

肩胛骨开闭链运动的肌电特征与康复优化

李春红, 张桂忠

(内蒙古师范大学 体育学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 招募在校就读健康男大学生并通过肩胛骨动力障碍测试(SDT)筛选受试者。对入选受试者开展肩胛骨上提、下降、前移、后缩、上回旋、下回旋运动实验,探究在开链、闭链条件下,肩胛骨各个方向运动时肩部肌群的积分肌电值(IEMG)、均方根振幅(RMS)、肌肉贡献率及肌群协同作用。结果表明:(1)肩上传运动中,闭链条件下上斜方肌(UT)、下斜方肌(LT)、三角肌后束(PD)、三角肌前束(AD)的激活程度显著低于开链条件($P < 0.05$);(2)肩下降和前移运动中,闭链条件下 LT、AD、PD、冈下肌(IS)的激活程度显著低于开链条件($P < 0.05$);(3)肩后缩和肩上传运动中,闭链条件下 PD、IS 的激活程度极显著低于开链条件($P < 0.01$);(4)闭链条件下,UT 在肩上传、前移运动中的贡献率显著大于开链条件($P < 0.05$),而 PD 在肩前移、后缩运动中的贡献率显著低于开链条件($P < 0.05$);(5)肩胛骨下降运动时,开链与闭链条件下 UT:MT、UT:LT 的比值均小于 1。研究表明,开链条件(OKC)适用于肌力强化和针对性肌群激活,闭链条件(CKC)在改善肌群协同性(UT:MT/LT < 1)、减少代偿(PD 抑制)和增强稳定性方面更具优势。

关键词: 开链运动; 闭链运动; 肩胛骨; 协同; 运动失衡

中图分类号: G804.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)01-0085-09

DOI: 10.3969/j.issn.1001-8735.2026.01.011

肩部疼痛是日常生活中全年龄段常见的肌肉骨骼疾病之一,患病率在 7%~27%,且随年龄增长发病率显著上升,60 岁左右达到发病高峰,女性患者比例更高,达 66.7%^[1]。大多数人会因颈部、肩部或背部疼痛问题,求助于医生或其他专业医疗人员^[2-3]。在社会层面,这些疾病增加了社会成本,包括医疗保健支出、残疾保险和旷工等^[4]。

现有研究表明,肩部疼痛等异常症状的起因源于肌肉的运动失衡。如上交叉综合征(UCS),医学博士 Vladimir Janda(1923—2002)将其定义为肌肉失衡模式^[5]。肌肉激活的改变包括上斜方肌(UT)、肩胛提肌和胸肌的过度活动,颈深屈肌、中斜方肌(MT)、下斜方肌(LT)及前锯肌的活动不足^[6]。肩峰下撞击综合征(subscapular impingement syndrome, SIS)被认为是导致肩部疼痛最常见的原因之一,约占肩痛患者的 44%~65%,其主要表现为肩部疼痛、肌力及活动度减退,各肌群力量不平衡^[7]。肩胛骨动力障碍(SD)产生的更重要的因素是肩胛部肌肉力量不平衡,包括 UT 紧张或激活过度,MT、LT、SA 力量不足或激活不足等^[8],并且肩袖损伤与 SD 常常互相影响,恢复肩部肌群运动平衡以及肩胛骨正常的运动轨迹,对预防肩部异常有重要意义。

人体的关节和节段在运动过程中互相作用的概念被称为运动链。开链运动(OKC)指肢体远端自由移动、近端固定的运动模式,允许单关节孤立训练;闭链运动(CKC)则是肢体远端固定、近端移动的闭合力学链模式,强调多关节协同和功能性动作。在肩部康复中,OKC 可针对性激活特定肌群,而 CKC 更有利于增强整体稳定性和神经肌肉的控制^[9-10]。

肩部相关疾病的诱因多是肩部周围肌肉力量失衡,现有研究证实 OKC 对肩部康复有效,但过早应用可能引发肌肉代偿,削弱主动肌功能,导致肩周肌群激活紊乱^[11]。CKC 可通过轴向负荷增强近端稳定性,促进双侧肌群协同激活,优化关节动力学^[9]。然而,对肩部康复的研究多聚焦在肩关节运动,忽视

收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 李春红(1997—),女,在读硕士研究生。

通信作者: 张桂忠(1975—),男,副教授,博士,主要从事运动生理学研究,E-mail: zhanggz@imnu.edu.cn。

肩胛骨自身运动对肩周肌肉的激活,肩周肌肉的协同工作能力是维持肩部稳定性的基础,肩胛骨的稳定性对肩部功能至关重要。因此,本研究通过对比肩关节外展 90°时,肩胛骨在开闭链条件下的六项运动,系统分析相关肌群的肌电特征、协同模式及共激活机制,揭示不同肩胛骨运动对肩部肌群的调控差异,为优化肩部康复策略提供理论依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募肩部无异常的健康男大学生为受试者,初步纳入右手为惯用手,无肩关节活动障碍,通过肩胛骨动力障碍测试(SDT)完成筛选,最终纳入无症状且双侧均无肩胛骨动力障碍的受试者 16 人。受试者平均年龄(23.2±1.5)岁,平均身高(175.8±2.5) cm,平均体重(75.1±5.8) kg。

SDT 测试采用哑铃负荷方案(3 LB/5 LB),制定标准为:(1)参照诊断 SD 的标准化 SDT 方案^[12-13]; (2)通过预实验确定,当负荷≥5% 体重时(3 LB≈1.3 6kg,对应 68.1 kg 体重的 2%),可诱发肩胛运动异常特征。

SDT 测试流程如下:受试者取站立位,按体重分组持相应哑铃,A 组(体重<68.1 kg),双手持 3 LB 哑铃;B 组(体重≥68.1 kg),双手持 5 LB 哑铃。依次完成冠状面外展-下降动作(15 次/分)和矢状面前屈-下降动作(15 次/分)。在后侧观察肩胛骨运动轨迹。采用 Kibler^[14]四型分类法评估,I 型(下角突出)、II 型(内侧缘突出)、III 型(过度上提)、IV 型(正常)。

测试仪器包括:(1)polar H10 心率带,同步采集心率;(2)Noraxon 无线表面肌电测量仪,Myon AKTOS 无线表面肌电分析系统,16 导;(3)其他工具,电极片、75% 乙醇、刮毛刀、脱脂棉、剪刀、双面胶、3 LB 和 5 LB 哑铃等。根据实验设计,选取受试者惯用侧肩关节周围的六块肌肉:上斜方肌(UT)、中斜方肌(MT)、下斜方肌(LT)、冈下肌(IS)、三角肌后束(PD)、三角肌前束(AD)。

1.2 表面电极粘贴方法

用刮毛刀剃除需要贴取电极片处的体毛,用脱脂棉沾取 75% 的医用酒精对皮肤进行擦拭,待皮肤表面晾干后粘贴电极片,粘贴位置见表 1。

1.3 目标肌肉最大自主等长收缩测试(MVIC)

最大等长收缩的肌电测试动作(见表 1)作为标准化参照,受试者在充分热身后测试,每块目标肌肉测试 3 次,最大等长收缩 5 s,次间休息 30 s,每块肌肉 MVIC 测试之间休息 2 min。

表 1 电信号采集位置及目标肌肉 MVIC 测试动作及阻力施加位置

Tab. 1 The position of electrical signal acquisition and the position of MVIC test action and resistance application to the target muscle

肌肉名称	电极片粘贴位置	测试动作及阻力施加位置
上斜方肌	在颈部和肩部的区域,约为乳突至肩胛冈内侧中间点	受试者坐位,头向对侧转,耸肩,阻力施加位置为肩峰
中斜方肌	肩胛冈内侧到 T3 棘突之间	俯卧位,肩关节水平外展外旋位,肘关节屈曲 90°,尽力上抬手臂,阻力施加位置为肩关节后方
下斜方肌	T10 棘突与肩胛下角连线中点	受试者俯卧位,上肢尽量抬起与头部保持水平,上肢与 LT 肌纤维成平行,尽力上抬手臂,阻力施加位置为肩关节后方
冈下肌	肩胛冈下方,三角肌后束与斜方肌中束之间	坐位,上臂贴于体侧,肘关节屈曲 90°,肩关节用力外旋,阻力施加位置为前臂后方并防止肩关节发生外展动作
三角肌前束	肩峰前部 1 个手指宽的位置上	坐位,一手托住受试者肩关节后部,另一手握住腕部用力向后,受试者尽可能直臂前摆,与之对抗
三角肌后束	肩峰角后(肩峰到小拇指方向)两个手指宽的位置	坐位,肩关节外展 90°,肘伸直,手掌向下,上肢用力水平后伸,阻力施加位置为上臂近端后方

1.4 数据采集

在肩关节水平外展 90°的基础上,分别进行开链和闭链两种情况下肩胛骨的六项运动。每项动作完成 3 次后,受试者休息 1 min,待心率降至静息心率 ± 10 次/min(通过 Polar 心率带实时监测)后,再进行下一项动作,利用 Noraxon 无线表面肌电测量仪,Myon AKTOS 无线表面肌电分析系统(16 导)进行。采集受试者运动过程中肩关节周围肌肉的有效肌电信号,每次采集 5 s 有效数据,共采集 3 次。采集受试者惯用侧 UT、MT、LT、IS、PD、AD 的肌电信号,采集频率为 2 000 Hz。

1.5 数据处理

积分肌电值(iEMG)为在一段时间内测量的肌肉的运动单位放电总数;均方根振幅(RMS)反映 IEMG 的平均效应,也被称作 IEMG 的有效效应。对所采集的数据利用测量的最大自主等长收缩(MVIC)进行标准化处理,因采集信号为受试者的表面肌电信号,个体差异导致肌电值的大小存在差异,不可直接用来比较,故采用 MVIC 标准化处理后的肌电值以消除差异,即 $IEMG\% = (IEMG_{\text{实测}}/IEMG_{\text{mvic}}) \times 100\%$ 。对 UT、MT、LT、IS、PD、AD 的肌电信号先进行带通滤波处理:高通滤波 10 Hz(参考 Noraxon 官方建议及国际电生理标准,用于消除皮肤-电极运动伪迹)、低通滤波 800 Hz(用于去除环境电磁噪声);经全波整流后进行分析^[15]。使用 50 ms 窗口宽度,计算各肌肉的积分肌电值、均方根振幅、贡献率以及斜方肌的协同作用、PD 与 AD 共激活比。

斜方肌协同作用(T_{syn}):利用 UT 正规化肌电图值除以 MT、LT 正规化肌电图值计算斜方肌肌肉内比值。将这些值乘以 100% 得到相对活性(%)^[16]。低于 100% 的值反映 UT 肌肉活性较低,高于 100% 的值反映 UT 肌肉活性优于 MT 和 LT 肌肉活性。当 UT 激活过多时,以 UT:MT、UT:LT 值与 1 的比例关系来反映目标动作对肩胛骨稳定性训练的意义,比值 >1 ,可能导致肩胛骨稳定性差,从而导致肩胛骨运动异常;比值 ≤ 1 ,说明目标动作下斜方肌内协同作用高^[10,17]。

1.6 统计学方法

采用 SPSS 26.0 进行统计分析,采用 Shapiro-Wilk 检验验证数据正态性,结果显示所有变量的 W 值为 0.92~0.98, $P>0.05$,符合正态分布;采用均值 \pm 标准差进行统计描述,同时采用配对 t 检验比较开链与闭链条件下各动作肌电参数的组间差异。若数据不符合正态分布(Shapiro-Wilk 检验 $P<0.05$),采用 Wilcoxon 符号秩检验进行补充分析。

2 结果分析

2.1 肩胛骨开、闭链动作下积分肌电值

开链与闭链条件下的 IEMG% 结果对比(表 2)显示:(1)闭链肩上提运动条件下,UT、LT、AD 的 IEMG% 显著低于开链肩上提($P<0.05$);肩上提动作中 PD 的 IEMG 在开链条件下极显著高于闭链条件($P<0.01$);(2)闭链肩下降运动时,LT、PD 的 IEMG% 显著低于开链肩下降($P<0.05$);闭链肩下降动作下,AD 的 IEMG% 极显著低于开链肩下降($P<0.01$);(3)肩前移运动在闭链条件下,PD、IS 的 IEMG% 比开链条件显著降低($P<0.05$);(4)闭链肩后缩运动中,PD 的 IEMG% 极显著低于开链肩后缩($P<0.01$);闭链肩后缩运动条件下 LT、IS、AD 的 IEMG% 显著低于开链肩后缩($P<0.05$);(5)闭链肩上回旋运动条件下 UT、LT、AD 的 IEMG% 极显著低于开链肩上回旋运动($P<0.01$);闭链肩上回旋运动时,MT、PD 的 IEMG% 显著低于开链肩上回旋($P<0.05$);(6)闭链肩下回旋运动条件下,IS 的 IEMG% 显著低于开链肩下回旋($P<0.05$)。

2.2 肩胛骨开、闭链动作下均方根值

开链与闭链条件下的均方根值(RMS)结果对比(表 3)显示:(1)与闭链肩上提相比,开链肩上提动作中的 LT 和 AD、RMS 显著高于闭链肩上提($P<0.05$);开链肩上提动作中 PD 的 RMS 极显著高于闭链条件($P<0.01$);(2)开链肩下降运动时,LT 的 RMS 显著高于闭链肩下降($P<0.05$);肩下降动作中,闭链条件下的 AD 的 RMS 极显著低于开链条件($P<0.01$);(3)肩前移动作中,闭链条件下 PD、IS

的 RMS 显著低于开链条件($P < 0.05$);(4)闭链肩后缩运动下,PD 的 RMS 极显著低于开链肩后缩($P < 0.01$);闭链肩后缩动作中 IS、AD 的 RMS 显著低于开链肩后缩($P < 0.05$);(5)闭链肩上回旋运动时,UT、LT、AD 的 RMS 极显著低于开链肩上回旋时($P < 0.01$);闭链肩上回旋运动时 MT、PD 的 RMS 显著低于开链肩上回旋($P < 0.05$);(6)闭链肩下回旋运动对 IS 的 RMS 激活显著低于开链肩下回旋($P < 0.05$)。

表 2 开闭链动作下目标肌肉的 IEMG %
Tab. 2 The IEMG % of the target muscle under the opening and closing chain movement %

肌肉	运动类型	上提	下降	前移	后缩	上回旋	下回旋
UT	OKC	0.96±0.42	0.32±0.39	0.42±0.23	0.71±0.35	1.04±0.35	0.52±0.34
	CKC	0.73±0.24*	0.26±0.30	0.41±0.21	0.57±0.22	0.49±0.26**	0.38±0.21
MT	OKC	0.35±0.18	0.38±0.13	0.37±0.37	0.49±0.17	0.64±0.35	0.47±0.27
	CKC	0.3±0.20	0.34±0.16	0.34±0.27	0.45±0.26	0.32±0.26*	0.48±0.31
LT	OKC	0.15±0.10	0.64±0.18	0.16±0.14	0.67±0.28	0.62±0.21	0.54±0.28
	CKC	0.09±0.06*	0.44±0.17*	0.15±0.11	0.49±0.29*	0.27±0.23**	0.54±0.35
IS	OKC	0.33±0.13	0.38±0.36	0.65±0.70	0.46±0.30	0.60±0.61	0.43±0.14
	CKC	0.25±0.08	0.26±0.13	0.47±0.59*	0.27±0.12*	0.30±0.11	0.30±0.19*
PD	OKC	0.25±0.12	0.43±0.57	0.35±0.10	0.38±0.37	0.48±0.38	0.34±0.52
	CKC	0.13±0.08**	0.27±0.35*	0.23±0.14*	0.20±0.29**	0.14±0.08*	0.15±0.12
AD	OKC	0.14±0.08	0.15±0.14	0.11±0.13	0.10±0.10	0.29±0.19	0.08±0.07
	CKC	0.09±0.08*	0.08±0.11**	0.07±0.06	0.18±0.13*	0.04±0.02**	0.11±0.09

注:*表示与开链对比差异显著, $P < 0.05$,**表示差异极显著, $P < 0.01$;数据为平均数±标准差。下同。

表 3 开闭链动作下目标肌肉的 RMS
Tab. 3 The RMS of the target muscle under open and closed chain movements

肌肉	运动类型	上提	下降	前移	后缩	上回旋	下回旋
UT	OKC	0.96±0.40	0.32±0.36	0.41±0.21	0.69±0.26	1.03±0.34	0.53±0.34
	CKC	0.75±0.24	0.30±0.34	0.43±0.21	0.65±0.31	0.53±0.26*	0.40±0.22
MT	OKC	0.36±0.18	0.39±0.13	0.38±0.38	0.51±0.19	0.66±0.35	0.48±0.28
	CKC	0.31±0.21	0.42±0.31	0.36±0.28	0.50±0.29	0.35±0.28*	0.50±0.32
LT	OKC	0.15±0.10	0.65±0.18	0.17±0.15	0.69±0.29	0.65±0.21	0.56±0.28
	CKC	0.09±0.06*	0.49±0.18*	0.17±0.12	0.51±0.30	0.33±0.29*	0.55±0.34
IS	OKC	0.33±0.13	0.39±0.39	0.65±0.71	0.47±0.31	0.61±0.61	0.45±0.16
	CKC	0.26±0.08	0.31±0.22	0.49±0.61*	0.28±0.13*	0.33±0.14	0.31±0.20*
PD	OKC	0.26±0.13	0.43±0.57	0.37±0.11	0.39±0.37	0.49±0.38	0.35±0.52
	CKC	0.14±0.08**	0.31±0.37	0.25±0.15*	0.21±0.29**	0.16±0.09*	0.16±0.13
AD	OKC	0.14±0.08	0.15±0.14	0.11±0.13	0.10±0.11	0.30±0.19	0.10±0.08
	CKC	0.10±0.08*	0.09±0.11**	0.07±0.06	0.18±0.14*	0.04±0.02**	0.11±0.10

2.3 肩胛骨开、闭链动作下肌肉贡献率

开、闭链动作下肩胛骨肌肉贡献率见表 4。UT 贡献率在进行肩上提动作时,闭链条件下贡献率显著高于开链条件($P < 0.05$);肩前移动作中 UT 的贡献率,闭链条件下的 UT 贡献率较开链条件极显著增多($P < 0.01$)。MT 贡献率在肩外展 90°的基础下,进行肩前移和肩下回旋动作时,闭链条件下 MT 贡献率显著高于开链条件($P < 0.05$)。LT 贡献率在肩关节前移动作中,闭链肩前移对 LT 的激活显著大于开链肩前移($P < 0.05$)。IS 贡献率在肩上回旋动作中,闭链条件下的 IS 贡献率显著高于开链条件($P < 0.05$)。PD 的贡献率,肩前移、肩后缩动作中,闭链条件下的 PD 贡献率显著低于开链条件($P <$

0.05)。肩下降、肩上回旋动作中,闭链条件下的 AD 贡献率显著低于开链条件($P<0.05$);肩后缩动作中,闭链条件下的 AD 贡献率显著高于开链条件($P<0.05$)。

2.4 肩胛骨开、闭链动作中斜方肌协同作用

开、闭链动作中斜方肌协同作用(T_{syn})见表 5。在开链、闭链条件下的肩胛骨六项运动中,UT 与 MT 的比值、UT 与 LT 的比值,在两种条件间均无显著性差异。但在做肩胛骨下降运动中,UT 与 MT 的比值、UT 与 LT 的比值在两种条件下均小于 1,有利于促进斜方肌内的协同作用,用此动作训练有利于减少上斜方肌的代偿,对于肩部异常形态的恢复有积极作用。肩胛骨下回旋运动过程中,闭链条件下 UT 与 MT 的比值、UT 与 LT 的比值均小于且接近 1,开链条件下 UT 与 MT 的比值、UT 与 LT 的比值大于且接近 1,说明该动作对于恢复斜方肌协同工作的能力有效。

表 4 开闭链运动下目标肌肉的贡献率

Tab. 4 The contribution rate of the target muscle under the opening and closing chain movement

肌肉	运动类型	上提	下降	前移	后缩	上回旋	下回旋
UT	OKC	0.32±0.10	0.09±0.06	0.14±0.06	0.20±0.05	0.22±0.05	0.18±0.09
	CKC	0.38±0.17*	0.10±0.08	0.20±0.07**	0.24±0.13	0.26±0.08	0.17±0.09
MT	OKC	0.13±0.05	0.16±0.07	0.12±0.07	0.16±0.05	0.14±0.05	0.18±0.07
	CKC	0.15±0.07	0.19±0.09	0.15±0.06*	0.19±0.09	0.19±0.12	0.21±0.08*
LT	OKC	0.06±0.06	0.26±0.06	0.06±0.05	0.22±0.08	0.16±0.05	0.22±0.09
	CKC	0.05±0.03	0.26±0.11	0.08±0.05*	0.20±0.09	0.13±0.05	0.23±0.12
IS	OKC	0.11±0.03	0.13±0.08	0.22±0.17	0.13±0.06	0.11±0.07	0.17±0.06
	CKC	0.13±0.03	0.13±0.05	0.18±0.13	0.11±0.03	0.17±0.05*	0.12±0.06
PD	OKC	0.31±0.16	0.28±0.08	0.41±0.17	0.26±0.08	0.25±0.08	0.20±0.11
	CKC	0.22±0.16	0.27±0.14	0.34±0.15*	0.14±0.09*	0.21±0.09	0.20±0.17
AD	OKC	0.07±0.03	0.08±0.04	0.05±0.02	0.04±0.02	0.11±0.07	0.05±0.03
	CKC	0.07±0.05	0.04±0.02*	0.05±0.01	0.11±0.09*	0.03±0.01*	0.06±0.03

表 5 开闭链运动斜方肌协同作用

Tab. 5 The trapezius muscle works in synergy under the opening and closing chain movement

肌肉	运动类型	上提	下降	前移	后缩	上回旋	下回旋
UT/MT	OKC	3.04±1.89	0.64±0.46	1.59±0.98	1.40±0.73	1.72±0.69	1.00±0.64
	CKC	3.06±1.52	0.61±0.54	1.57±0.81	1.49±0.88	2.03±1.32	0.92±0.59
UT/LT	OKC	9.30±6.47	0.39±0.32	4.02±2.79	1.10±0.68	1.67±0.90	1.11±0.90
	CKC	10.65±7.07	0.59±0.70	3.61±2.94	1.58±1.38	2.39±1.61	0.92±0.59

2.5 肩胛骨开、闭链动作下三角前肌与三角后肌共激活

肩胛骨的开闭链运动中,开链条件下的肩胛骨前移和后缩动作中,PD 与 AD 的共激活程度显著高于闭链条件下($P<0.05$,表 6)。PD 与 AD 的共激活比值,在肩胛骨前移动作中达到最大,提示在肩关节外展 90°条件下,开链肩前移动作可以作为三角后肌的训练手段,尤其针对存在圆肩体态的人群,该动作能更大程度地发展三角后肌,从而改善三角前肌和三角后肌肌力失衡。开链条件下肩胛骨运动时,上肢末端无固定支撑,动作完成需要更多主动肌参与控制以对抗重力及惯性,导致 PD 与 AD 的协同收缩增强,以稳定肩胛骨。与闭链运动相比,开链条件下的运动缺乏闭合力学链,需通过提高共激活水平来提升关节稳定性,防止肩胛骨过度移位或旋转。

3 讨论

3.1 肩胛骨开闭链运动肌电特征

在运动训练中,关节驱动肌,如 UT、PD、AD 等表面大肌群力量和围度的增加是体能训练的主要目标。针对肩胛骨动力障碍(SD)、肩袖损伤、上交叉综合征(UCS)等肌力失衡性肩部问题,康复训练的关键是恢复肩部肌力平衡。稳定控制肌群的激活抑制与肩关节周围主要的大肌肉群的过度激活相关^[14],因而强化稳定肌群的同时,减少 UT、AD 等大肌肉群的主导和代偿作用,调控肌肉工作中的运动失衡、促进肌群间协同工作是优化肩部康复动作的研究重点。这与王雪鹏^[18]提出斜方肌过度激活导致运动失衡,是肩袖撕裂患者 SD 的产生机制相一致。

表 6 开闭链两种条件下三角前肌和三角后肌共激活比和 95% 的置信区间
Tab. 6 The co-activation ratio and 95% confidence interval of the anterior deltoid and posterior deltoid muscles under both open and closed chain conditions

运动类型	运动方式	共激活比	置信区间
开链(OKC)	上提	5.27±3.63	(2.97,7.58)
	下降	4.99±3.34	(2.86,7.11)
	前移	9.56±5.28	(6.21,12.92)
	后缩	8.53±4.45	(5.70,11.36)
	上回旋	3.76±2.55	(2.14,5.39)
	下回旋	6.05±4.99	(2.88,9.23)
闭链(CKC)	上提	4.15±3.73	(1.79,6.52)
	下降	6.80±3.54	(4.55,9.05)
	前移	7.54±3.79*	(5.13,9.95)
	后缩	3.25±5.04*	(0.04,6.45)
	上回旋	6.62±2.45	(5.06,8.12)
	下回旋	3.56±2.40	(2.04,5.08)

本研究通过对比 OKC 和 CKC 条件下、肩关节水平外展 90°时肩胛骨运动特征,发现肩胛骨在 CKC 下,斜方肌的激活均低于 OKC,CKC 对于 SD 人群的恢复具有指导意义,CKC 肩上提动作中 UT 的贡献率显著低于 OKC($P<0.05$),说明 CKC 更利于抑制 UT 过度激活。肩下降运动中 UT:MT 和 UT:LT 的值均小于 1,提示此时斜方肌的协同工作能力达到峰值,该运动对 MT、LT 的激活作用更显著,UT 的代偿减少,Tsyn 作用增强,这与 Camargo 等^[17]提出的“斜方肌协同训练”理论一致。这一发现对肩部异常形态(如 UCS)的康复具有重要指导意义。USC 通常表现为上斜方肌和肩胛提肌的过度激活和中、下斜方肌和前锯肌的活动不足^[11]。这可能与目标动作是在肩关节外展 90°的条件下进行有关。Kara 等^[19]研究也证实,斜方肌的活动程度随着肩外展角度的增加而提升,相较于肩外展 45°、90°,肩外展 0°时,UT:MT 与 UT:LT 的值更低,这表明肩胛骨运动的起始角度是影响 Tsyn 的重要原因。在正常肩部抬高过程中,肩胛骨会通过一定的外旋和上旋角度来维持肩峰下间隙,以此降低抬高过程中肩部损伤概率^[20]。进行肩胛骨上提和上回旋运动时 UT:MT、UT:LT 的值显著增加(表 5),其原因不仅包括动作本身产生的力学刺激,还与“肩关节外展 90°为起始位”引发的 UT 代偿性激活有关。CKC 肩上提动作中 UT 的贡献率显著低于 OKC($P<0.05$),说明 CKC 更利于抑制 UT 过度激活,适用于 UCS 患者的稳定性训练。综上,在以“调控肩部肌肉”为目标的肩胛骨上提、上回旋运动中,CKC 模式的效果优于 OKC 模式,且二者存在显著性差异($P<0.05$)。

Lee 等^[21]结合以往研究发现,肩袖撕裂中 IS 损伤占 39%,因 IS 力量薄弱,导致肌肉间的生物力学

失衡是诱发肩袖损伤的重要原因之一。研究表明在 OKC 肩前移和肩下回旋动作中,IS 的激活水平显著高于 CKC($P<0.05$),提示 OKC 更适用于 IS 等肩袖肌群的针对性力量强化训练。这一结果与杨笛^[22]的研究相一致,即 OKC 动作能更高效地激活孤立肌群。CKC 后缩运动通过减少 PD 的过度激活($P<0.05$),促进 PD 与 IS 的协同平衡。对于肩袖损伤的防治而言,恢复肌群运动失衡是核心,不仅需强化薄弱肌群,更需调控 PD 等优势肌群的激活程度。调节 PD 与 IS 肌肉间的生物力学失衡是防治肩袖损伤的关键,如果仅发展 IS 等肩袖肌群力量,选择 OKC 效果明显优于 CKC,但对于肩袖损伤患者,训练的核心目标是恢复肌群间的运动平衡,需结合不同模式的动作特征选择方案。研究表明,在肩胛骨的开闭链运动中,进行闭链肩胛骨后缩和上回旋运动、开链下回旋运动,能最大程度达到 PD 与 IS 的运动平衡,对于肩袖损伤的防治有实践意义。

3.2 三角肌前束与三角肌后束共激活特征

在肩胛骨的开闭链运动中,AD 与 PD 的共激活模式表现出显著差异。研究结果显示,开链条件下肩前移和后缩运动中 PD 与 AD 的共激活程度显著高于闭链条件($P<0.05$),尤其是在肩前移动作中,共激活比值达到最大(9.56 ± 5.28)。这一现象可能与开链运动缺乏远端固定支撑有关,上肢末端需通过增加主动肌与拮抗肌的协同收缩来对抗重力和惯性,以维持肩胛骨的动态稳定性^[14]。闭链运动通过减少 PD 的过度激活(如闭链肩前移和后缩运动中 PD 贡献率显著降低, $P<0.05$),优化主动肌-PD 与拮抗肌-AD 的协同收缩模式。研究表明,当共激活比值接近 1 时,关节稳定性最佳^[10]。本研究中,闭链后缩运动为(3.25 ± 5.04),显著低于开链条件的(8.53 ± 4.45),表明闭链运动更利于平衡三角肌的激活,从而增强肩关节的稳定性,符合 Begalle 等^[10]提出的“共激活优化理论”。该发现对 UCS(如圆肩体态)的康复具有重要指导价值,圆肩体态者常表现为 PD 肌力不足、AD 过度激活的特征^[11]。肩关节外展 90° 下的开链肩前移动作可显著激活 PD(共激活比 9.56 ± 5.28),适用于 PD 的针对性强化训练,以改善三角肌肌力失衡。然而,闭链运动依托多关节协同与轴向负荷,更适用于整体稳定性训练,尤其适用于肩胛骨动力障碍(SD)或肩袖损伤患者^[9]。李磊等^[23]的研究也证实,闭链运动可通过减少 PD 的代偿性激活,促进前锯肌(IS)等肩袖肌群的功能恢复,验证了此结论。

4 结论与建议

本研究通过对比肩关节外展 90° 状态下,肩胛骨开链(OKC)与闭链(CKC)六种运动模式的肌电特征,揭示了两种运动模式对肩部肌群激活的差异性影响。OKC 可显著激活目标肌肉(如 IS、PD),适合强化肌力;但 OKC 易诱发肌肉代偿,导致运动失衡。CKC 则更能有效提升肩部肌群的协同收缩能力,优化肩关节整体稳定性,对于上交叉综合征这类由于 UT 发达,MT、LT 肌力薄弱引发的肌力失衡型肩部异常体态,具备重要的临床防治指导价值。闭链肩下降动作中 UT:MT/LT 值均 <1 ,可促进斜方肌协同;CKC 通过减少 PD 过度激活,改善肩袖肌群平衡;闭链肩胛骨后缩运动时,三角肌共激活比趋近 1,有利于增强关节稳定性。

综上,建议未来在对运动肌力失衡患者的早期运动干预和康复中以闭链动作为主,改善协同性;进入肌力恢复阶段再结合开链动作强化薄弱肌群。训练核心为强化中斜方肌、下斜方肌及肩袖肌群的肌力,同时松解并放松上斜方肌等肩胛骨上提、上旋肌群。后续研究可进一步探讨肩关节在不同外展角度下,肩胛骨开、闭链运动的肌电活动规律,为肩部姿态异常的预防提供运动方案。

参考文献:

- [1] BERNHARDSSON S, KLINTBERG I H, WENDT G K. Evaluation of an exercise concept focusing on eccentric strength training of the rotator cuff for patients with subacromial impingement syndrome[J]. Clinical Rehabilitation, 2011, 25(1): 69-78.

- [2] LANGENFELD A, HUMPHREYS B K, DE BIE R A, et al. Effect of manual versus mechanically assisted manipulations of the thoracic spine in neck pain patients: Study protocol of a randomized controlled trial[J]. *Trials*, 2015, 16: 233.
- [3] GAFFNEY B M, MALUF K S, DAVIDSON B S. Evaluation of novel EMG biofeedback for postural correction during computer use[J]. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 2016, 41(2): 181-189.
- [4] KAMPER S J, APELDOORN A T, CHIAROTTO A, et al. Multidisciplinary biopsychosocial rehabilitation for chronic low back pain: Cochrane systematic review and meta-analysis[J]. *British Medical Journal*, 2015, 350: h444.
- [5] MOHAMED A A, JAN Y K, SAYED W HEL, et al. Dynamic scapular recognition exercise improves scapular upward rotation and shoulder pain and disability in patients with adhesive capsulitis: A randomized controlled trial[J]. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, 2020, 28(3): 146-158.
- [6] LE H V, LEE S J, NAZARIAN A, et al. Adhesive capsulitis of the shoulder: Review of pathophysiology and current clinical treatments[J]. *Shoulder & Elbow*, 2017, 9(2): 75-84.
- [7] 姜从玉, 李骥耀, 张鹏, 等. 本体感觉训练治疗肩峰下撞击综合征研究进展[J]. *中国运动医学杂志*, 2013, 32(7): 637-645.
- [8] 何岚娟, 马燕红. 肩胛骨动力障碍与肩关节疾病[J]. *中国康复医学杂志*, 2016, 31(2): 244-247.
- [9] ROEHL T, LAMBERT B S, ANKERSEN J, et al. Optimal blood flow restriction occlusion pressure for shoulder muscle recruitment with upper extremity exercise[J]. *The American Journal of Sports Medicine*, 2023, 51(7): 1859-1871.
- [10] BEGALLE R L, DISTEFANO L J, BLACKBURN T, et al. Quadriceps and hamstrings coactivation during common therapeutic exercises[J]. *Journal of Athletic Training*, 2012, 47(4): 396-405.
- [11] LONGO U G, RISI AMBROGIONI L, BERTON A, et al. Scapular dyskinesis: From basic science to ultimate treatment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(8): 2974.
- [12] MCCIURE P, TATE AR, KAREHA S, et al. A clinical method for identifying scapular dyskinesis, part 1: Reliability [J]. *Athl Train*, 2009, 44(2):160-164.
- [13] TATE AR, MCCIURE P, KAREHA S, et al. A clinical method for identifying scapular dyskinesis, part 2: Validity[J]. *Athl Train*, 2009, 44(2):165-173.
- [14] KIBLER WBEN, LUDEWIG P M, MCCLURE P W, et al. Clinical implications of scapular dyskinesis in shoulder injury: The 2013 consensus statement from the ‘Scapular Summit’ [J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2013, 47(14): 877-885.
- [15] CHESTER R, SMITH T O, HOOPER L, et al. The impact of subacromial impingement syndrome on muscle activity patterns of the shoulder complex: A systematic review of electromyographic studies[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2010, 11: 45.
- [16] 张思渊, 张培珍, 周兴龙. 不同干预方式对斜方肌在运动中激活模式的影响[J]. *中国康复理论与实践*, 2021, 27(8): 951-961.
- [17] CAMARGO P R, NEUMANN D A. Kinesiologic considerations for targeting activation of scapulothoracic muscles-part 2: Trapezius[J]. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 2019, 23(6): 467-475.
- [18] 王雪鹏, 何勇. 肩袖撕裂患者肩胛骨运动障碍的表面肌电图评价[J]. *中国组织工程研究*, 2026, 30(17): 4318-4324.
- [19] KARA D, HARPUR G, DUZGUN I. Shoulder-abduction angle and trapezius muscle activity during scapular-retraction exercise[J]. *Journal of Athletic Training*, 2021, 56(12): 1327-1333.
- [20] TSURUIKE M, ELLENBECKER T S. Serratus anterior and lower trapezius muscle activities during multi-joint isotonic scapular exercises and isometric contractions[J]. *Journal of Athletic Training*, 2015, 50(2): 199-210.
- [21] LEE S B, ITOI E, O’DRISCOLL S W, et al. Contact geometry at the undersurface of the acromion with and without a rotator cuff tear[J]. *Arthroscopy*, 2001, 17(4): 365-372.
- [22] 杨笛. 不同开闭链运动中肩胛带肌群激活模式的研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2019.
- [23] 李磊, 高奉, 付一峰, 等. 伴Ⅲ型肩胛动力障碍肩袖撕裂患者的肩胛骨运动及肩部功能表现[J]. *中国运动医学杂志*, 2024, 43(3): 167-174.

Electromyographic Characteristics and Rehabilitation Optimization of Scapular Open and Closed Chain Movements

LI Chunhong, ZHANG Guizhong

(*Institute of Physical Education, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China*)

Abstract: Healthy male college students were recruited for the study, and subjects were screened using the Scapular Dyskinesia Test (SDT). Selected participants underwent experiments involving scapular elevation, depression, protraction, retraction, upward rotation, and downward rotation to investigate the IEMG, RMS, muscle contribution rates, and muscle group coordination of shoulder muscles during scapular movements in both open kinetic chain (OKC) and closed kinetic chain (CKC) conditions. The results are as follows. (1) During scapular elevation, the activation levels of the upper trapezius (UT), lower trapezius (LT), posterior deltoid (PD), and anterior deltoid (AD) under closed kinetic chains are significantly lower than those under open kinetic chains ($P < 0.05$). (2) During shoulder depression and protraction, the activation of LT, AD, PD, and infraspinatus (IS) under closed kinetic chains is significantly lower than that under open kinetic chains ($P < 0.05$). (3) During scapular retraction and upward rotation movements, the activation levels of the posterior deltoid (PD) and infraspinatus (IS) under closed kinetic chains are significantly lower than those under open kinetic chains ($P < 0.01$). (4) Under closed kinetic chains, the contribution rate of the upper trapezius (UT) during scapular elevation and protraction is significantly greater than that under open kinetic chains ($P < 0.05$), while the contribution rate of PD during shoulder protraction and retraction is significantly lower than under open kinetic chains ($P < 0.05$). (5) During scapular depression, the ratios of UT to middle trapezius (MT) and UT to LT under both open and closed kinetic chains are less than 1. The study indicates that open kinetic chains (OKC) are suitable for strength enhancement and targeted muscle activation, while closed kinetic chains (CKC) are more advantageous for improving muscle synergy ($UT:MT/LT < 1$), reducing compensation (inhibition of PD), and enhancing stability.

Key words: open kinetic chain movement; closed kinetic chain movement; scapula; synergy; movement imbalance

【责任编辑 张颖娟】