



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112903162 A

(43) 申请公布日 2021.06.04

(21) 申请号 202110072196.5

G01R 33/14 (2006.01)

(22) 申请日 2021.01.20

(71) 申请人 中国石油大学(华东)

地址 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号

(72) 发明人 李玉坤 王鄞尧 朱建平 蒋毅  
冯淑路 王垒超 鲁青龙 曹小建  
彭启凤 杨进川 王龙升 李坤  
程磊

(74) 专利代理机构 青岛智地领创专利代理有限公司 37252

代理人 陈海滨

(51) Int. Cl.

G01L 5/00 (2006.01)

G01N 3/08 (2006.01)

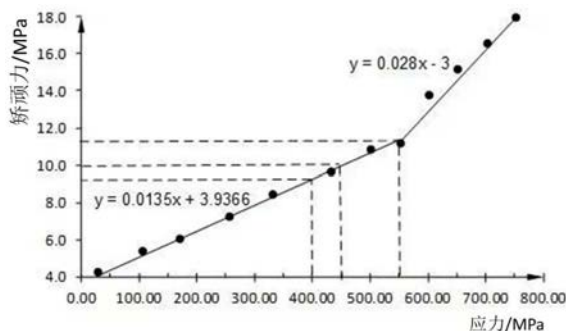
权利要求书2页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法。该方法利用矫顽力检测装置的探头和天然气管道外壁形成闭合磁路,向探头内通入交变电流对闭合磁路进行磁化测量磁滞回线,采用与天然气管道相同的材料制作标准拉伸试件,进行应力试验,确定矫顽力与应力的对应关系,再利用矫顽力检测装置测量天然气管道外壁的残余应力,绘制残余应力变化曲线,根据实际天然气管道建立有限元模型,采用双椭球热源模型模拟天然气管道环焊缝处残余应力的分布情况,确定环焊缝处的残余应力分布云图,绘制残余应力特征曲线并验证其准确性。本发明实现了对天然气管道残余应力的无损检测及评价,操作简单,有利于保障焊接管道的服役安全。



1. 一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

步骤1,将矫顽力检测装置的探头紧贴于天然气管道外壁,探头与天然气管道外壁形成闭合磁路,开启矫顽力检测装置,向探头内通入交变电流,对天然气管道表面的闭合磁路进行磁化,利用矫顽力检测装置测量天然气管道闭合磁路的磁滞回线;

步骤2,采用与天然气管道相同的材料制作标准拉伸试件,利用拉伸试验机进行应力试验,确定矫顽力与应力之间的对应关系;

步骤3,利用矫顽力检测装置测量天然气管道外壁的残余应力,绘制残余应力变化曲线;

步骤4,根据实际天然气管道结构,利用SYSWELD软件建立天然气管道的有限元模型,设置有限元模型的焊接热力边界条件及约束条件,采用双椭球热源模型模拟天然气管道有限元模型环焊缝处残余应力的分布情况,得到环焊缝处的残余应力分布云图,绘制残余应力特征曲线;

步骤5,通过将残余应力特征曲线与步骤3中确定的残余应力变化曲线进行对比,验证残余应力特征曲线的准确性。

2. 如权利要求1所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述探头为U型探头,包括磁芯、激励线圈和感应线圈,磁芯采用锰锌铁氧体制成,激励线圈和感应线圈分别缠绕于磁芯两侧或交替缠绕于磁芯底部。

3. 如权利要求1所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述步骤2中,具体包括以下步骤:

步骤2.1,确定天然气管道的制作材料,采用相同材料制作标准拉伸试件,标准拉伸试件呈圆筒状结构,轴向中间位置处设置有环焊缝,通过对标准拉伸试件进行热处理,消除标准拉伸试件表面的残余应力;

步骤2.2,利用拉伸试验机对标准拉伸试件进行拉伸,按照一定间隔增大拉伸试验机对标准拉伸试件施加的轴向应力和周向应力,测量各轴向应力和环向应力条件下标准拉伸试件环焊缝处所受到的轴向矫顽力和环向矫顽力,当标准拉伸试件出现屈服变形时,停止对标准拉伸试件施加压力;

步骤2.3,通过将标准拉伸试件的轴向应力值与环向矫顽力值进行拟合,再将标准拉伸试件的环向应力值与轴向矫顽力值进行拟合,确定天然气管道制作材料所受矫顽力与应力的关系。

4. 如权利要求3所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述步骤2.1中,根据GB/T 16923-2008中的热处理步骤对标准拉伸试件进行热处理。

5. 如权利要求1所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述步骤3中,具体包括以下步骤:

步骤3.1,将天然气管道环焊缝中心外壁圆周12点钟、3点钟、6点钟和9点钟位置处设置为测量点,再以天然气管道的环焊缝为中心,沿天然气管道轴向等间隔对称设置多个测量位置,针对各测量位置,将天然气管道外壁圆周12点钟、3点钟、6点钟和9点钟位置处设置为测量点,分别将矫顽力检测装置的探头设置于各测量点处;

步骤3.2,利用矫顽力检测装置,测量得到天然气管道外壁上各测量点的轴向矫顽力和环向矫顽力,根据天然气管道制作材料所受矫顽力与应力的关系,确定天然气管道外壁各测量点的环向残余应力和轴向残余应力,绘制残余应力变化曲线。

6.如权利要求1所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述步骤4中,双椭球热源模型如下所示:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{3x^2}{a_f^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{3x^2}{a_r^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (2)$$

$$f_f + f_r = 2, f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f}, f_r = \frac{2a_r}{a_r + a_f} \quad (3)$$

$$Q = \eta UI \quad (4)$$

式中,  $(x, y, z)$  表示有限元模型内任意点的坐标;  $q_f$  表示前半椭球体热源模型的热通量, 单位为  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $q_r$  表示后半椭球体热源模型的热通量, 单位为  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $f_f$  表示前半椭球体热源模型的热输入分配系数;  $f_r$  表示后半椭球体热源模型的热输入分配系数;  $a_f$ 、 $a_r$ 、 $b$ 、 $c$  表示双椭球热源模型的形状参数;  $Q$  表示有效功率,  $\eta$  表示电弧热效率,  $U$  表示焊接电压,  $I$  表示焊接电流。

7.如权利要求1所述的一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,其特征在于,所述步骤4中,有限元模型的管道长度为120mm,半径为400mm,壁厚为16mm,根据天然气管道焊接施工的实际工况,设置有限元模型的焊接热力边界条件。

## 一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及天然气管道施工领域,具体涉及一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法。

### 背景技术

[0002] 管道环焊缝焊接技术作为天然气管道现场施工的关键技术,焊接过程中不可避免的会产生焊接残余应力,残余应力的存在是导致管道焊接接头出现脆性断裂、疲劳断裂和应力腐蚀开裂等失效形式的重要因素,所以研究残余应力的分布特征对于在役管道使用的长效性及安全性都具有举足轻重的意义。

[0003] 目前现场对于管道残余应力的测量多采用盲孔法和超声法,但由于盲孔法属于有损检测方法,测量时需要将管道进行人为打孔,造成管道损伤;超声法的测量条件要求高且易于受材料各向异性、加工工艺、热影响区等因素的影响,因此,亟需提出一种新型高效的管道残余应力的在线评价方法,既能确保焊接管道的服役安全,还能对管道的残余应力进行评价。

### 发明内容

[0004] 本发明旨在解决上述问题,提出了一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,该方法为天然气管道残余应力的在线评价提供了无损检测方法,避免了检测过程中对管道的损害,实现了对天然气管道残余应力分布规律的准确评价。

[0005] 本发明具体采用如下技术方案:

[0006] 一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,具体包括以下步骤:

[0007] 步骤1,将矫顽力检测装置的探头紧贴于天然气管道外壁,探头与天然气管道外壁形成闭合磁路,开启矫顽力检测装置,向探头内通入交变电流,对天然气管道表面的闭合磁路进行磁化,利用矫顽力检测装置测量天然气管道闭合磁路的磁滞回线;

[0008] 步骤2,采用与天然气管道相同的材料制作标准拉伸试件,利用拉伸试验机进行应力试验,确定矫顽力与应力之间的对应关系;

[0009] 步骤3,利用矫顽力检测装置测量天然气管道外壁的残余应力,绘制残余应力变化曲线;

[0010] 步骤4,根据实际天然气管道结构,利用SYSWELD软件建立天然气管道的有限元模型,设置有限元模型的焊接热力边界条件及约束条件,采用双椭球热源模型模拟天然气管道有限元模型环焊缝处残余应力的分布情况,得到环焊缝处的残余应力分布云图,绘制残余应力特征曲线;

[0011] 步骤5,通过将残余应力特征曲线与步骤3中确定的残余应力变化曲线进行对比,验证残余应力特征曲线的准确性。

[0012] 优选地,所述探头为U型探头,包括磁芯、激励线圈和感应线圈,磁芯采用锰锌铁氧体制成,激励线圈和感应线圈分别缠绕于磁芯两侧或交替缠绕于磁芯底部。

[0013] 优选地,所述步骤2中,具体包括以下步骤:

[0014] 步骤2.1,确定天然气管道的制作材料,采用相同材料制作标准拉伸试件,标准拉伸试件呈圆筒状结构,轴向中间位置处设置有环焊缝,通过对标准拉伸试件进行热处理,消除标准拉伸试件表面的残余应力;

[0015] 步骤2.2,利用拉伸试验机对标准拉伸试件进行拉伸,按照一定间隔增大拉伸试验机对标准拉伸试件施加的轴向应力和周向应力,测量各轴向应力和环向应力条件下标准拉伸试件环焊缝处所受到的轴向矫顽力和环向矫顽力,当标准拉伸试件出现屈服变形时,停止对标准拉伸试件施加压力;

[0016] 步骤2.3,通过将标准拉伸试件的轴向应力值与环向矫顽力值进行拟合,再将标准拉伸试件的环向应力值与轴向矫顽力值进行拟合,确定天然气管道制作材料所受矫顽力与应力的关系。

[0017] 优选地,所述步骤2.1中,根据GB/T 16923-2008中的热处理步骤对标准拉伸试件进行热处理。

[0018] 优选地,所述步骤3中,具体包括以下步骤:

[0019] 步骤3.1,将天然气管道环焊缝中心外壁圆周12点钟、3点钟、6点钟和9点钟位置处设置为测量点,再以天然气管道的环焊缝为中心,沿天然气管道轴向等间隔对称设置多个测量位置,针对各测量位置,将天然气管道外壁圆周12点钟、3点钟、6点钟和9点钟位置处设置为测量点,分别将矫顽力检测装置的探头设置于各测量点处;

[0020] 步骤3.2,利用矫顽力检测装置,测量得到天然气管道外壁上各测量点的轴向矫顽力和环向矫顽力,根据天然气管道制作材料所受矫顽力与应力的关系,确定天然气管道外壁各测量点的环向残余应力和轴向残余应力,绘制残余应力变化曲线。

[0021] 优选地,所述步骤4中,双椭球热源模型如下所示:

$$[0022] \quad q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_f Q)}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x \geq 0 \quad (1)$$

$$[0023] \quad q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_r Q)}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), x < 0 \quad (2)$$

$$[0024] \quad f_f + f_r = 2, f_f = \frac{2a_f}{a_r + a_f}, f_r = \frac{2a_r}{a_r + a_f} \quad (3)$$

$$[0025] \quad Q = \eta UI \quad (4)$$

[0026] 式中,  $(x, y, z)$  表示有限元模型内任意点的坐标;  $q_f$  表示前半椭球体热源模型的热通量,单位为  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $q_r$  表示后半椭球体热源模型的热通量,单位为  $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ;  $f_f$  表示前半椭球体热源模型的热输入分配系数;  $f_r$  表示后半椭球体热源模型的热输入分配系数;  $a_f$ 、 $a_r$ 、 $b$ 、 $c$  表示双椭球热源模型的形状参数;  $Q$  表示有效功率,  $\eta$  表示电弧热效率,  $U$  表示焊接电压,  $I$  表示焊接电流。

[0027] 优选地,所述步骤4中,有限元模型的管道长度为120mm,半径为400mm,壁厚为

16mm,根据天然气管道焊接施工的实际工况,设置有限元模型的焊接热力边界条件。

[0028] 本发明具有如下有益效果:

[0029] 本发明基于矫顽力法直接确定管道环焊缝的残余应力分布特征,实现了对天然气管道残余应力的无损检测,操作简单,同时,本发明实现了对天然气管道环焊缝及其周围残余应力的评价,无需使用过多的耗材,评价效率高且精度高,有利于保障焊接管道的服役安全。

### 附图说明

[0030] 图1为磁滞回线示意图。

[0031] 图2为矫顽力检测装置原理示意图。

[0032] 图3为矫顽力与应力关系曲线。

### 具体实施方式

[0033] 下面结合附图和具体实施例对本发明的具体实施方式做进一步说明:

[0034] 一种利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力分布特征的方法,具体包括以下步骤:

[0035] 步骤1,将矫顽力检测装置的探头紧贴于天然气管道外壁,本实施例中矫顽力检测装置采用U型探头,U型探头的磁芯采用锰锌铁氧体制成,激励线圈和感应线圈分别缠绕于磁芯的两侧,感应线圈也可用作检测线圈,检测磁化过程中磁路内磁感应强度的变化;探头与天然气管道外壁形成闭合回路,开启矫顽力检测装置,如图1所示,通过向U型探头内通入交变电流,U型探头的激励线圈两端产生交变电磁场,对闭合回路进行磁化,信号发生器产生激励信号,通过集成电路板上的功率放大器对激励信号的峰值和能量进行放大,使得激励线圈的能量能够满足天然气管道达到磁化饱和状态的要求,利用U型探头的激励线圈对天然气管道表面的闭合磁路进行磁化,矫顽力检测装置通过采集U型探头激励线圈中的电流量以及感应线圈两端的电压量,得到天然气管道闭合磁路的磁滞回线,如图2所示。

[0036] 步骤2,采用与天然气管道相同的制作材料制作呈圆筒状的标准拉伸试件,标准拉伸试件轴向中间位置处设置有环焊缝,根据GB/T 16923-2008中的热处理步骤对标准拉伸试件进行热处理,消除标准拉伸试件表面的残余应力;

[0037] 利用拉伸试验机对标准拉伸试件施加轴向应力和周向应力,依次增加5MPa的应力,直至标准拉伸试件出现屈服变形时,停止对标准拉伸试件施加压力,在各轴向应力和环向应力条件下,测量标准拉伸试件环焊缝处所受到的轴向矫顽力和环向矫顽力,通过对标准拉伸试件的轴向应力值与环向矫顽力值进行拟合,再对标准拉伸试件的环向应力值与轴向矫顽力值进行拟合,确定天然气管道制作材料所受矫顽力与应力之间的关系,如图3所示;

[0038] 根据逆磁致伸缩效应,天然气管道采用的铁磁性材料在受到外力时,长度和体积会发生变化,导致材料内部的磁化状态发生改变,畴壁出现不可逆位移,其剩磁、磁导率、矫顽为等磁特性也发生显著变化,而磁特征参数中矫顽力对材料位错密度的变化最为敏感,对于铁磁性材料从初始状态到疲劳断裂,矫顽力值可增长2~3倍,因此,可以利用矫顽力评价材料的应力状态。

[0039] 步骤3,利用矫顽力检测装置测量天然气管道外壁的残余应力;

[0040] 将天然气管道环焊缝中心处设置为3号测量位置,再以天然气管道的环焊缝为中心,沿天然气管道轴向等间隔对称设置多个测量位置,分别为2号测量位置和4号测量位置、1号测量位置和5号测量位置,针对各测量位置,将天然气管道外壁圆周12点钟、3点钟、6点钟和9点钟位置处设置为测量点,分别将矫顽力检测装置的探头设置于各测量点处;

[0041] 利用矫顽力检测装置,测量得到天然气管道外壁上各测量点的轴向矫顽力和环向矫顽力,根据天然气管道制作材料所受矫顽力与应力的关系,确定天然气管道外壁各测量点的环向残余应力和轴向残余应力,绘制残余应力变化曲线。

[0042] 步骤4,根据实际天然气管道结构,利用SYSWELD软件的Visual-mesh组件建立有限元模型,本实施例中,天然气管道有限元模型的管道长度为120mm,半径为400mm,壁厚为16mm;根据天然气管道焊接施工的实际工况设置有限元模型的焊接热力边界条件,并将天然气管道有限元模型设置为刚性约束,采用双椭球热源模型模拟天然气管道有限元模型环焊缝处残余应力的分布情况,得到环焊缝处的残余应力分布云图,根据残余应力分布云图分析环焊缝及其周围残余应力的变化规律,绘制残余应力特征曲线。

[0043] 步骤5,基于步骤3中确定的残余应力变化曲线,将焊缝及其周围的残余应力特征曲线与步骤3中计算的残余应力变化曲线进行对比,发现利用矫顽力评价天然气管道环焊缝残余应力准确性高,有利于天然气管道的无损检测及对天然气管道环焊缝处的残余应力进行在线评价。

[0044] 当然,上述说明并非是对本发明的限制,本发明也并不仅限于上述举例,本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围。

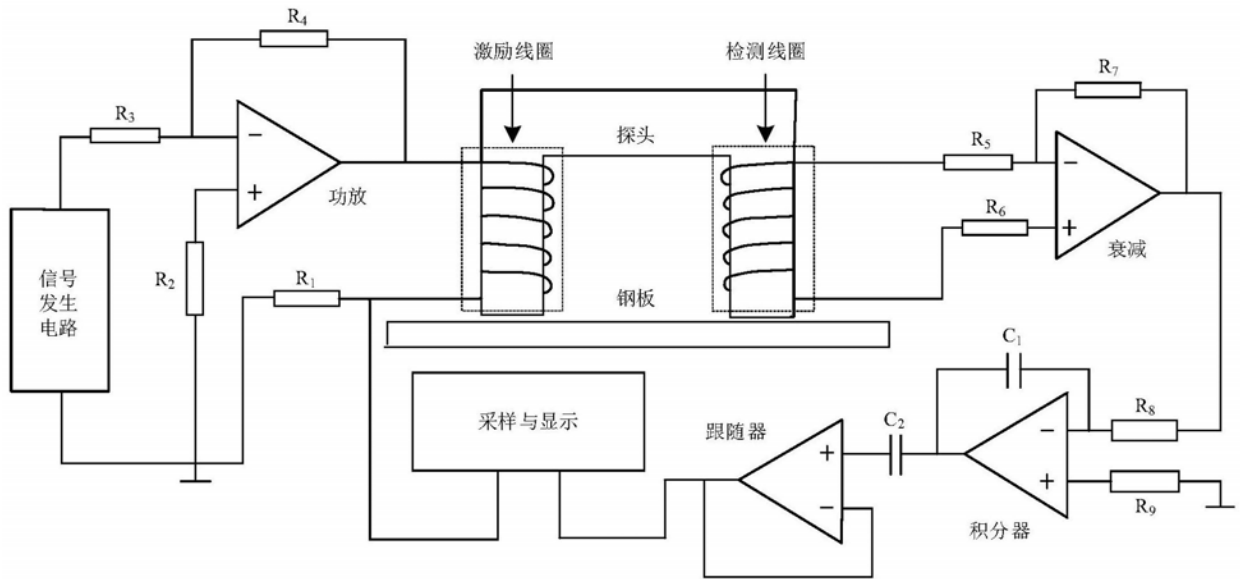


图1

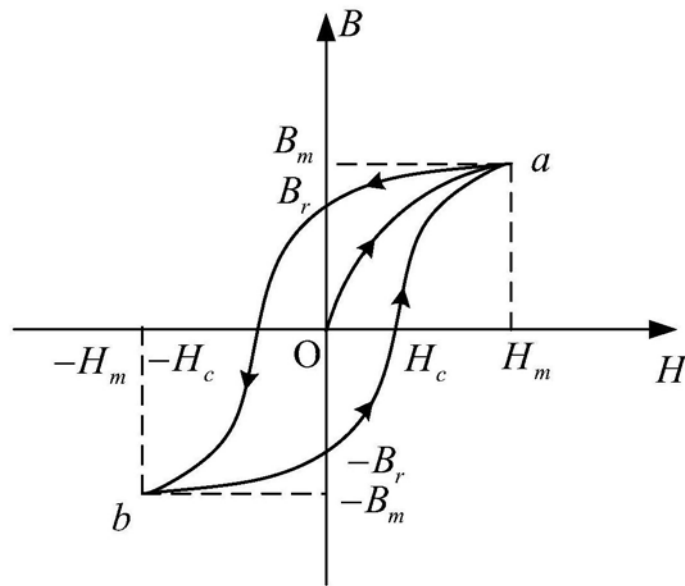


图2



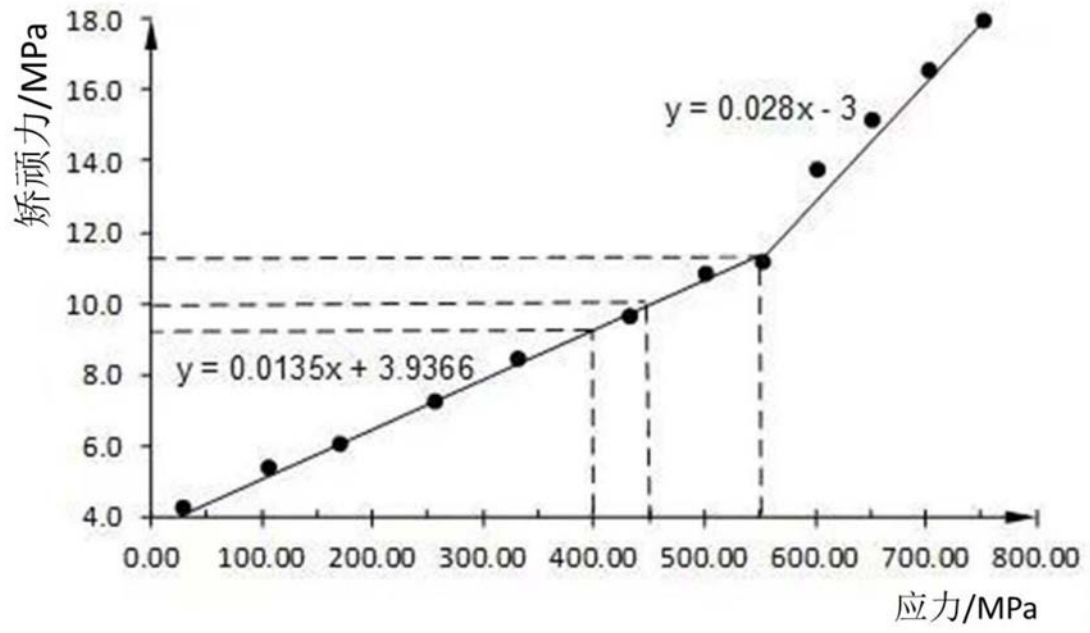


图3