



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108104795 A
(43)申请公布日 2018.06.01

(21)申请号 201711348194.4

(22)申请日 2017.12.15

(71)申请人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区大道8号

(72)发明人 曾德智 张海鑫 李皓 董宝军

喻智明 刘冰 张恩搏 施太和

(51)Int. Cl.

E21B 47/00(2012.01)

E21B 12/02(2006.01)

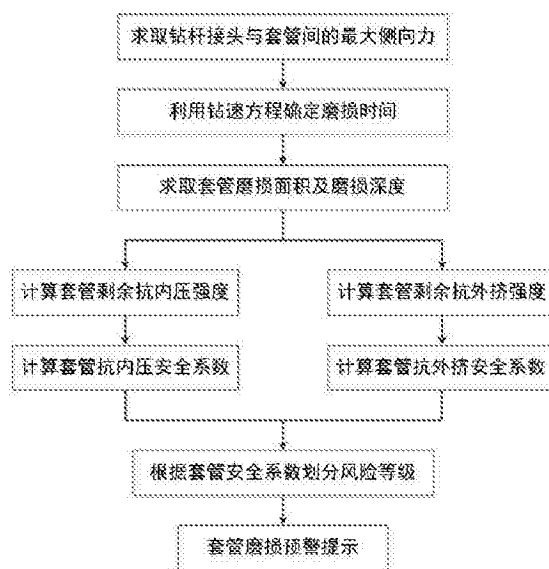
权利要求书4页 说明书8页 附图2页

(54)发明名称

一种套管磨损风险的实时预警方法

(57)摘要

本发明属于油气建井安全领域,具体涉及一种套管磨损风险的实时预警方法。其特征在于:首先通过计算选取钻杆接头与套管间的最大侧向力,利用钻速方程,确定磨损时间,求取套管的磨损面积与深度;然后求出套管剩余抗内压强度和剩余抗挤强度,计算套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数,根据得到的套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数划分风险等级;最后根据风险等级来确定套管磨损情况并进行实时预警。该发明的优点在于:可根据井眼轨迹,计算出套管在磨损风险最大位置处的磨损深度;可对当前已钻和待钻井眼中套管的磨损量进行预评估,便于后期采取套管防护措施。



1. 一种套管磨损风险的实时预警方法,其特征在于:首先通过计算选取钻杆接头与套管间的最大侧向力,利用钻速方程,确定磨损时间,求取套管的磨损面积与深度;然后求出套管剩余抗内压强度和剩余抗挤强度,计算套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数,根据得到的套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数划分风险等级;最后根据风险等级来确定套管磨损情况并进行实时预警;具体步骤如下:

步骤1:根据井身轨迹和钻柱结构,分段求取钻杆接头与套管间侧向力,记为 $F=F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$,并取最大的侧向力,记为 F_{\max} ,其中, F_i 算式为(1):

$$F_i = \frac{2}{2\rho + 0.001d_i} \left\{ \begin{array}{l} q \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \sin\beta - Ze^{-\mu\beta} - \\ \frac{q}{\mu + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$Z = e\mu\beta_0 \left[qLK_b \cos\beta_0 - \pi \frac{d_e}{2000} L_t r_n \right] - \frac{e\beta_0 \mu q}{\mu^2 + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \quad (2)$$

其中:

$$K_b = 1 - \gamma_n / \gamma_t \quad (3)$$

式中: F_i 为套管与钻杆间的侧向力(N), ρ 为井眼曲率半径(m), d_e 为钻杆接头外径(mm), d_i 为套管内径(mm), Z 为计算系数, e 为常数(取2.718), μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数, L 为井深(m), β_i 为井斜角(弧度), q 为钻柱线重(N/m), β_0 为最大井斜角(弧度), K_b 为浮力系数, L_t 为井斜开始点至井口的高度(m), γ_n 为钻井液密度(kg/m^3), γ_t 为套管密度(kg/m^3);

步骤2:确定钻杆接头与套管的磨损时间 T ,其算式为(4):

$$T = T_1 + T_2 \quad (4)$$

其中:

$$T_2 = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{r_i} \quad (5)$$

$$r_i = f(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}) \quad (6)$$

式中: T 为钻杆接头与套管的磨损时间(h), T_1 为已发生磨损的时间(h),通过井史数据资料获取, T_2 为预计磨损时间(h), n 为即将钻遇地层的分段数, L_i 为第 i 段地层中的钻头进尺(m), r_i 为第 i 段地层中的机械钻速(m/h),与多种因素有关, f 为第 i 段地层中机械钻速与钻井工艺参数之间的关系, X_{1i} 为第 i 段地层中岩层特性对机械钻速的影响, X_{2i} 为第 i 段地层中井深对机械钻速的影响, X_{3i} 为第 i 段地层中井底压差对机械钻速的影响, X_{4i} 为第 i 段地层中机械参数对机械钻速的影响, X_{5i} 为第 i 段地层中水力参数对机械钻速的影响;

步骤3:求取套管磨损面积 S ,其算式为(7):

$$S = \frac{E \mu F_{\max} L_w \times 10^6}{H} \quad (7)$$

其中:

$$L_w = 0.001 n_t d_e \quad (8)$$

$$n_t = 60NT \quad (9)$$

式中: S 为套管磨损面积(mm^2), E 为磨损效率, μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数, F_{\max} 为钻杆接头与套管间的最大侧向力(N), L_w 为钻柱与套管间的相对运动累计路程(m), H 为布氏硬

度 (N/m^2), n_t 为钻柱转动次数, d_e 为钻杆接头外径 (mm), N 为钻柱转速 (r/h), T 为钻杆接头与套管的磨损时间 (h);

步骤4: 利用公式 (10) 求取套管偏磨深度 c_1 ;

$$c_1 = k - (d_i - d_e) \quad (10)$$

其中:

$$k = \frac{S - \int_{x_1}^{x_2} \left(\sqrt{d_e^2 - x^2} - \sqrt{d_i^2 - x^2} \right) dx}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

式中: c_1 为套管偏磨深度 (mm), k 为钻杆接头的轴线与套管轴线的距离 (mm), d_i 为套管内径 (mm), d_e 为钻杆接头外径 (mm), S 为套管磨损面积 (mm^2), x_1 和 x_2 为套管磨损截面上的两圆交点的横坐标;

步骤5: 利用公式 (12) 求取磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} ;

$$P_{cw} = \frac{(P_1 + P_2) - \left[(P_1 - P_2)^2 + 4P_1P_2\lambda \right]^{1/2}}{2(1 - \lambda)} \quad (12)$$

其中:

$$P_1 = \frac{2K_e E}{(1 - \nu^2) \left[\frac{d}{c - c_1} \right] \left[\frac{d}{c - c_1} - 1 \right]^2} \quad (13)$$

$$P_2 = \frac{2K_y P_{\min}}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{d}{d + 2c_1 - 2c} \right) \quad (14)$$

$$\lambda = 0.127\delta + 0.0039\eta - 0.440 (P_{rs}/P_{fy}) \quad (15)$$

$$\delta = \frac{2c_1}{2d - 4c + c_1} \quad (16)$$

$$\eta = \frac{2c_1}{2c - c_1} \quad (17)$$

式中: P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度 (MPa), P_1 为套管的弹性挤毁压力 (MPa), P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力 (MPa), λ 为套管的制造缺陷影响因子 (普通级套管 λ 取 0.21~0.23, 高抗挤套管 λ 取 0.17~0.175, 高抗挤抗硫套管 λ 取 0.125~0.130), c 为套管壁厚 (mm), c_1 为套管磨损深度 (mm), K_e 为套管弹性常数折减系数 (J55、K55 和所有抗硫钢, K_e 取 0.9; N80、P110 和 Q125, K_e 取 1.0), E 为杨氏模量 ($2.0 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^5$ MPa), ν 为泊松比 (0.2~0.3), d 为套管外径 (mm), K_y 为套管屈服强度折减系数 (对 J55、K55、N80 和所有抗硫钢, $K_y = 0.85$), P_{\min} 为套管最小屈服强度 (MPa), δ 为套管内壁不圆度, η 为套管壁厚不均度, P_{rs} 为套管残余应力 (MPa), P_{fy} 为套管的实际屈服强度 (MPa);

步骤6: 将步骤5中磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} 代入公式 (18) 中计算出套管的抗挤安全系数 k_{cw} , 其算式为 (19);

$$k_{cw} = P_{cw}/P_{设外} \quad (18)$$

$$k_{cw} = \frac{P_1 + P_2 - [(P_1 - P_2)^2 + 4P_1 P_2 \lambda]^{1/2}}{2P_{\text{设外}}(1 - \lambda)} \quad (19)$$

式中： k_{cw} 为套管的抗挤安全系数， P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度(MPa)， $P_{\text{设外}}$ 为套管的设计外压载荷(MPa)， P_1 为套管的弹性挤毁压力(MPa)， P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力(MPa)， λ 为套管的制造缺陷影响因子(普通级套管 λ 取0.21~0.23，高抗挤套管 λ 取0.17~0.175，高抗挤抗硫套管 λ 取0.125~0.130)；

步骤7：将步骤4中求取的套管偏磨深度 c_1 代入到公式(20)中，得到磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} ；

$$P_{iw} = \frac{2P_{\min}(c - ac_1) \left[\left(\frac{1}{2}\right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{b+1} \right]}{d - (c - ac_1)} \quad (20)$$

其中：

$$b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{\min} \quad (21)$$

式中： P_{iw} 为磨损套管的剩余抗内压强度(MPa)， P_{\min} 为套管最小屈服强度(MPa)， c 为套管壁厚(mm)， c_1 为套管偏磨深度(mm)， d 为套管外径(mm)， a 为内压强度系数(调质和13Cr材料套管取1.0，其他情况取2.0)， b 为套管材料应力-应变强度硬化因子；

步骤8：将步骤7中磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} 代入公式(22)计算套管抗内压安全系数 k_{iw} ，其算式为(23)；

$$k_{iw} = P_{iw} / P_{\text{设内}} \quad (22)$$

$$k_{iw} = \frac{2P_{\min}(c - ac_1) \left[\left(\frac{1}{2}\right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{b+1} \right]}{[d - (c - ac_1)] P_{\text{设内}}} \quad (23)$$

其中：

$$b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{\min} \quad (24)$$

式中： k_{iw} 为套管的抗内压安全系数， P_{\min} 为套管最小屈服强度(MPa)， d 为套管外径(mm)， $P_{\text{设内}}$ 为设计内压载荷(MPa)， P_u 为套管拉伸屈服强度(MPa)， c 为套管壁厚(mm)， a 为套管内压强度系数(调质和13Cr材料套管取1.0，其他情况取2.0)， c_1 为套管磨损深度(mm)， b 为套管材料应力-应变强度硬化因子， d 为套管外径(mm)；

步骤9：以抗内压安全系数为套管风险等级图版的横坐标轴，抗外挤安全系数为套管风险等级图版的纵坐标轴；将套管抗内压安全系数大于1.15，抗挤安全系数大于1.05范围的套管风险等级划分为1级；将套管抗内压安全系数介于1.1~1.15，抗挤安全系数介于1.0~1.05范围的套管风险等级划分为2级；将套管抗内压安全系数小于1.1，抗挤安全系数小于1.0范围的套管风险等级划分为3级；从而绘制出磨损套管风险等级图版；

步骤10：将步骤6中所得的抗外挤安全系数和步骤8中所得的抗内压安全系数分别代入到步骤9绘制的图版中，确定磨损套管的风险等级；

步骤11：依据划分的套管风险等级进行预警，根据风险等级确定套管防磨措施；若套管的风险等级为1级，则套管处于安全的服役状态；若套管的风险等级为2级，则套管有发生失效的风险，此时需要采取套管防磨措施；若套管的风险等级为3级，则套管发生磨损失效，需重新下入一层套管。

2. 根据权利要求1所述的一种套管磨损风险的实时预警方法,其特征在于:所述的磨损套管风险等级图版横坐标为磨损套管的抗内压安全系数,纵坐标为磨损套管的抗挤安全系数。

一种套管磨损风险的实时预警方法

技术领域

[0001] 本发明属于油气井建井安全领域,具体涉及一种套管磨损风险的实时预警方法。

背景技术

[0002] 在深井、超深井、大斜度井、水平井等钻探过程中,日益暴露出套管磨损问题。磨损可使套管壁厚减薄,一定条件下可造成套管变形、甚至破坏,从而降低套管抗挤强度和抗内压强度,降低了套管抗挤抗压的安全系数,以致不能保证后续作业生产安全。

[0003] 目前,发明专利“一种石油套管磨损自动检测系统”(申请公布号:CN 101603418 A)通过实时监测设备,收集和分析循环钻井液中磁性磨屑量来检测套管磨损状况。而钻井过程中,套管与钻杆接触应力最大处的磨损程度最严重,该处是发生磨损失效的危险点,但该系统无法确定钻杆与套管接触应力最大的部位,同样只能根据磨屑量来评估进尺井段套管的磨损总量,不能识别出磨损的危险点,未能对钻井作业安全进行准确指导。另有发明专利“估计套管磨损”(申请公布号:CN 105473807 A)通过用摄像机捕获钻井中泥浆振动筛上的钻屑和套管磨粒的影像,并用计算机识别,进而估算出进尺井段套管磨损的总体积。但CN 105473807 A的技术方案统计分析的是返回铁屑的总和,得出套管磨损的总体积,仅能反映进尺井段套管磨损的平均程度,故无法得出危险点处的磨损深度,难于合理指导套管磨损风险井的安全钻井作业。

[0004] 为确保复杂井况下油气井套管的安全服役,套管磨损风险预警就显得尤为关键,因此发明一种套管磨损风险的实时预警方法是很有必要的。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于,提供一种套管磨损风险的实时预警方法,解决套管磨损后由于强度降低所面临的风险预警问题;

[0006] 本发明采用以下技术方案,一种套管磨损风险的实时预警方法,其特征在于,首先通过计算选取钻杆接头与套管间的最大侧向力,利用钻速方程,确定磨损时间,求取套管的磨损面积与深度;然后求出套管剩余抗内压强度和剩余抗挤强度,计算套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数,根据得到的套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数划分风险等级;最后根据风险等级来确定套管磨损情况并进行实时预警;具体步骤如下:

[0007] 步骤1:根据井身轨迹和钻柱结构,分段求取钻杆接头与套管间侧向力,记为 $F=F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$,并取最大的侧向力,记为 F_{\max} ,其中, F_i 算式为(1);

$$[0008] \quad F_i = \frac{z}{2\rho + 0.001d_i} \left\{ \begin{array}{l} q \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \sin\beta - Ze^{-\mu\beta} - \\ \frac{q}{\frac{z}{\mu} + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

[0009] 其中:

$$[0010] \quad Z = e\mu\beta_0 \left[qLK_b \cos\beta_0 - \pi \frac{d_e}{2000} L_t r_n \right] - \frac{e\beta_0 \mu q}{\frac{z}{\mu} + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \quad (2)$$

[0011] 其中:

$$[0012] \quad K_b = 1 - \gamma_n / \gamma_t \quad (3)$$

[0013] 式中: F_i 为套管与钻杆间的侧向力(N), ρ 为井眼曲率半径(m), d_e 为钻杆接头外径(mm), d_i 为套管内径(mm), Z 为计算系数, e 为常数(取2.718), μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数, L 为井深(m), β_i 为井斜角(弧度), q 为钻柱线重(N/m), β_0 为最大井斜角(弧度), K_b 为浮力系数, L_t 为井斜开始点至井口的高度(m), γ_n 为钻井液密度(kg/m^3), γ_t 为套管密度(kg/m^3);

[0014] 步骤2:确定钻杆接头与套管的磨损时间 T ,其算式为(4);

$$[0015] \quad T = T_1 + T_2 \quad (4)$$

[0016] 其中:

$$[0017] \quad T_2 = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{r_i} \quad (5)$$

$$[0018] \quad r_i = f(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}) \quad (6)$$

[0019] 式中: T 为钻杆接头与套管的磨损时间(h), T_1 为已发生磨损的时间(h),通过井史数据资料获取, T_2 为预计磨损时间(h), n 为即将钻遇地层的分段数, L_i 为第 i 段地层中的钻头进尺(m), r_i 为第 i 段地层中的机械钻速(m/h),与多种因素有关, f 为第 i 段地层中机械钻速与钻井工艺参数之间的关系, X_{1i} 为第 i 段地层中岩层特性对机械钻速的影响, X_{2i} 为第 i 段地层中井深对机械钻速的影响, X_{3i} 为第 i 段地层中井底压差对机械钻速的影响, X_{4i} 为第 i 段地层中机械参数对机械钻速的影响, X_{5i} 为第 i 段地层中水力参数对机械钻速的影响;

[0020] 步骤3:求取套管磨损面积 S ,其算式为(7);

$$[0021] \quad S = \frac{E \mu F_{\max} L_w \times 10^6}{H} \quad (7)$$

[0022] 其中:

$$[0023] \quad L_w = 0.001 n_t d_e \quad (8)$$

$$[0024] \quad n_t = 60NT \quad (9)$$

[0025] 式中: S 为套管磨损面积(mm^2), E 为磨损效率, μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数, F_{\max} 为钻杆接头与套管间的最大侧向力(N), L_w 为钻柱与套管间的相对运动累计路程(m), H 为布氏硬度(N/m^2), n_t 为钻柱转动次数, d_e 为钻杆接头外径(mm), N 为钻柱转速(r/h), T 为钻杆接头与套管的磨损时间(h);

[0026] 步骤4:利用公式(10)求取套管偏磨深度 c_1 ;

$$[0027] \quad c_1 = k - (d_i - d_e) \quad (10)$$

[0028] 其中:

$$[0029] \quad k = \frac{S - \int_{x_1}^{x_2} \left(\sqrt{d_e^2 - x^2} - \sqrt{d_i^2 - x^2} \right) dx}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

[0030] 式中: c_1 为套管偏磨深度(mm), k 为钻杆接头的轴线与套管轴线的距离(mm), d_i 为套管内径(mm), d_e 为钻杆接头外径(mm), S 为套管磨损面积(mm^2), x_1 和 x_2 为套管磨损截面上的两圆交点的横坐标;

[0031] 步骤5:利用公式(12)求取磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} ;

$$[0032] \quad P_{cw} = \frac{(P_1+P_2) - [(P_1-P_2)^2 + 4P_1P_2\lambda]^{1/2}}{2(1-\lambda)} \quad (12)$$

[0033] 其中:

$$[0034] \quad P_1 = \frac{2K_e E}{(1-\nu^2) \left[\frac{d}{c-c_1} \right] \left[\frac{d}{c-c_1} - 1 \right]^2} \quad (13)$$

$$[0035] \quad P_2 = \frac{2K_y P_{\min}}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{d}{d+2c_1-2c} \right) \quad (14)$$

$$[0036] \quad \lambda = 0.127\delta + 0.0039\eta - 0.440 (P_{rs}/P_{fy}) \quad (15)$$

$$[0037] \quad \delta = \frac{2c_1}{2d-4c+c_1} \quad (16)$$

$$[0038] \quad \eta = \frac{2c_1}{2c-c_1} \quad (17)$$

[0039] 式中: P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度(MPa), P_1 为套管的弹性挤毁压力(MPa), P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力(MPa), λ 为套管的制造缺陷影响因子(普通级套管 λ 取0.21~0.23,高抗挤套管 λ 取0.17~0.175,高抗挤抗硫套管 λ 取0.125~0.130), c 为套管壁厚(mm), c_1 为套管磨损深度(mm), K_e 为套管弹性常数折减系数(J55、K55和所有抗硫钢, K_e 取0.9; N80、P110和Q125, K_e 取1.0), E 为杨氏模量($2.0 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^5$ MPa), ν 为泊松比(0.2~0.3), d 为套管外径(mm), K_y 为套管屈服强度折减系数(对J55、K55、N80和所有抗硫钢, $K_y = 0.85$), P_{\min} 为套管最小屈服强度(MPa), δ 为套管内壁不圆度, η 为套管壁厚不均度, P_{rs} 为套管残余应力(MPa), P_{fy} 为套管的实际屈服强度(MPa);

[0040] 步骤6:将步骤5中磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} 代入公式(18)中计算出套管的抗挤安全系数 k_{cw} ,其算式为(19);

$$[0041] \quad k_{cw} = P_{cw}/P_{\text{设外}} \quad (18)$$

$$[0042] \quad k_{cw} = \frac{P_1+P_2 - [(P_1-P_2)^2 + 4P_1P_2\lambda]^{1/2}}{2P_{\text{设外}}(1-\lambda)} \quad (19)$$

[0043] 式中: k_{cw} 为套管的抗挤安全系数, P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度(MPa), $P_{\text{设外}}$ 为套管的设计外压载荷(MPa), P_1 为套管的弹性挤毁压力(MPa), P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力(MPa), λ 为套管的制造缺陷影响因子(普通级套管 λ 取0.21~0.23,高抗挤套管 λ 取0.17~0.175,高抗挤抗硫套管 λ 取0.125~0.130);

[0044] 步骤7:将步骤4中求取的套管偏磨深度 c_1 代入到公式(20)中,得到磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} ;

$$[0045] \quad P_{iw} = \frac{2P_{\min}(c-ac_1) \left[\left(\frac{1}{2} \right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^{b+1} \right]}{d-(c-ac_1)} \quad (20)$$

[0046] 其中:

$$[0047] \quad b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{\min} \quad (21)$$

[0048] 式中： P_{iw} 为磨损套管的剩余抗内压强度 (MPa)， P_{min} 为套管最小屈服强度 (MPa)， c 为套管壁厚 (mm)， c_1 为套管偏磨深度 (mm)， d 为套管外径 (mm)， a 为内压强度系数 (调质和13Cr材料套管取1.0,其他情况取2.0)， b 为套管材料应力-应变强度硬化因子；

[0049] 步骤8:将步骤7中磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} 代入公式(22)计算套管抗内压安全系数 K_{iw} ,其算式为(23)；

$$[0050] \quad k_{iw} = P_{iw} / P_{设计内} \quad (22)$$

$$[0051] \quad k_{iw} = \frac{2P_{min}(c-ac_1) \left[\left(\frac{1}{2}\right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{b+1} \right]}{[d-(c-ac_1)]P_{设计内}} \quad (23)$$

[0052] 其中：

$$[0053] \quad b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{min} \quad (24)$$

[0054] 式中： k_{iw} 为套管的抗内压安全系数， P_{min} 为套管最小屈服强度 (MPa)， d 为套管外径 (mm)， $P_{设计内}$ 为设计内压载荷 (MPa)， P_u 为套管拉伸屈服强度 (MPa)， c 为套管壁厚 (mm)， a 为套管内压强度系数 (调质和13Cr材料套管取1.0,其他情况取2.0)， c_1 为套管磨损深度 (mm)， b 为套管材料应力-应变强度硬化因子， d 为套管外径 (mm)；

[0055] 步骤9:以抗内压安全系数为套管风险等级图版的横坐标轴，抗外挤安全系数为套管风险等级图版的纵坐标轴；将套管抗内压安全系数大于1.15，抗挤安全系数大于1.05范围的套管风险等级划分为1级；将套管抗内压安全系数介于1.1~1.15，抗挤安全系数介于1.0~1.05范围的套管风险等级划分为2级；将套管抗内压安全系数小于1.1，抗挤安全系数小于1.0范围的套管风险等级划分为3级；从而绘制出磨损套管风险等级图版；

[0056] 步骤10:将步骤6中所得的抗外挤安全系数和步骤8中所得的抗内压安全系数分别代入到步骤9绘制的图版中，确定磨损套管的风险等级；

[0057] 步骤11:依据划分的套管风险等级进行预警，根据风险等级确定套管防磨措施；若套管的风险等级为1级，则套管处于安全的服役状态；若套管的风险等级为2级，则套管有发生失效的风险，此时需要采取套管防磨措施；若套管的风险等级为3级，则套管发生磨损失效，需重新下入一层套管；

[0058] 进一步的，根据权利要求1所述的一种套管磨损风险的实时预警方法，其特征在于：所述的磨损套管风险等级图版横坐标为磨损套管的抗内压安全系数，纵坐标为磨损套管的抗挤安全系数。

[0059] 本发明优点在于：

[0060] (1) 本发明根据实钻和待钻井眼轨迹，计算得出已钻或待钻条件下套管和钻柱的接触力(侧向力)最大工况点，从而找到套管磨损风险最大的位置，并计算出套管在危险点的磨损深度，克服了现有铁屑监测法只能评估出进尺井段套管磨损总量的缺点。

[0061] (2) 本发明可对当前已钻和待钻井眼中套管的磨损量进行预评估，为后期钻井施工留有足够余地，根据预警情况及时采取针对性的套管防护措施。

[0062] (3) 本发明通过计算磨损量进一步评估出套管的剩余抗挤强度和抗内压强度，并确定安全系数，根据对应的安全图版，可对套管的服役可靠性进行预警，直接为井筒的安全管控提供依据。

附图说明

[0063] 图1是本发明的方法流程示意图。

[0064] 图2是本发明划分套管的风险等级示意图。

具体实施方式

[0065] 下面结合附图对本发明进行详细的描述。

[0066] 由图1和图2所示：一种套管磨损风险的实时预警方法，其特征在于，首先通过计算选取钻杆接头与套管间的最大侧向力，利用钻速方程，确定磨损时间，求取套管的磨损面积与深度；然后求出套管剩余抗内压强度和剩余抗挤强度，计算套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数，根据得到的套管剩余抗内压安全系数和剩余抗挤安全系数划分风险等级；最后根据风险等级来确定套管磨损情况并进行实时预警；具体步骤如下：

[0067] 步骤1：根据井身轨迹和钻柱结构，分段求取钻杆接头与套管间侧向力，记为 $F=F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_n$ ，并取最大的侧向力，记为 F_{\max} ，其中， F_i 算式为(1)：

$$[0068] \quad F_i = \frac{Z}{2\rho + 0.001d_i} \left\{ \begin{array}{l} q \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \sin\beta - Ze^{-\mu\beta} - \\ \frac{q}{\frac{Z}{\mu} + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

[0069] 其中：

$$[0070] \quad Z = e\mu\beta_0 \left[qLK_b \cos\beta_0 - \pi \frac{d_e}{2000} L_t r_n \right] - \frac{e\beta_0 \mu q}{\frac{Z}{\mu} + 1} \left(\rho + \frac{d_i - d_e}{2000} \right) \left[(\mu^2 - 1) \sin\beta_0 - 2\mu\cos\beta_0 \right] \quad (2)$$

[0071] 其中：

$$[0072] \quad K_b = 1 - \gamma_n / \gamma_t \quad (3)$$

[0073] 式中： F_i 为套管与钻杆间的侧向力(N)， ρ 为井眼曲率半径(m)， d_e 为钻杆接头外径(mm)， d_i 为套管内径(mm)， Z 为计算系数， e 为常数(取2.718)， μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数， L 为井深(m)， β_i 为井斜角(弧度)， q 为钻柱线重(N/m)， β_0 为最大井斜角(弧度)， K_b 为浮力系数， L_t 为井斜开始点至井口的高度(m)， γ_n 为钻井液密度(kg/m^3)， γ_t 为套管密度(kg/m^3)；

[0074] 步骤2：确定钻杆接头与套管的磨损时间 T ，其算式为(4)：

$$[0075] \quad T = T_1 + T_2 \quad (4)$$

[0076] 其中：

$$[0077] \quad T_2 = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{r_i} \quad (5)$$

$$[0078] \quad r_i = f(X_{1i}, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}, X_{5i}) \quad (6)$$

[0079] 式中： T 为钻杆接头与套管的磨损时间(h)， T_1 为已发生磨损的时间(h)，通过井史数据资料获取， T_2 为预计磨损时间(h)， n 为即将钻遇地层的分段数， L_i 为第 i 段地层中的钻头进尺(m)， r_i 为第 i 段地层中的机械钻速(m/h)，与多种因素有关， f 为第 i 段地层中机械钻速与钻井工艺参数之间的关系， X_{1i} 为第 i 段地层中岩层特性对机械钻速的影响， X_{2i} 为第 i 段地层中井深对机械钻速的影响， X_{3i} 为第 i 段地层中井底压差对机械钻速的影响， X_{4i} 为第 i 段地层中机械参数对机械钻速的影响， X_{5i} 为第 i 段地层中水力参数对机械钻速的影响；

[0080] 步骤3：求取套管磨损面积 S ，其算式为(7)：

$$[0081] \quad S = \frac{E \mu F_{\max} L_w \times 10^6}{H} \quad (7)$$

[0082] 其中:

$$[0083] \quad L_w = 0.001 n_t d_e \quad (8)$$

$$[0084] \quad n_t = 60NT \quad (9)$$

[0085] 式中: S 为套管磨损面积 (mm^2), E 为磨损效率, μ 为套管与钻杆接头的摩擦系数, F_{\max} 为钻杆接头与套管间的最大侧向力 (N), L_w 为钻柱与套管间的相对运动累计路程 (m), H 为布氏硬度 (N/m^2), n_t 为钻柱转动次数, d_e 为钻杆接头外径 (mm), N 为钻柱转速 (r/h), T 为钻杆接头与套管的磨损时间 (h);

[0086] 步骤4: 利用公式 (10) 求取套管偏磨深度 c_1 ;

$$[0087] \quad c_1 = k - (d_i - d_e) \quad (10)$$

[0088] 其中:

$$[0089] \quad k = \frac{S - \int_{x_1}^{x_2} \left(\sqrt{d_e^2 - x^2} - \sqrt{d_i^2 - x^2} \right) dx}{x_2 - x_1} \quad (11)$$

[0090] 式中: c_1 为套管偏磨深度 (mm), k 为钻杆接头的轴线与套管轴线的距离 (mm), d_i 为套管内径 (mm), d_e 为钻杆接头外径 (mm), S 为套管磨损面积 (mm^2), x_1 和 x_2 为套管磨损截面上的两圆交点的横坐标;

[0091] 步骤5: 利用公式 (12) 求取磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} ;

$$[0092] \quad P_{cw} = \frac{(P_1 + P_2) - [(P_1 - P_2)^2 + 4P_1 P_2 \lambda]^{1/2}}{2(1 - \lambda)} \quad (12)$$

[0093] 其中:

$$[0094] \quad P_1 = \frac{2K_e E}{(1 - \nu^2) \left[\frac{d}{c - c_1} \right] \left[\frac{d}{c - c_1} - 1 \right]^2} \quad (13)$$

$$[0095] \quad P_2 = \frac{2K_y P_{\min}}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{d}{d + 2c_1 - 2c} \right) \quad (14)$$

$$[0096] \quad \lambda = 0.127\delta + 0.0039\eta - 0.440 (P_{rs}/P_{fy}) \quad (15)$$

$$[0097] \quad \delta = \frac{2c_1}{2d - 4c + c_1} \quad (16)$$

$$[0098] \quad \eta = \frac{2c_1}{2c - c_1} \quad (17)$$

[0099] 式中: P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度 (MPa), P_1 为套管的弹性挤毁压力 (MPa), P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力 (MPa), λ 为套管的制造缺陷影响因子 (普通级套管 λ 取 0.21~0.23, 高抗挤套管 λ 取 0.17~0.175, 高抗挤抗硫套管 λ 取 0.125~0.130), c 为套管壁厚 (mm), c_1 为套管磨损深度 (mm), K_e 为套管弹性常数折减系数 (J55、K55和所有抗硫钢, K_e 取 0.9; N80、P110和Q125, K_e 取 1.0), E 为杨氏模量 ($2.0 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^5$ MPa), ν 为泊松比 (0.2~0.3), d 为

套管外径 (mm), K_y 为套管屈服强度折减系数 (对 J55、K55、N80 和所有抗硫钢, $K_y=0.85$), P_{\min} 为套管最小屈服强度 (MPa), δ 为套管内壁不圆度, η 为套管壁厚不均度, P_{rs} 为套管残余应力 (MPa), P_{fy} 为套管的实际屈服强度 (MPa);

[0100] 步骤6: 将步骤5中磨损套管的剩余抗挤强度 P_{cw} 代入公式 (18) 中计算出套管的抗挤安全系数 k_{cw} , 其算式为 (19);

$$[0101] \quad k_{cw} = P_{cw} / P_{\text{设外}} \quad (18)$$

$$[0102] \quad k_{cw} = \frac{P_1 + P_2 - [(P_1 - P_2)^2 + 4P_1 P_2 \lambda]^{1/2}}{2P_{\text{设外}}(1 - \lambda)} \quad (19)$$

[0103] 式中: k_{cw} 为套管的抗挤安全系数, P_{cw} 为磨损套管的剩余抗挤强度 (MPa), $P_{\text{设外}}$ 为套管的设计外压载荷 (MPa), P_1 为套管的弹性挤毁压力 (MPa), P_2 为套管的弹塑性屈服挤毁压力 (MPa), λ 为套管的制造缺陷影响因子 (普通级套管 λ 取 0.21~0.23, 高抗挤套管 λ 取 0.17~0.175, 高抗挤抗硫套管 λ 取 0.125~0.130);

[0104] 步骤7: 将步骤4中求取的套管偏磨深度 c_1 代入到公式 (20) 中, 得到磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} ;

$$[0105] \quad P_{iw} = \frac{2P_{\min}(c - ac_1) \left[\left(\frac{1}{2}\right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{b+1} \right]}{d - (c - ac_1)} \quad (20)$$

[0106] 其中:

$$[0107] \quad b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{\min} \quad (21)$$

[0108] 式中: P_{iw} 为磨损套管的剩余抗内压强度 (MPa), P_{\min} 为套管最小屈服强度 (MPa), c 为套管壁厚 (mm), c_1 为套管偏磨深度 (mm), d 为套管外径 (mm), a 为内压强度系数 (调质和 13Cr 材料套管取 1.0, 其他情况取 2.0), b 为套管材料应力-应变强度硬化因子;

[0109] 步骤8: 将步骤7中磨损套管的剩余抗内压强度 P_{iw} 代入公式 (22) 计算套管抗内压安全系数 k_{iw} , 其算式为 (23);

$$[0110] \quad k_{iw} = P_{iw} / P_{\text{设内}} \quad (22)$$

$$[0111] \quad k_{iw} = \frac{2P_{\min}(c - ac_1) \left[\left(\frac{1}{2}\right)^{b+1} + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{b+1} \right]}{[d - (c - ac_1)] P_{\text{设内}}} \quad (23)$$

[0112] 其中:

$$[0113] \quad b = 0.1693 - 1.1774 \times 10^{-4} P_{\min} \quad (24)$$

[0114] 式中: k_{iw} 为套管的抗内压安全系数, P_{\min} 为套管最小屈服强度 (MPa), d 为套管外径 (mm), $P_{\text{设内}}$ 为设计内压载荷 (MPa), P_u 为套管拉伸屈服强度 (MPa), c 为套管壁厚 (mm), a 为套管内压强度系数 (调质和 13Cr 材料套管取 1.0, 其他情况取 2.0), c_1 为套管磨损深度 (mm), b 为套管材料应力-应变强度硬化因子, d 为套管外径 (mm);

[0115] 步骤9: 以抗内压安全系数为套管风险等级图版的横坐标轴, 抗外挤安全系数为套管风险等级图版的纵坐标轴; 将套管抗内压安全系数大于 1.15, 抗挤安全系数大于 1.05 范围的套管风险等级划分为 1 级; 将套管抗内压安全系数介于 1.1~1.15, 抗挤安全系数介于 1.0~1.05 范围的套管风险等级划分为 2 级; 将套管抗内压安全系数小于 1.1, 抗挤安全系数

小于1.0范围的套管风险等级划分为3级;从而绘制出磨损套管风险等级图版;

[0116] 步骤10:将步骤6中所得的抗外挤安全系数和步骤8中所得的抗内压安全系数分别代入到步骤9绘制的图版中,确定磨损套管的风险等级;

[0117] 步骤11:依据划分的套管风险等级进行预警,根据风险等级确定套管防磨措施;若套管的风险等级为1级,则套管处于安全的服役状态;若套管的风险等级为2级,则套管有发生失效的风险,此时需要采取套管防磨措施;若套管的风险等级为3级,则套管发生磨损失效,需重新下入一层套管;

[0118] 进一步的,根据权利要求1所述的一种套管磨损风险的实时预警方法,其特征在于:所述的磨损套管风险等级图版横坐标为磨损套管的抗内压安全系数,纵坐标为磨损套管的抗挤安全系数。

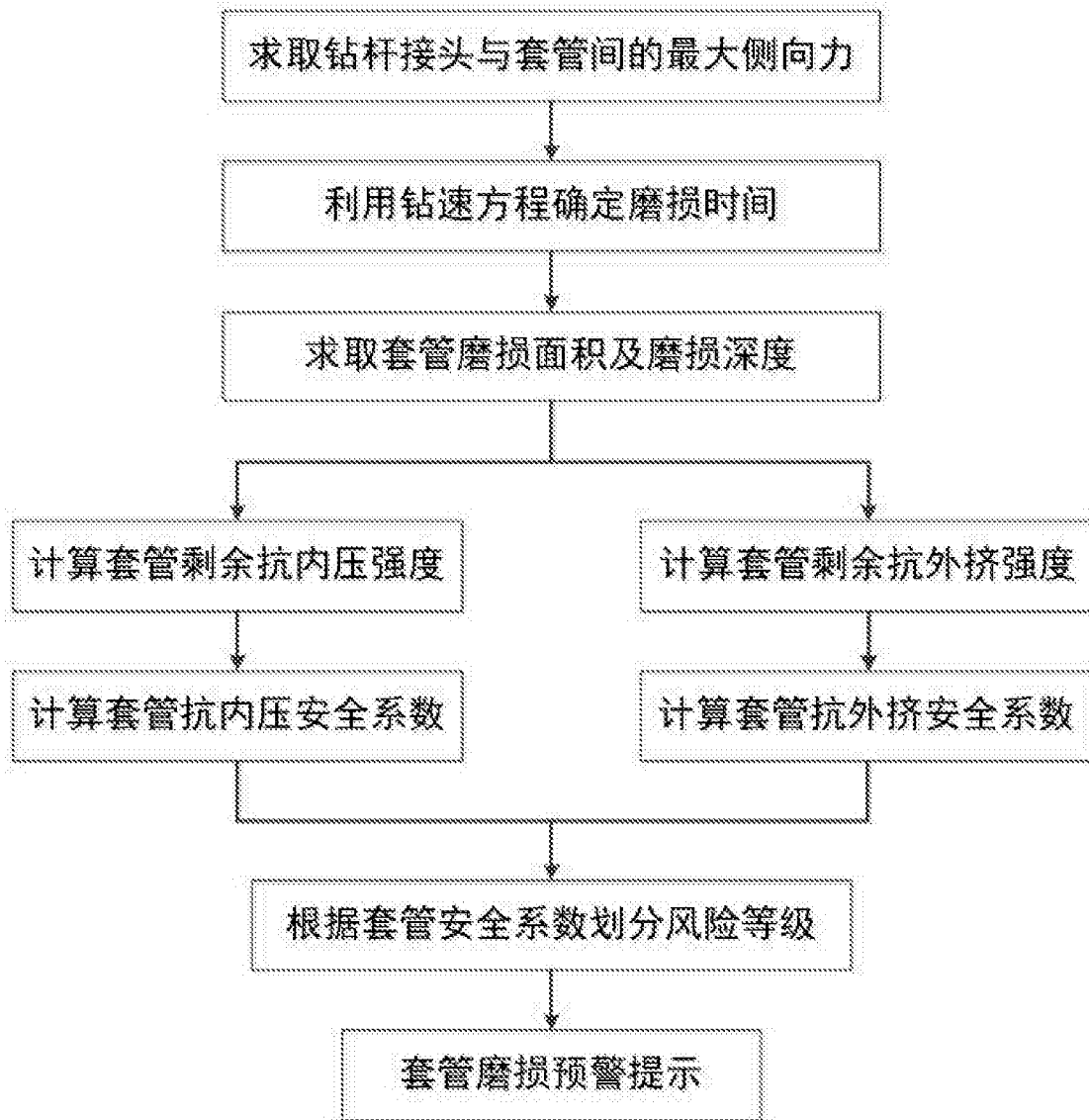


图1

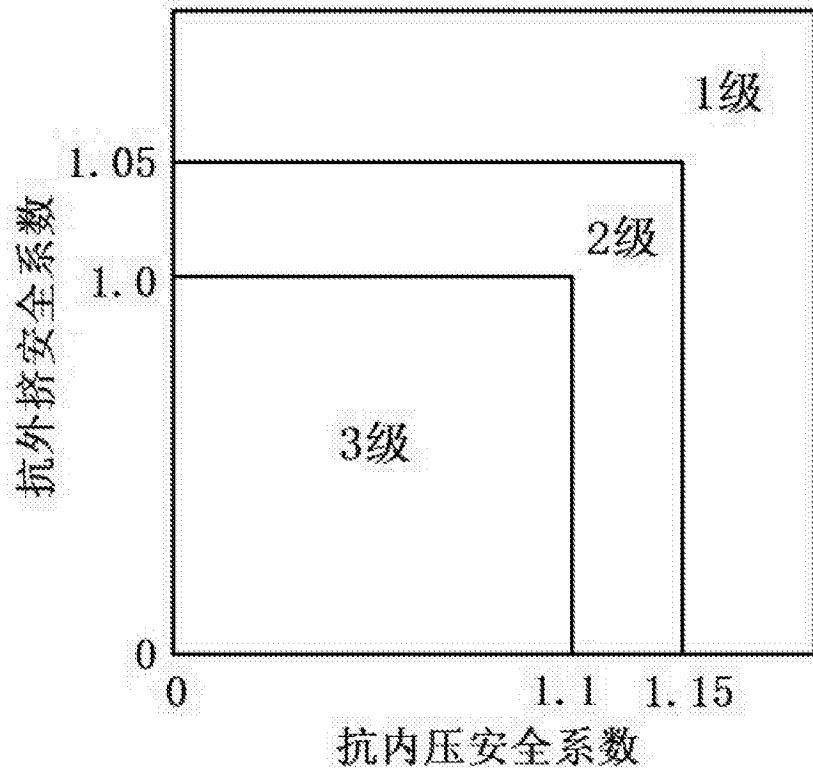


图2