京 100084; 2.北京体育大学 运动人体科学学院, 北京 100084)

摘 要: 为了研究网球拍线径对击球速度、控制性和持拍臂肘关节所造成的影响, 揭示网球拍线径在击球过程中可能造成持拍前臂肘关节运动性损伤的原因。15名网球国家2级运动员作为被试者, 通过对不同线径(18号1.15 mm和16L 1.25 mm)的网球拍线进行现场正手击球测试。研究发现, 网球拍线径会对底线击球效果产生影响, 其中对击球速度产生显著影响, 线径较细的18号聚酯线的击球速度显著快于线径较粗的16L聚酯线, 且18号聚酯线击球控制性的总体趋势要高于16L聚酯线的击球控制性。网球拍线径会对持拍臂造成一定的影响, 具体表现为对持拍臂的肌电峰值、均方根值(RMS)及放电时程的影响, 其中对肱桡肌的影响最为显著。使用16L聚酯线拍击球时, 为更好地实现对球的控制, 过多动用了持拍臂桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌参与运动, 这些肌肉的过度使用可能导致持拍前臂肘关节的损伤。

关键词: 运动生物力学; 网球拍线径; 底线击球效果; 肌电峰值; 均方根振幅; 放电时程; 持拍臂肘关节

中图分类号: G804.6 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2018)03-0134-06

Effects of tennis racket string diameters on the baseline ball hitting effect and the elbow joint of the racket holding arm

XIA Yong-an¹, LIU Ye²

(1. Graduate School, Beijing Sport University, Beijing 100084, China;

2. School of Sport and Human Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to study the effects caused by tennis racket string diameters to the ball hitting speed, controllability and the elbow joint of the racket holding arm, and to reveal the cause for athletic injury of the elbow joint of the racket holding forearm, possibly caused during ball hitting, the authors selected 15 national level two tennis players as the testees, and tested their forehand ball hitting on the court with the use of tennis racket strings of different diameters (No. 18: 1.15mm and 16L: 1.25mm). Research results: racket string diameters would produce effects on the baseline ball hitting effect, in which they produced a significant effect on the ball hitting speed, the ball hitting speed of the No. 18 polyester string with a smaller diameter was significantly faster than that of the 16L polyester string with a bigger diameter, and the overall trend of the ball hitting controllability of the No. 18 polyester string was higher than the ball hitting controllability of the 16L polyester string; racket string diameters would caused certain effects on the racket holding arm, specifically showing their effects on the myoelectricity peak value, root mean square value and discharge duration of the racket holding arm, in which their effect on the brachioradialis was the most significant; when the 16L polyester string was used for ball hitting, in order to better realize control over the ball, the flexor carpi radialis, pronator teres and extensor carpi radialis longus of the racket holding arm were overly mobilized to involve in movement, the overuse of these muscles may cause the injury of the elbow joint of the racket holding forearm.

收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助课题(2017YB023); 教育部“运动与体质健康”重点实验室支持项目。

作者简介: 夏永桢(1990-), 男, 博士研究生, 研究方向: 网球教学与训练。E-mail: xiayongan123@163.com 通讯作者: 刘晔教授

Key words: sports biomechanics; tennis racket string diameter; baseline ball hitting effect; myoelectricity peak value; root mean square amplitude; discharge duration; elbow joint of the racket holding arm

作为网球拍必不可少的核心成分,网球拍线对网球运动的重要性可想而知,但却未因此而得到人们足够的重视。网球运动员可能更多地只是凭着自己的经验或者爱好选购网球拍线,觉得聚酯线的使用寿命长、耐磨和击球控制好,并且普遍更青睐于该材质网球拍线径较细,认为该线的击球体验更好、击球感觉更舒适,但却没有得到相关的科学理论依据与指导建议。另一方面,国内关于网球拍线动态性能的研究也相对不足。

赵伟科等^[1]测试网球拍线磅数变化对底线击球效果的影响;黄体登等^[2]研究优秀网球选手对网球拍线张力变化的敏感度;沈佳丽^[3]分析击球过程中网球持拍手所受到的应力和冲击载荷。相比国内研究,国外相关研究更为广泛、深入,更注重对网球拍和网球拍线动态性能研究,有在实验室中进行的研究^[4-5],也有现场研究^[6-7]。相关研究较多关注的是网球拍线张力对击球效果的影响,研究发现较低的网球拍线磅数(张力)能够产生较高的击球速度^[8-9],而较高磅数(张力)的网球拍线有助于击球控制性的提升^[6-7]。

网球拍线最重要的功能就是,吸收球拍与球碰撞时的运动能量,并将其转换为弹性势能,然后传递给球^[10]。低硬度的网球拍线在击球过程中要比高硬度的网球拍线传递给运动员更少的冲击力,因为其与球发生碰撞时产生的弹性形变更大,增加了与球碰撞的时间,从而限制了球拍冲击的传递^[11]。有关研究认为,网球持拍手肘腕关节的损伤与网球拍传递到持拍前臂的冲击载荷有关^[12-13]。有研究者发现,持拍手肘腕关节的损伤,是持拍前臂肌肉受到球拍的冲击振动发生快速离心收缩而导致的,反复的离心收缩增大了肌纤维的负荷而造成损伤^[14],并认为反复快速的离心收缩是造成持拍前臂肌肉肘关节损伤的主要原因,而不是由于球拍的振动^[15]。

本研究使用两种不同线径的网球拍线进行现场击球的测试,通过分析比较两种不同线径表现出来的底线击球效果和持拍臂冲击的差异,研究网球拍线径对底线击球效果与持拍臂肘关节的影响程度,预防持拍臂肘关节运动性损伤。

1 研究对象与方法

1.1 被试者

北京某高校网球2级运动员15名,均为男性,右利手,身高(179.00±5.90)cm、体质量(71.00±8.58)kg、

年龄(25±2)岁、运动等级2级、无运动损伤史。

1.2 实验设计

研究选用16 L 1.25 mm与18号1.15 mm两种不同线径,但材质相同(泰昂聚酯)的网球拍线(网球拍线主要有3种型号:15、16、17号,每一型号表示一种拍线的直径,型号数字越大,拍线直径越小,拍线越细,重量越轻。有时,拍线上还有附加符号“L”,相当于半个型号^[16]),拉线磅数均为54磅,被试者前后测试条件(球拍、喂球速度与击球力量等)均保持一致。选定测试技术为运用最多的并且最重要的底线正手击球技术。根据网球正手击球的力学特征,选取前臂肌腱起于肱骨外上髁的肱桡肌、指伸肌及肌腱起于肱骨内上髁的旋前圆肌、桡侧腕屈肌^[17]作为持拍前臂表面肌电测试肌肉。底线击球效果指标:击球速度和控制性得分。球拍测试指标:球拍振动频率、加速度和应变电阻值。持拍前臂测试指标:被试者持拍臂肱桡肌、桡侧腕长伸肌、桡侧腕屈肌和旋前圆肌的表面肌电峰值、均方根振幅(RMS)及放电时程。

1.3 测试仪器设备

美国斯德克手持式运动雷达测速仪(Stalker Pro II);Delsys公司生产的Trigno™无线表面肌电系统,采样频率1 932 Hz,8个无线感应器;北京一洋应振测试技术有限公司生产的YSV动态信号采集分析系统,采样频率1 024 Hz,500 G加速度传感器,质量10 g,及应变调理器和应变电阻片;Wilson公司生产的型号为Ktour 95 Tns Rkt 2的网球拍;线径为18号1.15 mm的泰昂TS5600聚酯线和16 L 1.25 mm的泰昂TS5000聚酯线;Teloon天龙比赛用球24桶;自制喂球装置。

1.4 测试流程

1)测试准备。

正式测试前先进行预测试,测试人员先熟悉相关仪器的性能,相关软件的操作步骤,及清楚现场测试要求和条件。雷达测速枪摆放于距底线3.5 m,距右侧单打边线3.3 m的位置。击球控制性测试采用统一测试标准,结合深度与角度测试,击打斜线角度。添3条竖线将网球场对面半片球场纵分为4等分,再添两根横线将后场平分为12等分,所有添加的线均用红色纤维绳,用透明胶带固定,给每个格子标记好分值。

Trigno™表面无线肌电测试仪进入工作状态,用双面胶将4个无线肌电感应器分别贴于受试者持拍前臂测试肌肉的肌腹位置,并用弹性绷带固定住。YSV动态信号采集分析系统,8通道动态信号采集设备以及

应变调理器连接电源,并与加速度传感器、应变电阻片的电线连接正确,其中加速度传感器和应变电阻片分别用双面胶及胶带紧贴于球拍拍颈正反面,数据线正常连接。喂球装置摆放于其中心距底线 2.29 m,距右侧单打连线 2.30 m 的位置处。

2)测试步骤。

15 名受试者先使用 16L 拍线的球拍进行击球测试,再使用 18 号拍线的球拍进行击球测试,在网球场底线中点位置使用正手击球技术击打通过简易喂球装置送来的球(球的落点固定和初速度稳定,前后测试保持一致),受试者前后两组测试使用的击球动作、力量等均保持前后一致。测试过程中,每名受试者每次测试击球 6 个,每球间歇 5 s,不受时空限制、流畅地完成击球动作。

1.5 测试数据的提取与处理

通过电脑 YSV 分析软件提取加速度峰值和球拍应变值,运用 Trigno™分析软件提取持拍前臂的表面肌电峰值、RMS 及放电时程,将提取出的各指标数据输入 2010Microsoft Excel 工作表中(本研究只分析垂直球拍拍面方向的加速度信号)。运用 2010Microsoft Excel 软件对提取出来的数据进行常规处理,计算出每名受试者每项指标的平均值。使用 SPSS13.0 中文版统计软件统计出每组测试数据的平均数与标准差,运用 3δ 法(拉依达准则)将超过 3 倍平均值的测试数据剔除后

再对其进行配对样本 T 检验,分析对应的测试数据之间差异是否具有统计学显著性意义($P<0.05$)。

2 结果及分析

2.1 底线击球效果

对击球速度与控制性进行配对样本 T 检验,16 L 与 18 号聚酯线的击球速度的差异存在统计学显著性意义($P=0.046$),表明网球拍线线径对击球速度产生影响;16 L 与 18 号聚酯线的控制性的差异没有统计学显著性意义($P=0.261$),表明网球拍线径对击球控制性没有影响(见表 1)。

表 1 击球速度与控制性测试结果($\bar{x} \pm s$)

拍线	n/人	击球速度/(km·h ⁻¹)	击球控制性/分
16 L 聚酯线	15	109.20±11.137	5.11±0.764
18 号聚酯线	15	116.23±7.818 ¹⁾	5.50±0.805

1)与 16 L 聚酯线比较, $P<0.05$

2.2 球拍测试结果

运用 3δ 法剔除异常值后,球拍冲击载荷测试的样本量为 13。16L 与 18 号聚酯线的球拍振动频率、加速度与应变电阻值的差异均没有统计学显著性意义,表明网球拍线径对球拍振动频率、加速度与应变电阻值均无影响(见表 2)。

表 2 球拍测试结果($\bar{x} \pm s$)

拍线	n/人	振动频率/Hz	加速度/(m·s ⁻²)	应变电阻值/mΩ
16 L 聚酯线	13	37.77±0.439	38.58±4.613	16.96±5.336
18 号聚酯线	13	37.73±0.458	38.82±5.054	18.92±4.214

2.3 持拍臂测试结果

1)持拍臂肌电峰值。

运用 3δ 法剔除异常值后,持拍臂肌电峰值测试的样本量为 13。16L 聚酯线与 18 号聚酯线肱桡肌的肌电峰值的差异具有统计学非常显著性意义

($P=0.008$), 桡侧腕屈肌电峰值之间、旋前圆肌肌电峰值与桡侧腕长伸肌肌电峰值差异没有统计学显著性意义,表明网球拍线径会对持拍前臂肱桡肌肌电峰值产生影响,而对桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌肌电峰值的影响不大(见表 3)。

表 3 持拍臂肌电峰值测试结果($\bar{x} \pm s$)

拍线线径	n/人	肱桡肌	桡侧腕屈肌	旋前圆肌	桡侧腕长伸肌
16 L 聚酯线	13	1 922.54±1 028.257	916.23±598.738	790.14±414.608	811.28±567.888
18 号聚酯线	13	1 423.67±1 167.079 ¹⁾	732.96±450.020	773.22±447.794	813.72±612.429

1)与 16 L 聚酯线比较, $P<0.05$

2)持拍臂 RMS。

运用 3δ 法剔除异常值后,持拍臂 RMS 测试的样本量为 13。16 L 聚酯线与 18 号聚酯线肱桡肌与 RMS 的差异具有统计学显著性意义($P=0.024$),旋前圆肌

RMS 差异具有统计学非常显著性意义($P=0.007$),桡侧腕屈 RMS 差异不存在统计学显著性意义($P=0.145$),桡侧腕长伸肌 RMS 的差异没有统计学显著性意义($P=0.216$),表明网球拍线径会对肱桡肌和旋前圆肌肌

电 RMS 产生影响,但对桡侧腕屈肌和桡侧腕长伸肌肌电 RMS 则影响不大(见表 4)。

表 4 持拍前臂 RMS 测试结果 ($\bar{x} \pm s$)

拍线线径	n/人	肱桡肌	桡侧腕屈肌	旋前圆肌	桡侧腕长伸肌
16 L 聚酯线	13	564.53±317.973	328.66±116.883	505.08±174.808	226.68±93.011
18 号聚酯线	13	327.03±169.917 ¹⁾	255.70±156.120	380.13±127.994 ¹⁾	179.45±72.582

1)与 16 L 聚酯线比较, $P<0.05$

3)持拍臂肌肉放电时程。

运用 3 δ 法剔除异常值后,持拍臂肌肉放电时程测试的样本量为 13。16 L 聚酯线与 18 号聚酯线肱桡肌的放电时程的差异不存在统计学显著性意义 ($P=0.070$),桡侧腕屈肌放电时间、旋前圆肌放电时间、

桡侧腕长伸肌放电时间的差异具有统计学显著性意义 ($P=0.026$, $P=0.018$, $P=0.027$),表明网球拍线径会对桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌的放电时间产生影响,而对肱桡肌的放电时间的影响不大(见表 5)。

表 5 持拍臂肌肉放电时程测试结果 ($\bar{x} \pm s$)

拍线线径	n/人	肱桡肌	桡侧腕屈肌	旋前圆肌	桡侧腕长伸肌
16 L 聚酯线	13	220.59±82.166	204.34±56.148	196.68±53.901	267.09±113.308
18 号聚酯线	13	163.26±56.213	153.48±43.114 ¹⁾	140.83±51.749 ¹⁾	186.84±41.857 ¹⁾

1)与 16 L 聚酯线比较, $P<0.05$

3 讨论

本研究是在同款球拍、出球速度落点及被试者前后测试击球动作力量等各方面条件保持一致的情况下,通过使用 16L 与 18 号两种不同线径的聚酯材质网球拍进行现场击球测试,分析比较两种线径球拍击球表现出来的底线击球速度、控制性和持拍臂肱桡肌、桡侧腕长伸肌、桡侧腕屈肌和旋前圆肌的表面肌电峰值、均方根振幅(RMS)及放电时程之间的差异,研究网球拍线径对底线击球效果与持拍臂的影响,及预防持拍臂肘关节运动性损伤。已往研究更多关注于网球拍线张力对击球效果的影响^[6, 8],而对网球拍线径动态性能的研究较少。研究结果显示,网球拍线径会对底线击球效果与持拍臂造成一定程度的影响。

3.1 网球拍线径对底线击球效果的影响

以往研究发现,较低的网球拍线磅数(张力)能够产生较高的击球速度^[8-9]。Elliott^[18]通过研究证实了拍线的“蹦床”效应,认为低磅数的球拍能够发挥出更大的击球速度,磅数较低的球拍由于松弛的拍面变形较大,而使得网球自身的变形较小,拍线相对于网球产生更大的形变,从而存储较多能量使网球获得更快的速度。本研究所用拍线是同一款材质相同的拍线,虽然拉线磅数相同,由于拍线线径不同,所产生的张力是不一样的,即线径较小的 18 号聚酯线比线径较大的 16 L 聚酯线的张力小。有研究指出, Nakui 等通过对球拍线床的载荷压力测试发现,增加拍线直径的击球

效果等同于增加拍线张力的击球效果^[9]。因而,本研究的结果与前人的研究结果相一致,18 号聚酯线的击球速度显著大于 16 L 聚酯线的击球速度。

网球拍线径对击球控制性没有显著影响,但由表 1、表 2 可知,18 号聚酯线的击球控制性的总体趋势要高于 16 L 聚酯线的击球控制性,这与前人的研究结果不一致^[6-7]。可能是由于测试所用网球拍拍面比较小,线床较密(16×19),因而球拍击球的甜区就相对小,16L 聚酯线与球碰撞时产生的线床张力更大,不利于对球的控制;测试所用线径较粗的 16 L 聚酯线非被试者所惯用的拍线,不能够很好地适应;另外,球拍上固定有测试仪器和数据线,这些原因可能都会影响到击球的控制性得分。

武春林等^[20]发现,影响球拍固有频率的主要因素是球拍的材料。网球拍线径对球拍加速度的影响不显著,而主要取决于球拍自身的物理特性,如拍头重量、平衡点等。Mitchell 等^[21]通过对具有不同惯性特征的球拍进行了测试研究,发现拍头速度的产生和击球的最终速度都与球拍惯性密切相关,减少球拍惯性可以显著提升拍头速度。而球拍的惯性主要取决于球拍重量与平衡点的位置。固定于球拍的电阻应变片在外界力的作用下会产生机械变形,其电阻值相应发生变化。通过测量分析应变电阻值,反映不同线径拍线的网球拍在击球碰撞时产生应力应变的变化情况。由表 2 可知,18 号聚酯线球拍应变电阻值的变化趋势较为明

显。Elliott^[18]认为网球拍面与网球碰撞时会产生“蹦床”效应,低磅数的球拍由于拍面张力的原因产生更大的形变,拍线“蹦床”效应更为明显。本研究中的18号聚酯网球拍线与16L聚酯线相比,线径较小,因而线床所产生的“蹦床”效应更为明显。

3.2 网球拍线径对持拍臂的影响

肌电峰值,是指击球过程中持拍前臂放电的最大幅度,反映出持拍前臂肌肉对球拍与球碰撞产生的冲击压力的应激强度,及击球时肌肉参与活动的程度。由表3可知,16L聚酯线的肌电峰值的总体趋势要高于18号聚酯线的肌电峰值,表明16L聚酯线球拍所传递给持拍臂的冲击力更大,这在肱桡肌肌电峰值方面表现得最为明显。由前面的研究可知,18号聚酯线的底线击球效果要好于16L聚酯线的以及球拍应变程度较小,所以在使用16L聚酯线球拍的击球过程中需要更多地动用桡侧腕屈肌与旋前圆肌参与活动来更好地对击球进行控制。

均方根振幅(RMS),描述的是肌电信号振幅的集中趋势,反映一段时间内肌肉放电的平均水平^[22];可在时间维度上反映SEMG信号振幅的变化特征^[23]。由此可见,持拍前臂各肌肉均方根振幅值体现了肌肉在正手击球动作过程中的用力程度及球拍的碰撞传递给持拍前臂的冲击影响程度。受试者使用16L聚酯线的球拍击球时,持拍前臂各肌肉肌电图的均方根振幅值趋势均要大于18号聚酯线球拍,说明线径的不同会导致参与击球活动的持拍前臂肌肉用力程度的不一样。持拍前臂肌肉在线径较大的16L聚酯线击球时发了更大的力,肌肉激活程度更强,同时球拍与网球碰撞时会对持拍前臂产生更大的冲击。其中,前臂肱桡肌和旋前圆肌肌电RMS之间具有显著性差异,表明在正手击球动作过程中更多地参与了活动,而这与本研究前面部分球拍加速度峰值与持拍前臂肌肉加速度峰值的相关性结论是一致的。

放电时程,是指肌肉运动时放电时间的长短。由表5可知,16L聚酯线的肌肉放电时程的总体趋势要高于18号聚酯线,表明网球拍线径对持拍臂肌肉放电时程的影响比较大。16L聚酯线击球时与网球的碰撞会对持拍前臂产生更大的冲击,且持续时间较长;持拍前臂肌肉在击球冲击力的影响下也相应变得更为紧张,因而击球过程中肌肉放电时间相对较长。其中,网球拍线线径对桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌的影响更为显著,说明受试者在使用16L聚酯线的球拍击球时为实现对球更好地控制,而更多地动用了持拍臂的桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌使球产生更多的旋转。

球拍在击球过程中传递给持拍前臂冲击振动,持拍臂表面肌电数据的测量,可以反映持拍臂对球拍冲击振动的应激程度。网球拍线径会对持拍臂的冲击载荷产生一定的影响,表现为对持拍臂肌肉的肌电峰值、均方根振幅(RMS)及肌肉放电时程的影响,在使用16L聚酯线的球拍击球时对持拍前臂肱桡肌的冲击影响最大以及同时为实现对球更好地控制,而更多地动用了前臂的桡侧腕屈肌、旋前圆肌及桡侧腕长伸肌参与运动,而这些肌肉是与网球肘腕关节的损伤密切相关的。Knudson等^[15]认为导致网球肘损伤的主要原因是由持拍前臂相关肌肉的离心收缩造成的,而与网球拍撞击时产生的冲击振动关系不大。持拍前臂肌肉受到球拍的冲击振动发生快速离心收缩而导致的,反复的离心收缩增大了肌纤维的负荷而造成损伤^[14]。

本研究在其他条件(球拍、线床磅数与击球力量等)保持一致的前提下,测试网球拍线径对底线击球效果及持拍臂肘关节的影响,了解不同线径网球拍线的动态性能。目前,国内还没有关于网球拍线径的研究报道。由于测试所用仪器设备的限制,如加速度计较重(固定在拍头会对拍重与平衡产生一定影响)、数据线等,会对测试的结果产生一定的影响,被试者可能没有能够发挥出真实水平;另外,研究没有测试不同拍面的击球表现。因而,未来的研究如果条件允许的话,可以利用无线仪器进行测试,并且使用不同拍面的球拍进行比较研究。

参考文献:

- [1] 赵伟科,杨三军. 网球拍弦磅数变化对优秀网球职业运动员底线击球效果的研究[J]. 北京体育大学学报, 2010, 33(12): 130-133.
- [2] 黄钵登,张家豪. 优秀网球选手对于分辨不同网线张力的敏感度[C]. 第十四届全国运动生物力学学术交流大会论文集, 2010.
- [3] 沈佳丽. 不同入射角及球性对网球运动员持拍手冲击载荷影响的数值模拟[J]. 上海体育学院学报, 2014, 38(3): 78-82.
- [4] CROSS R. The sweet spots of a tennis racket[J]. Sports Engineering, 1999, 1(2): 63-78.
- [5] CROSS R. Flexible beam analysis of the effects of string tension and frame stiffness on racket performance[J]. Sports Engineering, 2000, 3(2): 111-122.
- [6] JACK L, GROPEI S. The effects of string type and tension on impact in midsized and oversized tennis rackets[J]. International Journal of Sport Biomechanics, 1987, 3(1): 40-46.

- [7] BOWER R, CROSS R. String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions[J]. *Journal of Sports Sciences*, 2005, 23(7): 765-767.
- [8] BAKER J A, WILSON B D. The effect of tennis racket stiffness and string tension on ball velocity after impact[J]. *Research Quarterly of Exercise and Sport*, 1978, 49(3): 255-259.
- [9] BOWER R, SINCLAIR P. Tennis racket stiffness and string tension effects in rebound velocity and angle for an oblique impact[J]. *Journal of Human Movement Studies*, 1999, 37(6): 271-286.
- [10] FABRE B, MARTIN V. Effects of string stiffness on muscle fatigue after a simulated tennis match[J]. *Journal of Applied Biomechanics*, 2014, 30(3): 401-406.
- [11] LEHMAN R C. Surface and equipment variables in tennis injuries[J]. *Clinical Sports and Medicine*, 1988, 7(2): 229-232.
- [12] KNUDSON D V. Forces on the hand in the tennis one-handed backhand[J]. *International Journal of Sport Biomechanics*, 1991, 7(3): 282-292.
- [13] KING M A, KENTEL B B. Effects of ball impact location and grip tightness on the arm, racquet and ball for one-handed tennis backhand groundstrokes[J]. *Journal of Biomechanics*, 2012, 45(6): 1048-1052.
- [14] KNUDSON D V, WHITE S C. Forces on the hand in the tennis forehand drive: Application of force sensing resistors[J]. *International Journal of Sport Biomechanics*, 2010, 5(3): 324-331.
- [15] KAWAZOE Y, CASOLO E. Performance prediction and estimation system for tennis racket in terms of player's wrist joint shock vibrations[J]. *Engineering of Sport*, 2004, 5(1): 393-399.
- [16] 陶志翔. 网球运动教程[M]. 北京: 北京体育大学出版社, 2007: 29.
- [17] 全国体育院校教材委员会. 运动解剖学[M]. 北京: 人民体育出版社, 2000: 114.
- [18] ELLIOTT B. The influence of tennis racquet flexibility and string tension on rebound velocity following a dynamic impact[J]. *Research Quarterly of Exercise and Sport*, 1982, 53(4): 277-281.
- [19] NAKUI M, AKIHIRO M, TOMOHIRO M. Effect of the polymer string diameter on the hitting surface of tennis rackets[C]. The proceedings of Ibaraki district conference, 2016.
- [20] 武春林, 潘宏侠. 基于 ANSYS 对网球拍调谐减震球的分析[J]. *机械管理开发*, 2013(2): 25-26, 28.
- [21] MITCHELL S R, ROY J, MARK K. Head speed vs. racket inertia in the tennis serve[J]. *Sports Engineering*, 2010, 3(2): 99-110.
- [22] 罗莉斯, 彭莉. 振动结合负重刺激对下肢表面肌电均方根振幅的影响: 基于4种刺激下半蹲起提踵练习[J]. *中国组织工程研究*, 2017, 21(32): 5152-5157.
- [23] 王键. SEMG 信号分析及其应用研究进展[J]. *体育科学*, 2000, 20(4): 56-60.

