

文章编号:1000-8241(2012)07-0553-04

# 长输管道直流消磁法及其 ANSYS 数值模拟

章磊 张素香 张城伟 孙铁

辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001

章磊等. 长输管道直流消磁法及其 ANSYS 数值模拟. 油气储运, 2012, 31(7): 553-556.

**摘要:** 焊接具有磁性的管道焊口时, 焊口剩磁产生的磁场和焊接电弧产生的磁场组成复合磁场, 若复合磁场的洛伦兹力大于电磁场的收缩力, 焊接电弧带电粒子的运动角度将发生偏转, 在宏观上表现为电弧偏吹, 即磁偏吹。若电弧的偏转角度大于 45°, 在焊接过程中将出现严重的磁偏吹现象; 反之, 磁偏吹现象不明显。利用有限元软件 ANSYS 对管道、消磁线圈以及外部空气进行实体建模, 通过对模型简化和求解, 得到消磁磁场的分布情况: 磁场以通电螺线管的轴线为对称轴呈对称分布, 且线圈中心的磁场强度最弱, 距离线圈无限远处的磁场强度为 0; 沿径向两端管壁的磁场强度最大, 无限远处的磁场强度为 0, 中间区域分布较均匀。最后, 对长输管道直流消磁方法进行优化, 并介绍了直流消磁方法的两种基本形式。

**关键词:** 长输管道; 剩磁; 消磁; 磁偏吹; 复合磁场; ANSYS 模拟

**中图分类号:** TE42

**文献标识码:** A

**doi:** 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.07.019

在长输管道的建设、维抢修过程中, 经常产生剩磁。实施焊接作业时, 焊接管口存在的剩磁将导致磁偏吹现象的产生。具有一定电离程度的气体构成焊接电弧, 焊接电弧的微观结构由分离且有运动方向的正、负电荷组成, 流动电荷产生的电流促使电弧周围产生感应磁场。如果分布均匀的电弧磁场被破坏, 局部的洛伦兹力过大, 受力不均匀电弧将偏离焊条的轴线方向, 与电极轴形成倾斜角度, 产生电弧偏吹, 即磁偏吹。如果不对磁偏吹加以控制, 将对焊接产生严重影响: 轻者, 电弧的稳定燃烧受到影响, 造成焊缝根部未焊透、未融合, 此时, 必须重新焊接管道; 重者, 焊接作业将无法进行<sup>[1]</sup>, 因而影响工程进度和工程质量, 恶化管道的物理特性, 造成严重的经济损失。

## 1 磁偏吹方向的判定

焊接具有磁性的管道焊口, 将有较强的外磁场出现在电弧周围, 即由焊口剩磁产生的磁场和电弧产生的磁场组成的复合磁场。该复合磁场的磁场强度超过一定数值后, 将会破坏电弧的稳定性。这是因为带电粒子的运动使电弧具有导电性能, 而复合磁场会对在

其场强中带电粒子运动产生的洛伦兹力造成影响, 进而影响电弧的稳定性。

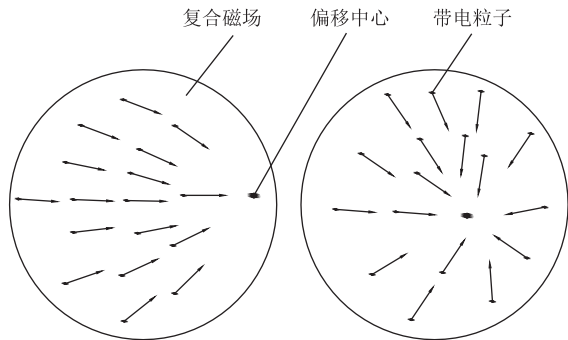
由洛伦兹力的表达式可以推导出偏转角  $\alpha$  的计算式<sup>[2]</sup>:

$$\sin\alpha = K \frac{BLI}{I^2} \quad (1)$$

式中:  $B$  为磁感应强度,  $10^{-4}$  T;  $I$  为焊接电流, A;  $L$  为焊接电弧长度, cm;  $K$  为常数, 对于钢的钨极氩弧焊,  $K=5$ 。

可见, 有两种外力对电弧产生作用, 一种是电弧中带电粒子在磁场中产生洛伦兹力的总和  $BLI$ , 另一种是电磁场的收缩力, 由流过电弧的电流自身产生, 用  $I^2$  表示。焊接电弧在复合磁场中的偏转角度由这两种外力共同决定。管道焊接处的剩磁磁通量  $B$  越大,  $BLI$  所表示的洛伦兹力越大。若复合磁场的洛伦兹力大于电磁场的收缩力, 即  $BIL > I^2$ , 焊接电弧带电粒子的运动角度将发生偏转, 在宏观上表现为电弧偏吹。如果电弧的偏转角度大于 45°(图 1a), 在焊接过程中将出现严重的磁偏吹现象, 这是因为剩磁磁场所产生的洛伦兹力, 远远大于焊接电流自身的作用力<sup>[3]</sup>。反之, 如果复合磁场的洛伦兹力小于电磁场的收缩力, 即

$BLI < I^2$ , 两种外力的合力则主要作用于焊接电弧中的电荷, 使电弧向空间的某一个偏离中心运动, 则磁偏吹现象不明显(图 1b)。



(a) 电弧偏转角大于 45° (b) 焊接电弧燃烧稳定性未破坏

图 1 电荷在复合磁场中的偏转示意图

以偏转角度 45° 为临界点确定管道在可施工范围内的最大剩磁感应强度  $B_{max}$  [4]。对于长输管道,  $K$  值一般取 2.5; 焊接电流  $I$  一般为 80~100 A, 这里取 80 A; 电弧长度取 0.2 cm。将相关参数代入式(1)可得:  $B_{max} = 0.07 I/L$ , 通过计算可知, 管道可施焊的最大剩磁感应强度  $B_{max} = 28 \times 10^{-4} T$  (表 1)。

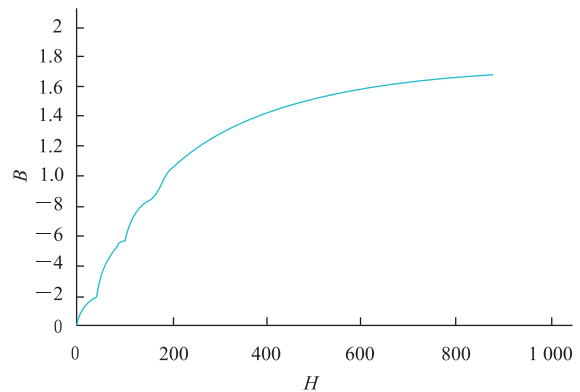
表 1 管道剩磁强度与可施焊条件

剩磁等级	剩磁感应强度 / ( $10^{-4} T$ )	焊接条件
弱	28	可焊
中	28~100	消磁
高	100	消磁

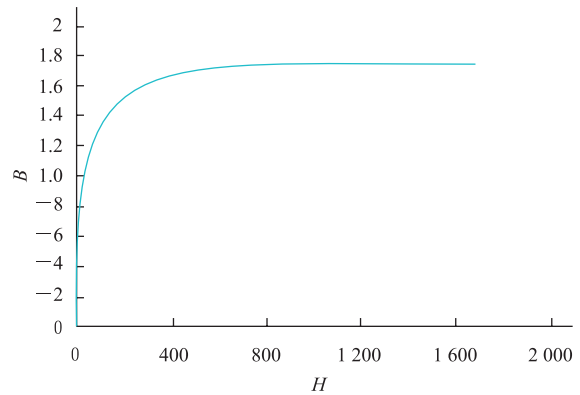
## 2 管道直流消磁磁场的模拟

### 2.1 管道模型的建立<sup>[5]</sup>

以东北管网 16MnR 管材为对象, 由于 16MnR 管材的相对磁导率与磁场强度呈非线性关系, 因此, 在建立管道模型之前须对管道的  $B-H$  磁化曲线进行定义。利用 J40 示波器测量 16MnR 钢管的磁场强度  $B$  和磁通量  $H$ , 并与 ANSYS 软件提供的  $B-H$  磁化曲线进行对比, ANSYS 提供的磁通量极大值与实际情况基本一致, 但磁通量在磁场强度小于 4 000 时存在明显误差(图 2)。同时, 16MnR 钢管的实测磁导率曲线与 ANSYS 软件提供的磁导率曲线存在较大差异(图 3)。因此, 采用实测数据(图 2a、图 3a)作为模拟管道的基本数据。

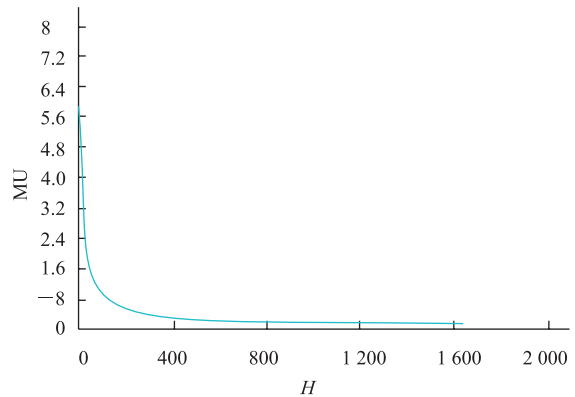


(a) 实测数据

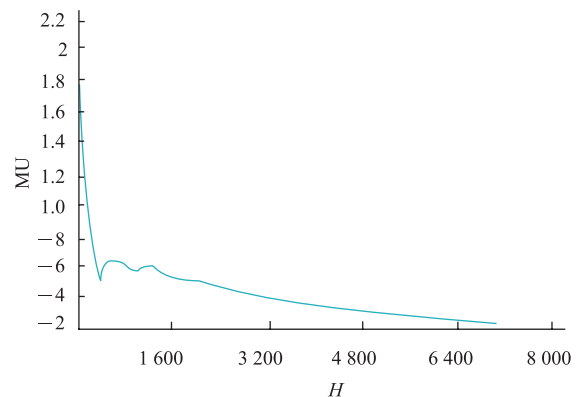


(b) ANSYS 模拟数据

图 2 16MnR 管材管道  $B-H$  曲线



(a) 实测数据



(b) ANSYS 模拟数据

图 3 16MnR 管材的磁导率曲线

2.2 直流消磁法模拟

ANSYS 二维静态磁场模拟主要针对稳态电流、永外加电压、外加磁场、运动导体、永磁体以及外加磁场等激励下产生的静态磁场,只能模拟和计算各种非饱和的磁性材料,不能模拟涡流等由时间变化产生的效应。为了节省计算时间和简化分析过程,对模型进行

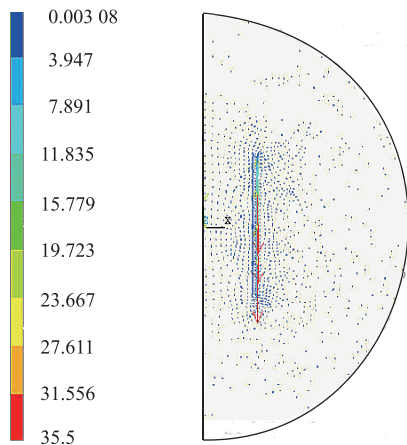
简化使其成为二维轴对称图形,构建二维静态磁场<sup>[6]</sup>。由于远场的磁场强度微弱,对工件不构成影响,故不建立远空气场,只建立近空气场,并选用 PLANE13 作为其单元类型。对于管道和线圈,选用 PLANE53 作为其单元类型,该单元格的分析结果比 PLANE13 更加精确(表2)。

表 2 二维静态磁场单元类型

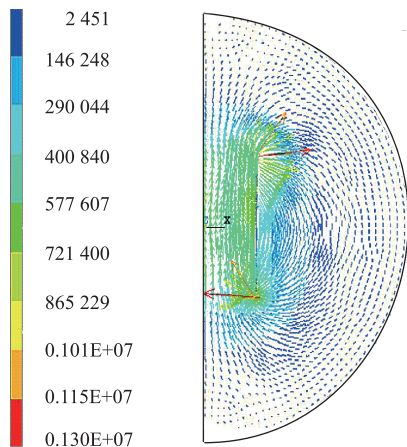
名称	单元	维数	特征	自由度
实体单元	PLANE13	2 D	四边形、4 个节点,或者三角形、3 个节点	每个节点最多 4 个:磁矢势、位移、温度、时间积分电势
	PLANE53	2 D	四边形、8 个节点,或者三角形、3 个节点	每个节点最多 4 个:磁矢势、位移、温度、时间积分电势
远场单元	INFIN9	2 D	线性、2 个节点	磁矢势
	INFIN10	2 D	四边形、4 个或者 8 个节点	磁矢势、电势、温度
通用电路单元	CIRCE124	无	最多 3 个节点	每个节点最多 3 个:电势、电流、电动势降

根据 ANSYS 模拟结果,磁场以通电螺线管轴线为对称轴呈对称分布,且线圈中心的磁场强度最弱(图 4a),距离线圈无限远处的磁场强度为 0(图 4b)。

在位置。沿径向两端管壁的磁场强度最大,无限远处的磁场强度为 0,中间区域分布较均匀(图 5b)。



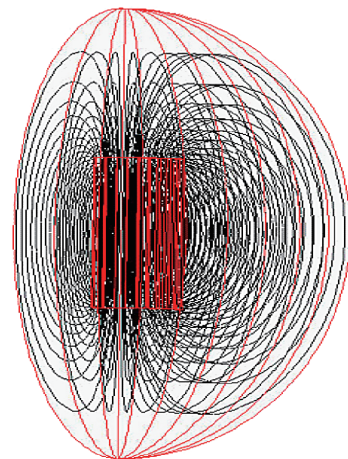
(a) 磁通量分布



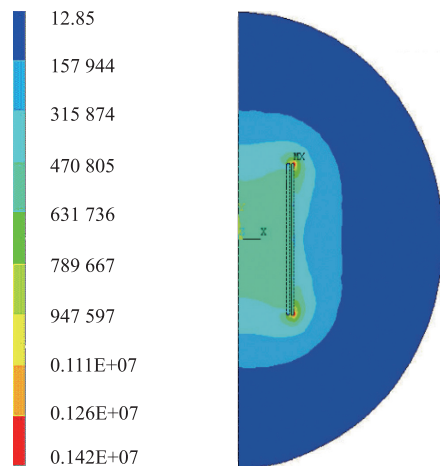
(b) 磁场强度分布

图 4 管道直流消磁 ANSYS 磁通量和磁场强度分布

根据空间磁力线模拟结果(图 5a),线圈中心磁力线最稀疏,因此,不应将管道退磁部位放在线圈中心所



(a) 空间磁力线



(b) 磁场强度径向分布

图 5 管道直流消磁 ANSYS 空间磁力线和磁场强度径向分布

管道在消磁过程中,由于其末端的磁场强度最高

(图 6a),因此,测量管道磁性时磁场强度应取最大值,避免消磁过量的现象发生。由于管道轴线上的磁场强度呈非线性减小(图 6b),因此线圈不宜过长,需控制在 1 m 以内。若管道磁性过强,可以采用多层缠绕法增强消磁磁场。

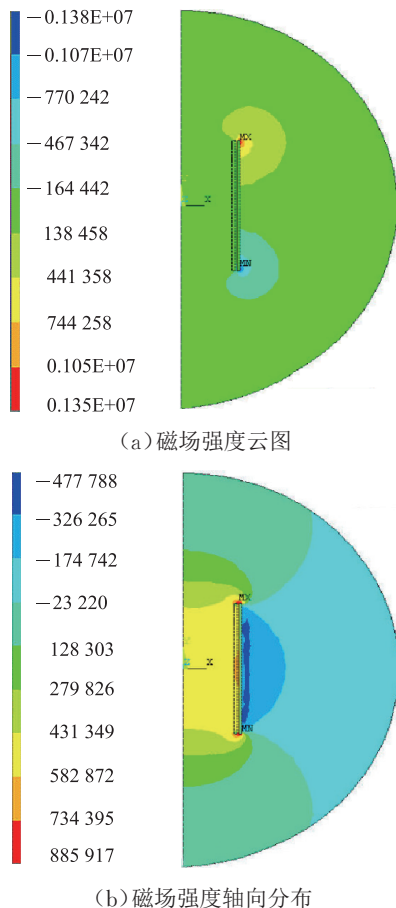


图 6 管道直流消磁 ANSYS 磁场强度云图和磁场强度轴向分布

### 3 直流消磁法的应用

利用磁力计确定钢管切割处剩磁磁场的场强和磁力线方向;在磁性钢管上,将截面为 35~50 mm 的柔性焊接导线缠绕成单层线圈(图 7),并焊接导线连接到焊接变流器上,焊接变流器的数目一般为 1~2 个。通电的焊接导线在管道上形成一个外磁场,其磁力线方向与管道的磁场方向相反。在对管道实施消磁的过程中,电流控制在 80~100 A,同时利用磁力计对管道的磁性部位进行周期性测量,并根据管道的剩磁结果改变电流的强度,当消磁过量时,改变电流的方向。管道消磁结束后,在 1 min 内逐渐将电流降至 0,再切断电源,以达到平滑降低磁通量的目的。

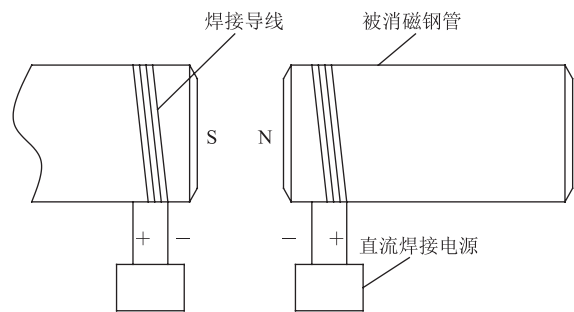


图 7 钢管对接装配直流电消磁系统示意图

综上所述,直流消磁法主要有两种基本形式:其一是通过改变直流电的方向和大小,对管道施加外磁场进行消磁,改变电流大小通过调压器或者多抽头变压器自动调压实现,改变电流方向通过时间继电器控制;这种形式要求退磁电流渐变且不断改变方向。其二是不改变直流电的大小和方向,而是使金属材料逐步远离退磁场;这种形式只改变了磁场场强的大小,没有改变场强的方向。由于直流消磁方法的电流方向不变换或者变换的频率较低,从而降低了趋附效应<sup>[7]</sup>,因此可以消除金属材料内部的磁性。

#### 参考文献:

- [1] 姜运健,冯砚厅.带磁管道焊口的磁偏吹及其退磁焊接[J].焊接技术,1992,21(5):20-24.
- [2] 赵春旺,王克勋,刘前.有限长螺线管磁场的数值计算与分析[J].工物物理,1997(4):14-17.
- [3] 徐明亮,何辅云,张勇,等.钢管整体关联消磁技术[J].合肥工业大学大学学报,2002,25(4):528-530.
- [4] 何辅云,苏占强,张艳,等.铁磁材料的变频消磁技术[J].无损检测,2005,27(9):427-474.
- [5] 秦宇.ANSYS 11.0 基础与实例教程[M].1版.北京:化学工业出版社,2009:22-48.
- [6] 戴光,孙传轩,杨志军,等.管道外壁缺陷多磁化单元磁场数值模拟与参量分析[J].压力容器,2008,25(11):24-29.
- [7] 隋永莉,杜则裕,赵事,等.油气管道焊接过程中的磁偏吹[J].焊接技术,2005,34(4):33-34.

(收稿日期:2011-07-11;编辑:关中原)

**作者简介:**章磊,在读硕士生,1984年生,2012年毕业于辽宁石油化工大学化工过程机械专业,现主要从事新型高效节能石化装备的研发工作。

电话:13942393546;Email:feiyata0@126.com