

恒磁场对刚性圆直管中脉动流的影响*

冯忠刚 吴望一

(北京大学力学系 100871, 1994年4月11日收到)

摘 要

本文研究了恒磁场对于刚性圆直管中脉动流的影响, 并根据现有的实验资料考虑了磁场对于血液粘度的影响。给出了恒磁场作用下刚性圆直管脉动流的分析解以及恒磁场对刚性圆直管中的流速分布、流量以及阻抗的影响的计算结果。这些结果对于深入研究磁场对于血液动力学的影响具有一定参考价值。

关键词 恒磁场 刚性圆直管流动 脉动流 流速分布 流量 阻抗

一、引 言

外加磁场对于人体的作用早已被人类所认识并用于医疗实践。公元二世纪我国第一部中药书籍《神农本草经》已有磁石入药的记载。古希腊也有关于手握磁石可解除手足疼痛痉挛等记载^[1]。然而限于当时的生产、医疗水平, 磁疗主要应用于局部消炎、止痛以及调节内分泌方面。本世纪以来特别是随着大量新型高场强永磁材料以及新型磁疗设备的问世, 磁疗得到了广泛的应用, 并发现它对血液循环有影响^[1,2,3]。本世纪二、三十年代国外有人认为磁疗可促进血液循环和皮肤的分泌, 调节新陈代谢, 促进健康, 防治疾病。同时, 日本制成了磁带、磁帽、磁枕和磁床以治疗高血压、失眠、神经衰弱等。六、七十年代我国已有关于磁疗治疗高血压、冠心病、心绞痛以及降血脂的临床报道^[2,3]。与磁场对于血液循环系统疾病临床治疗相比较, 磁场对于血液循环系统影响的基础研究起步较晚。1982年陈淑云等用磁场作用高血压病人的腰骶部, 发现磁场对于高血压病人的全血粘度有降低作用^[4]。1992年周崇文、吴望一等对恒磁场作用下豚鼠血栓等血液流变性质进行了较全面的研究。测量了磁场对不同剪切率下全血粘度的影响以及磁场对体外血栓、红细胞压积和血沉的影响, 并首次报导了磁场对血栓弹力图的影响。他们发现恒磁场在一定磁场强度和一定持续作用时间下具有特异性的抗血栓、抗高凝血和降低血液粘滞度的功能。在此基础上对脑血栓、糖尿病、高血脂、高血压及冠心病病人进行了广泛的临床试验^[6], 证实了恒磁场具有显著的抗血栓、抗高凝血、降血压、降血液粘滞及降胆固醇、除痛尿等功效。

针对上述背景, 研究磁场对血流动力学因素的影响是十分必要和有意义的。血液是一种弱导电体, 当它在磁场中运动时磁场必然对其产生影响。同时根据实验研究^[4,5,6], 磁场对于

* 国家自然科学基金资助课题

血液全血粘度等流变性质也具有很大影响,这就必然进一步加强了磁场对血流动力学性质的影响。本文初步研究了恒磁场对血液动力学的影响,即研究了恒磁场对于刚性圆直管中血液脉动流的影响,得到了分析解以及恒磁场对流速分布、流量以及阻抗的影响的计算结果。这些对于深入研究磁场对于血液动力学的影响具有一定参考价值。

二、基本方程

刚性圆管中的脉动流,可以认为是动脉脉动流的一种粗略近似。它忽略血管的变形性,因而不能用来研究波的传播,但其速度分布及阻抗等物理量对动脉血管内的脉动流研究仍有参考价值。对于无磁场作用的刚性圆直管脉动流人们已作过全面的研究^[7],给出了其分析解。

图1是无磁场作用下刚性圆直管脉动流的流量幅值与相应泊肃叶流量之比 Q_{\max}/Q_{pois} 以及流量与压力梯度相差 ε_{10} 随 Womersley 数 α 的变化情况^[8]。

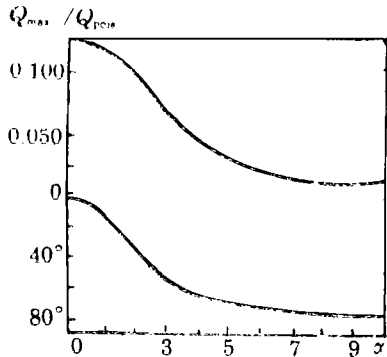


图1 $Q_{\max}/Q_{\text{pois}}, \varepsilon_{10}$ 随 α 的变化

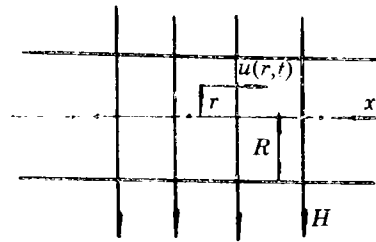


图2 均匀恒磁场作用下刚性圆直管流

本文研究恒磁场作用下刚性圆直管的脉动流,同样是将动脉脉动流近似看成是刚性圆直管中不可压缩牛顿流体的轴对称层流。设有刚性管流,如图2所示。在与时间有关的压力梯度作用下刚性管内产生了振荡流。恒磁场 H 均匀加于刚性管径向。设流速远小于波速,管径远小于波长,则运动方程中加速度的对流项可忽略不计。并设磁雷诺数较小,相对外加磁场而言,感应磁场可忽略不计。根据磁流体运动基本方程考虑到上述简化条件及径向速度 $v=0$, 可得刚性圆直管内的血液在均匀恒磁场作用下的轴向 N-S 方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\sigma H^2}{\rho C^2} u \quad (2.1)$$

其中 $u(r,t)$ 为轴向流速, ρ 为流体密度, H 为磁场强度, C 为光速, ν 为流体运动粘度,一般来说它是磁场强度 H 的函数即 $\nu = \nu(H)$, p 为压力, σ 为流体电导率。方程 (2.1) 是线性偏微分方程,较无磁场时的刚性圆直管流体运动方程多出一项磁场对导电流体的 Lorentz 力 $-\sigma H^2 u / \rho C^2$ 。

在此我们考察管中压力梯度为简谐波形式的振荡流。对于不是简谐波的脉动流,可以把压力波动展开为傅立叶级数。考虑到方程 (2.1) 是线性的,将每个谐波的计算结果叠加起来,就可得到脉动流的结果。对于简谐振荡流令

$$-dp/dx = Ae^{i\omega t} \quad (2.2)$$

其中, A 为压力梯度振幅, ω 为圆频率。且

$$u(r,t) = U(r)e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

$$\text{则} \quad \frac{d^2U}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU}{dr} - \frac{i\omega}{\nu} U - \frac{\sigma H^2}{\rho\nu C^2} U = -\frac{A}{\mu} \quad (2.4)$$

其中, μ 为流体动力粘度.

引入

$$y = \frac{r}{R}, \quad \alpha = R\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}, \quad \beta = \sqrt{\frac{\sigma R^2 H^2}{\rho\nu C^2}}, \quad \theta + \psi i = \sqrt{-(\beta^2 + \alpha^2 i)}$$

式中 R 为管径, α 为 Womersley 数, β 为 Hartmann 数. 则方程(2.4) 成为

$$\frac{d^2U}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{dU}{dy} - (i\alpha^2 + \beta^2)U = -\frac{AR^2}{\mu} \quad (2.5)$$

解方程(2.5) 得

$$U = \frac{AR^2}{(\beta^2 + i\alpha^2)\mu} + CJ_0[(\theta + \psi i)y] \quad (2.6)$$

其中, J_0 是复变量的零阶 Bessel 函数. 由边界条件 $y=1$ 时 $U=0$ 求出 C , 代入上式有

$$U = \frac{AR^2}{(\beta^2 + i\alpha^2)\mu} \left[1 - \frac{J_0[(\theta + \psi i)y]}{J_0(\theta + \psi i)} \right] \quad (2.7)$$

由此得

$$u = \frac{AR^2}{(\beta^2 + i\alpha^2)\mu} \left[1 - \frac{J_0[(\theta + \psi i)y]}{J_0(\theta + \psi i)} \right] e^{i\omega t} \quad (2.8)$$

根据(2.8) 式可求出圆管截面的流量 Q

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^R 2\pi r u dr \\ &= \frac{\pi R^4}{\mu} \cdot \frac{A}{\beta^2 + i\alpha^2} \left[1 - \frac{2J_1(\theta + \psi i)}{(\theta + \psi i)J_0(\theta + \psi i)} \right] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2.9)$$

其中, J_1 为一阶 Bessel 函数. 将式(2.9) 进一步表示为

$$Q = (R_Q + I_Q i) e^{i\omega t} = M_Q \exp[i(\omega t + \varepsilon_Q)] \quad (2.10)$$

其中

$$M_Q = \frac{\pi R^4 A}{\mu} \left| \frac{1}{\beta^2 + \alpha^2 i} \left[1 - \frac{2J_1(\theta + \psi i)}{(\theta + \psi i)J_0(\theta + \psi i)} \right] \right| \quad (2.11)$$

$$\tan \varepsilon_Q = I_Q / R_Q \quad (2.12)$$

ε_Q 为流量相位与压力梯度相位之差. 另外对于刚性圆直管流可考察其纵向阻抗

$$Z = -\frac{dp}{dx} / Q = R_Z + I_Z i \quad (2.13)$$

其中实部 R_Z 为流阻, I_Z 为流感.

根据文[5], 全血粘度的变化与外加恒磁场的强度与作用时间有关, 且存在一阈值. 当恒磁场强度小于阈值, 或强度虽大但作用时间较短时, 全血粘度不变. 当恒磁场强度大于阈值且有一定作用时间后, 全血粘度将有明显下降. 设血液原始粘度为 $\mu_0(\nu_0)$, 在磁场作用下粘度下降为 $\mu_H(\nu_H)$, 则粘度变化率 $s = \mu_H / \mu_0 = \nu_H / \nu_0$. 根据目前的实验结果^[5,6], 全血粘度在磁场作用下大约可下降到原始粘度的 60%~80% 左右, 在本文的计算中我们近似取 $s = 0.8$. 综上所述, 本文的计算也分粘度不变和粘度下降两种情况.

当粘度不变时 (用下标“0”表示)

$$\mu = \mu_0, \quad \nu = \nu_0, \quad \alpha = \alpha_0 = R\sqrt{\frac{\omega}{\nu_0}}, \quad \beta = \beta_0 = \sqrt{\frac{\sigma R^2 H^2}{\rho\nu_0 C^2}}$$

则根据公式(2.8), 速度

$$u_0 = \frac{AR^2}{(\beta_0^2 + \alpha_0^2 i)\mu_0} \left[1 - \frac{J_0[(\theta_0 + \psi_0 i)y]}{J_0(\theta_0 + \psi_0 i)} \right] e^{i\omega t} \quad (2.14)$$

我们取无量纲速度

$$\bar{u}_0 = \frac{u_0}{AR_0^2 \mu_0} = \frac{1}{(\beta_0^2 + \alpha_0^2 i)} \left[1 - \frac{J_0[(\theta_0 + \psi_0 i)y]}{J_0(\theta_0 + \psi_0 i)} \right] e^{i\omega t} \quad (2.15)$$

在计算流量 Q ，相位差 ε_Q 以及阻抗 R_z ， I_z 时我们分别计算它们与无磁场作用下相应量的比值。下标“ b ”代表无磁场作用（即 $\beta=0$ 时）的情况。则

$$\frac{M_{Q_0}}{M_{Q_b}} = \frac{\left| \frac{1}{\beta_b^2 + \alpha_b^2 i} \left[1 - \frac{2J_1(\theta_0 + \psi_0 i)}{(\theta_0 + \psi_0 i)J_0(\theta_0 + \psi_0 i)} \right] \right|}{\left| \frac{1}{\alpha_b^2 i} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha_b i^{3/2})}{\alpha_b i^{3/2} J_0(\alpha_b i^{3/2})} \right] \right|} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_{Q_0, b} = \varepsilon_{Q_0} - \varepsilon_{Q_b} \quad (2.17)$$

$$R_{z_0, b} = R_{z_0} / R_{z_b} \quad (2.18)$$

$$I_{z_0, b} = I_{z_0} / I_{z_b} \quad (2.19)$$

当粘度变化时（用下标“ H ”表示）

$$\mu = \mu_H = \mu_0 \cdot s, \quad \nu = \nu_H = \nu_0 \cdot s, \quad \alpha_H = \alpha_0 / \sqrt{s}, \quad \beta_H = \beta_0 / \sqrt{s}$$

$$\theta_H + \psi_H i = (\theta_0 + \psi_0 i) / \sqrt{s}$$

则速度
$$u_H = \frac{AR^2}{(\beta_H^2 + \alpha_H^2 i)\mu_H} \left[1 - \frac{J_0[(\theta_H + \psi_H i)y]}{J_0(\theta_H + \psi_H i)} \right] \cdot e^{i\omega t} \quad (2.20)$$

无量纲速度

$$\bar{u}_H = \frac{u_H}{AR^2 \mu_0} = \frac{1}{(\beta_H^2 + \alpha_H^2 i)s} \left[1 - \frac{J_0[(\theta_H + \psi_H i)y]}{J_0(\theta_H + \psi_H i)} \right] e^{i\omega t} \quad (2.21)$$

其它

$$\frac{M_{Q_H}}{M_{Q_b}} = \frac{\left| s(\beta_H^2 + \alpha_H^2 i) \left[1 - \frac{2J_1(\theta_H + \psi_H i)}{(\theta_H + \psi_H i)J_0(\theta_H + \psi_H i)} \right] \right|}{\left| \frac{1}{\alpha_b^2 i} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha_b i^{3/2})}{\alpha_b i^{3/2} J_0(\alpha_b i^{3/2})} \right] \right|} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{Q_H, b} = \varepsilon_{Q_H} - \varepsilon_{Q_b} \quad (2.23)$$

$$R_{z_H, b} = R_{z_H} / R_{z_b} \quad (2.24)$$

$$I_{z_H, b} = I_{z_H} / I_{z_b} \quad (2.25)$$

从式(2.20)~式(2.25)可见，由于考虑粘度变化，在计算中代入的 α ， β 数为 $\alpha_H = \alpha_0 / \sqrt{s}$ ， $\beta_H = \beta_0 / \sqrt{s}$ ，即 α_H ， $\beta_H > \alpha_0$ ， β_0 。因此 α_0 ， β_0 可称为考虑粘度下降情况下的“参考Womersley数”和“参考Hartmann数”。在计算中我们给出的都是随 α_0 ， β_0 的变化情况。根据式(2.15)~式(2.25)，本文计算了粘度不变和粘度下降时恒磁场作用下刚性圆直管振荡流的无量纲速度、相对流量、相差、流阻和流感。

三、计算结果与讨论

1. 速度

图3至图7为不同情况下， ωt 半个周期内间隔 $\omega t = 15^\circ$ 时速度剖面的比较。图中左方是无磁场作用的情况，右方是在恒磁场作用下（其Hartmann数 β_0 ）速度剖面。图3~图6是不考虑粘度变化情况，从图中可以看出当 β_0 较小或 α_0 较大时速度剖面的差别不明显，当 β_0 较大

而 α_0 不很大时速度剖面有较大变化。表现为 $\partial u/\partial t$ 减小，即由于磁场Lorenz力作用，刚性圆直管内的振荡流动变平缓。图7是考虑了粘度下降的情况($s=0.8$)，图中名义 $\beta_0=0.5$ 。可以看出对应较小的名义 α_0 ($\alpha_0=3.34、4.72$)速度剖面有明显改变(比较图3(a)、图4(a))。表现

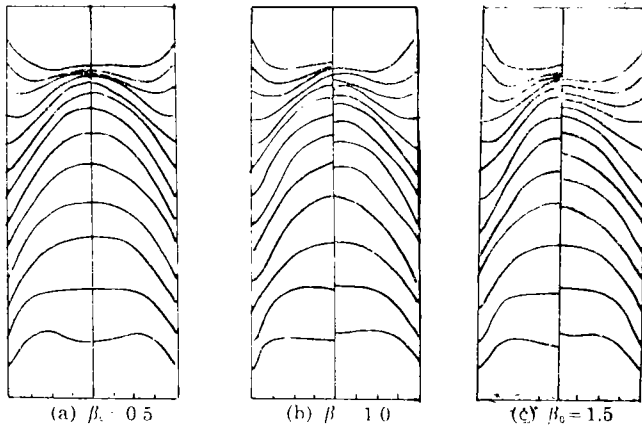


图3 $\alpha_0=3.34$ 时不同 β 值下刚性圆直管振荡流速度剖面比较

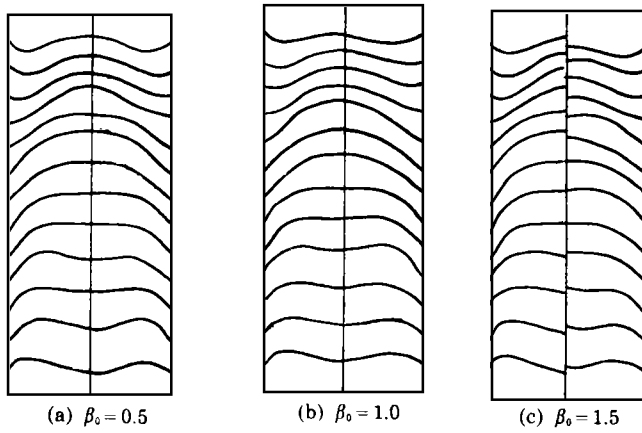


图4 $\alpha_0=4.72$ 时不同 β 值下刚性圆直管振荡流速度剖面比较

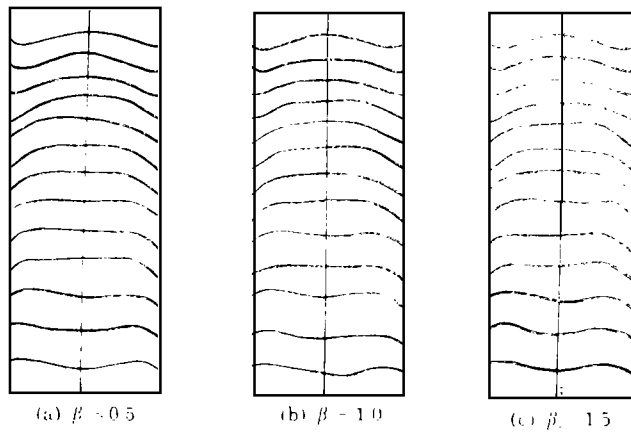


图5 $\alpha_0=5.78$ 时不同 β 值下刚性圆直管振荡流速度剖面比较

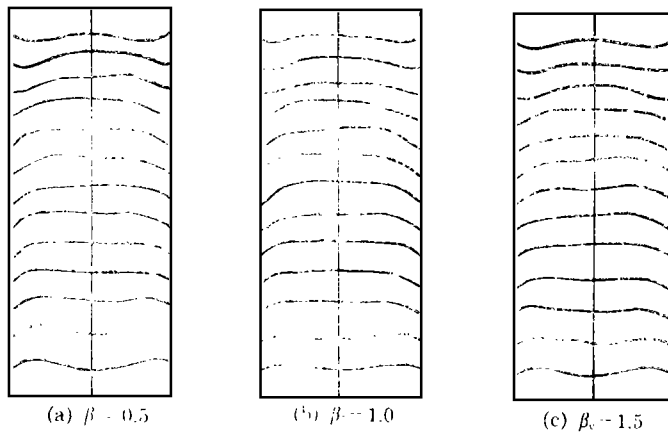


图6 $\alpha_0 = 6.67$ 时不同 β 值下刚性圆直管振荡流速度剖面比较

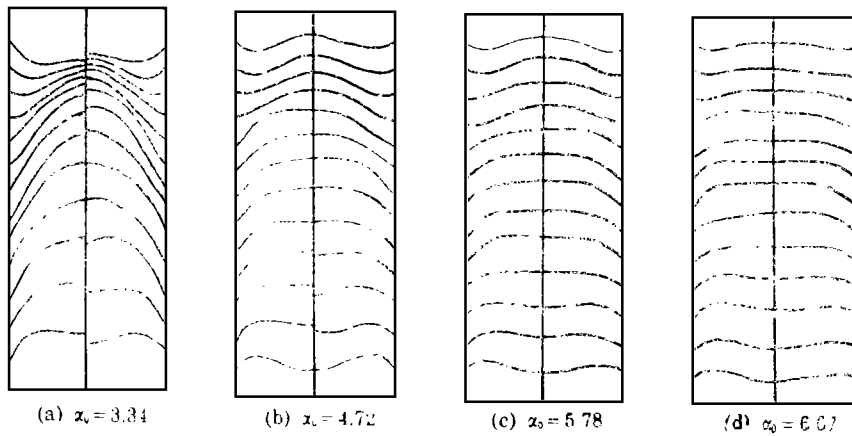
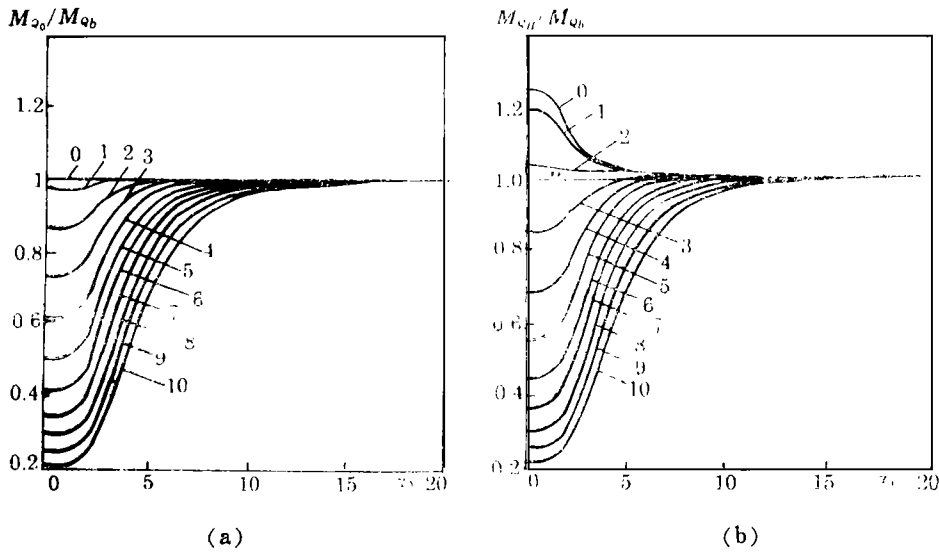


图7 $\beta_0 = 0.5$ 时考虑粘度变化 $s = 0.8$ 不同 α 值速度剖面比较

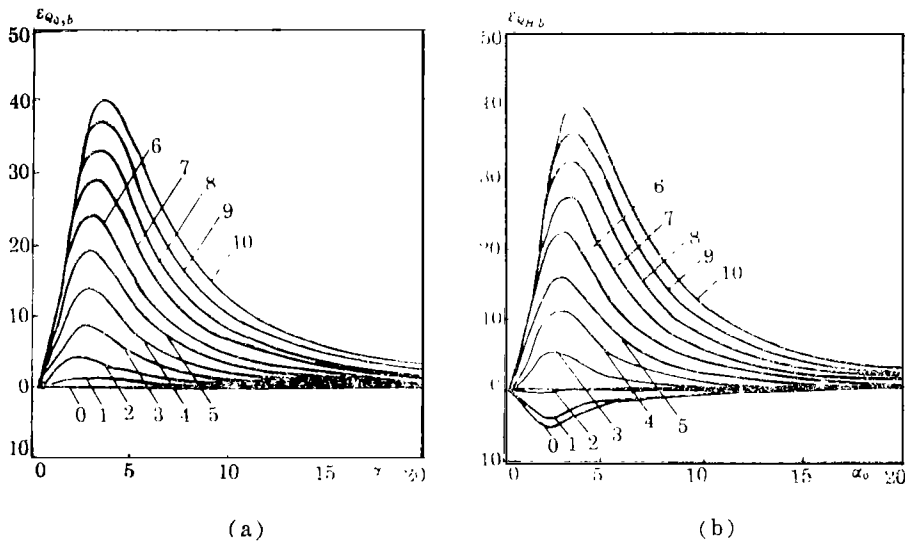
为 $\partial u / \partial t$ 增加, 振荡加剧。而当 α_0 较大时速度剖面仍无明显变化。

2. 流量

图8、图9为相对流量随 α_0 、 β_0 变化情况。其中 β_0 分别等于 4×10^{-3} (此时对应恒磁场强度大约在2000高斯左右, 即对应一般临床治疗所用的磁场强度) 以及从0.5到5.0间隔0.5的情况。图中(a)为粘度不变, (b)为粘度下降($s = 0.8$)情况。当考察 β_0 对相对流量的影响, 可以看出粘度不变时恒磁场使刚性圆直管振荡流流量下降 ($M_{Q_0} / M_{Q_b} < 1$), 相位提前 ($\varepsilon_{Q_0, b} > 0$), 且 β_0 越大越显著。而当考虑粘度下降的情况, 在 β_0 一定范围内 (图中曲线0, 1, 2) 流量将增加 ($M_Q / M_{Q_0} > 1$) 相位滞后 ($\varepsilon_{Q_H, b} > 0$)。事实上使粘度下降的恒磁场强度有一阈值^[5, 9] (设此时对应 $\beta = \beta_0$), 当 $\beta < \beta_0$ 时粘度不会下降又因 β_0 较小 (根据文[5, 6] β_0 大约在 $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ 之间), 所以 $\beta < \beta_0$ 时相对流量基本不变 (如图8, 9中(a)曲线0)。当 $\beta > \beta_0$ 时, 粘度下降, 此时恒磁场对刚性圆直管振荡流的影响是多方面的。首先磁场Lolenz力对流动起阻碍作用 (如粘度不变情况), 其次由于粘度降低又有利于流动, 但粘度下降使实际的 α_H, β_H 大于参考的 α_0, β_0 而这一点对流动又是不利的。因此当 β 一旦大于 β_0 , 此时粘度已下降为 $\mu_0 \cdot s$, 而恒磁场产生的Lolenz阻力还很小。因而相对流量最大 (图8(b)中曲线0)。此后随着 β_0 的

图8 相对流量 M_Q/M_{Qb} 随 α_0, β_0 变化

(其中曲线0对应 $\beta_0=4 \times 10^{-3}$, 曲线1~10对应 β_0 从0.5~5.0间隔0.5)

图9 相对相差 ϵ_{Qb} 随 α_0, β_0 变化

(其中曲线0对应 $\beta_0=4 \times 10^{-3}$, 曲线1~10对应 β_0 从0.5~5.0间隔0.5)

增加, Lorenz 阻力增大同时 β_H 也显著增加, 相对流量开始下降。直到 β_0 增加到一定值时, 粘度下降的有利方面被完全抵消。

考察 α_0 对相对流量的影响可以看出, $\alpha_0 < 10$ 时相对流量的变化最为明显。事实上由于外加磁场强度是有限的, β_0 不可能到很大的值, 因而当 α_0 很大时复变量 $\alpha_0^2 i + \beta_0^2$ 以及 $\theta_0 + \psi_0 i$ 都较接近于 $\alpha_0^2 i$ 和 $\alpha_0 i^{3/2}$ 。这样对于 α_0 较大时有限恒磁场强度的作用将不会对流动产生很大影响。从图8(b)中可以看到对相同的 β_0 , 在 α_0 某一范围内相对流量小于1, 而 α_0 在另一范围相对流量又会略大于1(图中曲线3、4、5)。这是由于粘度下降所产生的诸多影响因素在不同 α_0 时改变了它们的主导作用。

3. 纵向阻抗

纵向阻抗由流阻和流感组成。图10、图11分别给出了它们随 α_0, β_0 的变化情况。从图10可见不考虑粘度变化流阻 $R_{Z_0,b}$ 增加 (>1)。当粘度下降时对于较小 β_0 ($=4 \times 10^{-3}, 0.5, 1.0$) 流阻将减小 (<1)。流阻变化的原因是与上述分析相对流量变化时提出的原因相同的。流感 $I_{Z_0,b}$ 在恒磁场作用下都会下降, 当粘度下降时流感下降更为明显。但总的来说流感所受影响远不及流阻变化显著(图11)。

4. 讨论

用于人体磁疗的恒磁场其场强一般在1000~2000高斯之间, 即刚刚大于使人体血液粘度下降的场强阈值^[8]。考虑人体血流动力学参数此时的Hartmann数 β_0 在 $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ 之

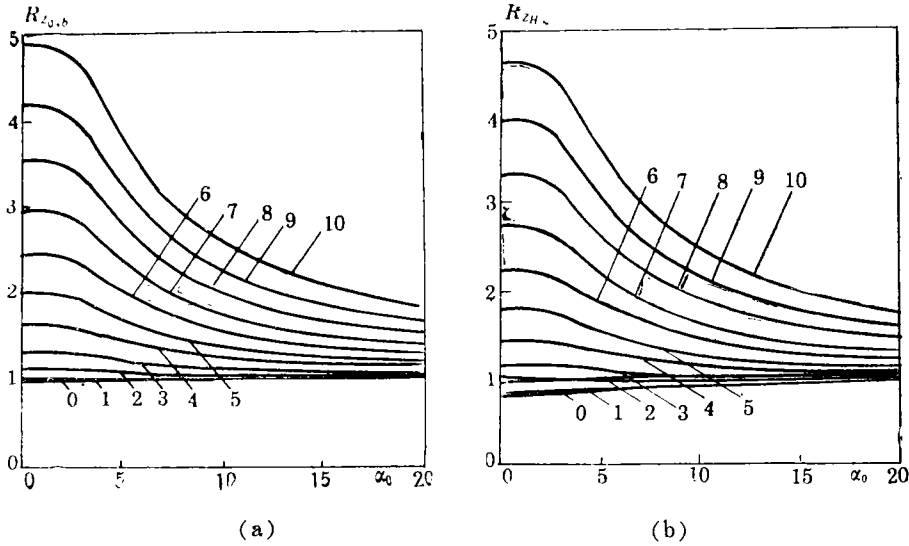


图10 流阻 $R_{Z_0,b}$ 随 α_0, β_0 变化 (其中曲线0对应 $\beta_0=4 \times 10^{-3}$, 曲线1~10对应 β_0 从0.5~5.0间隔0.5)

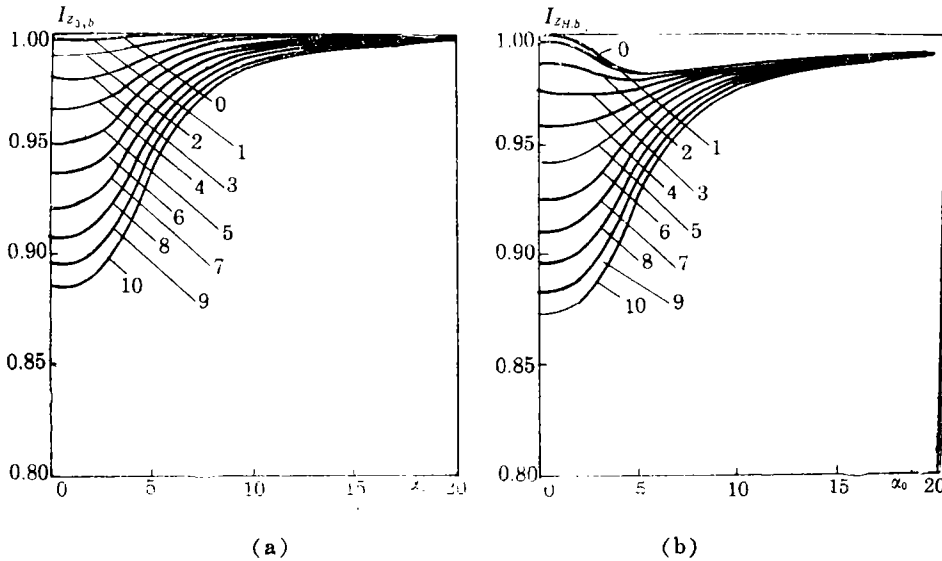


图11 流感 $I_{Z_0,b}$ 随 α_0, β_0 变化 (其中曲线0对应 $\beta_0=4 \times 10^{-3}$, 曲线1~10对应 β_0 从0.5~5.0间隔0.5)

间。而此时磁场Lorenz力的影响很微弱(见图8~图11中(a)),但根据实验结果^[5,6]该磁场在作用一段时间后已能使血液全血粘度明显下降。从图8(b)、图10(b)和图11(b)中曲线0可以看出对应此时较小 β_0 ,管内振荡加剧、流量增加、流阻、流感下降。所有这些都利于改善人体血液循环。因此在实际临床应用中,外加磁场主要是由于改变了血液的本构关系如使粘度下降而起到改善血液循环的作用。另外对于人体不同部位其 α 数见表1^[9]。由图8~图11可见恒磁场对于 $\alpha < 10$ 时作用最为明显,此时对应于人体的肢动脉等中小动脉及微动脉,而人体血液循环阻力大部分也来自 α 的相同范围。因此这一点在临床中具有非常重要的意义。

表1 人体不同血管段的 α 数

血 管	升主动脉	降主动脉	腹主动脉	股 动 脉	颈 动 脉	微 动 脉
α 数	20	17.3	12	5.3	6.6	0.06

四、结 论

(1) 当磁场对粘度没有产生影响时,外加恒磁场对刚性圆直管流起阻碍作用,致使振荡变平缓、流量减小、流阻增大。因此当人体在短时间内受到较强磁场作用时会对血液循环造成不利影响。

(2) 当外加恒磁场强度适中且作用一段时间使血液粘度下降后,刚性圆直管在该磁场作用下振荡加剧、流量增加、流阻下降。这种变化主要源于磁场使血液粘度下降。因此对人体进行磁疗应选择合适的磁场强度(高于使粘度变化的阈值但也不应使 β 值过大),并作用足够的时间。

(3) 由于磁场对中低 α 数的血管作用最为显著,而在这些血管处阻力增加又较大,因此人体磁疗部位选择中,低 α 数处如挠动脉、肢动脉等效果最佳。

(4) 本文从血液动力学方面分析了恒磁场对人体血液循环的影响。说明磁疗可以改善人体血液循环并指出其原因和最佳作用部位。这些对临床实际具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 安徽大学物理系磁学应用组,磁学在医疗方面的应用概况,安徽省磁性疗法资料选编(1977), 1-7.
- [2] 孙好明、常吉成,对磁治疗高血压200例临床疗效观察,磁疗法及其应用,西安市科学技术情报研究所(1978), 25-26.
- [3] 冶金部有色金属研究院,经络磁场疗法初探,医学研究参考,(10)(1978), 16-32.
- [4] 陈淑云等,磁场对高血压动脉硬化病人血液粘度等影响的改变,中华理疗杂志,5(1)(1982), 27.
- [5] 周崇文、吴望一等,恒磁场对豚鼠血栓等血液流变性质影响的实验研究,《第四届全国生物力学会议论文集》,科学出版社(1993).
- [6] 吴望一等,血栓血压糖尿宁治疗效果的临床研究,杨桂通等编,《生物力学进展》,科学出版社(1993).
- [7] 陶祖莱,《生物流体力学》,科学出版社(1984).
- [8] D. L. Schultz, *Cardiovascular Fluid Dynamics*, Vol. 1, Academic Press, London, New York (1972).

[9] 柳兆荣、李惜惜, 《弹性腔理论及其在心血管系统分析中的应用》, 科学出版社 (1987).

Effect of the Magnetic Field on the Pulsatile Flow Through a Rigid Tube

Feng Zhonggang Wu Wangyi

(*Department of Mechanics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

This study presents the effect of the magnetic field with constant intensity on the pulsatile flow through a rigid tube. Basing on the experimental results, the influence of the magnetic field on the blood viscosity is considered. The analytic solution of the pulsatile flow through a rigid tube under constant magnetic field intensities and the effect of the magnetic field on the velocity distribution, flow and impedance in a rigid tube are given. This investigation is valuable for understanding the influence of the magnetic field on the blood circulation.

Key words magnetic field of constant intensity, flow through a rigid tube, pulsatile flow, velocity distribution, flow impedance