

文章编号 1004-924X(2021)02-0278-08

用于慢性软组织损伤的大功率光谱治疗仪

徐建根¹, 崔锦江^{1*}, 董宁宁^{1,2}, 曹逸兴²

(1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏苏州 215163;

2. 复旦大学工程与应用技术研究所, 上海 200433)

摘要: 光谱波段和治疗光强度是光治疗的关键, 决定了适应症、治疗深度和疗效。基于水滤红外线 A 原理, 本文采用大功率高效卤素灯为光源, 通过对光束整形、密闭液体过滤器以及电子学控制等系统设计了大功率光谱治疗仪, 其基本性能与国外先进产品基本相同。该治疗仪的光谱、光功率密度、电气安全性和电磁兼容性通过了医疗器械注册检验, 并应用于慢性软组织损伤炎症、疼痛的临床治疗中。临床实验结果显示, 71 例患者在经过(6±1)天治疗后的总有效率达 100%, 显效率达 80.28%, 未发生不良反应。该治疗仪提升了有效光谱宽度和治疗光强度, 降低了热效应, 提高了穿透深度和疗效, 有望广泛用于软组织的损伤、慢性炎症、疼痛及伤口愈合等领域。

关键词: 医用光学; 光谱治疗; 波段; 光功率密度; 治疗深度

中图分类号: TN202 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212902.0278

High-power spectral instrument for chronic soft tissue injury

XU Jian-gen¹, CUI Jin-jiang^{1*}, DONG Ning-ning^{1,2}, CAO Yi-xing²

(1. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China;*

2. *Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

* *Corresponding author, E-mail: cuijj@sibet.ac.cn*

Abstract: In the course of phototherapy, the spectral band and therapeutic light intensity are the key factors that determine the indications, therapeutic depth, and curative effect. Based on the principle of water-filtered infrared A, a high-power halogen lamp was used as the light source in this study. A high-power spectral therapeutic apparatus, comprising a beam shaper, a closed liquid filter, and an electronic control system, was designed. Its basic performance was equivalent to those of advanced foreign products. The spectrum, optical power density, electrical safety, and electromagnetic compatibility passed the medical device registration test. The device was used clinically for 71 patients to treat chronic soft tissue injury, inflammation, and pain. After (6±1) days of treatment, the total effective rate is 100%, and the significant efficiency is 80.28%, without adverse reactions being recorded. The therapeutic apparatus improves the effective spectral width and the therapeutic light intensity, reduces the thermal effect, increases the penetration depth and curative effect, and can be widely used in soft tissue injuries, chronic diseases,

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2020-10-15.

基金项目: 吉林省与中科院合作项目(No. 2019SYHZ0032); 吉林省重点科技研发项目(No. 20180201047YY); STS 双创引导项目(No. KFJSTS-SCYD-318); 季华实验室项目(No. X190231UZ190)

pain and wound healing.

Key words: medical optics; spectrum therapy; waveband; light intensity; treatment depth

1 引言

软组织损伤及其引起的慢性炎症和疼痛是临床中最常见多发的疾病,其损伤部位长期反复发作并引起慢性炎症和疼痛,严重影响着患者的身心健康和生活质量,严重时甚至致残。因其发病率高、根治困难,目前软组织损伤已被世界卫生组织列为三大类疑难病之一^[1]。除药物之外,物理因子是临床中最常使用的手段,常用的方法有针灸、电疗法、超短波疗法、冲击波疗法和超声波疗法等^[2-7],但上述疗法存在着有创,易交叉感染,患者依从性差,需建昂贵屏蔽房等缺陷。近年来,光疗法因其非接触式、依从性好、疗效确切,已成为治疗软组织损伤的临床首选。其中,红光、红外线热辐射以及LED光谱设备的应用最为广泛,但也存在光谱窄、光功率密度低、穿透深度浅和热效应严重等问题。20世纪末,德国Hoffmann教授基于自然加热思想和大气层过滤太阳光的原理^[8]研发了一种基于水滤红外线A(wIRA)原理的过滤器和治疗仪,其光谱涵盖了可见光和近红外A(760~1 400 nm)波段,功率密度达数百mW/cm²^[9-10],克服了传统光疗设备光谱窄、能量低、热效应显著等缺点。自此,欧美发达国家针对wIRA及其治疗机理及临床应用开展了大量的研究^[11-13],并将该技术广泛应用于治疗各类伤口^[14-15]。而我国对wIRA技术的研究则在引进威伐光设备之后,并且多集中在wIRA的临床应用中,如带状疱疹的止痛、筋膜炎治疗、中耳炎、膝关节炎等疾病的治疗^[16-21]。目前为止,国内不仅鲜有基于wIRA原理的治疗设备,用于慢性软组织损伤的临床研究也较为少见。

wIRA原理模拟大气层对太阳光的过滤作用,利用密闭液体过滤器将光谱中容易使皮肤热损伤的波段吸收,保留了可见光波段及能够深穿透的近红外A(760~1 400 nm)波段^[9,22]。本文基于该原理设计了大功率光谱治疗仪,并应用于软组织炎症和疼痛的临床中。该设备在软组织损伤的临床治疗中疗效显著,性能达到了国外先进产品的水平。

2 水滤红外线A的基本组成及原理

图1所示是基于wIRA原理的大功率光谱治疗仪及其组成。光谱治疗仪主要由主机、控制系统和机械调节装置等组成。其中,水滤红外线A系统构成了主机,由光源、光束整形装置、液体过滤器、滤光片、冷却装置等组成;各类信号则由治疗仪控制系统输出。

光源模拟太阳光辐射,发出的光束经过整形装置反射、匀化,绝大部分通过了密闭液体过滤器,通过液体过滤器的滤光作用,吸收了绝大部分容易使皮肤热损伤的近红外B波段及其他有害波段,最后通过滤光片的作用形成了治疗光谱。

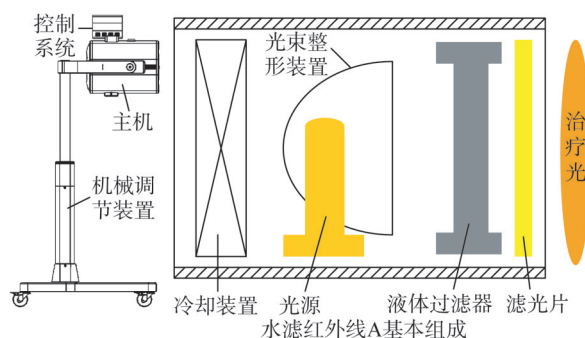


图1 大功率光谱治疗仪的水滤红外线A系统组成
Fig. 1 Composition of water-filtered infrared-A system for high-power spectral therapeutic apparatus

3 光谱治疗仪的设计

3.1 光源的选用

光源的选用考虑了光谱范围、功率、寿命和效率等因素。由文献^[9,23]可知,对于人类来说最适宜的太阳辐射是经过大气层过滤的太阳辐射曲线,如图2所示,涵盖了可见光和近红外波段;另外,考虑到波段决定适应症以及近红外A能够深层穿透^[22]等因素,光源光谱范围至少应覆盖可见光和近红外A波段。

本文选用了高效卤素灯(230 V, 500 W)为光源,其光谱曲线与达到海面的太阳辐射光谱最为

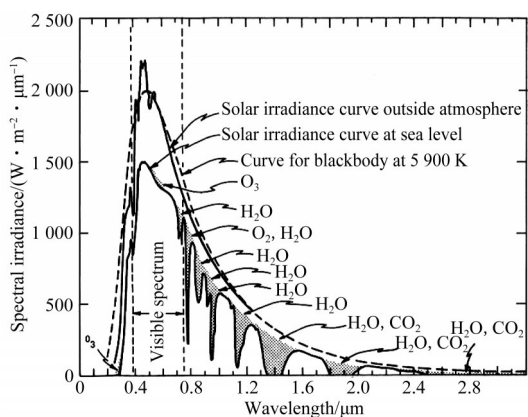


图 2 大气层外和海平面上的太阳辐射曲线^[9]

Fig. 2 Spectral solar irradiance outside atmosphere and at sea level^[9]

贴合,且寿命长(2000 h)、经济性好,如图 3 所示。

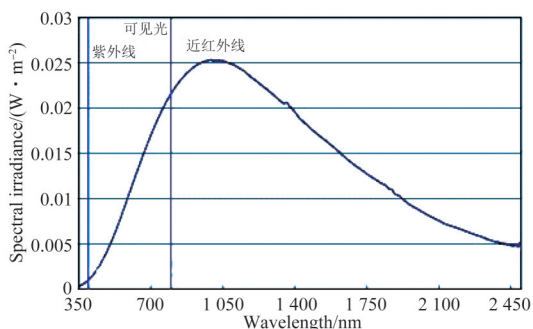


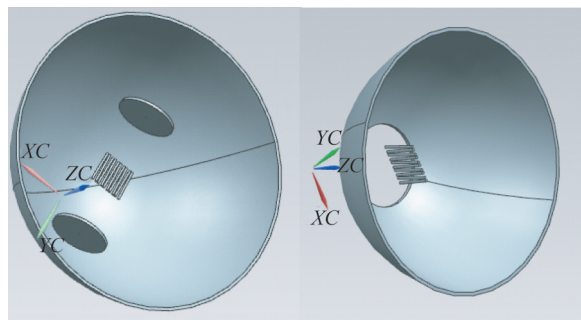
图 3 卤素灯的光谱曲线

Fig. 3 Spectral curve of halogen

3.2 光束整形装置的设计

卤素灯光源通常与反光杯配合使用,由反光杯完成对光线的汇聚、反射和匀化。根据实际使

用情况,利用 TracePro 软件建立侧面灯丝光源(光源从反光杯侧面安装)与灯丝光源(光源从反光杯尾部安装)两种结构模型,如图 4 所示。



侧面灯丝光源 灯丝光源

图 4 两种灯丝结构模型

Fig. 4 Two models of filament construction

由上述模型及配光曲线得到仿真结果和反光杯实物,如图 5 和图 6 所示。由仿真结果可知:侧面灯丝光源结构所得的反光杯(侧置式)效率达 0.8,且均匀性较好;灯丝光源结构仿真所得的反光杯(后置式)效率为 0.53,均匀性相对较差。

经实验测得:在距离出光面 25 cm 的治疗面上,光功率密度(10 cm × 10 cm 面积内取 9 个点)分布如表 1 和表 2 所示。

由表中数据可知:经两种结构反光杯光束整形后,在相同距离治疗面上,由后置式反光杯光束整形所得功率密度要大于由侧置式反光杯光束整形所得的功率密度,且效率较高,结果与仿真相反。分析原因如下:侧置式反光杯在侧面有较大安装孔,光线在反射时,部分光线从安装孔内漏出,故其功率密度较低。综上,本文采用后

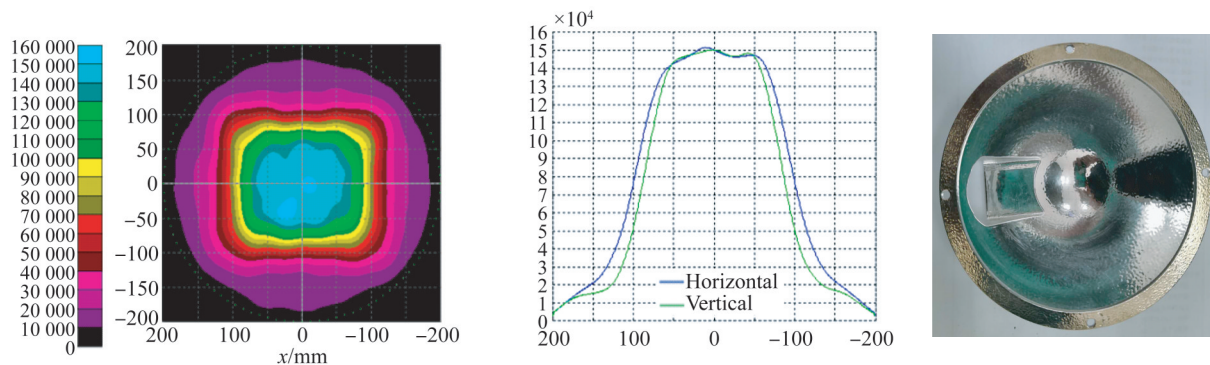


图 5 侧面灯丝光源仿真结果及侧置式反光杯

Fig. 5 Simulation results of side filament light source and side reflector cup

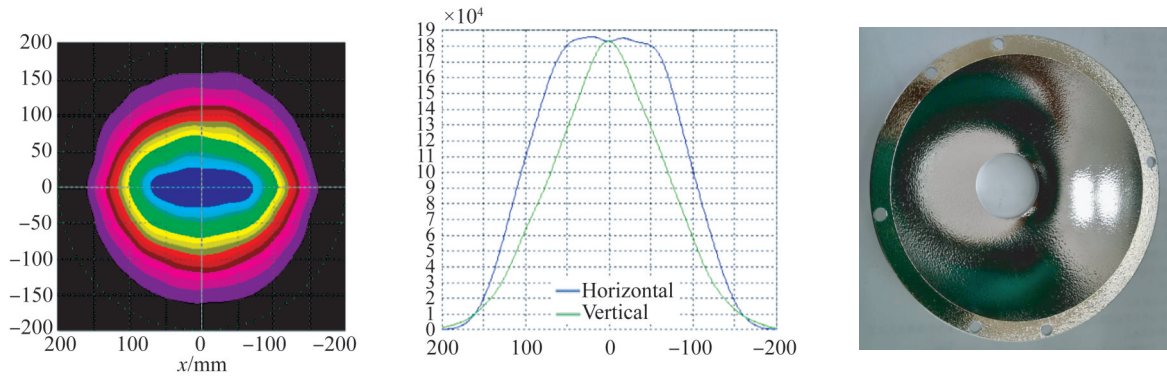


图 6 灯丝光源结构仿真结果及后置式反光杯

Fig. 6 Simulation results of filament light source structure and rear reflector cup

表 1 侧置式反光杯功率密度分布表(液体厚度为 28 mm)

Tab. 1 Power density distribution of side-mounted reflective cup with liquid thickness of 28 mm

功率密度/ (mW·cm ⁻¹)	-5 cm (水平)	0	5 cm (水平)
-5 cm(竖直)	69.4	135.4	75.4
0	105.6	185.2	95.6
5 cm(竖直)	60.5	100.6	72.5

表 2 后置式反光杯功率密度分布表(液体厚度为 28 mm)

Tab. 2 Power density distribution of rear reflective cup with liquid thickness of 28 mm

功率密度/ (mW·cm ⁻¹)	-5 cm (水平)	0	5 cm (水平)
-5 cm(竖直)	90.2	175.7	88.8
0	121.4	234.3	112.2
5 cm(竖直)	80.7	163.4	78.6

置式反光杯为光束整形装置。

3.3 过滤器的设计

经光束整形后的光线须经过液体过滤器的吸收作用,才能滤除容易引起皮肤热损伤等的有害波段。其中,液体过滤器的结构、散热性能、密封性能、材料和耐压能力是关键。为了获得高效的散热性能和良好的密封性能,过滤器采用了工字型结构,如图 7 所示。工字型的过滤器利用光学镜片将过滤液体密封在金属腔体内,光线通过光学玻璃后绝大部分有害波段被过滤液吸收,金属腔体迅速将热量传导至四周的高密翅片并由

风扇将热量带出治疗仪。

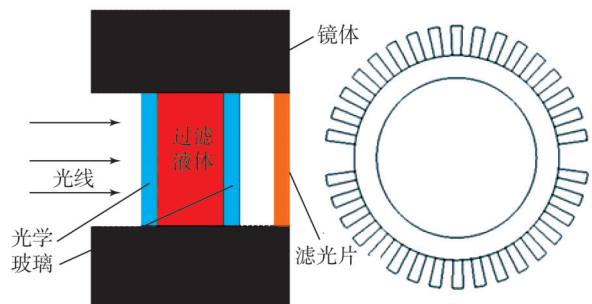


图 7 液体过滤器结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of liquid filter

首先,在选择玻璃时需考虑其通光波段、透射率、耐压性、耐热性以及膨胀系数等因素。本文选用 ZS-1 光学石英玻璃,该玻璃具有通光波段宽、透射率高,耐压、耐热性好,热膨胀系数小等特点。3 种光学石英玻璃的通光波段及性能分别如图 8 和表 3 所示。

最终,利用金属镜体、密封垫、光学玻璃、滤

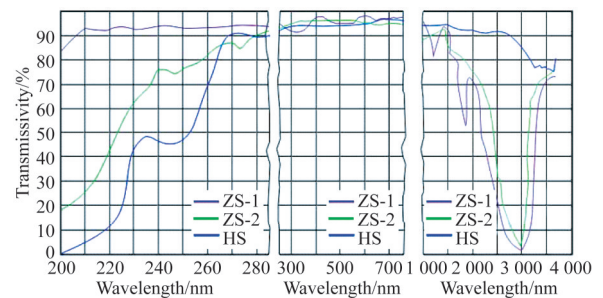


图 8 三种光学石英玻璃的通光波段

Fig. 8 Optical wavebands of three optical quartz glasses

表 3 光学石英玻璃性能

Tab. 3 Performance of optical quartz glass

性能	标准值
光谱特性/nm	180~2 500
平均透射率/%	90
抗压强度/MPa	1 100
抗弯强度/MPa	67
热导率(20℃)/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	1.4
热膨胀系数/℃ ⁻¹	5.5×10 ⁻⁷
长期使用温度/℃	1 100

光片和过滤液体等制成的液体过滤器如图 9 所示。该液体过滤器具有密封性好、散热性能佳等优点。

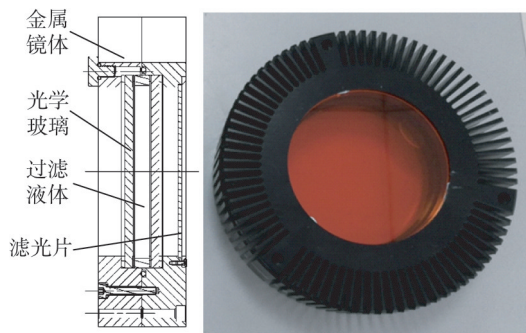


图 9 液体过滤器

Fig. 9 Liquid filter

3.4 电学控制设计

治疗仪的电学设计主要包括对光源、风扇、显示屏、电动升降和传感器等的驱动和控制,如图 10 所示。利用 ACDC 模块将交流转换为直流,为主控电路供电,主控完成相关数据的输出显示和存储、显示屏驱动、信号响应等控制;继电器

负责光源和风扇的开断;显示屏负责显示治疗时间和状态标识。

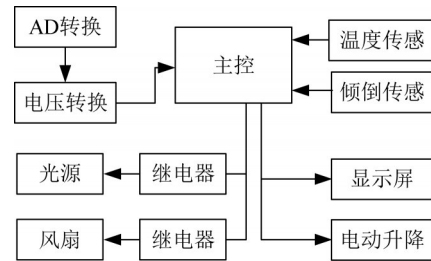


图 10 光谱治疗仪电学系统的基本结构

Fig. 10 Basic structure of electrical system of spectral therapeutic apparatus

本设计主控由 STM32F103 系列微处理器和接口电路等构成,其中 STM32F103VET6 芯片具有以下性能:

- (1) 高性能的 ARM Cortex-M3 32 位的 RISC 内核,工作频率为 72 MHz;
- (2) 内置高速存储器,丰富的增强 I/O 端口和连接到两条 APB 总线的外设;
- (3) 2 个 12 位的 ADC、3 个通用 16 位定时器和 1 个 PWM 定时器。

该芯片能够实现光谱治疗仪的实时控制,且经济性良好。

4 实验

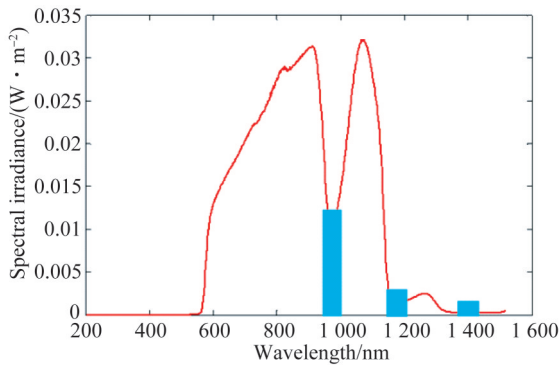
为了验证光谱治疗仪的有效性和安全性,并为临床试验提供依据,需要测试光谱治疗仪的全性能和电磁兼容(EMC)性能。本光谱治疗仪的全性能(江苏省医疗器械检测所,2018ZC2481)和电磁兼容性(江苏省医疗器械检测所,2018ZC2481-EMC)已经通过了医疗器械注册检验。其中,有效光谱和治疗光强度与国外先进产品的对比如图 11 和表 4 所示。

综上所述,本光谱治疗仪的有效光谱范围与威伐光设备有效光谱基本一致,均在 560~1 400

表 4 两种光谱治疗仪的治疗光强度

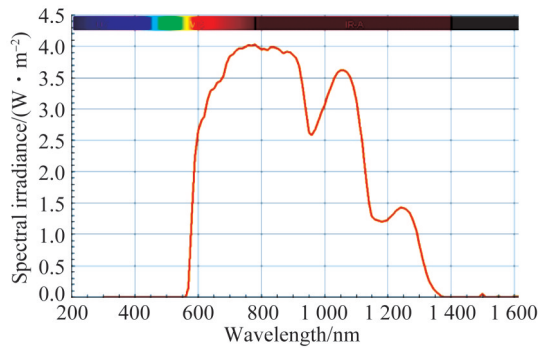
Tab. 4 Therapeutic light intensity of two kinds of spectral therapeutic apparatus

仪器	治疗光强度/(mW·cm ⁻²)	治疗光强度/(mW·cm ⁻²)
本光谱治疗仪	242(距离出光面 26 cm)	491(距离出光面 14 cm)
威伐光(标准值)	230	480



(a) 本光谱治疗仪的有效光谱

(a) Effective spectrum of proposed spectral instrument



(b) 威伐光的有效光谱^[9]

(b) Effective spectrum of wIRA instrument^[9]

图 11 两种光谱治疗仪的有效光谱

Fig. 11 Effective spectra of two kinds of spectral instrument

nm 之间,几乎滤除了所有热效应显著波段(近红外 B, 1 400~3 000 nm),大大降低了热损伤风险;同时,治疗光强度基本相同。由此可知,本光谱治疗仪的基本性能已达国外先进产品水平。

5 光谱治疗仪的临床应用

5.1 试验方法

将 144 例软组织损伤的炎症和疼痛患者随机分为两组:试验组(72 例)和对照组(72 例)。试验组采用光谱治疗仪照射,每天一次,每次照射 20 min,连续使用产品(6±1)天。对照组采用红外线治疗仪照射(注册号:渝械注准 20182260052),每天一次,每次照射 20 min,连续使用产品(6±1)天。治疗完成后,利用视觉模拟评分法(Visual Analogue Scale, VAS)比较两组的有效率及产品依从性。实际完成 141 例,试验组脱落

1 例,对照组脱落 2 例,剔除 0 例。

5.2 结果

临床试验的主要结果如表 5~表 7 所示。由表 5 可知,在本研究中试验组治疗显效率为 80.28%,(6±1)天的有效率为 100%;对照组的显效率为 28.57%,(6±1)天的有效率为 100%,试验组显效率明显优于对照组。在产品使用依从性方面,试验组产品为 98.61%,对照组为 97.22%,两组仪器的使用性能良好,均未发生不良事件。

综上可知,本光谱治疗仪在 71 例软组织损伤的炎症和疼痛的临床治疗中,经(6±1)天治疗后显效率高达 80.28%,未出现皮肤热损伤等不良反应,光谱治疗的疗效得到了提高。

表 5 两组总有效率的分析结果(per protocol set,符合方案集,PPS)

Tab. 5 Analysis results of two sets of total efficiency (per Protocol Set, PPS)

组别	临床痊愈	显效	有效	无效	显效率	总有效率/%
试验组	0	57	14	0	80.28	100
对照组	0	20	50	0	28.27	100

表 6 产品使用依从性分析

Tab. 6 Result for product compliance analysis

组别	病例总数	完成例数	依从性/%
试验组	72	71	98.61
对照组	72	70	97.22

表 7 机器性能指标

Tab. 7 Performance of machine

组别	优	良	差	总有效率/%
试验组	71	0	0	100
对照组	70	0	0	100

6 结论

本文针对光谱治疗中对宽波段、高功率、深穿透和低热效应的临床需求,基于 wIRA 原理,设计了以高功率卤素灯、高效反光杯、高密封过

滤器和电学控制系统等构成的大功率光谱治疗仪。该光谱治疗仪的有效光谱宽、治疗功率高,通过医疗器械对全性能、电磁兼容性等的注册检验,证明了该仪器的安全性。比较了与国外先进产品的基本性能,并将它应用于软组织损伤的炎

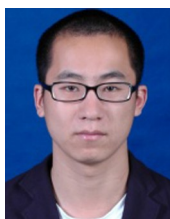
症和疼痛的临床治疗。试验结果表明:该光谱治疗仪能有效治疗软组织损伤,经(6±1)天治疗后,有效率为100%,显效率高达80.28%,且疗效优于常用红外线产品,产品患者依从性良好。未来该治疗仪有望应用于其他适应症的临床治疗中。

参考文献:

- [1] 杜艳玉,张春波. 中国康复医学会第22届疗养康复学术会议论文汇编[C]. 北京, 2011:157-160.
DU Y Y, ZHANG CH B. The 22nd Convalescent rehabilitation Academic Conference of Chinese Rehabilitation Medical Association [C]. Beijing, 2011: 157-160. (in Chinese)
- [2] 陈峰,王芳玲. 常用物理因子疗法的应用调查与分析[J]. 福建体育科技, 2015, 34(2): 12-15.
CHEN F, WANG F L. Investigation and analysis on the frequently physical factors therapy applications [J]. *Fujian Sports Science and Technology*, 2015, 34(2): 12-15. (in Chinese)
- [3] 杜永红,罗志仙,才华,等. 多元化有序物理因子治疗在康复临床中的作用[J]. 中西医结合心血管病电子杂志, 2019, 7(17): 198-199.
DU Y H, LUO ZH X, CAI H, *et al.*. The multiplex role and ordered physical factor therapy in rehabilitation clinic [J]. *Cardiovascular Disease Electronic Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine*, 2019, 7(17): 198-199. (in Chinese)
- [4] 丁文兵,任伟. 慢性软组织损伤诊断治疗现状及进展[J]. 中国实用医药, 2009, 4(6): 225-227.
DING W B, REN W. Status and progress of diagnosis and treatment in chronic soft tissue injury [J]. *China Practical Medicine*, 2009, 4(6): 225-227. (in Chinese)
- [5] 王永慧,岳寿伟. 软组织疼痛的物理因子治疗[J]. 中国临床康复, 2002, 6(16): 2356-2357.
WANG Y H, YUE SH W. Soft tissue pain and physiotherapy [J]. *Modern Rehabilitation*, 2002, 6(16): 2356-2357. (in Chinese)
- [6] 张琛,周超,常鹏. 软组织相关慢性疼痛治疗现状及发展[J]. 中国疗养医学, 2017, 26(4): 361-364.
ZHANG CH, ZHOU CH, CHANG P. Current situation and development of treatment of chronic pain related to soft tissue [J]. *Chinese Journal of Convalescent Medicine*, 2017, 26(4): 361-364. (in Chinese)
- [7] 徐颖,黄臻,罗子芮,等. 体外冲击波联合威伐光治疗桡骨茎突狭窄性腱鞘炎的临床疗效观察[J]. 中国康复医学杂志, 2019年, 34(9): 1092-1094.
XU Y, HUANG ZH, LUO Z R, *et al.*. The present situation of the treatment of soft tissue related chronic pain and the development of extracorporeal shock wave combined with Vivarlight in the treatment of radial styloid stenosing tenosynovitis [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2019, 34(9): 1092-1094. (in Chinese)
- [8] MENEZES S, COULOMB B, LEBRETON C, *et al.*. Non-coherent near infrared radiation protects normal human dermal fibroblasts from solar ultraviolet toxicity [J]. *Journal of Investigative Dermatology*, 1998, 111(4): 629-633.
- [9] HOFFMANN G. Principles and working mechanisms of water-filtered infrared-A (wIRA) in relation to wound healing [J]. *GMS Krankenhaushygiene Interdisziplinär*, 2007, 2(2): Doc54.
- [10] FELBERT VVON, SCHUMANN H, MERCER J B, *et al.*. Therapy of chronic wounds with water-filtered infrared-A (wIRA) [J]. *GMS Krankenhaushygiene Interdisziplinär*, 2008, 2(2): Doc52.
- [11] ALJASIR A, PIERSON T, HOFFMANN G, *et al.*. Management of donor site infections in split-thickness skin graft with water-filtered infrared-A (wIRA) [J]. *GMS Interdisciplinary Plastic and Reconstructive Surgery DGPW*, 2018, 7: Doc03.
- [12] KÖNIG A, MISSALLA S, VALESKY E M, *et al.*. Effect of near-infrared photobiomodulation therapy in a cellular wound healing model [J]. *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, 2018, 34(4): 279-283.
- [13] PIAZENA H, MEFFERT H, UEBELHACK R. Spectral remittance and transmittance of visible and infrared-A radiation in human skin—comparison between *in vivo* measurements and model calculations [J]. *Photochemistry and Photobiology*, 2017, 93(6): 1449-1461.

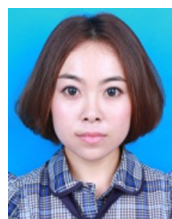
- [14] MERCER J B, NIELSEN S P, HOFFMANN G. Improvement of wound healing by water-filtered infrared-A (wIRA) in patients with chronic venous stasis ulcers of the lower legs including evaluation using infrared thermography [J]. *German Medical Science*, 2008, 6: Doc11.
- [15] HOFFMANN G, HARTEL M, MERCER J B. Heat for wounds-water-filtered infrared-A (wIRA) for wound healing-a review [J]. *German Medical Science*, 2016, 14: Doc08.
- [16] 马维平, 朱兵, 王文, 等. 水滤红外线-A与普通红外线照射治疗腰椎间盘突出症的疗效对比[J]. *中国医刊*, 2017, 52(12):58-60.
MA W P, ZHU B, WANG W, *et al.*. A comparative study on the effect of water filtered infrared-A irradiation and common infrared irradiation in the treatment of lumbar disc herniation [J]. *Chinese Journal of Medicine*, 2017, 52(12): 58-60. (in Chinese)
- [17] 解二康, 罗娟, 李莹莹, 等. 水滤红外线-A照射治疗辅助综合运动训练对肩袖损伤患者疼痛及关节功能的影响[J]. *中国运动医学杂志*, 2016, 35(5): 481-483, 489.
XIE E K, LUO J, LI Y Y, *et al.*. Effect of water-filtered infrared-A on combined exercise training on pain and joint function in rotator cuff injury patients [J]. *Chinese Journal of Sports Medicine*, 2016, 35(5): 481-483, 489. (in Chinese)
- [18] 杜梅, 骆文龙. 水滤红外线A治疗慢性化脓性中耳炎的临床疗效[J]. *现代医药卫生*, 2018, 34(8): 1138-1141.
DU M, LUO W L. Clinical effect of water filtration infrared A in treatment of chronic suppurative otitis media [J]. *Journal of Modern Medicine & Health*, 2018, 34(8): 1138-1141. (in Chinese)
- [19] 郭明, 邵彬, 姜海, 等. 威伐光加等速肌力训练治疗老年膝关节骨性关节炎的临床观察[J]. *中国康复*, 2015, 30(5): 376-377.
GUO M, SHAO B, JIANG H, *et al.*. Clinical observation on the treatment of senile knee osteoarthritis with Vivaroxone and isokinetic muscle strength training [J]. *Chinese Journal of Rehabilitation*, 2015, 30(5):376-377. (in Chinese)
- [20] 高宏伟, 王冠, 罗宗键, 等. 威伐光结合中药塌渍治疗早中期膝关节骨性关节炎[J]. *长春中医药大学学报*, 2019, 35(2): 286-288.
GAO H W, WANG G, LUO Z J, *et al.*. Clinical observation on treating knee osteoarthritis in early and middle stage with WIRAOR combined with external application of Chinese materia medica [J]. *Journal of Changchun University of Chinese Medicine*, 2019, 35(2): 286-288. (in Chinese)
- [21] 方敏, 张逸仙. 威伐光联合康复运动训练对脑卒中后肩痛的治疗效果[J]. *福建医药杂志*, 2018, 40(5): 160-161.
FANG M, ZHANG Y X. Treatment effect of Shoulder pain after stroke in the combined rehabilitation exercise training team of Weivarang [J]. *Fujian Medical Journal*, 2018, 40(5): 160-161. (in Chinese)
- [22] BRENKE R, SIEMS W. Infrarotstrahlung eine moderne form der W. rmetherapie [J]. *Natura Med.*, 2006:32-37.
- [23] 徐建根, 崔锦江, 董宁宁, 等. 用于大功率激光治疗的瞬态喷雾冷却系统[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1309-1317.
XU J G, CUI J J, DONG N N, *et al.*. Transient spray cooling system for high-power laser treatment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(6): 1309-1317. (in Chinese)

作者简介:



徐建根(1987—),男,江苏苏州人,副研究员,2010年、2013年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事医用光学、激光诊疗技术及设备的研究和应用。E-mail: jgXu19871121@163.com

通讯作者:



崔锦江(1981—),女,吉林省吉林市人,博士,研究员,2004年于长春理工大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事医用光学技术及设备的研究。E-mail: cuijj@si-bet.ac.cn.