

低水平CO₂激光照射皮肤热效应的剂量推算

郭福源

(福建师范大学激光研究所, 福州)

摘要: 本文从平面半无界一维有源热扩散方程和生化反应速率方程导出了CO₂激光散焦照射皮肤组织允许的最大激光剂量, 分析了激光剂量、温升和生化反应速度之间的关系; 最后探讨了CO₂激光热效应对开放性创伤组织的作用机理。

Dosage calculation on the heat effect of skin irradiated with low level CO₂ laser

Guo Fuyuan

(Institute of Laser, Fujian Normal University)

Abstract: From the plane semi-limitless one-dimensional active heat diffusion equation and biochemical reaction rate equation, the maximum dosage of defocusing CO₂ laser irradiation for skin tissue are derived. The relationships between the laser dosage, temperature increasing and biochemical reaction rate are analyzed. Finally, the mechanism of CO₂ laser temperature effects on open-wound skin tissue is discussed.

一、引 言

在激光医用中,以激光照射生物组织后不会直接造成生物组织的不可逆性损伤,作为判定弱激光的依据。而弱激光作用的意义,在于用人工的方法给予生命物质以能量,使之在生命过程中增加做功的本领,从而有能力去改变病理状态,使之恢复健康。CO₂激光散焦照射致皮肤表面热致红斑与中医的光灸疗效具有相似修复组织的作用。显然,对CO₂激光辐照剂量和皮肤组织损伤阈值的研究是必要的。本文从热扩散方程出发,探讨CO₂激光辐照剂量与酶和蛋白质之间的关系,并分析散焦照射情况下的CO₂激光热效应促进开放性创伤组织愈合的作用机理。

二、CO₂激光的热作用基础

人体表皮温度为32℃,它的辐射光谱亮度最大值的波长为9.5μm,而CO₂激光的10.6μm波长正好在此峰值附近。根据普朗克辐射定律和基尔霍夫定律^[1],人体表皮对10.6μm波长的吸收比约是峰值吸收比的97%,显然,CO₂激光的大部分能量被表皮吸收,即人体组织对CO₂激光具有特殊的“亲和性”。由于组织中的水和血液都对CO₂激光有强烈的吸收^[2],而表皮内没有血管且较为干燥,因而有一部分CO₂激光能透过表皮层被真皮层吸收。根据

Bouguer-Lambert吸收定律^[3];

$$D = D_0 e^{-rx} \quad (1)$$

式中, D_0 为射至皮肤的最大功率密度; $r = 20\text{mm}^{-1}$, 是人体皮肤组织对 CO_2 激光的消光系数。显然, 经过透射深度 $x = 0.23\text{mm}$ 后的激光功率密度 D 仅为入射处的1%, 而人体皮肤每单位时间、单位体积所吸收的 CO_2 激光能量 W 与皮肤深度 x 的关系可由(1)式导出, 且为:

$$W = rD_0 e^{-rx} \quad (2)$$

由于入射至皮肤表面的 CO_2 激光功率密度 $D(R)$ 呈高斯函数分布:

$$D(R) = D_0 e^{-2R^2/W_z^2} \quad (3)$$

式中, R 为皮肤表面离开最大功率密度的距离, W_z 为 CO_2 激光功率密度降至峰值功率密度 $1/e^2$ 的半径。当 CO_2 激光散焦照射时, 显然 W_z 是一个比较大的值, 因此, CO_2 激光散焦照射时对人体组织的热机理可近似为平面半无界的一维有源热扩散方程, 且由于热输入速度较慢和时间较长, 因此人体皮肤组织被 CO_2 激光照射后的温升即可由下式算出^[4]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{\rho c_p} + \frac{K}{\rho c_p} \cdot \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4)$$

式中, 人体皮肤组织的热传导系数 $K = 1.2 \times 10^{-4} \text{J/mm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$; 皮肤组织密度 $\rho = 1.0 \times 10^{-3} \text{g/mm}^3$; 定压比热 $c_p = 3.0 \text{J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ 。当表皮峰值温度稳定为 T_0 , 且在一定深度内达到稳定状态分布, 即 $dT/dt = 0$ 。由(2)、(3)和(4)式可得, 人体皮肤组织表层峰值温度 T_0 与人体核心温度 T_c 的最大温差 ΔT_0 为:

$$\Delta T_0 = D_0 / rK \quad (5)$$

显然, CO_2 激光辐射引起人体皮肤组织的温升与其功率密度成正比。

三、生化反应速度及激光剂量

CO_2 激光散焦照射皮肤组织产生了温升效应, 其明显的作用是改变人体生化过程, 改变生化反应速度。结合 Wood^[5] 描述的一个事件使一个蛋白质或一个酶变性的单击细胞失活过程:

$$f/f_0 = e^{-K't} \quad (6)$$

式中, f/f_0 表示原始物质中没有发生化学变化的百分数; K' 是化学反应速度常数。在生化过程中, K' 由下式表示:

$$K' = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta H + T\Delta S}{RT}\right) \quad (7)$$

式中, k 是玻耳兹曼常数; T 是绝对温度; h 是普朗克常数; R 是气体常数; ΔH 是自由能的变量; ΔS 是熵的变量。对(7)式求关于 T 的导数得:

$$\frac{dK'}{dT} = \frac{k}{h} \left(1 + \frac{\Delta H}{RT}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H + T\Delta S}{RT}\right) \quad (8)$$

显然, $\frac{dK'}{dT} \gg 0$, 则说明了生化反应速度常数 K' 随着温度 T 的增加而增加, 且温度微小变化即可引起生化反应速度的较大变化。

对于温度小于 60°C 的皮肤组织热损伤阈值的研究, 由于可以近似使用 $\Delta H = 5.75 \times 10^5 \text{J}$ 和 $\Delta S = 1.48 \times 10^3 \text{J/K}$ 来计算^[4], 则当允许人体表皮温度升至 42°C 时, 其生化反应速度

$K' = 5.83 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$, 是核心温度37℃时的35倍。若皮肤损伤阈值允许1%表皮细胞失活, 由(6)式得损伤阈允许时间为1600s, 此时, 皮肤组织呈暗红色, 出现少量炎性渗出物致轻度水肿和轻度充血, 即引起红斑反应并在生理允许范围内。显然, CO₂激光热作用温度越低, 生化反应速度也越小, 热损伤阈值允许时间也越长。对于CO₂激光照射致皮肤组织热致红斑, 我们选定照射时间为20min, 表皮峰值温度与核心温度的最大温差为5℃, 则由(5)式计算得出临床上允许的CO₂激光峰值功率密度为12mW/mm², 但由于人们通常采用平均功率密度作为CO₂激光剂量的参数, 显然, 临床上允许的CO₂激光平均功率密度仅是峰值功率密度的一半, 即为6mW/mm²。

四、低水平CO₂激光促进开放性创伤愈合

当低水平CO₂激光照射开放性创伤皮肤致组织热致红斑时, 由于皮肤组织温度升高, 机体中的血管活性胺和激肽形成酶被激活, 酶的浓度增加, 导致血管壁的通透性升高, 促使白细胞、抗体、巨噬细胞等游到炎症灶, 实现炎性细胞浸润; 同时, 由于皮肤组织温度升高, 补体系统中酶促反应速度加快, C₃和C₅增加, 巨噬细胞的吞噬能力增强, 从而控制炎症反应在生理范围之内, 起到抗感染作用。另一方面, 由于白细胞增加, 促使渗出的纤维素网将损伤组织粘合起来, 提早实现开放性创伤的隐匿期修复。在组织修复阶段, 皮肤组织吸收了CO₂激光的能量后改变了其分子的振-转能级的状态, 多次吸收积累达到了蛋白质合成所需的活化能, 加速了蛋白质合成, 从而在创伤组织内产生许多成纤维细胞和新生的毛细血管内皮细胞, 并沿着凝块内纤维蛋白网生长。同时, CO₂激光的热效应促使了成纤维细胞的成熟, 并促使其变成结缔组织纤维和胶原纤维^[6]。此外, 由于低水平CO₂激光的热效应改善了受热区的供血和营养, 使细胞核代谢旺盛, 加速了肉芽组织的生长和上皮的再生。我们曾和南京军区福州总医院妇产科赵秀芝和顾建宏同志合作, 采用按上述推算的CO₂激光剂量照射会阴侧切术切口, 临床实践证明了低水平CO₂激光能促进切口一期愈合, 且证明了我们推算的CO₂激光剂量是合理的。

感谢赵秀芝和顾建宏同志的合作和帮助。

参 考 文 献

- [1] 李景镇 et al., 光学手册。西安: 陕西科学技术出版社, 1986; 17~22
- [2] 久保宇市, レーザ一研究, 1983; 11(9): 698~700
- [3] 徐国祥 et al., 激光医学。广州: 广东高等教育出版社, 1987; 132~141
- [4] 沃尔巴什特 M L 著, 刘普和 et al.译, 激光在医学和生物学中的应用。北京: 科学出版社, 1983; 1~15
- [5] Wood T H, Advances in Biological Medical Physics, Vol. 4. New York, Academic Press, 1956
- [6] 李维礼 et al., 创伤理学。北京: 人民军医出版社, 1984; 78~91

*

*

*

作者简介: 郭福源, 男, 1965年1月出生。助教(在职研究生)。现从事医药激光专业。

收稿日期: 1990年2月5日。 收到修改稿日期: 1990年4月10日。