



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110259656 A

(43)申请公布日 2019.09.20

(21)申请号 201910523088.8

(22)申请日 2019.06.17

(71)申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙坪坝正街
174号

(72)发明人 庞晓平 杨柳 郭岗 万民顺
刘志斌 胡鹰

(74)专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有
限公司 11275

代理人 赵荣之

(51)Int.Cl.

F04B 15/02(2006.01)

F04B 51/00(2006.01)

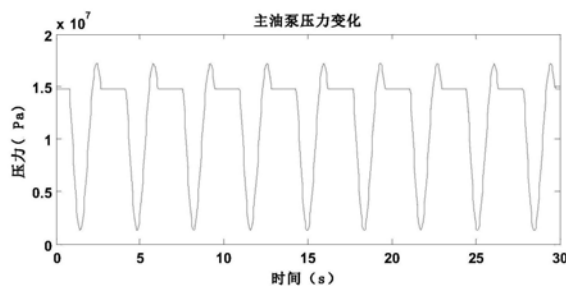
权利要求书4页 说明书12页 附图5页

(54)发明名称

泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法

(57)摘要

本发明涉及一种泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,属于流体力学领域。该方法为:把混凝土的流动看成在管道中作非定常层流运动的柱塞流,速度和压力在同一横截面上不随半径的变化而变化;根据混凝土泵送系统泵送原理,得知混凝土速度为一个周期性变化的波形,在活塞开始推送和即将换向阶段呈现加减速运动,平稳推送阶段近似匀速运动,建立速度的数学模型,求出了压力损失动态变化的数学模型。最后通过实例计算验证动态模型的正确性。本发明从混凝土在管道中流动的原理出发建立了一套数学模型,能够更直观地表示出泵送负载即混凝土缸出口压力的动态变化,为后续泵车振动的研究提供了输入的动载荷。



1. 泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,其特征在于:该方法包括以下步骤:

S1:分析泵送混凝土的流变学特性;

S2:推导混凝土在管道中的压力损失动态变化公式。

2. 根据权利要求1所述的泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,其特征在于:所述步骤S1具体为:

普通混凝土为非牛顿流体中的Bingham体,本构方程为 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$, τ_0 为极限切应力, η_p 为塑性粘度,当切应力小于极限切应力时,流体内部无相对运动,当切应力大于极限切应力 τ_0 时,流体才开始运动,切应力与剪切应变率呈线性变化,斜率为 η_p ;

根据钻井流体力学,在判断Bingham体在管道中流动为层流还是紊流时,参照牛顿流体判断方法,当雷诺数 $Re = \frac{\rho U d}{\mu} \leq 2320$ 范围内,流体流动为层流;雷诺数 $Re \leq 2320$,得出泵送混凝土在管道中的流动状态为层流;

Bingham体在管道中作定常层流运动时,根据Bingham体本构方程知,当最大切应力 $\tau_w < \tau_0$ 时,混凝土不产生流动,为静止状态;当最大切应力 $\tau_w > \tau_0$ 时,在 $\tau \leq \tau_0$,即 $R \leq R_0$ 范围内,流体内部质点无相对运动,流体的运动速度相同,在 $\tau \geq \tau_0$,即 $R \geq R_0$ 范围内,切应力 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$,流体的流动速度曲线呈抛物线形式,定常流动时速度为

$$u = \frac{\Delta p}{4\eta_p L} [R^2 - r^2 - 2R_0(R - r)] \quad , R = R_0 \text{时速度最大,管壁处速度为} 0;$$

把混凝土在管道中的流动看成柱塞流,即在一个截面上任意半径处速度都相同,管道内的混凝土像柱塞一样向前流动,只有与管道内壁接触的表面存在摩擦力,混凝土内部无摩擦力。

3. 根据权利要求2所述的泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,其特征在于:所述步骤S2具体为:

S21:推导压力损失经验公式;

压力损失计算式为:

$$\Delta p_H = \frac{2}{R} \left[K_1 + K_2 \left(1 + \frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}} \right) V \right] \alpha_2 \quad (1)$$

Δp_H ---混凝土在单位长度水平管道内流动时的压力损失,单位为Pa/m;

K_1 ---粘着系数,单位为Pa, K_1 的计算式为 $K_1 = 300 - S$, S 为混凝土的坍落度;

K_2 ---速度系数,单位为Pa·s/m, K_2 的计算式为 $K_2 = 400 - S$;

R ---混凝土流动管道的半径,单位为m;

$\frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}}$ ---混凝土泵分配阀切换时间与活塞推压混凝土时间之比;

V ---混凝土的平均流速,单位为m/s,计算式为 $V = \frac{Q}{\pi R^2}$, Q 为混凝土的排量,单位为 m^3/h ;

α_2 —径向压力与轴向压力之比,普通混凝土一般取0.9;

S22:推导压力损失动态变化计算模型

(1)直管道压力损失分析

混凝土在管道中的流动近似为柱塞流,在管道的一个横截面上,速度和压力都不随半径变化,分析直管道压力损失,取长度为 dx 、半径为管道半径 r 的混凝土为控制体,受到沿管道长度方向的压力、沿管壁处的摩擦力和重力,得出流体运动方程为:

$$-(P+dP)\pi r^2 + P\pi r^2 + f \cdot 2\pi r dx + \rho\pi r^2 dx g \sin \varphi = ma = -\rho\pi r^2 dx \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

式中 f 为摩擦系数,表示为 $f=K_1+K_2V$, K_1 和 K_2 的计算与压力损失经验公式中计算公式一致;将 f 代入后,运动方程求解得

$$P = \left[\frac{2}{r} (K_1 + K_2 V) + \rho \frac{dV}{dt} + \rho g \sin \varphi \right] x \quad (3)$$

若能得到混凝土流动速度随时间的变化关系,则能求出泵送压力的时间历程曲线;

(2)速度模型的建立

根据混凝土泵车泵送系统的原理,高压泵送时,油缸有杆腔连通,从无杆腔供油,当一个油缸活塞到达最大行程时,连接混凝土缸的S管阀和主油缸同时换向,主油泵给另一个油缸供油,相对应的充满混凝土的缸继续泵送混凝土,呈现周期性泵送的规律;

油缸活塞位移在稳定输送阶段随时间近似呈线性变化,速度为常数,在泵送开始和换向阶段,活塞位移随时间的变化不是线性的,速度会呈现加速上升和减速下降的趋势,得出混凝土速度的变化,在泵送开始阶段混凝土速度从0加速上升至一个恒定值,在稳定输送阶段,混凝土速度为一个恒定值,在换向阶段混凝土速度减速为0,用式(4)所示的数学模型来表示速度随时间的变化:

$$V(t) = \begin{cases} \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_4)} (t + t_4) \right] + \frac{v}{2} & (-t_2, -t_3) \\ v & (-t_3, t_1) \\ \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_1)} (t - t_1) \right] + \frac{v}{2} & (t_1, t_2) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $v = \frac{Q}{3600\pi r^2}$, Q 为混凝土排量,单位为 m^3/h , r 为管道的半径; $(-t_2, -t_4)$ 为活塞加速推送混凝土至平稳推送的时间, (t_1, t_2) 为活塞缓冲减速时间, (t_2, t_3) 为分配阀换向时间的一半;

$V(t)$ 用傅里叶级数展开式的表达式

$$V(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{t_3} + b_n \sin \frac{n\pi t}{t_3} \right) \quad (5)$$

其中 a_0 、 a_n 、 b_n 计算如下

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \cos \frac{n\pi t}{t_2} dt \\
 &= \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_3)} - \frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \\
 &\quad + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_1)} - \frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2}
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \sin \frac{n\pi t}{t_2} dt \\
 &= \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_1)} - \frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \\
 &\quad \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_3)} - \frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \\
 &\quad \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$a_0 = \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) dt = \frac{v}{2} (2t_2 + t_1 + t_3) \tag{8}$$

速度V表达式为

$$V(t) = \frac{v}{4} (2t_2 + t_1 + t_3) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_3)} - \frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \\ &+ \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_1)} - \frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ &+ \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_1)} - \frac{(t_2-t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2-t_3)} - \frac{(t_2-t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2-t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \end{aligned} \right. \tag{9}$$

(3) 压力损失动态变化模型求解

将V和求导后的V代入上述流体运动方程(3),得压力p计算公式

泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法

技术领域

[0001] 本发明属于流体力学领域,涉及泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法。

背景技术

[0002] 混凝土泵车在各种建筑施工等需要泵送混凝土的工程上有广泛地应用,根据施工对象、场地、泵送高度的不同,混凝土泵车在每一个工况下的臂架姿态也不同,所对应的每一个姿态所需的泵送压力也不同,通过计算混凝土在管道中的压力损失可以得到泵送混凝土所需要的压力,为混凝土泵车的设计与施工提供重要的参数。同时,混凝土泵车在施工过程中会产生较大的振动,而泵送压力随时间的变化是引起臂架及底盘振动的根本原因,因此研究混凝土泵车泵送压力的动态特性对混凝土泵车的设计和振动特性分析具有重要的理论意义和实用价值。

[0003] ORio测得了不同配比的混凝土压力和流量的对应数据,运用数学方法拟合压力随流量变化的曲线,得到压力与流量近似呈线性的关系。ChoiM通过实验测得了压力与流量、管道长度、混凝土规格等流变参数对应数据,通过CFD计算得到的压力损失大小与流量的线性曲线与实验所得曲线拟合较好;钟才华运用伯努利方程结合S.Morinaga提出的摩擦系数计算式推导出了混凝土在直管、弯管、锥管中的压力损失;赵志缙分析了混凝土在管道中的流动状态,认为混凝土在管道中流动时符合Bingham体管道层流特性,在管道中的流动为柱塞流,并推导得出了压力损失计算的公式;杨志强进行了废石尾砂混合料浆在环管内输送时的压力损失实验,分析了不同配比的废石砂和料浆在管道中压力损失的变化规律;张磊通过实验得到压力损失大小与速度大小的一一对应的数据点,用直线拟合得到了压力损失的计算式。

[0004] 现有的压力损失研究主要计算泵送压力的数值,一般认为混凝土在管道中的流动为定常流动,事实上,随着泵送油缸活塞周期性地交替运动泵送混凝土可知,混凝土在管道内流速呈周期性变化,且在泵送开始阶段和即将换向阶段混凝土并不是匀速运动,是急需克服的难题。

发明内容

[0005] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,通过理论推导得出混凝土在管道中作非定常流动时的压力损失计算式,并通过活塞位移和应变信号图得到混凝土流速的变化曲线,用傅里叶级数建立混凝土流速的数学模型,代入压力损失计算式中,得到混凝土管道压力随时间的动态变化计算式。

[0006] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0007] 泵送混凝土非定常流泵送压力动态分析方法,该方法包括以下步骤:

[0008] S1:分析泵送混凝土的流变学特性;

[0009] S2:推导混凝土在管道中的压力损失动态变化公式。

[0010] 进一步,所述步骤S1具体为:

[0011] 普通混凝土为非牛顿流体中的Bingham体,本构方程为 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$, τ_0 为极限切应力, η_p 为塑性粘度,当切应力小于极限切应力时,流体内部无相对运动,当切应力大于极限切应力 τ_0 时,流体才开始运动,切应力与剪切应变率呈线性变化,斜率为 η_p ;

[0012] 根据钻井流体力学,在判断Bingham体在管道中流动为层流还是紊流时,参照牛顿流体判断方法,当雷诺数 $Re = \frac{\rho U d}{\mu} \leq 2320$ 范围内,流体流动为层流;雷诺数 $Re \leq 2320$,得出泵送混凝土在管道中的流动状态为层流;

[0013] Bingham体在管道中作定常层流运动时,根据Bingham体本构方程知,当最大切应力 $\tau_w < \tau_0$ 时,混凝土不产生流动,为静止状态;当最大切应力 $\tau_w > \tau_0$ 时,在 $\tau \leq \tau_0$,即 $R \leq R_0$ 范围内,流体内部质点无相对运动,流体的运动速度相同,在 $\tau \geq \tau_0$,即 $R \geq R_0$ 范围内,切应力 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$,流体的流动速度曲线呈抛物线形式,定常流动时速度为

$$u = \frac{\Delta p}{4\eta_p L} [R^2 - r^2 - 2R_0(R - r)] \quad , R = R_0 \text{时速度最大,管壁处速度为} 0;$$

[0014] 把混凝土在管道中的流动看成柱塞流,即在一个截面上任意半径处速度都相同,管道内的混凝土像柱塞一样向前流动,只有与管道内壁接触的表面存在摩擦力,混凝土内部无摩擦力。

[0015] 进一步,所述步骤S2具体为:

[0016] S21:推导压力损失经验公式;

[0017] 压力损失计算式为:

$$[0018] \quad \Delta p_H = \frac{2}{R} \left[K_1 + K_2 \left(1 + \frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}} \right) V \right] \alpha_2 \quad (1)$$

[0019] Δp_H ---混凝土在单位长度水平管道内流动时的压力损失,单位为Pa/m;

[0020] K_1 ---粘着系数,单位为Pa, K_1 的计算式为 $K_1 = 300 - S$, S 为混凝土的坍塌度;

[0021] K_2 ---速度系数,单位为Pa · s/m, K_2 的计算式为 $K_2 = 400 - S$;

[0022] R ---混凝土流动管道的半径,单位为m;

[0023] $\frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}}$ ---混凝土泵分配阀切换时间与活塞推压混凝土时间之比;

[0024] V ---混凝土的平均流速,单位为m/s,计算式为 $V = \frac{Q}{\pi R^2}$, Q 为混凝土的排量,单位为 m^3/h ;

[0025] α_2 ---径向压力与轴向压力之比,普通混凝土一般取0.9;

[0026] S22:推导压力损失动态变化计算模型

[0027] (1)直管道压力损失分析

[0028] 混凝土在管道中的流动近似为柱塞流,在管道的一个横截面上,速度和压力都不随半径变化,分析直管道压力损失,取长度为 dx 、半径为管道半径 r 的混凝土为控制体,受到

沿管道长度方向的压力、沿管壁处的摩擦力和重力,得出流体运动方程为:

$$[0029] \quad -(P+dP)\pi r^2 + P\pi r^2 + f \cdot 2\pi r dx + \rho\pi r^2 dx g \sin \varphi = ma = -\rho\pi r^2 dx \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

[0030] 式中 f 为摩擦系数,表示为 $f=K_1+K_2V$, K_1 和 K_2 的计算与压力损失经验公式中计算公式一致;将 f 代入后,运动方程求解得

$$[0031] \quad P = \left[\frac{2}{r}(K_1 + K_2V) + \rho \frac{dV}{dt} + \rho g \sin \varphi \right] x \quad (3)$$

[0032] 若能得到混凝土流动速度随时间的变化关系,则能求出泵送压力的时间历程曲线;

[0033] (2) 速度模型的建立

[0034] 根据混凝土泵车泵送系统的原理,高压泵送时,油缸有杆腔连通,从无杆腔供油,当一个油缸活塞到达最大行程时,连接混凝土缸的S管阀和主油缸同时换向,主油泵给另一个油缸供油,相对应的充满混凝土的缸继续泵送混凝土,呈现周期性泵送的规律;

[0035] 油缸活塞位移在稳定输送阶段随时间近似呈线性变化,速度为常数,在泵送开始和换向阶段,活塞位移随时间的变化不是线性的,速度会呈现加速上升和减速下降的趋势,得出混凝土速度的变化,在泵送开始阶段混凝土速度从0加速上升至一个恒定值,在稳定输送阶段,混凝土速度为一个恒定值,在换向阶段混凝土速度减速为0,用式(4)所示的数学模型来表示速度随时间的变化:

$$[0036] \quad V(t) = \begin{cases} \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_4)}(t + t_4) \right] + \frac{v}{2} & (-t_2, -t_3) \\ v & (-t_3, t_1) \\ \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_1)}(t - t_1) \right] + \frac{v}{2} & (t_1, t_2) \end{cases} \quad (4)$$

[0037] 其中 $v = \frac{Q}{3600\pi r^2}$, Q 为混凝土排量,单位为 m^3/h , r 为管道的半径; $(-t_2, -t_4)$ 为活塞加速推送混凝土至平稳推送的时间, (t_1, t_2) 为活塞缓冲减速时间, (t_2, t_3) 为分配阀换向时间的一半;

[0038] $V(t)$ 用傅里叶级数展开式的表达式

$$[0039] \quad V(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{t_3} + b_n \sin \frac{n\pi t}{t_3} \right) \quad (5)$$

[0040] 其中 a_0 、 a_n 、 b_n 计算如下

$$[0041] \quad \begin{aligned} a_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \cos \frac{n\pi t}{t_2} dt \\ &= \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \\ &\quad + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \sin \frac{n\pi t}{t_2} dt \\
 &= \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \\
 [0042] \quad & \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \\
 & \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$[0043] \quad a_0 = \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) dt = \frac{v}{2} (2t_2 + t_1 + t_3) \tag{8}$$

[0044] 速度V表达式为

[0045]

$$V(t) = \frac{v}{4} (2t_2 + t_1 + t_3) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \left\{ \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ & + \left\{ \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ & + \left\{ \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \right\} \end{aligned} \right. \tag{9}$$

[0046] (3) 压力损失动态变化模型求解

[0047] 将V和求导后的V代入上述流体运动方程(3),得压力p计算公式

[0048]

$$p = \left\{ \left[\frac{2}{R} (K_1 + K_2) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right. \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(\begin{matrix} -\cos n\pi \\ -\cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{matrix} \right) + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\begin{matrix} \cos n\pi \\ \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \end{matrix} \right) + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \right\} \right. \right. \left. \right\} x \\
 + \rho \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right. \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \cdot \frac{n\pi}{t_2} \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(\begin{matrix} -\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{matrix} \right) + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\begin{matrix} \cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \end{matrix} \right) + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \cdot \frac{n\pi}{t_2} \right\} \right. \right. \left. \right\} + \rho g \sin \varphi$$

[0049] 混凝土缸泵送出口的压力包括其在直管道流动时的沿程压力损失,在弯管、锥管、连接处等附件的局部阻力损失和重力损失,弯管和锥管处的压力损失等效为单位长度直管沿程压力损失的倍数,则混凝土缸出口压力为

$$P = \left[\frac{2}{r} (K_1 + K_2 V) + \rho \frac{dV}{dt} \right] (x + ly + mz + nw) + \rho gh \tag{11}$$

[0051] 其中x为直管长度,y为弯管等效的直管长度,z为锥管等效的直管长度,w为其他附件等效的直管长度,l、m、n分别为弯管、锥管及其他附件的个数。

[0052] 本发明的有益效果在于:

[0053] 目前已有计算泵送压力的模型仅计算压力损失的大小,或者通过泵送液压系统的仿真模型得出主油泵出口的压力变化,本发明从混凝土在管道中流动的原理出发建立了一套数学模型,能够更直观地表示出泵送负载即混凝土缸出口压力的动态变化,为后续泵车振动的研究提供了输入的动载荷。

[0054] 本发明的其他优点、目标和特征在某种程度上将在随后的说明书中进行阐述,并且在某种程度上,基于对下文的考察研究对本领域技术人员而言将是显而易见的,或者可以从本发明的实践中得到教导。本发明的目标和其他优点可以通过下面的说明书来实现和获得。

附图说明

[0055] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明作优选的详细描述,其中:

- [0056] 图1为Bingham体流变曲线;
- [0057] 图2为Bingham体管道定常层流速度曲线;
- [0058] 图3为混凝土在管道中流动时的受力图;
- [0059] 图4为混凝土泵送示意图;
- [0060] 图5为泵送油缸活塞行程图;
- [0061] 图6为泵送油缸活塞应变压力信号变化;
- [0062] 图7为混凝土速度变化曲线;
- [0063] 图8为150l/min实验工况;
- [0064] 图9为单位长度压力动态变化;
- [0065] 图10为实验主油泵压力变化曲线;
- [0066] 图11为模型计算所得主油泵压力变化曲线。

具体实施方式

[0067] 以下通过特定的具体实例说明本发明的实施方式,本领域技术人员可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点与功效。本发明还可以通过另外不同的具体实施方式加以实施或应用,本说明书中的各项细节也可以基于不同观点与应用,在没有背离本发明的精神下进行各种修饰或改变。需要说明的是,以下实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本发明的基本构想,在不冲突的情况下,以下实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0068] 其中,附图仅用于示例性说明,表示的仅是示意图,而非实物图,不能理解为对本发明的限制;为了更好地说明本发明的实施例,附图某些部件会有省略、放大或缩小,并不代表实际产品的尺寸;对本领域技术人员来说,附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。

[0069] 本发明实施例的附图中相同或相似的标号对应相同或相似的部件;在本发明的描述中,需要理解的是,若有术语“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此附图中描述位置关系的用语仅用于示例性说明,不能理解为对本发明的限制,对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语的具体含义。

[0070] 本发明中,混凝土泵送油缸交替泵送混凝土,使混凝土在输送管中流动为非定常流,混凝土管道流与bingham体在管道中的流动特性相近,可把混凝土的流动看成在管道中作非定常层流运动的柱塞流,速度和压力在同一横截面上不随半径的变化而变化。然后,根据混凝土泵送系统泵送原理,得知混凝土速度为一个周期性变化的波形,在活塞开始推送和即将换向阶段呈现加减速运动,平稳推送阶段近似匀速运动,建立速度的数学模型,求出了压力损失动态变化的数学模型。最后,实例计算验证动态模型的正确性。

[0071] 1. 泵送混凝土的流变学特性

[0072] 混凝土是一种水泥砂浆拌合物,根据混凝土在管道中流动时剪切应力与剪切应变率的变化关系可知其不满足牛顿粘性定律,为非牛顿流体,普通混凝土一般为非牛顿流体

中的Bingham体,其本构方程为 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$, τ_0 为极限切应力, η_p 为塑性粘度,流变曲线如图

1所示,当切应力小于极限切应力时,流体内部无相对运动,当切应力大于极限切应力 τ_0 时,流体才开始运动,切应力与剪切应变率呈线性变化,斜率为 η_p 。

[0073] 随着混凝土泵送系统两个油缸活塞交替泵送混凝土进入管道内,可知混凝土在管道内的流动为成一定周期变化的非定常流动。根据钻井流体力学,在判断Bingham体在管道中流动为层流还是紊流时,可参照牛顿流体判断方法,根据尼古拉兹实验曲线和莫迪图可知,

当雷诺数 $Re = \frac{\rho U d}{\mu} \leq 2320$ 范围内,流体流动为层流。赵志缙根据常用泵送混凝土的塑性

粘度范围、管道流速范围及泵车管道半径范围计算了雷诺数 $Re \leq 2320$,可以得出泵送混凝土在管道中的流动状态为层流。

[0074] Bingham体在管道中作定常层流运动时,根据Bingham体本构方程可知,当最大切应力 $\tau_w < \tau_0$ 时,混凝土不产生流动,为静止状态;当最大切应力 $\tau_w > \tau_0$ 时,其流动速度如图2所示,在 $\tau \leq \tau_0$,即 $R \leq R_0$ 范围内,流体内部质点无相对运动,流体的运动速度相同,在 $\tau \geq \tau_0$,

即 $R \geq R_0$ 范围内,切应力 $\tau = \tau_0 + \eta_p \frac{du}{dy}$,流体的流动速度曲线呈抛物线形式,定常流动时速度

为 $u = \frac{\Delta p}{4\eta_p L} [R^2 - r^2 - 2R_0(R - r)]$, $R = R_0$ 时速度最大,管壁处速度为0。

[0075] 根据以上分析,我们可以把混凝土在管道中的流动看成柱塞流,即在一个截面上任意半径处速度都相同,管道内的混凝土像柱塞一样向前流动,只有与管道内壁接触的表面存在摩擦力,混凝土内部无摩擦力。

[0076] 2.混凝土在管道中的压力损失动态变化公式推导

[0077] 2.1压力损失经验公式

[0078] 目前国内外广泛采用的压力损失计算式是由S.Morinaga根据理论和实验总结得出的经验公式,也是《混凝土泵送施工技术规范》推荐使用的公式,此公式计算的是混凝土定常流运动时压力损失的数值。

$$[0079] \quad \Delta p_H = \frac{2}{R} \left[K_1 + K_2 \left(1 + \frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}} \right) V \right] \alpha_2 \quad (1)$$

[0080] Δp_H ---混凝土在单位长度水平管道内流动时的压力损失 (Pa/m)

[0081] K_1 ---粘着系数,单位为Pa, K_1 的计算式为 $K_1 = 300 - S$,S为混凝土的坍塌度

[0082] K_2 ---速度系数,单位为Pa·s/m, K_2 的计算式为 $K_2 = 400 - S$

[0083] R ---混凝土流动管道的半径,单位为m

[0084] $\frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{tuiya}}}$ ---混凝土泵分配阀切换时间与活塞推压混凝土时间之比

[0085] V —混凝土的平均流速,单位为m/s,计算式为 $V = \frac{Q}{\pi R^2}$, Q 为混凝土的排量,单位为 m^3/h

[0086] α_2 —径向压力与轴向压力之比,普通混凝土一般取0.9

[0087] 2.2压力损失动态变化计算模型

[0088] 2.2.1直管道压力损失分析

[0089] 混凝土在管道中的流动近似为柱塞流,在管道的一个横截面上,速度和压力都不随半径变化,分析直管道压力损失,取长度为 dx 、半径为管道半径 r 的混凝土为控制体,受到沿管道长度方向的压力、沿管壁处的摩擦力和重力,其受力情况如图3所示,可得出流体运动方程为式2。

$$[0090] \quad -(P+dP)\pi r^2 + P\pi r^2 + f \cdot 2\pi r dx + \rho\pi r^2 dx \sin \varphi = ma = -\rho\pi r^2 dx \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

[0091] 式中 f 为摩擦系数, $S.Morinaga$ 经过大量实验验证结合理论总结出混凝土在管道中流动时的摩擦系数可表示为 $f = K_1 + K_2V$, K_1 和 K_2 的计算与上述压力损失经验公式中计算公式一致。将 f 代入后,运动方程求解得

$$[0092] \quad P = \left[\frac{2}{r} (K_1 + K_2V) + \rho \frac{dV}{dt} + \rho g \sin \varphi \right] x \quad (3)$$

[0093] 上式中如能得到混凝土流动速度随时间的变化关系,就能求出泵送压力的时间历程曲线。

[0094] 2.2.2速度模型的建立

[0095] 根据混凝土泵车泵送系统的原理,混凝土泵送示意图如图4,高压泵送时,油缸有杆腔连通,从无杆腔供油,当一个油缸活塞到达最大行程时,连接混凝土缸的S管阀和主油缸同时换向,主油泵给另一个油缸供油,相对应的充满混凝土的缸继续泵送混凝土,呈现周期性泵送的规律。

[0096] 油缸活塞的位移变化规律如图5,为浙江大学黄前春测得活塞的行程图,吕彭民实验室已测得活塞杆应变信号如图6所示,可以看出,活塞位移在稳定输送阶段随时间近似呈线性变化,速度为常数,在泵送开始和换向阶段,活塞位移随时间的变化不是线性的,速度会呈现加速上升和减速下降的趋势,由此,可以得出混凝土速度的变化图形如图7所示,在泵送开始阶段混凝土速度从0加速上升至一个恒定值,在稳定输送阶段,混凝土速度为一个恒定值,在换向阶段混凝土速度减速为0,所以可以用式(4)所示的数学模型来表示速度随时间的变化,速度随时间变化的曲线图如图7所示。

$$[0097] \quad V(t) = \begin{cases} \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_4)} (t + t_4) \right] + \frac{v}{2} & (-t_2, -t_3) \\ v & (-t_3, t_1) \\ \frac{v}{2} \cos \left[\frac{\pi}{(t_2 - t_1)} (t - t_1) \right] + \frac{v}{2} & (t_1, t_2) \end{cases} \quad (4)$$

[0098] 其中 $v = \frac{Q}{3600\pi r^2}$, Q 为混凝土排量,单位为 m^3/h , r 为管道的半径。 $(-t_2, -t_4)$ 为活塞加

速推送混凝土至平稳推送的时间, (t_1, t_2) 为活塞缓冲减速时间, (t_2, t_3) 为分配阀换向时间的一半。

[0099] 把 $V(t)$ 用傅里叶级数展开式写成一个表达式

$$[0100] \quad V(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi t}{t_3} + b_n \sin \frac{n\pi t}{t_3} \right) \quad (5)$$

[0101] 其中 a_0, a_n, b_n 计算如下

$$[0102] \quad \begin{aligned} a_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \cos \frac{n\pi t}{t_2} dt \\ &= \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \\ &\quad + \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$[0103] \quad \begin{aligned} b_n &= \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) \sin \frac{n\pi t}{t_2} dt \\ &= \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \\ &\quad \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \\ &\quad \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$[0104] \quad a_0 = \frac{1}{t_2} \int_{-t_2}^{t_2} V(t) dt = \frac{v}{2} (2t_2 + t_1 + t_3) \quad (8)$$

[0105] 则速度 V 表达式为

[0106]

$$[0106] \quad V(t) = \frac{v}{4} (2t_2 + t_1 + t_3) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ &+ \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right\} \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ &+ \left\{ \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left(-\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left(\cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

[0107] 2.2.3 压力损失动态变化模型求解

[0108] 将 V 和求导后的 V 代入上述流体运动方程 (3), 可得压力 p 计算公式

[0109]

$$p = \left\{ \left[\left(\frac{2}{R} K_1 + K_2 \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ & + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \cos \frac{n\pi t}{t_2} \\ & + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left[\begin{aligned} & -\cos n\pi \\ & -\cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{aligned} \right] + \right. \\ & \left. + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left[\begin{aligned} & \cos n\pi \\ & +\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \end{aligned} \right] + \right. \sin \frac{n\pi t}{t_2} \\ & \left. \left. + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right] \right\} \right] \right\} x \\
 + \rho \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_3}{t_2} \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \cdot \frac{n\pi}{t_2} \\ & + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \right] \sin \frac{n\pi t_1}{t_2} \right\} \sin \frac{n\pi t}{t_2} \cdot \frac{n\pi}{t_2} \\ & + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_1)} - \frac{(t_2 - t_1)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_1)} \right] \left[\begin{aligned} & -\cos n\pi - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \end{aligned} \right] + \right. \\ & \left. + \left[\frac{v}{4} \left[\frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 - n\pi(t_2 - t_3)} - \frac{(t_2 - t_3)}{\pi t_2 + n\pi(t_2 - t_3)} \right] \left[\begin{aligned} & \cos n\pi + \cos \frac{n\pi t_3}{t_2} \end{aligned} \right] + \right. \cos \frac{n\pi t}{t_2} \cdot \frac{n\pi}{t_2} \\ & \left. \left. + \frac{v}{2} \frac{1}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi t_3}{t_2} - \cos \frac{n\pi t_1}{t_2} \right) \right] \right\} + \rho g \sin \varphi \right\}
 \end{aligned} \right. \tag{10}$$

[0110] 混凝土缸泵送出口的压力包括其在直管道流动时的沿程压力损失,在弯管、锥管、连接处等附件的局部阻力损失和重力损失,根据日本学者黑岩秀介等人的实验及理论研究,弯管和锥管处的压力损失可以等效为单位长度直管沿程压力损失的倍数,则混凝土缸出口压力为

$$P = \left[\frac{2}{r} (K_1 + K_2 V) + \rho \frac{dV}{dt} \right] (x + ly + mz + nw) + \rho gh \tag{11}$$

[0112] 其中x为直管长度,y为弯管等效的直管长度,z为锥管等效的直管长度,w为其他附件等效的直管长度,l、m、n分别为弯管、锥管及其他附件的个数。

[0113] 3. 泵送压力计算实例

[0114] 参考长安大学吕彭民实验室、杨晓乾及中南大学张大庆研究论文里的管道参数、泵送系统参数、实验工况等条件,实验工况如图8所示,流量150l/min频率0.296Hz周期为3.38s,t₁=0.8,t₂=1.69,t₃=0.7,排量为80m³/h,r=0.0625m,坍落度S=180mm。运用上述混凝土管道非定常流压力损失计算模型,仅考虑直管道压力损失动态变化的计算,计算出单位长度压力损失的动态变化结果如图9,压力呈周期性波动,从大小上看,单位长度压力损失的均值为0.0166MPa,经验公式算得单位长度压力损失大小为0.0172MPa,如式(12),可知所推导的压力损失动态变化计算的数学模型均值与经验公式所计算的大小很接近;从压力变化上看,在活塞开始加速推送混凝土阶段,即速度上升阶段,压力有一个冲击,在活塞平稳推送混凝土阶段,即匀速阶段,压力也平稳变化接近一个恒定值,在活塞减速到达行程

最大并换向处,压力则迅速降低为接近0的一个值。

[0115]

$$\Delta P_H = \frac{2}{R} \left[K_1 + K_2 \left(1 + \frac{t_{\text{huanxiang}}}{t_{\text{miya}}} \right) V \right] \alpha_2 = \frac{2}{0.0625} \left[120 + 220 \times 1.2 \times \frac{80}{3600 \times 3.14 \times 0.0625^2} \right] \times 0.9 = 0.0172 \text{ MPa} \quad (12)$$

[0116] 从图4所示的混凝土泵送示意图可以求出主油泵进油口无杆腔压力与混凝土缸泵送出口压力之间的关系, $P_{\text{进}}$ 表示无杆腔进油口压力, $P_{\text{连}}$ 表示有杆连通腔压力, $P_{\text{回}}$ 表示无杆腔回油压力, $P_{\text{负}}$ 表示吸入混凝土需要的负压, $P_{\text{混凝土}}$ 表示混凝土缸出口压力, f_1, a_1 和 f_2, a_2 分别为上下两活塞运动时所受的摩擦力和运动加速度,可列两活塞运动方程如下:

$$[0117] \quad P_{\text{进}} \cdot S_{\text{无杆腔}} - P_{\text{连}} S_{\text{有杆腔}} = P_{\text{混凝土}} S_{\text{混凝土}} + f_1 + Ma_1 \quad (13)$$

$$[0118] \quad P_{\text{连}} S_{\text{有杆腔}} - P_{\text{回}} \cdot S_{\text{无杆腔}} = P_{\text{负}} S_{\text{混凝土}} + f_2 + Ma_2 \quad (14)$$

$$[0119] \quad \text{相加得 } P_{\text{进}} \cdot S_{\text{无杆腔}} - P_{\text{回}} S_{\text{无杆腔}} = P_{\text{混凝土}} - P_{\text{负}} S_{\text{混凝土}} + f_1 + f_2 + M(a_1 + a_2) \quad (15)$$

$$[0120] \quad \text{匀速运动时 } P_{\text{进}} \cdot S_{\text{无杆腔}} - P_{\text{回}} S_{\text{无杆腔}} = P_{\text{混凝土}} - P_{\text{负}} S_{\text{混凝土}} + f_1 + f_2 \quad (16)$$

$$[0121] \quad \text{泵空载运行时 } P_{\text{空}} \cdot S_{\text{无杆腔}} - P_{\text{回}} S_{\text{无杆腔}} = f_1 + f_2 \quad (17)$$

[0122] 将空载运行时的方程代入匀速运动方程,可得到混凝土缸出口压力与进油口油缸压力的关系

$$[0123] \quad P_{\text{混凝土}} = \left(P_{\text{进}} - P_{\text{空}} \right) \frac{S_{\text{油缸}}}{S_{\text{混凝土}}} - P_{\text{负}} \quad (18)$$

[0124] 可看出进油口油缸压力与混凝土缸出口压力呈线性关系,可用式(18)表示

$$[0125] \quad P_{\text{进}} = a P_{\text{混凝土}} + b \quad (19)$$

$$[0126] \quad \text{其中 } a_1 = \frac{S_{\text{混凝土}}}{S_{\text{油缸}}}, \quad b_1 = \frac{S_{\text{混凝土}}}{S_{\text{油缸}}} \cdot P_{\text{负}} + P_{\text{空}}$$

[0127] 混凝土缸泵送出口压力如式(11),可改写为式(20), $P_{\text{单}}$ 为单位长度直管道压力损失

$$[0128] \quad P_{\text{混凝土}} = a_2 P_{\text{单}} + b_2, \quad a_2 = x + ly + mz + nw, \quad b_2 = \rho gh \quad (20)$$

$$[0129] \quad \text{则主油泵进油口油缸压力 } P_{\text{进}} = a P_{\text{单}} + b, \quad a = a_1 a_2, \quad b = a_1 b_2 + b_1 \quad (21)$$

[0130] 由式(21)可知,主油泵进油口油缸压力与单位长度直管压力损失近似呈线性关系,吕彭民实验室论文里得出流量为150l/min时主油泵进油口压力变化实验曲线如图10所示,前面算得单位长度压力损失如图9,可以看出实验曲线与单位长度压力曲线近似呈线性关系,当 $a=830, b=1 \times 10^6$ 时,算出主油泵压力曲线如图11与实验曲线趋势吻合较好。

[0131] 4. 结论

[0132] 1) 混凝土泵送油缸交替泵送混凝土,使混凝土在输送管中流动为非定常流,混凝土管道流与bingham体在管道中的流动特性相近,可把混凝土的流动看成在管道中作非定常层流运动的柱塞流,速度和压力在同一横截面上不随半径的变化而变化。

[0133] 2) 根据混凝土泵送系统泵送原理,得知混凝土速度为一个周期性变化的波形,在活塞开始推送和即将换向阶段呈现加减速运动,平稳推送阶段近似匀速运动,建立速度的数学模型,求出了压力损失动态变化的数学模型。

[0134] 3) 通过一个计算实例得出混凝土压力损失动态变化的结果,可以看出,压力损失呈周期性变化,均值与经验公式计算所得大小接近,在泵车换向阶段压力会产生周期性的

波动,显示出了混凝土在管道内非定常流动状态对泵车产生的压力冲击。

[0135] 4) 混凝土缸出口压力与主油泵进油口无杆腔压力呈线性关系,且混凝土缸出口压力与单位长度直管压力损失近似成线性关系,可以得出主油泵出口压力的变化曲线,与实验曲线进行对比,与实验所测压力变化的曲线趋势吻合较好,验证了所建立的压力损失动态变化计算模型的正确性。

[0136] 最后说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制,尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应当理解,可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,而不脱离本技术方案的宗旨和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

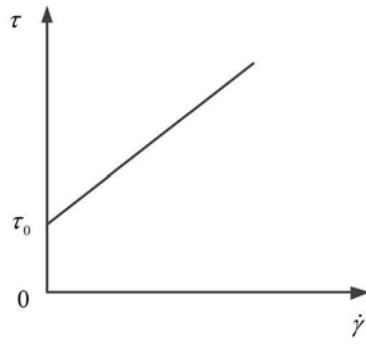


图1

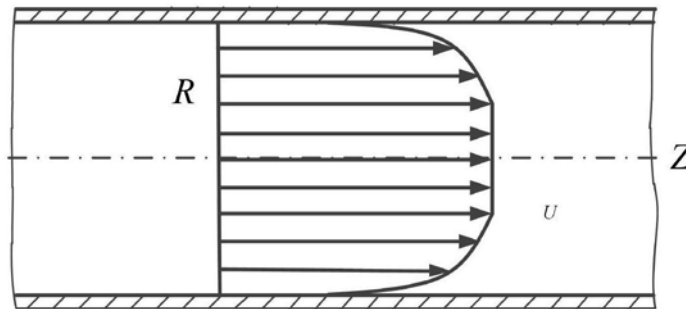


图2

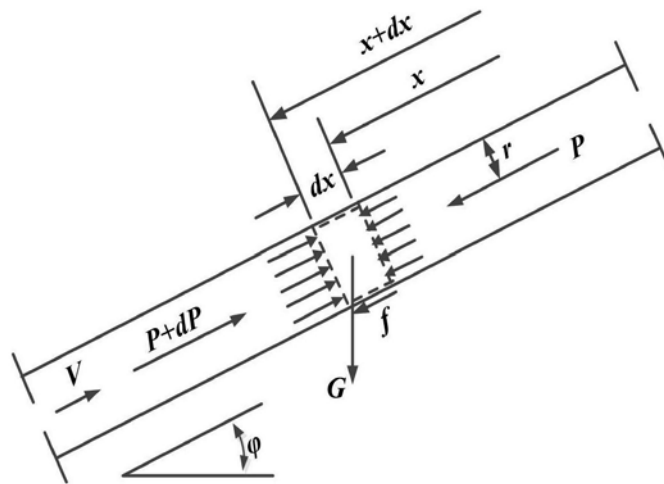


图3

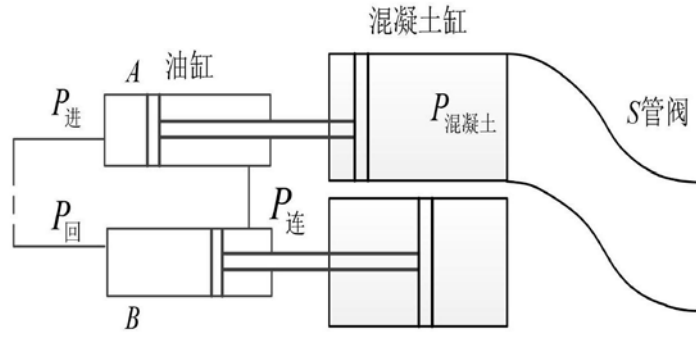


图4

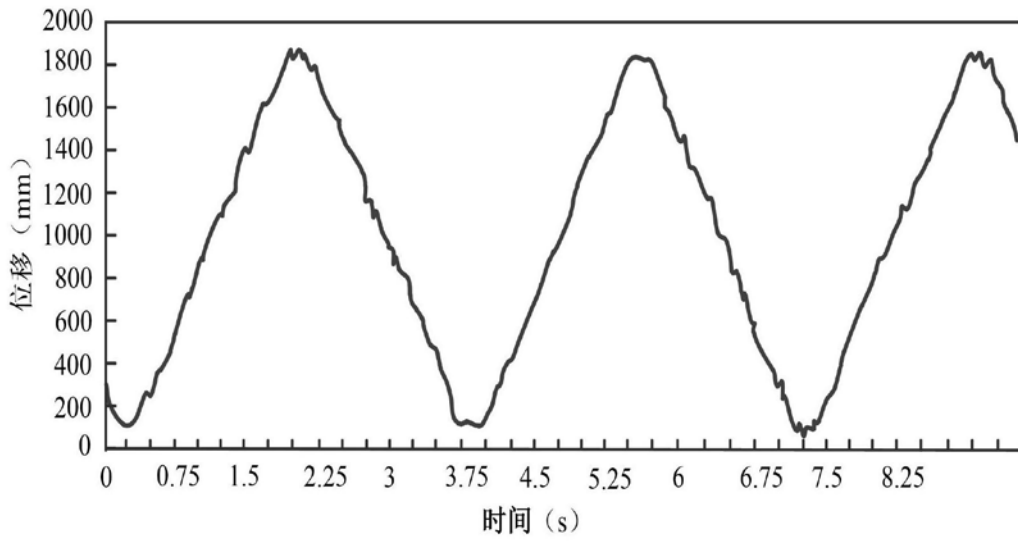


图5

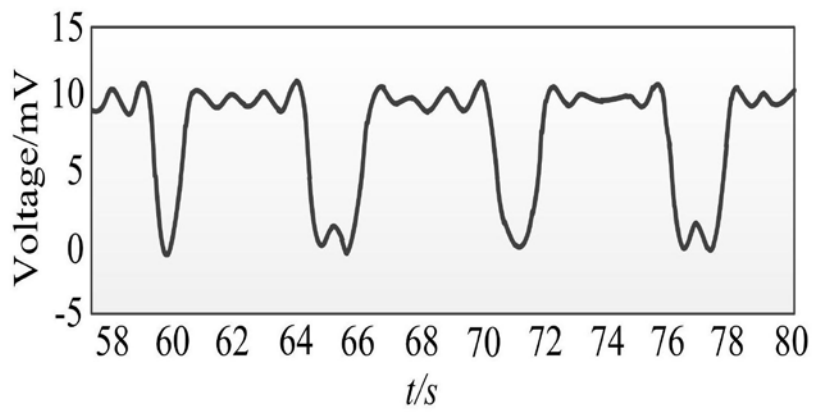


图6

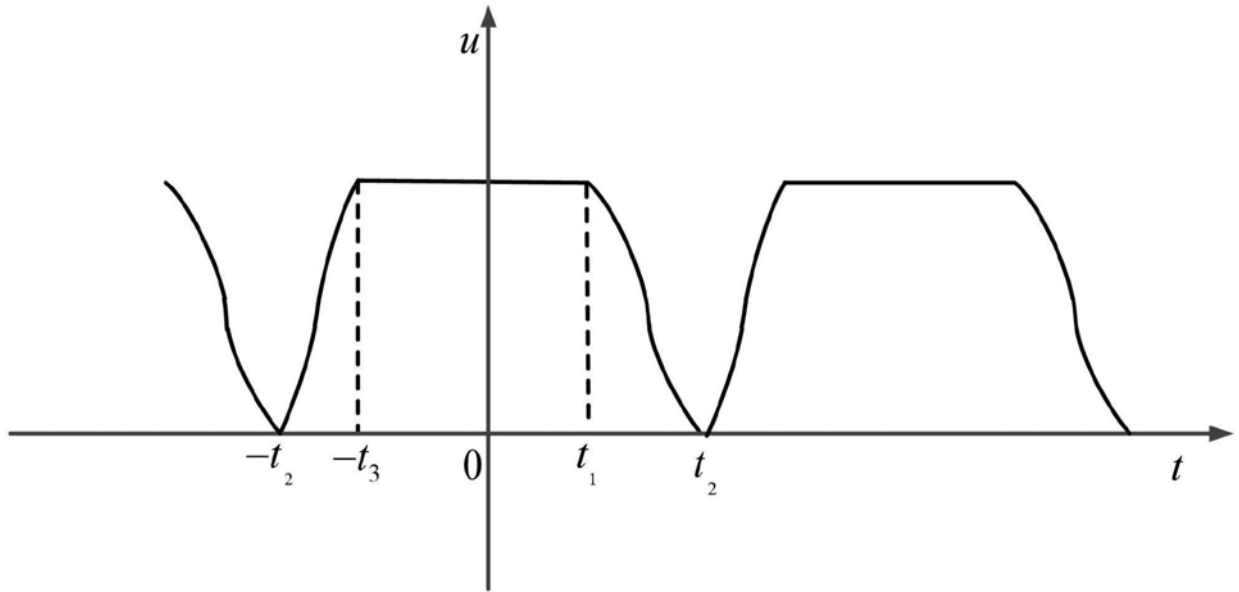


图7

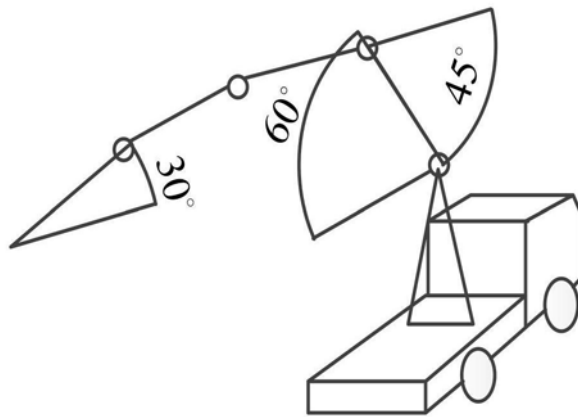


图8

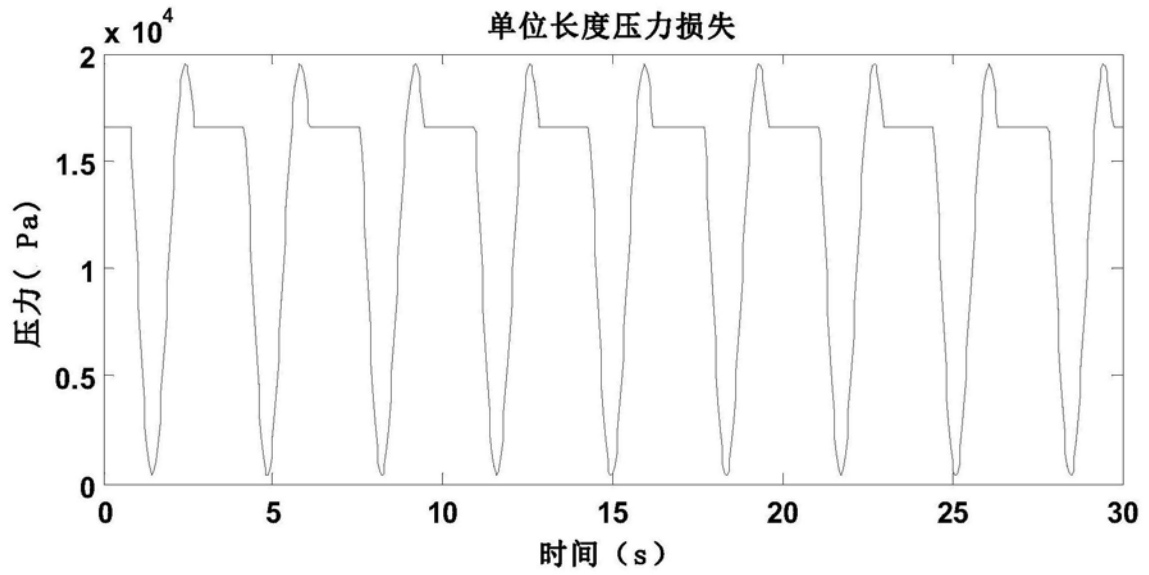


图9

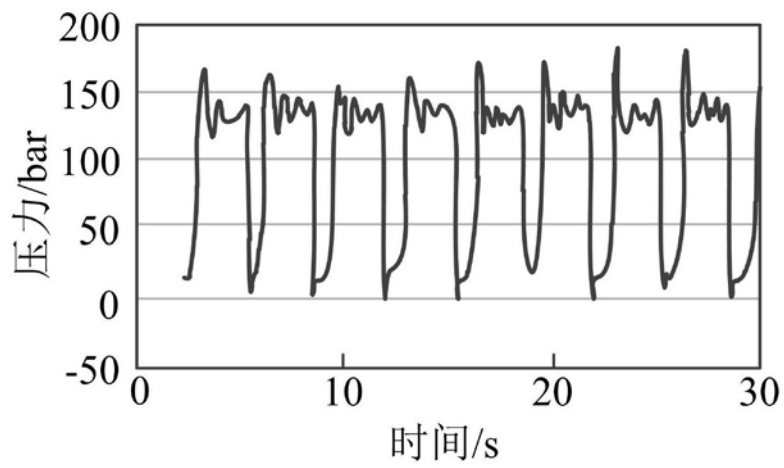


图10

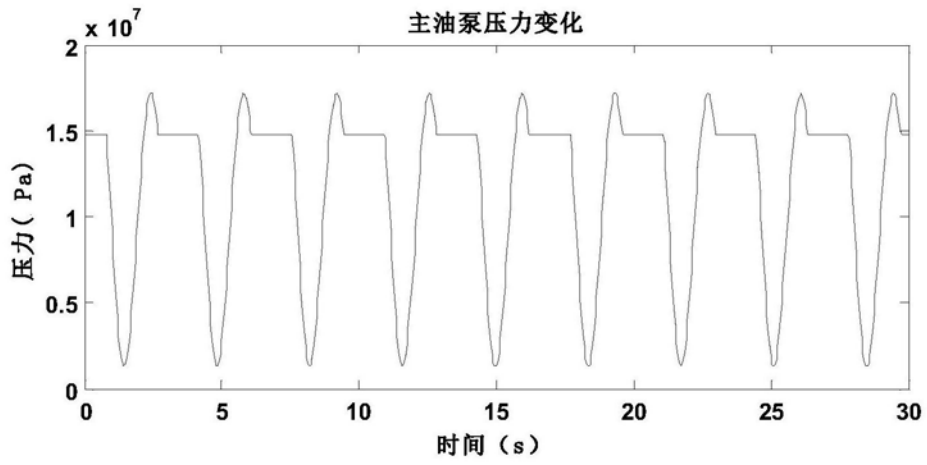


图11