

## 基于灰色综合关联度的天然气管道内腐蚀安全评价研究

王璨 宋伟 王林涛 吴鹏 王雅峰

陕西省天然气股份有限公司, 陕西 西安 710055

**[摘要]**对天然气管道内腐蚀的评价是管道腐蚀与防护工作中的重要环节,为了对天然气管道内腐蚀进行风险分析,引入了系统理论中灰色综合关联度的相关知识。该方法结合具体实例,以硫化氢、二氧化碳和缓蚀剂三项造成天然气管道内腐蚀的因素为例,列出了灰色关联度分析的具体步骤,从而对其进行灰色综合关联度计算。结果表明,该方法的评价结果与期望值相符,可以作为评价天然气管道内腐蚀的评价方法。应用灰色综合关联度对天然气管道内腐蚀进行评价,易于使用,且具有计算量小等特点,为进一步整改提供理论依据。

**[关键词]**天然气管道;内腐蚀;灰色综合关联度;评价

DOI: 10.33142/aem.v4i3.5592

中图分类号: X931

文献标识码: A

### Study on Internal Corrosion Safety Evaluation of Natural Gas Pipeline Based on Grey Comprehensive Correlation Degree

WANG Can, SONG Wei, WANG Lintao, WU Peng, WANG Yafeng  
Shaanxi Provincial Natural Gas Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710055, China

**Abstract:** The evaluation of internal corrosion of natural gas pipeline is an important link in pipeline corrosion and protection. In order to analyze the risk of internal corrosion of natural gas pipeline, the relevant knowledge of grey comprehensive correlation degree in system theory is introduced. Combined with specific examples, taking hydrogen sulfide, carbon dioxide and corrosion inhibitor as examples, this method lists the specific steps of grey correlation analysis, so as to calculate the grey comprehensive correlation degree. The results show that the evaluation result of this method is consistent with the expected value, and can be used as an evaluation method for evaluating the internal corrosion of natural gas pipeline. The application of grey comprehensive correlation degree to evaluate the internal corrosion of natural gas pipeline is easy to use and has the characteristics of small amount of calculation, which provides a theoretical basis for further rectification.

**Keywords:** natural gas pipeline; internal corrosion; grey comprehensive correlation degree; evaluate

#### 引言

在天然气长输管道事故中,内腐蚀是造成天然气管道失效的重要因素,内腐蚀不进而会改变材质的结构强度,进而造成管道的泄漏,对天然气长输管道输气系统的安全、完整性管理以及经济性造成威胁,最终可引发事故。近年,天然气长输管道事故呈现一定的增长趋势,且造成的后果日益严重,社会影响深远,国内一些专家学者已经逐步关注此类问题,并不断研究技术及管理措施确保天然气管道的安全,保障人民群众生命安全和减少财产及环境危害。经调查内地部分地区,自20世纪70年代年至21世纪初发生的输气管道事故中,其中因腐蚀引发的事故约占四成,占比居各种事故危害因素的首位<sup>[1]</sup>。在腐蚀的诸多因素中,以外腐蚀,内腐蚀以及生物腐蚀因素为主,天然气管道内产生腐蚀的原因主要是因为内部有残液,通过和若干化学物质 $H_2S$ ,  $CO_2$ 和氯化物等反应,产生有强烈腐蚀性的有害物质。因此,要创造天然气长输管道的经济效益,就应关注内腐蚀发生的潜在影响因素及物质,需对危害因素进行安全辨识评价,找出内腐蚀的影响因素并提出相关的防治措施,以增强安全效益最大化。对天然气管道危害因素的

研究尤其针对内腐蚀情况进行安全评价分析,是预防事故,提高管道安全管理的重要手段。国内外的一些学者已就天然气管道危害因素方面开展一系列研究,如罗鹏等对国外天然气长输管道内腐蚀评价案例的分析<sup>[2]</sup>;欧剑等运用模糊数学的方法评价天然气管道内腐蚀<sup>[3]</sup>;郭秋月等预测管道发生内腐蚀的部位,研究天然气管道内腐蚀直接评价方法原理与范例<sup>[4]</sup>;王凯全等城市天然气管道风险特征与肯特法的改进<sup>[5]</sup>,研究城市管网安全评估的方法;胡小芳等用人工神经网络预测天然气管道内腐蚀速度<sup>[6]</sup>,利用人工神经网络的模型,预测输气管道内腐蚀可能发生的速度;俞树荣等埋地管道腐蚀剩余寿命预测概率模<sup>[7]</sup>,采用Monte-carlo的手段预测管道腐蚀生命周期。

目前,对于天然气管道内腐蚀的评价方法各有长处和不足,本文根据灰色系统理论对管道的内腐蚀进行综合评价,这对于制定长输管线的防腐措施,保障管道平稳运行,创造安全效益具有重要的现实意义。

#### 1 评价方法的选择

近年,国内外对城市天然气管道的安全评估逐渐增多,评价方法有定性和定量以及半定量,多数都是以

W. K. Muhlbauer 在《管道风险管理手册》所提到的评分方法为蓝本<sup>[8]</sup>，此种评价方法是针对长输管道提出的，提出了解决管道内腐蚀管理的关键<sup>[9]</sup>。

安全评价方法目前已发展成多种，我们常用的安全评价方法主要有安全检查表法(SCL)、预先危险分析法(PHA)、事故树事件树分析法、故障分析法以及危险与可操作性分析、指标评价法等等。

安全检查表法是依据国家法律法规，标准规范，对生产系统中的各类危害因素包括危险类别、设计缺陷、潜在危险性和有害性进行判别检查，是工作中较为常用的评价方法，是一种定性评价方法。安全检查表把检查对象分成几个类别，把检查内容细化，检查方式通常是现场结合询问的方式进行，安全检查表的特点是检查要素全面，简单便捷，使用频率较高，检查人员便于理解和使用的定性评价方法。安全检查表广泛应用在各企业安全管理检查手段中，能够一定程度上发现潜在的事故隐患，是企业各级检查人员常用的工具，但是，该方法具有明显的短板，不能够对各检查项目给予量化，检查表的制定也需要大量的时间准备，检查的内容受制于编制人员的水平，具有一定的局限性。

预先危险分析是一种定性评价方法，又称是初步危险分析。在初期工作中，预先危险分析是针对系统设计利用最初的安全状态检查，是对系统中的危害因素所进行的初步判断。该分析方法针对系统中的主要危害因素，进行分类，从人、机物、环等方面对风险进行评估，采取一定的工程技术、安全管理和安全培训教育等手段，消除事故隐患，降低风险、减轻财产损失和环境危害，达到企业管理所能接受的最低可承受风险。预先危险分析的目的不仅仅是为了控制危险因素，是为了识别和分析系统内有关危害的所有状态。预先危险分析的用处较多，其主要是为了确定故障树，在系统内某一阶段采用怎样的评价。在进行安全评价的初期，应在安全的运行系统情况下，对系统开始危险分析工作，对相关对象进行评价。预先危险分析所得到的结果可用来建立系统安全要求，该方法是建立其他危险分析的基础，是工作中最基本的危险分析。许多大型公司在设计初期，如厂房的选址和设备设施的概念设计阶段，或者在工程项目建设的初期，经常会用此方法来分析系统潜在存在的危险。

事件树分析法是一种定量分析方法，是安全评价工作中常用的分析方法，它通过归纳推理将事故发生的可能性和危险程度用事件树的形式表示出来。这种方法按照时间顺序对系统的危险因素进行辨识，发现事故隐患的产生原因，以达到削减灾害的目的。事件树分析法广泛应用于能源化工、交通运输、电力等领域，能够有效地进行故障分析和诊断，查找出生产系统的薄弱点。他的优点是可以预测事故发生的可能性，预防事故，因为其方法简便，也可以通过积累大量的数据及资料，利用数学方法进行模拟分

析，在安全管理上发挥决策的作用，这是其他风险评价方法所不具备的一个优势。

故障假设分析方法是一种定性分析方法，具有一定的创造性，分析了系统内的生产以及工艺过程。该方法对技术人员具有一定的技能储备要求，工作人员应熟悉生产工艺，需要经常进行询问和设想，假定问题发生后应采取的措施和后果，对系统中潜在的危害因素彻底发现的一种假设理论方法。故障假设分析方法具有一定的优缺点，同安全检查表、预先危险分析法侧重点有所不同，它要求技术人员假设潜在的事故和严重后果，一定程度上弥补了安全检查表的缺点，在日常工作中，应运用多种方法相结合，取长补短，定性和定量相结合。

本文中笔者旨在研究利用数学方法，研究灰色关联分析对天然气长输管道进行风险分析，验证内腐蚀的发展速度，预测管道失效的关键因素，它一定程度上弥补了单纯利用数理统计方法作系统分析所导致的缺陷，该方法对样本量的多少和样本有无规律同样适用，并且计算量小，难度低，且不易出现量化结果有偏差的情况。

## 2 灰色综合关联度评价模型

灰色综合关联分析的基本方法是利用序列曲线几何形状的相似程度从而判断其联系是否密切。在数学图形上的表现就是，曲线如果越接近，表示响应的序列之间的关联度越大，如果曲线偏差越大，表示响应的序列之间的关联度越小<sup>[10]</sup>。针对天然气管道的内腐蚀评价采用灰色关联分析法，从而分析影响管道内腐蚀速度的因素序列。这对于制定管线的防腐方案、以及能够经济有效地维护天然气管线的安全运行具有非常重要的理论与实际意义。

(1) 设  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$  为系统特征序列，且  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ， $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ， $X_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n))$  为相关因素序列。给定实数  $r(x_0(k), x_i(k))$ ，若实数  $r(X_0, X_i) =$  满足：

I 规范性  $0 < r(X_0, X_i) \leq 1$ ， $r(X_0, X_i) = 1 \iff X_0 = X_i$

II 整体性 对于  $X_i, X_j \in X = \{X_s | s=0, 1, 2, \dots, m; m \geq 2\}$ ，有  $r(X_i, X_j) \neq r(X_j, X_i)$ ， $i \neq j$

III 偶对称性 对于  $X_i, X_j \in X$ ，有  $r(X_i, X_j) = r(X_j, X_i) \iff X = \{X_i, X_j\}$

IV 接近性  $|x_0(k) - x_i(k)|$  越小， $r(x_0(k), x_i(k))$  越大，则  $r(X_i, X_j)$  称为  $X_i$  与  $X_0$  的灰色关联度， $r(x_0(k), x_i(k))$  为  $X_i, X_0$  在  $k$  点的关联系数。

2) 设序列  $X_i, X_0$  长度相同， $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n))$ ， $S_i =, s_i - s_j =$  则称  $\epsilon_{oi}$  为  $X_i, X_0$  的灰色绝对关联度；如果  $X_i, X_0$  初值不等于零，则初值像的关联度  $\epsilon_{oi}$  为  $X_i, X_0$  灰色相对关联度，记为  $r_{oi}$ 。

## 3 实例应用

在天然气长输管道的输送中， $H_2S$ 、 $CO_2$ 、缓蚀剂和水

等化学物质都一定程度上存在不同的气质中,这些物质相互作用产生具有更强腐蚀性的物质,根据建立的数学模型,灰色系统关联度模型,将化学物质与内腐蚀速度进行关联,并进行灰色关联度分析,见表1。

表1 管道内腐蚀因素及内腐蚀速度数据表

编号	1	2	3	4	5
内腐蚀速度 mm/s	0.0057	0.045	0.0088	0.0038	0.011
H <sub>2</sub> S 浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	174	363	363	184	445
CO <sub>2</sub> 浓度, 体积%	0.65	0.68	0.66	0	0.65
缓蚀剂浓度×10 <sup>-6</sup>	200	50	200	200	100

### 3.1 求绝对关联度

(1) 确定母序列和子序列

母序列设定为内腐蚀速度,子序列设为 H<sub>2</sub>S 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度和缓蚀剂的浓度。根据公式,经计算得到各子序列的始点零化像,见表2

表2 始点零化像

0	0.0393	0.0031	-0.0010	0.0053
0	189	189	10	271
0	0.03	0.01	-0.65	0
0	-150	0	0	-100

(2) 求  $|S_i|$ ,  $|S_i-S_0|$ ,  $|S_i|$  为曲线与横轴所围面积的绝对值; $|S_i-S_0|$  为每个曲线面积与  $S_0$  面积差的绝对值。由  $|S_i|=|$ , 经计算得到  $|S_i|$  (其中,  $i=0, 1, 2, 3$ ), 见表3

表3  $|S_i|$  计算结果表

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
0.04315	523.5	0.61	200

由公式:  $|S_i-S_0|=|$ , 经计算得到  $|S_i-S_0|$  (其中,  $i=1, 2, 3$ ), 见表4

表4  $|S_i-S_0|$  计算结果表

$S_1-S_0$	$S_2-S_0$	$S_3-S_0$
523.45685	0.65315	-200.04315

(3) 求灰色绝对关联度  $\epsilon_{0i}$

灰色绝对关联度,体现的是序列  $X_0$  与  $X_i$  的相似程度,没考虑其他因素。由公式得  $\epsilon_{0i}$  (其中,  $i=1, 2, 3$ ), 见表5。

表5 绝对关联度计算结果表

$\epsilon_{01}$	$\epsilon_{02}$	$\epsilon_{03}$
0.500518	0.7167	0.5024

从表5中可得到结果,其中各因素的影响顺序为:  $\epsilon_{02} > \epsilon_{03} > \epsilon_{01}$

### 3.2 求灰色相对关联度

1) 求出初像值,对原始数据进行无量纲化。由公式  $(k)=X_i/X_i(1)$ , 经计算得到结果,见表6

表6 初像值

1	7.8947	1.5439	0.6667	0.1930
1	4.9054	4.9054	1.0575	2.5575
1	0.0462	1.0154	0	1
1	0.2500	1	1	0.5

(2) 求始点零化像

由数学公式计算可以得到各子序列的始点零化像值,结果见表7。

表7 始点零化像表

0	6.8947	0.5439	-0.3333	-0.807
0	3.9054	3.9054	0.0575	1.5575
0	0.0462	0.0154	-1	0
0	0.75	0	0	-0.5

(3) 求  $|$ ,  $|$ 。

$|$ , 经计算得到  $|$ , 见表8。

表8  $|$  计算结果表

$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
6.7018	8.6471	-0.9384	-1.25

由  $|$ , 经计算得到  $|$ , 见表9

表9  $|$  计算结果表

$S_1-S_0$	$S_2-S_0$	$S_3-S_0$
1.94525	7.963	7.8553

(4) 求相对关联度  $\epsilon_{0i}$

由灰色相对关联度的数量表征,  $\epsilon_{0i}$ =得到各因素的相对关联度,结果见表10。

表10 相对关联度值表

$\epsilon_{01}$	$\epsilon_{02}$	$\epsilon_{03}$
0.8937	0.52039	0.5326

由表可得关系  $\epsilon_{01} > \epsilon_{03} > \epsilon_{02}$

### 3.3 求综合关联度

根据灰色综合关联度的定义,它表示折线序列  $X_0$  与  $X_i$  的相似程度,也可反映出序列  $X_0$  与  $X_i$  相对于始点的变化速率的接近程度,能够完整的表征序列之间的关联程度,是衡量紧密程度的指标,取  $\theta=0.5$ ,由  $\rho_{0i}=\theta \epsilon_{0i}+(1-\theta) r_{0i}$ ; 可得  $\rho_{01}=0.6971$ ,  $\rho_{02}=0.6185$ ,  $\rho_{03}=0.5175$

### 3.4 分析数值

由  $\rho_{01} > \rho_{02} > \rho_{03}$ , 可以得出  $X_1 > X_2 > X_3$ 。由此可见,  $X_1$  为其中最优的因素,  $X_2$  次之,  $X_3$  是最差的因素。也就是说,在天然气管道内腐蚀的影响因素中, H<sub>2</sub>S 的影响因素是最大, CO<sub>2</sub> 浓度对内腐蚀有一定的影响, 缓蚀剂浓度的影响最弱。这一计算结果与现实生产经营中所发生的现象是一致的。

### 4 结语

在天然气管道内腐蚀的影响因素中, 本文通过研究天然气长输管道内腐蚀的3个重要影响因素, 利用安全评价方法中的综合关联度模型进行评价, 得出结论, H<sub>2</sub>S 的影

响因素是最大,CO<sub>2</sub>浓度对内腐蚀有一定的影响,缓蚀剂浓度的影响最弱。结果表明该方法对影响因素的关联度排序符合实际情况,利用灰色系统理论进行分析,为天然气管道内腐蚀因素的影响程度的划分提供了一个途径。灰色系统理论中的灰色综合关联度是一中定量的分析方法,它能够分析各因素之间的关联性,该方法对评估指标没有限制,模型对指标的数量也没有限制,是灰色系统决策、预测、分析、建模的基础。但是灰色关联度量化模型目前还很不完善,我们应该本着实事求是的科学态度,灵活而谨慎地应用它。对于灰色关联度的适用条件及模型的完善方面还要进行大量的研究,进而将其完善成为一个成熟的理论方法,以方便广大工程技术、管理人员应用。

#### [参考文献]

- [1]杜艳,谢英,王子豪,等.天然气管道事故分析[J].管道技术与设备,2009(2):16-17.  
[2]罗鹏,赵霞,张一玲,等.国外天然气管道内腐蚀直接评

价案例分析[J].油气储运,2010,29(2):137-140.

- [3]欧剑,相臻.模糊数学在天然气管道内腐蚀评价中的应用[J].腐蚀科学与防腐技术,2006,18(5):389-390.  
[4]郭秋月,刘磊,郭新峰.天然气管道内腐蚀直接评价方法原理与范例[J].焊管,2011,34(3):65-70.  
[5]王凯全,王宁,张弛等.城市天然气管道风险特征与肯特法的改进[J].中国安全科学学报,2008,18(9):152-157.  
[6]胡小芳,韩廷亮,盖国盛.用人工神经网络预测天然气管道内腐蚀速度[J].油气储运,2004,23(9):56-58.  
[7]俞树荣,李建华,李淑欣等.埋地管道腐蚀剩余寿命预测概率模型[J].中国安全科学学报,2008,18(6):11-15.  
[8]赵学芬,姚安林,赵忠刚.输气管道内腐蚀直接评价方法[J].焊管,2006,29(2):69-72.

作者简介:王璨(1986-)男,安徽界首市人,硕士研究生,研究方向为城市公共建设及其保障体系。