

文章编号: 0253-2697(2009)01-0136-05

油气长输管道裂纹漏磁检测的瞬态仿真分析

吴德会 黄松岭 赵伟 辛君君

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室 北京 100084)

摘要: 为了提高油气管道漏磁检测的准确度,应充分考虑检测器行进速度对漏磁信号的影响。根据三维有限元分析原理,建立了漏磁检测系统的瞬态数学模型,并对油气长输管道裂纹检测过程进行了仿真研究。由麦克斯韦方程组推导出管道裂纹静态漏磁场的分布模型,对由漏磁检测器运动产生感应的管壁环向涡流进行了定量分析,计算其形成的“逆磁场”及其对外加磁场的影响,推导出动态磁化条件下的裂纹漏磁场有限元仿真模型。由实际物理实验得到与仿真分析相一致的漏磁信号,这表明所建瞬态仿真模型的有效性。利用该模型,获得了不同裂纹所产生的漏磁信号检测结果。根据检测结果,分析了裂纹几何特征,如深度、宽度等与漏磁信号峰谷值之间的对应关系,并给出了关系曲面图。为实际利用漏磁信号检测油气长输管道裂纹提供了重要的依据。

关键词: 油气长输管道; 裂纹几何特征; 漏磁检测; 有限元仿真模型; 定量分析

中图分类号: T E873

文献标识码: A

Transient simulation analysis on magnetic flux leakage detection of cracks in long-distance oil and gas pipeline

WU Dehui HUANG Songling ZHAO Wei XIN Junjun

(State Key Laboratory of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In order to improve the accuracy of magnetic flux leakage (MFL) detection for the long-distance oil and gas pipeline, the impact of the moving velocity of detector on MFL signals should be carefully considered. According to the principle of 3D finite element analysis, a transient mathematic model for the MFL testing system was established and used to stimulate and analyze the crack detection process of oil and gas pipeline. A model for the static MFL distribution of pipeline crack was derived from the Maxwell's equations. Based on the model, the circumferential eddy current of pipeline generated from the movement of the detector was quantitatively analyzed, furthermore, the characteristics of inverse magnetic field formed by the eddy current and its effect on the external magnetic field were evaluated. Finally, a finite element simulation model for the magnetic flux leakage of crack was derived under the condition of dynamic magnetization. The model can acquire the tested results of MFL signals corresponding to different cracks. The consistency between the actual physical experiments and simulation analysis of the MFL signals proved the effectiveness and correctness of the transient simulation model. The relations of the crack geometric parameters, such as depth, width and the peak-valley value of MFL signals were discussed, and their relative curved surface plots were also drawn. The results of simulation analysis may be as a reference for practical MFL detection of cracks in long-distance oil and gas pipelines.

Key words: long distance oil and gas pipeline; geometric features of cracks; magnetic flux leakage detection; finite element simulation model; quantitative analysis

提高油气长输管道的检测技术水平,对保障油气工业安全生产将发挥重要作用。常用的管道无损检测方法有多种^[1-3],其中,漏磁检测方法缺陷检测能力强、信号处理方便、易于实现,已在油气长输管道检测领域得到广泛的应用,尤其是对于腐蚀坑状缺陷,漏磁检测已成为成熟的检测技术之一。但在油气长输管道服役期间,除了存在腐蚀坑状缺陷外,还可能形成许多危险性大的裂纹缺陷^[4]。由于管道裂纹的形成机理较复杂,检测结果影响因素多,因此,与腐蚀坑状缺陷相比,

对裂纹漏磁检测和分析的研究尚不够深入。

目前,漏磁场数学分析主要有基于磁偶极子模型的解析方法^[5]和数值方法^[6-8]。但这些方法大多基于静态磁场的仿真研究,适合静止或低速条件下的漏磁检测。而实际油气长输管道测试中,检测器在管道内以较高的速度(一般为3~5 m/s)行进,对管壁磁化是一个动态过程。因此,利用静态漏磁场分析结果,对实际检测数据进行评定必会带来较大分析误差。笔者在现有漏磁场有限元仿真分析基础上,针对油气长输管

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z223)资助。

作者简介: 吴德会,男,1975年2月生,2006年获合肥工业大学精密仪器及机械专业博士学位,现为清华大学电机工程与应用电子技术系博士后,主要从事智能测试技术的研究。E-mail: wudehui@tsinghua.edu.cn

道裂纹漏磁检测的实际情况, 充分考虑检测器运动对管壁产生的瞬态磁化问题, 为实际裂纹检测及其量化评价提供可靠依据。

1 裂纹漏磁场的有限元分析

1.1 静态漏磁场有限元分析

漏磁检测是利用磁现象来检测铁磁材料工件缺陷的一种无损检测方法。当油气长输管道外壁存在裂纹时, 管壁中裂纹磁导率远比管壁材料本身小, 则该处磁阻增大。在外加磁场的的作用下, 通过该区域磁力线将发生畸变、弯曲, 并有部分漏出管壁表面形成漏磁场。利用磁敏元件对裂纹漏磁场进行检测, 便可以得到裂纹的相关信息。油气长输管道裂纹与普通腐蚀坑状缺陷漏磁场的主要区别在于: 裂纹宽度小、长度大, 磁力线在裂纹两壁间传播多, 形成的泄漏磁场不明显, 增大了漏磁检测及量化评价的难度。用有限元方法对管道裂纹漏磁场进行分析, 就是找出管道裂纹几何参数与漏磁检测信号之间的关系。

对于稳定的静态漏磁场, 可用安培环路定律和高斯磁通定律进行描述^[9], 建立如下的微分形式:

$$\Delta \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \Delta \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度矢量; \mathbf{B} 为磁通密度矢量; \mathbf{J} 为永久磁铁产生磁场等效的电流密度矢量; μ 为介质磁导率。

由于磁场的无源性, 引入矢量磁势 \mathbf{A} , 则有

$$\mathbf{B} = \Delta \times \mathbf{A}, \quad \Delta \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得

$$\frac{1}{\mu} \Delta^2 \mathbf{A} + \mathbf{J} = 0 \quad (3)$$

对于轴对称油气长输管道系统, 可采用柱坐标系 (r, θ, z) 表达, 即

$$\mathbf{A} = A(r, z) \mathbf{e}_\theta, \quad \mathbf{J}_s = J_s \mathbf{e}_\theta \quad (4)$$

其中, \mathbf{e}_θ 为 θ 方向的单位矢量。因此, 式(4)又可简化为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} = -\mu J_s \quad (5)$$

且满足

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \quad (6)$$

用变分原理找出与式(6)等价的能量泛函, 并在给定的区域和边界条件下计算使能量泛函达到极小值的矢量磁势 \mathbf{A} 。

1.2 瞬态漏磁场的有限元分析

从上述的推导过程可以看出, 式(5)是静态漏磁场的分析模型。但在实际检测中, 检测器以一定的速度在管道内行进, 对管壁磁化是一个动态过程^[10]。一方

面, 钢管是导体, 径向磁场变化会在管壁内产生环形电流(即涡流), 形成反向磁场, 阻碍磁通对管壁的穿透, 从而改变外加磁场的分布; 另一方面, 动态的磁化过程会影响裂纹漏磁通量, 其程度取决于裂纹外形参数。因此, 油气长输管道裂纹漏磁检测信号高精度仿真分析, 应考虑检测器速度对裂纹漏磁场的影响, 建立瞬态漏磁场有限元分析模型。

在静态漏磁场有限元分析模型的基础上定义由漏磁检测器运动所感应的涡流为 \mathbf{J}_c , 则永久磁铁产生磁场等效的电流密度 \mathbf{J} 为

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_c \quad (7)$$

其中, \mathbf{J}_s 对应源电流。

由麦克斯韦方程可得

$$\Delta \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \Delta \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

式中: \mathbf{v} 表示漏磁检测器行进速度。

因为对任意标量 K 有 $\Delta \times (\Delta K) = 0$, 所以将式(2)代入并整理可得

$$\mathbf{E} = \Delta K - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\Delta \times \mathbf{A}) \quad (9)$$

根据实际情况, 不妨假设油气管道的管壁由均匀、各向同性的铁磁性材料制成, 则式(9)可写成

$$\mathbf{J}_c = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times (\Delta \times \mathbf{A}) + \sigma \Delta K \quad (10)$$

式中: σ 代表材料的电导率。

油气管道截面通常为圆环, 可将管壁视为轴对称系统, 即 $\Delta K = 0$ 。将式(3)、式(7)代入式(10), 可建立漏磁检测器对管道进行瞬态磁化的漏磁场矢量偏微分方程为

$$-\frac{1}{\mu} \Delta^2 \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times (\Delta \times \mathbf{A}) \quad (11)$$

式中: $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$ 代表磁势随时间变化引起的电流密度; $\sigma \mathbf{v} \times (\Delta \times \mathbf{A})$ 为磁场区域同管壁相对运动产生的电流密度。

同样采用有限元法对式(11)进行数值计算, 分析检测器在运动过程中裂纹瞬态漏磁场的分布情况, 从而对实际检测漏磁信号进行评价提供依据。

2 裂纹漏磁检测仿真实验及结果分析

2.1 仿真实验

选用了英国 Vector Fields 公司的 Opera-3D 软件包对裂纹漏磁场进行有限元仿真实验。Opera-3D 对建立的几何模型, 采用四面体或者六面体自动划分网格。在计算核心部分, 由于 Opera-3D 是通用型的三维电磁场数值仿真软件, 因此含有 TOSCA、ELEKTRA、SCALA、CARMEN、SOPRANO、TEMPO 等 6

个模块。选用其中的 ELEKTRA 模块对三维静磁场和带有涡流的电磁场瞬态进行仿真分析,如图 1 所示。

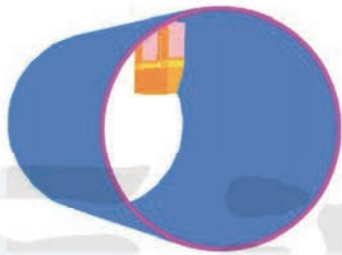


图 1 管道漏磁场检测的三维有限元仿真模型

Fig. 1 3D finite element simulation model for MFL detection

根据检测器的实体结构,利用该软件包建立三维有限元漏磁检测模型(图 1)。该模型的轴向截面如图 2 所示,其中主要包含 5 个部分:永磁体、钢刷、管壁、裂纹和衬铁,构成了一个磁回路。图 2 中 d 表示霍尔传感器的提高值。

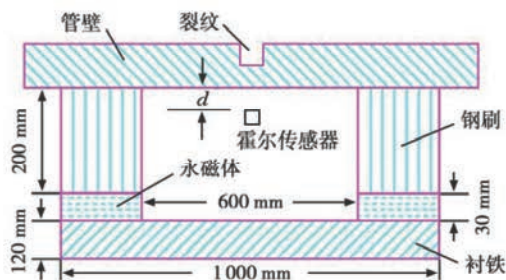


图 2 三维有限元仿真模型轴向截面

Fig. 2 Axial section of 3D finite element simulation model

管道裂纹漏磁场三维有限元仿真模型使用的永磁体为钕铁硼磁铁,设置其相对磁导率为 1.26,矫顽力为 836 kA/m。被测管壁、钢刷和衬铁 3 种材料的磁性参数来自实际设计方案,并与实际物理测试结果对比最终确定。在影响管道裂纹漏磁场检测结果的诸多因素中,检测器行进速度 v 、材料磁导率 μ 、外加磁场强度 H 及霍尔传感器提高值 d 主要由检测器自身参数决定,在检测过程中不会发生明显变化。因此,着重研究管道裂纹宽度 b 、深度 h 对漏磁场的影响规律。

仿真实验时,设置的相关参数有:管道壁厚为 14.6 mm;检测器行进速度 3 m/s;管道直径为 1016 mm;传感器与管道内表面提高值为 1 mm;空气磁导率取 1.0;裂纹长度均为 300 mm(相对于裂纹深度和宽度,可近似为无限长);裂纹宽度及裂纹深度可根据仿真研究目标设置,其取值为 0.1~10 mm。

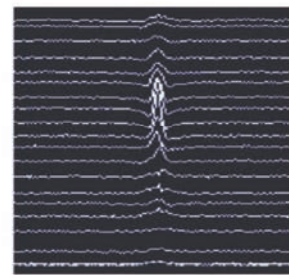
2.2 仿真模型验证

笔者通过物理实验验证所建瞬态漏磁场有限元分析模型的实际效果。实验管道采用我国西气东输工程中使用的 X70 管材,其管径为 1016 mm、壁厚为 14.6

mm,用人工方法在管道外表面加工若干条矩形槽沟。由于受到实际裂纹样本机械加工条件的限制,物理样本最小宽度、最小深度均为 1 mm。实验时,用绞车牵引钢丝绳,从而牵拉检测器前进,行进速度为 3 m/s。图 3 显示了管壁上人工预制的裂纹样本及利用检测器进行轴向扫查裂纹的漏磁信号波形 B_x 。用霍尔传感器检测的漏磁场感应强度轴向分量 B_x 表示“漏磁场”。



(a) 管壁上预制裂纹



(b) 实际轴向扫查结果

图 3 实际管道裂纹检测实验

Fig. 3 Actual MFL testing experiments

用检测器对裂纹漏磁场进行多路扫查时,靠近裂纹中间位置的漏磁信号相对均匀、幅值也较大;而到裂纹两端,漏磁信号峰值会有一个明显衰减过程,其波形分布如图 3(b) 所示。实验时取裂纹正中位置的检测曲线作为裂纹漏磁场检测结果。图 4 给出了实际深度

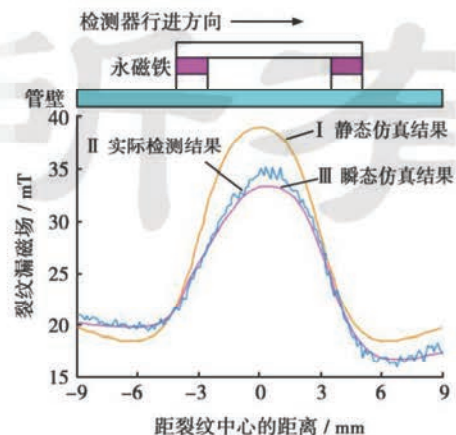


图 4 裂纹漏磁场物理检测与仿真结果对比

Fig. 4 Result comparison between simulation and actual testing

为3 mm、宽度为2 mm物理裂纹的漏磁场牵拉检测结果与同尺寸有限元静态及瞬态仿真结果的对比情况。

从图4中曲线I可见,在静止情况下,裂纹漏磁场对称地分布于中心点两侧。但由曲线II可以看出,实际检测过程中,检测器的行进速度对管壁裂纹漏磁检测信号产生了明显的影响,主要表现在:①造成了漏磁信号幅值变化,当检测器以3 m/s的速度运动时,漏磁信号幅度相对于静止状态降低了约10%;②改变了漏磁信号前后端形状,波形两端谷底值不等;③使漏磁信号向检测器运动的反方向倾斜,并形成“拖尾”。由此看来,若仍用漏磁场静态仿真模型来分析实际检测信号,势必会带来较大的分析误差。因此,建立的裂纹漏磁场瞬态有限元仿真模型与实际物理测试结果之间吻合情况良好,能有效反映检测器牵拉行进时漏磁场建立的动态过程。

2.3 裂纹外形参数与漏磁信号关系分析

对于油气长输管道表面裂纹来说,一般认为对构件力学性能影响最大的形状参数是裂纹深度。裂纹深度是管道等承压设备缺陷评价的主要指标,也是评价管道安全性能的主要依据。为此,先分析裂纹深度对漏磁信号的影响规律。保持裂纹宽度不变(0.5 mm)的情况下,裂纹深度分别取0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm、0.6 mm、0.8 mm、1 mm、2 mm、3 mm、4 mm和5 mm等值进行多次漏磁场瞬态仿真实验。观察裂纹检测信号与深度的变化关系,可得到裂纹深度对漏磁信号影响曲面,如图5所示。

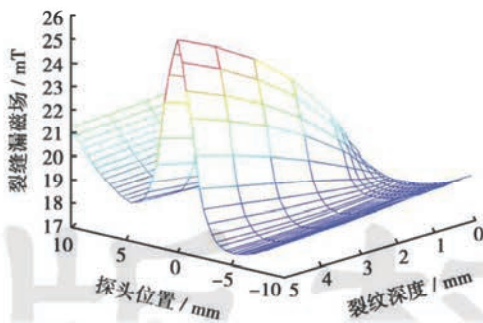


图5 裂纹深度对漏磁信号的影响

Fig. 5 Impact of MFL testing signal on crack depth

从图5中可见,检测器探头的漏磁信号峰谷值越大,对应的裂纹也越深。对于深度小于1 mm的裂纹,漏磁信号峰谷值与裂纹深度之间呈现近似线性关系,这与Lord^[6]得出的腐蚀坑深度对漏磁信号强度影响的结论相似。但随着裂纹深度进一步增加,漏磁信号峰谷值增加的幅度却逐渐降低,并趋于平缓。

保持裂纹深度不变(2 mm),裂纹宽度在1~10 mm范围内每隔1 mm实验1次,为分析漏磁检测对细

微裂缝的效果,在0~1 mm宽度范围内每隔0.2 mm实验1次。观察裂纹漏磁检测信号与其宽度之间的关系,得到对应的漏磁信号分布曲面,如图6所示。

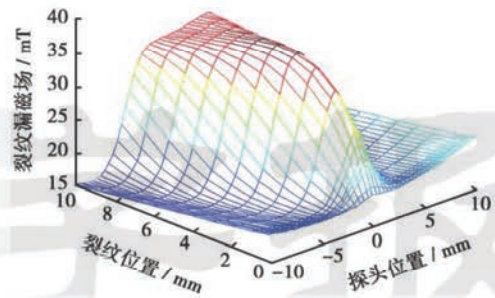


图6 裂纹宽度对漏磁信号的影响

Fig. 6 Impact of MFL testing signal on crack width

从图6可以看出,若裂纹深度确定,则随着裂纹宽度的增加,漏磁信号峰谷值变化包括“线性区”、“非线性区”和“渐降区”。当裂纹宽度较小时,漏磁信号峰谷值随裂纹宽度近似线性增加;若裂纹宽度超过2 mm,则进入“非线性区”,此时漏磁信号峰谷值增加趋于平缓;但当裂纹宽度超过某一临界值(图6中为5 mm),漏磁信号峰谷值反而减小,并呈现双峰分布。因此,不能简单根据裂纹漏磁信号峰谷值对裂纹宽度进行评价,需要结合漏磁信号的形态开展综合分析。

3 结论

(1) 建立裂纹漏磁检测瞬态仿真模型,准确地模拟由检测器运动产生的涡流效应及动态磁化的作用,弥补漏磁场静态仿真分析中的不足,仿真分析结果与实际管道检测器采集的漏磁信号更为接近。

(2) 利用瞬态仿真模型,针对管道裂纹宽度和深度的尺寸变化对漏磁检测信号造成的影响进行详细地计算和分析。当裂纹宽度不变时,裂纹漏磁场峰谷值与深度之间呈现单调递增关系,但随着裂纹变深,漏磁信号峰谷值增加幅度会逐渐降低。当裂纹深度确定时,其漏磁信号峰谷值随宽度先增大后减小,其影响曲线存在“线性”、“非线性”和“渐降”三个区域。

参考文献

- [1] Makar J, Desnoyers R. Magnetic field techniques for the inspection of steel under concrete cover[J]. NDT & E International, 2001, 34(7): 445-456.
- [2] 王长龙, 纪凤珠, 王建斌, 等. 油气管道漏磁检测缺陷的三维成像技术[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 146-148, 152.
Wang Changlong, Ji Fengzhu, Wang Jianbin, et al. 3-D imaging technology for determining defect of oil-gas pipeline in magnetic flux leakage testing [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 146-148, 152.

- [3] Tian G Y, Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(1): 77-82.
- [4] 宋小春, 黄松岭, 赵伟. 天然气长输管道裂纹的无损检测方法[J]. *天然气工业*, 2006, 26(7): 103-106.
Song Xiaochun, Huang Songling, Zhao Wei. Nondestructive testing technique for cracks in long-distance natural gas pipelines [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(7): 103-106.
- [5] 刘美全, 徐章遂, 王建斌. 基于磁偶极子能级分布的缺陷反演成像[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(11): 951-955, 959.
Liu Meiqian, Xu Zhangsui, Wang Jianbin. Inverse imaging for defects based on energy level of the magnetic dipole[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(11): 951-955, 959.
- [6] Hwang J H, Lord W. Finite element modeling of magnetic field/defect interactions[J]. *Journal of Testing & Evaluation*, 1975, 3(1): 21-25.
- [7] Krause T W, Donaldson R M, Barnes R, et al. Variation of the stress dependent magnetic flux leakage signal with defect depth and flux density[J]. *NDT & E International*, 1996, 29(2): 79-86.
- [8] 魏茂安, 靳世久, 李莺莺, 等. 油气管道缺陷二维轮廓重建及处理技术[J]. *石油学报*, 2003, 24(6): 98-101, 106.
Wei Mao'an, Jin Shijiu, Li Yingying, et al. Two-dimensional profile reconstruction and process technology for pipeline defect[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(6): 98-101, 106.
- [9] 曾庆庚, 徐国华, 宋国乡. 电磁场有限单元法[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-30.
Zeng Qingyu, Xu Guohua, Song Guoxiang. *Finite element method for electromagnetic field* [M]. Beijing: Science Press, 1982: 1-30.
- [10] Park G S, Park S H. Analysis of the velocity-induced eddy current in MFL type NDT[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40(2): 663-669.

(收稿日期 2008-01-17 改回日期 2008-03-24 编辑 仇学艳)

《石油学报》再次荣获“中国百种杰出学术期刊”称号

2008年12月9日在北京国际会议中心召开了“中国科技论文统计结果发布会”。会上中国科学技术信息研究所发布了2007年度中国科技论文发表趋势和状况,我国发表的国际论文数量及被引用情况,国内论文数量及被引用情况,我国分学科领域、分地区、分机构论文分布和影响,我国高影响科技论文情况等;公布了首批“中国精品科技期刊”、“2007年中国百种杰出学术期刊”和“2007年中国百篇最具影响的学术论文”名单。

“2007年中国百种杰出学术期刊”名单是中国科学技术信息研究所在对其所收录的1765种中国科技核心期刊进行统计分析的基础上,利用总被引频次、影响因子、他引率等十几种期刊评价指标建立的中国科技学术期刊综合评价指标体系,采用层次分析法,分学科进行综合评定的。该统计结果为我国科技管理部门和学术界广泛采用,具有一定的科学性和权威性。《石油学报》再次荣获“中国百种杰出学术期刊”称号,这是自2002年该奖项设立以来本刊连续7届获此殊荣。

中国科学技术信息研究所公布的首批“中国精品科技期刊”名单是根据中国精品科技期刊遴选指标体系,经公开征集社会各界意见和多次专家研讨而确定的。《石油学报》成功入选首批“中国精品科技期刊”。

另外,中国科学技术信息研究所根据论文的创新性、发表论文的期刊水平、论文他引量等文献计量指标,采用文献计量与专家评估相结合的方式,综合评选出了“2007年中国百篇最具影响的学术论文”。本刊2003年第2期发表的由贾承造、魏国齐、李本亮、肖安成、冉启贵撰写的“中国中西部两期前陆盆地的形成及其控气作用”成功入选。

(本刊编辑部)