



气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究

任建东 赵毅鑫 孙中博 LIUShimin 王文

引用本文：

任建东, 赵毅鑫, 孙中博, 等. 气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S2): 152–164.

REN Jiandong, ZHAO Yixin, SUN Zhongbo. Study on time series rule of buried pipe failure under high-intensity coal mining in a gas-coal overlapping area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 152–164.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅埋深厚煤层高强度开采地表沉陷规律研究

Research on surface subsidence law in high-intensity mining of shallow buried with thick coal seam
煤炭科学技术. 2023, 51(5): 11–20 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0821>

浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究

Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining
煤炭科学技术. 2021, 49(10): 185–192 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d749e872-e15c-4dff-b196-aa45fb971793>

黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究

Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e2e70fbd-d9b8-40b4-993b-4015877a7e95>

上湾矿高强度开采地表裂隙发育规律实测研究

In-situ surveying and study on development laws of surface cracks by high-intensity mining in Shangwan Mine
煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fd66eff3-3e0f-4c00-8df3-34a6fc84aa42>

煤炭高强度重复采动下地下水漏失规律研究

Study on law of groundwater resources leakage under high intensity repeated mining
煤炭科学技术. 2022, 50(11): 131–139 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bd6ac8f7-562f-4b80-adc8-5b8e15b0a4ed>

我国厚及特厚煤层高强度开采导水裂隙带发育高度区域分布规律

Regional distribution law of water-conducting fractured zone height in high-strength mining of thick and extra-thick coal seams in China
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e6931a0d-2d77-4f62-8b29-73b29a04bafa>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



任建东,赵毅鑫,孙中博,等.气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究[J].煤炭科学技术,2023,51(S2): 152-164.

REN Jiandong, ZHAO Yixin, SUN Zhongbo, et al. Study on time series rule of buried pipe failure under high-intensity coal mining in a gas-coal overlapping area[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S2): 152-164.

移动扫码阅读

气煤叠置区高强度开采浅埋管道破坏时序规律研究

任建东^{1,2},赵毅鑫^{1,2},孙中博^{1,2},LIU Shimin³,王文⁴

(1.中国矿业大学(北京)共伴生能源精准开采北京市重点实验室,北京 100083; 2.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083;

3.宾夕法尼亚州立大学能源与矿产工程系,美国宾夕法尼亚州 16802; 4.河南理工大学能源科学与工程学院,河南焦作 454003)

摘要:鄂尔多斯气煤叠置区工作面的高强度回采极易导致地表浅埋油气管线变形失效,明确工作面推进过程中管道破坏的时序规律,对集输管线的精准维护和参数优化具有重要意义。首先,通过理论分析提出了体积应变的理论算法。其次,通过体积应变极限分别构建了管道局部拉伸和压缩状态下失效破坏判别的新方法。然后,通过数值模拟分析了管道轴向和环向的变形和体积应变,明确了埋地管道破坏的时序规律。同时,将数值结果与监测数据和理论结果进行对比分析,验证了试验结果的合理性和准确性。结果表明:以直径为508 mm的输气管道为例,拉伸和压缩状态下油气管道的体积应变极限分别为0.42%、-0.31%。工作面向管道靠近过程中管道的变形量总小于覆岩,二者为非协同变形,且工作面距管道越近非协同变形程度越大。在轴线方向上,管道的变形曲线均呈现漏斗状。管道的椭圆度随着管道与工作面间距离的缩小而逐渐减小,且二者间数学关系可用指数函数表达。管道拐点至端部体积应变大于零、拐点之间小于零,整体的体积应变关于沉陷中心位置左右对称。管道底部和顶部的体积应变分布并不对称,且同一轴向位置处顶部的体积应变绝对值总大于底部。管道顶底部破坏轮廓分别呈现“U”和“U”,同一轴向位置上的破坏轮廓呈现“S”。管道轴向易破坏的位置及形式:顶部中心压缩破坏、顶部两端拉伸破坏。采煤工作面逐渐靠近管道过程中,管道中心至拐点、端部至拐点均从先到后依次破坏,且中心位置破坏早于两端、顶部的破坏早于底部。与此同时,管道在环向上的破坏由270°向180°偏转,其中330°~150°是最易发生破坏的方位;最小变形由120°向0°偏转。最后,通过地表沉降量、管道的变形量、椭圆度、剪应力等指标验证了结果的可靠性。研究结果进一步明确了埋地管道破坏的方位和时序,有利于管输工程的精准维护和高效施工,为促进油-气-煤资源的协调开采提供借鉴。

关键词:高强度开采;气煤叠置区;浅埋管道;破坏方位;体积应变极限;时序规律

中图分类号:TD713 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2023)S2-0152-13

Study on time series rule of buried pipe failure under high-intensity coal mining in a gas-coal overlapping area

REN Jiandong^{1,2}, ZHAO Yixin^{1,2}, SUN Zhongbo^{1,2}, LIU Shimin³, WANG Wen⁴

(1. Beijing Key Laboratory for Precision Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Department of Energy and Mineral Engineering, Pennsylvania State University, Pennsylvania State 16802, America; 4. School of Energy Science Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The high-intensity mining of coal face in the Ordos gas-coal overlapping area can easily lead to the failure of shallowly buried oil & gas pipelines. It is of great significance to clarify the time series of the pipeline failure during the advancing process of the panel in

收稿日期:2023-02-06 责任编辑:宫在萍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0107

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51874312);山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY01)

作者简介:任建东(1993—),男,河南三门峡人,博士研究生。E-mail: rjdcumt@163.com

通讯作者:赵毅鑫(1977—),男,河南洛阳人,教授,博士生导师,博士。E-mail: zhaoyx@cumtb.edu.cn

this area for the accurate maintenance and parameter optimization of the gathering and transmission pipelines. Firstly, the theoretical algorithm of volume strain (VS) is proposed through theoretical analysis. Then, a new method for failure damage discrimination in the tensile and compressive states locally is respectively constructed by the volume strain limit. Next, the deformation and volumetric strain of the pipeline in the axial and circumferential directions were analyzed by numerical simulation, and the time series law of buried pipeline damage was clarified. At the same time, the numerical results are compared and analyzed with the monitoring data and theoretical results to verify the reasonableness and accuracy of the experimental results. The results show that the volumetric strain limits in tension and compression are, for example, 0.42% and -0.31% for a 508 mm diameter gas transmission pipe. The deformation of the pipeline is smaller than that of the overburden during the process of panel advancing, and the deformation between them is non-synergistic. The closer the panel is to the pipeline, the greater the degree of non-synergistic. In the axial direction, the deformation curves of the tubes are funnel-shaped. The ellipticity of the tube decreases as the distance between the tube and the panel decreases, and the mathematical relationship between them can be expressed as an exponential function. The volume strain between the inflection points of the pipeline is always less than 0, and the VS from the inflection point to the end is always greater than 0. Furthermore, the volume strain of the pipe is symmetrical to the left and right about the position of the center of the subsidence. The volume strain distribution at the bottom and top of the pipe is not symmetrical, and the absolute value of the volume strain at the top is always greater than that at the bottom at the same axial position. The failure profiles at the top and bottom of the pipeline are shown as “ \cap ” and “ \cup ”, and at the same axial position show “ S ”. The location and pattern of axial damage of the pipeline: compression damage at the bottom center, and tensile damage at the bottom two ends. The panel is gradually approaching the pipeline process, the failure from the center to the inflection point and from the end to the inflection point of the pipeline is successively generated, and the center is earlier than that at both ends, and the top is earlier than the bottom. At the same time, the failure of the pipeline ring is the transfer from 270° to 180° , where 330° - 150° is the most vulnerable to damage orientation, and the minimum deformation is the transfer from 120° to 0° . Finally, the reliability of the results was verified by the deformation, the ellipticity, the shear stress of the pipe, and the ground settlement. The research results further clarify the orientation and time series rule of pipeline failure, which is conducive to the precise maintenance and efficient construction of pipeline projects and provides a reference for promoting the coordinated mining of oil-gas-coal resources.

Key words: high-intensity coal mining; gas-coal overlapping area; shallow buried pipeline; failure orientation; volume strain limit; time series rule

0 引言

煤及共伴生资源的协调开发是新时代能源资源开发模式的导向^[1]。鄂尔多斯盆地蕴藏着丰富的石油、煤炭、天然气等资源,它们赋存于同一盆地的不同层位,形成了平面上叠加、垂向上叠置的赋存特征,不可避免地导致了多资源的同时同区域开采^[2-3]。随着煤炭开采的重心向鄂尔多斯转移,油气与煤炭共采面积的不断扩大、采煤引起埋地油气管道的失效事故也逐年增多。研究工作面回采过程中管道破坏的方位及时序,对于准确掌握管道的变形状态、精准维护以及气煤协调开采具有重要的借鉴意义。

为了明确采煤影响下埋地管道的破坏区域,国内外的专家学者通过数值模拟、理论分析和相似模拟等开展了相关的研究,并取得了一系列的丰硕成果。在数值模拟方面,郑大海等^[4]通过三向土弹簧非线性模型进行数值分析认为,在增加开采厚度的条件下管道的轴向和竖向位移增大,且变形量在塌陷区中间和边缘达到最大值。王现中等^[5]采用现场监测和数值模拟相结合的方法,分析认为随着煤矿开采范围的增加,沉陷区内的管道轴向应力和剪应力急剧增加,在工作面开采过程中管道应力超过自

身极限时,管道极易发生破坏。吴韶艳等^[6]以不同的松散层厚度为变量进行分析,认为在埋深相同的情况下松散层厚度越大管道的竖直及水平位移越大,管道最容易破坏的位置为沉陷盆地的边缘和中心。任建东等^[7]通过理论分析、数值模拟发现当工作面从管道下方穿过后埋地管道变形曲线符合高斯分布,并分析了竖向、水平应力作用下管道顶、底部的受力状态。在理论分析方面,赵江平等^[8]通过理论和数值模拟分析了管道与土体间的作用,认为管道最小轴向应力值靠近盆地中部,最大轴向应力值和横向位移值均出现在沉陷区边缘。王小龙等^[9]基于Winkler假设的弹性地基梁理论,建立了管道在局部悬空时管道与土相互作用的力学模型,并据此求解了管道局部悬空时的挠度和内力,发现管道最大变形处于沉陷中心。在相似模拟方面,王文等^[10]通过相似模拟分析管道下方煤层开采后管道顶底部的受力状态,认为塌陷区边缘管道发生的斜向拉伸变形、中部发生弯曲变形是管道破坏的主因。此外,徐平^[11]和王坚^[12]等通过相似模拟分析地表沉降过程中管道-土体间的相互作用,以及二者间的协同/非协同变形问题。

综上所述,既有成果主要探讨了沉陷区内管道

的受力变形,部分学者明确指出管道最易破坏的位置处于沉陷区的中心和两端。该成果对现场具有重要的指导意义,但也有不足之处:①仅研究了管道下方煤层采出后管道的受力变形问题,此时管道大多已发生破坏。然而管道是在工作面逐渐向其靠近过程中发生塑性破坏的,因此失效的演化过程并不清晰;②仅指出管道破坏处于沉陷区的中心和两端,二者破坏的先后顺序和环向上的具体方位并未明确。考虑到上述内容对于准确掌握管道破坏方位、实时精准维护、以及管道参数的设计优化具有参考意义,将鄂尔多斯气煤重叠区典型矿井高强度回采工作面作为研究对象,通过理论分析和数值模拟进一步明确管道破坏的时序规律,为工程现场提供参考。

1 工程背景

鄂尔多斯盆地内的石油主要分布在盆地南部,深度为2 000~3 200 m,全部低渗、特低渗透类型;天然气层主要赋存于二叠系,深度约1 500~3 000 m;煤层自下而上赋存于石炭-二叠系、三叠系和侏罗系,含可采煤层8层^[3,13]。据已有资料表明盆地内石油资源分布在苏里格、大牛地等气田,累计探明地质储量 $1.79 \times 10^{14} \text{ m}^3$;截至2014年底,盆地内查明煤炭保有储量 $2.13 \times 10^{12} \text{ t}$,占全区保有资源储量的52.49%,占全国的13.70%。预测资源量 $3.53 \times 10^{12} \text{ t}$ ^[13-14]。鄂尔多斯盆地多资源伴生共存的禀赋特征,导致了油、气、煤的交叉开采不可避免。

如图1a所示,大牛地气田与周边的4个煤矿存在不同程度的重叠。矿井1与大牛地气田重叠面积为 252.94 km^2 ,重叠区内铺设输气管线40.21 km。矿井2与大牛地气田重叠面积 53.30 km^2 ,重叠区内铺设集气管线2 km、采气管线20 km。矿井3与大牛地气田重叠面积 52.41 km^2 ,重叠区内铺设集气干线2条。矿井4与大牛地气田重叠面积 17.74 km^2 ,重叠区内铺设集气干线2条,外输管线1条^[13-14]。如图1b所示,重叠区内某采煤工作面采厚2.8 m,平均埋深348 m(深厚比124),煤层平均倾角为3°。工作面宽230 m,每月推进约300 m,采用综合机械化采煤工艺,属于高强度开采区。距离工作面200 m的位置铺设一条直径为508 mm、壁厚7.1 mm的输气管道,埋深为1.8 m。地表为15 m厚的风积沙层、含有少量黄土。自然状态下容重约为 1.4 g/cm^3 ,黏聚力约为0。工作面地质条件简单,柱状图如图1c所示。工作面推进过程中顶板垮落,工作面上方依次形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带^[15]。当弯曲下沉带波及至表土时在地表形成沉陷盆地。此时管道处于沉陷区影响范围时,表土的移动变形会使其产生向采空区发展的弯曲变形。在这种情况下,变形超过自身强度时管道便会发生折断、破裂等失效事故,严重威胁油气集输工程的安全稳定。因此明确管道破坏的准确方位和时序,对于维护管道安全、气煤资源的协调开采至关重要。

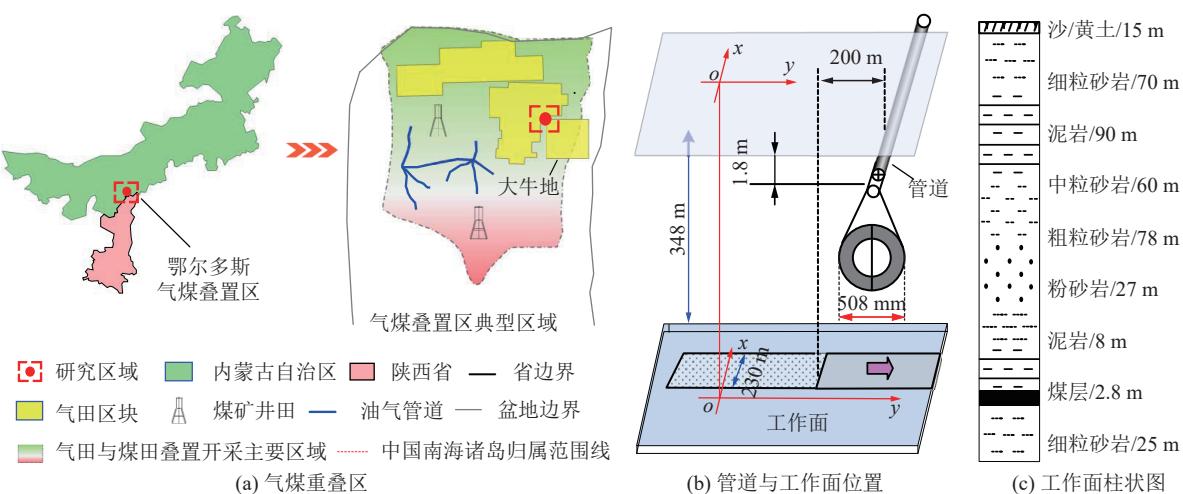


图1 鄂尔多斯盆地气田与煤矿重叠区示意

Fig.1 Schematic of gas field and coal mine overlapping area in Ordos Basin

2 埋地管道的安全判别

煤层采出后在工作面后方形成较大内部空间,

在应力重新分布过程中工作面的顶板向采空区方向移动,并在工作面上方依次形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带。当弯曲下沉带的高度波及至地表,便会

在地表形成连续移动的沉陷盆地^[16-17]。当管道从采煤沉陷区穿过时, 岩层沉降将会使管道底部失去支撑、顶部承载沙土重力, 此时管道的受力状态可看作单跨梁。由于长距离铺设的管道具有一定的柔性, 因此开采影响下管道的变形近似漏斗状。埋地管道属于弹塑性材料, 本身具有一定的强度, 可以允许产生自身强度范围内的变形(即弹性变形极限)。当管道变形超过其弹性变形极限时, 便会发生塑性破坏。参考《现役管道的不停输移动推荐作法》(SY-T 0330—2004)分析受力时, 将沉陷区的管道看作单跨梁, 通过式(1)计算管道的弹性极限变形量 A ^[18-19]。当变形量超过其极限值时, 即可认为管道发生塑性破坏, 反之为安全。

$$A = \frac{\sqrt{(3.2 \times 10^6 D)^2 + 21.36 \times 10^5 S^2}}{2 \times (5.34 \times 10^5)} \times \frac{\sqrt{(F_D S_{\text{MY}} S - S_E) - 3.2 \times 10^6 D}}{2 \times (5.34 \times 10^5)} \quad (1)$$

$$S_E = p D \mu / (2t) + E \tau (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中: A 为极限变形量, mm; D 为管道外径, mm; S 为沉陷区内管道长度, m; F_D 为设计系数, 取 0.9; S_{MY} 为管道最小屈服强度, MPa; S_E 为管道原有的轴向拉伸应力, MPa; p 为管道内压, MPa; μ 为泊松比, 0.35; t 为管道壁厚, mm; E 为管道的弹性模量, MPa; τ 为线性热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, 取 1.2×10^{-5} mm/(mm· $^{\circ}\text{C}$); T_1 和 T_2 分别为管道安装时和沉管时的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

变形前后管道长度明显增加, 因此目前还常采用拉伸应变对管道进行安全判别。拉伸应变极限是指在自身弹性范围内产生的最大拉伸变形。在该变形范围内管道强度指标不会发生明显改变, 管道是安全的。拉伸应变极限一般使用弹塑性结合的方法进行评价, 其中 DNV-OS-F101 规定管道的累积塑性拉伸应变超过 0.3% 需要进行工程临界评价; 累积塑性拉伸应变超过 2% 还需满足材料的附加要求。CSA-Z262 规定海底管道安装时的拉伸应变极限为 2.5%。ASCE 规定埋地管道对应地表的允许拉伸应变极限值为 2%。同时, DNV2000 建议管道屈服强度 ≥ 415 MPa 时失效拉伸应变为 18%。鉴于此, 综合考虑为确保油气管道的安全, 确定拉伸应变极限为 2%。若假设沉陷区内的管道长为 L , 变形后长为 l , 则拉伸应变 ε_t 可用式(3)描述。

$$\varepsilon_t = \frac{l - L}{L} \times 100\% \quad (3)$$

基于变形极限和拉伸应变极限均是对管道的整

体安全性进行判别, 同时也可以用于管道局部的失效判别, 但是现场应用具有一定的局限性。为了明确沉陷区内管道的具体失效区域和时序规律, 需要建立适用于局部失效破坏判别的新方法。

3 构建管道局部失效判据

3.1 体积应变理论分析

从管体上取一任意立体微元, 其相应的面与坐标轴平行, 微元的长、宽和厚依次为 dl 、 dw 、 dt 。变形后块体的轴向应变为 α 、横向应变为 β , 纵向应变为 γ 。变形固体满足连续性假设、均匀性假设和各向同性假设。微元的变形视为均匀变形, 变形后各边的长度依次为: $(1+\alpha)dl$ 、 $(1+\beta)dw$ 、 $(1+\gamma)dt$ 。在小应变条件下, 管道微元在剪切应变作用下引起的体积应变是高阶无穷小量, 可忽略不计。载荷作用下管道的体积变化由边长变化引起, 因此微元的体积应变 ε_v 由式(4)表示。

$$\varepsilon_v = \frac{(1+\alpha)dl(1+\beta)dw(1+\gamma)dt - dl dw dt}{dl dw dt} \quad (4)$$

将式(4)展开得到体积应变 ε_v 为:

$$\varepsilon_v = \alpha + \beta + \gamma + \alpha\beta + (\alpha + \beta)\gamma + \alpha\beta\gamma \quad (5)$$

埋地油气管道的力学性能较好, 且小变形情况下微元的轴向应变 α 、横向应变 β 、纵向应变 γ 的值均较小, 因此可忽略高阶微量, 体积应变应变 ε_v 可表示为:

$$\varepsilon_v = \alpha + \beta + \gamma \quad (6)$$

已知泊松比指材料在单向受拉或受压时, 横向正应变与轴向正应变的比值。管道微元拉伸时轴向伸长、横向和纵向收缩; 微元压缩时轴向收缩、横向和纵向膨胀。鉴于管道为均质材料, 泊松比均取值 ν 。结合泊松比计算公式, 微元受力时轴向应变为 α 和横向应变为 β 与 ν 的关系可分别由式(7)、式(8)描述。

$$\nu = \left| \frac{\alpha}{\gamma} \right| \Rightarrow \alpha = -\nu\gamma \quad (7)$$

$$\nu = \left| \frac{\beta}{\gamma} \right| \Rightarrow \beta = -\nu\gamma \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6), 可得:

$$\varepsilon_v = (1 - 2\nu)\gamma \quad (9)$$

埋地油气管道属于典型的弹塑性材料, 在载荷作用下依次经历弹性阶段、塑性阶段。在弹塑性变形过程中, 管道微元的轴向应变 α 、横向应变 β , 纵向应变 γ 均包括弹性应变和塑性应变。然而, 塑性变形

时体积不可压缩,因此微元的体积应变 ε_v 与弹性体积应变 ε_e 相等。此时微元的体积应变可用式(10)表示:

$$\varepsilon_v = (1 - 2\nu_e)\gamma \quad (10)$$

式中: ν_e 为弹性泊松比。

3.2 建立判据

根据式(9)可知,体积应变随着泊松比的增大而减小、随着应变的增大而增大。根据指标之间的函数关系,可确定具体值。此时,将管道泊松比和极限应变代入式(10)即可确定其体积应变极限。当管道单元的体积应变超过其极限值,认为其发生失效破坏。油气管道的泊松比取值在 0.25~0.35,为了确保管道安全泊松比取值 0.35。管道属于弹塑性材料,未发生塑性破坏前具有良好的延展性。在 2.1 节结合现行规范,确定拉伸应变极限为 2%。但是,管道的压缩应变极限受管径、壁厚和内压等因素影响,需要结合具体管道参数进行计算。CSA-Z262 规定管道局部产生屈曲时的压缩应变极限 ε_c 用式(11)表示。

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2D} + 3000 \left(\frac{p_i - p_e}{2tE_s} \right) - 0.0025 \quad (11)$$

式中: p_i 为管道最大的设计工作压力, MPa; p_e 为管道外部最小静水压力, MPa; E_s 为局部屈曲状态下管道的弹性模量, 取值 2.07×10^5 MPa。

当管道处于沉陷区时,其受力状态主要分为受压和受拉 2 种。同时,由于管道的力学性能导致其拉伸应变极限与压缩应变极限也不相同,因此在分析其安全性的过程中需要区别对待。计算不同受力状态下体积应变极限时,代入对应应变极限值即可。开采引起的地表沉降受埋深、煤层倾角、采高、回采工艺及岩层力学性质等因素影响,地表变形不可控性、差异性较大。考虑到理论结果的可靠性设计安全富余系数 k , 拉伸状态、压缩状态下的体积应变极限分别由式(12)、式(13)表示:

$$\varepsilon_{vt} = k\gamma_t(1 - 2\nu_e) \quad (12)$$

$$\varepsilon_{vc} = k(1 - 2\nu_e) \left[\frac{t}{2D} + 3000 \left(\frac{p_i - p_e}{2tE_s} \right) - 0.0025 \right] \quad (13)$$

式中: ε_{vt} 为拉伸状态下体积应变极限; ε_{vc} 为压缩状态下体积应变极限; γ_t 为拉伸状态下应变极限; k 取值为 0.7。

通过式(12)确定拉伸作用下油气管道体积应变极限为 0.42%; 压缩作用下的体积应变极限需要将管道的具体参数代入式(13)即可确定。

4 数值分析

4.1 数值模型的建立

以气煤叠置区典型矿井的工作面与管道空间重叠情况为例,结合柱状图采用 FLAC^{3D} 建立 1 000 m×830 m×375.8 m(长×宽×高)的数值模型。从煤层底板开始建模至地表; 煤层埋深 348 m、厚 2.8 m。管道长 830 m、埋深 1.8 m, 直径 508 mm、壁厚 7.1 mm。工作面宽 230 m、与管道轴向方向垂直。工作面与管道的水平距离为 200 m。考虑到边界效应的影响,工作面后方和前方依次留置 200 m 和 180 m 的煤层,两侧留置 300 m; x 轴和 y 轴方向的开采范围分别为 400~800、300~530 m, 如图 2a 所示。浅埋管道的失效大多由于局部过度弯曲或拉伸致使的,破坏位置难以判定。为了便于监测管道不同位置的物理量变化,沿 12 点钟顺时针依次划分为 8 部分,对应环向上 0°~45°、45°~90°、90°~135°、135°~180°、180°~225°、225°~270°、270°~315°、315°~360°,如图 2b 所示。

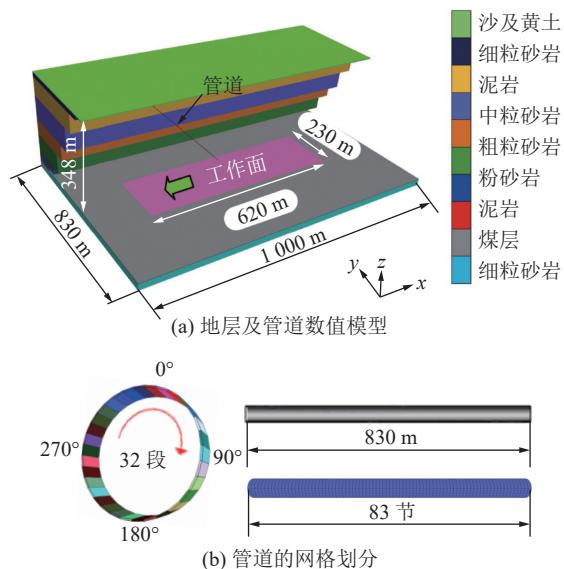


图 2 数值模型设计与建立

Fig.2 Design and establishment of numerical model

4.2 埋地管道及岩层参数

数值模型侧面设置水平位移约束、底部设置水平和垂直位移约束。不考虑岩层中断层、褶曲以及构造应力的影响,默认开挖前处于原岩应力状态。计算收敛准则满足不平衡力比达到 1×10^{-5} 的求解要求^[20]。煤岩体采用摩尔库伦模型,管道采用弹性模型,均采用实体单元建模。管道两端设置水平位移、垂直位移约束,煤岩体及管道的物理和力学参数见表 1、表 2。

表 1 地层的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of strata

地层	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
砂及黄土	0.31	0.11	3.6	19	0.25	1 570
细粒砂岩	0.5	0.13	5.5	21	0.55	2 240
泥岩	0.46	0.14	17	22	0.5	2 440
中粒砂岩	0.23	0.18	15	38	1.59	2 200
粗粒砂岩	0.57	0.15	3	43	0.26	2 500
粉砂岩	1	0.5	6	22	0.66	2 436
泥岩	0.46	0.14	17	22	0.5	2 440
2-2煤	0.18	0.1	1.2	39	0.25	1 300
细粒砂岩	0.57	0.15	3	43	0.26	2 500

表 2 管道的物理力学参数
Table 2 Physical and mechanical parameters of the pipeline

弹性模量/MPa	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	外径/mm	壁厚/mm	抗拉强度/MPa	泊松比/ μ
2×10^5	7 850	508	7.1	415	0.3

当工作面推进距离达到 1.2~1.4 倍采深, 地表下沉达到最大值。继续推进采空区尺寸和沉陷范围继续扩大, 但地表下沉量不再发生显著变化。为了使数值分析贴合实际、研究内容丰富, 设计工作面推进 400 m 时距离管道 200 m; 既能分析工作面推进 400~490 m 时的非充分采动影响, 又能分析推进 490~620 m 时充分/超充分采动影响。此外, 可采集工作面从靠近管道至到穿过等场景下的管道物理参数数据。已知煤层埋深 348 m, 工作面推进距离 490 m 达到充分采动, 继续推进依次达到充分、超充分采动; 工作面推进 400~600 m 是靠近过程、推进 600~620 m 是穿过过程。

5 数值结果及分析

5.1 管道及地表位移

设计采煤工作面推进距离为 620 m。当工作面推进 400 m 时与管道间的水平距离为 220 m。剩余的 220 m 每次推进 20 m(模拟工作面高强度回采, 即 2 天大约推进 20 m), 推进 11 次。当每次推进 40 m 时提取地表、管道的变形云图, 如图 3a、3b 所示。当工作面推进 400 m 时, 沉陷盆地影响范围已波及至管道。随着工作面的推进, 地表下沉盆地的影响范围不断扩大, 管道及地表的位移逐渐增大, 且管道的位移总小于覆岩、二者间差值逐渐增大; 表明在工作面推进过程中管道与围岩产生了离层, 且工作面距管道越近非协同变形程度越大。

当管道-工作面间距为-20 m 时, 管道与自身覆

盖表土的位移依次为 0.86 m 和 1.2 m, 地表最大位移为 1.65 m。对比图 3a、3b 发现推进距离相同情况下, 管道和覆岩的最大位移并不相同。如图 3c 所示, 随着工作面推进, 管道与表土的位移差距逐渐扩大, 二者表现为非协同变形, 且工作面距管道越近二者间的非协同变形程度越大。原因: 管道为钢材质, 属于典型的弹塑性体。管道自身可产生一定的弯曲变形, 自然状态下弯曲变形可视为无载荷条件的简支梁挠曲。采煤影响下沉陷区内的管道存在移动的条件和空间, 而沉陷区边缘的管道在表土和管-土摩擦力的共同作用下不易移动, 且沉陷区内的管道长度有限, 因此其产生的挠曲也有限。当管道弯曲变形超出自由变形的极限后, 自身的抗拉刚度便会阻碍或限制其产生进一步的弯曲变形。随着工作面的推进, 表土和管道的变形越大, 其自身抗拉刚度的阻碍作用越强, 致使管-土的变形差值越来越大, 直至管道发生塑性弯曲或破断失效。

充分采动下工作面走向与倾向的沉降曲线如图 4 所示。不难发现, 随着工作面的推进地表走向和倾向的下沉逐渐增大。充分采动后走向下沉达到最大值 1.61 m; 工作面继续推进下沉不在发生显著变化, 下沉曲线呈现平底状。工作面倾向上采宽为 230 m, 未达到理论条件下的充分采动, 因此其下沉曲线呈现漏斗状。与数值结果对比可知, 模拟中地表最大下沉为 1.65 m, 与现场最大下沉 1.61 m 近似一致, 表明数值分析结果可较为可靠地反映表土的运移特征。因此, 地表沉降引起的管道变形也是合

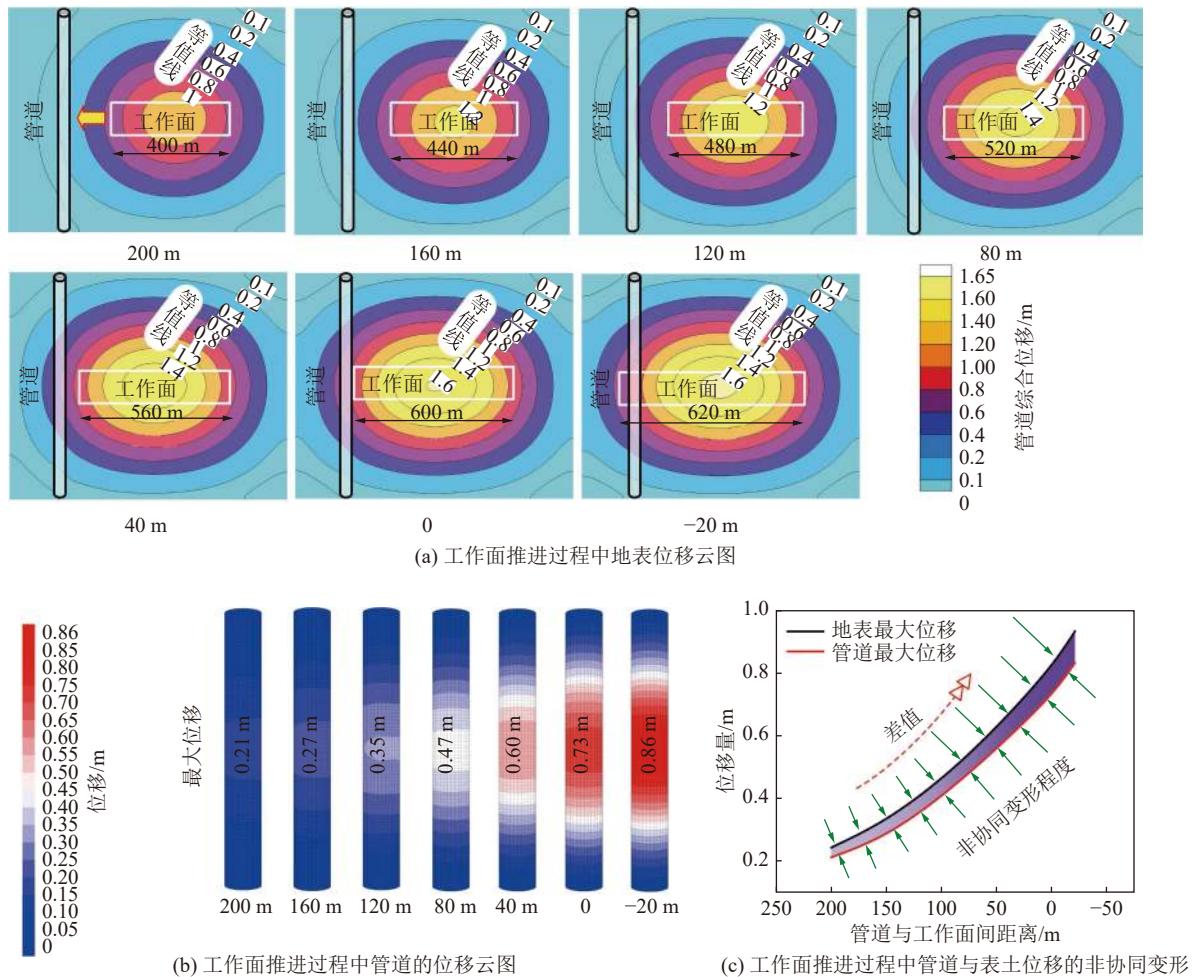


图3 工作面推进过程中地表及管道的位移云图

Fig.3 Displacement cloud diagram of surface and pipeline during advancing of panel

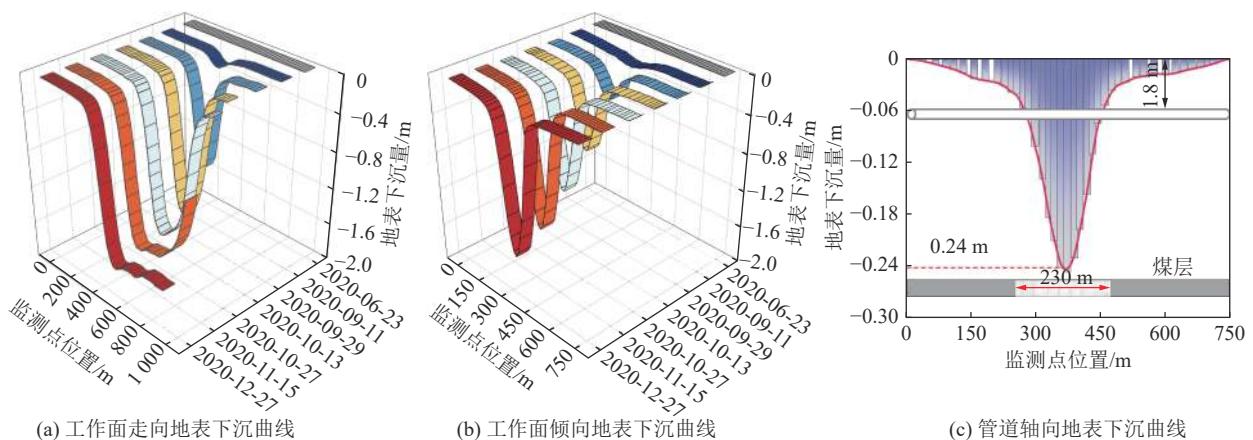


图4 采煤影响下地表下沉曲线

Fig.4 Surface subsidence curve under coal mining influence

理的。在工作面距离其 200 m 时, 管道对应表土的沉降值约为 0.22 m (图 3a), 现场观测管道轴向对应的地表最大下沉为 0.24 m (图 4c)。对比发现, 现场监测与数值结果近似一致, 也再次证明了数值结果的可靠性。因此, 基于同一数值模型和地质条件分析得到的管道与地表的变形结果也是合理的, 使得

据此展开的后续分析具有可靠的研究基础。

5.2 管道的变形特征

结合管道网格的划分方式, 依次提取环向上的 1—8 区域中间 22.5° 、 67.5° 、 112.5° 、 157.5° 、 202.5° 、 247.5° 、 292.5° 、 337.5° 等位置的变形数据, 绘制工作面距管道 200 m、160 m、120 m、80 m、40 m、0、

-20 m 条件下管道的变形曲线, 具体如图 5 所示。不同推进距离条件下, 环向位置的变形状态均呈漏斗状。整体分析发现, 随着工作面距离管道越近, 管道的变形量越大, 且最大变形总集中在沉陷中心。这由于工作面推进过程中管道的围岩受采煤影响的程度逐渐增大, 因此自身的运移幅度也随之增大。然

而, 由于管道阻碍了围岩的移动将会承载围岩移动方向施加的载荷进而向采空区方向不断移动。随着作用在管道上的载荷范围越大, 管道的变形量也就随之增加。在此过程中管道的变形量逐渐向自身的强度极限逼近, 因此管道产生失效破坏的风险也就随之增高。

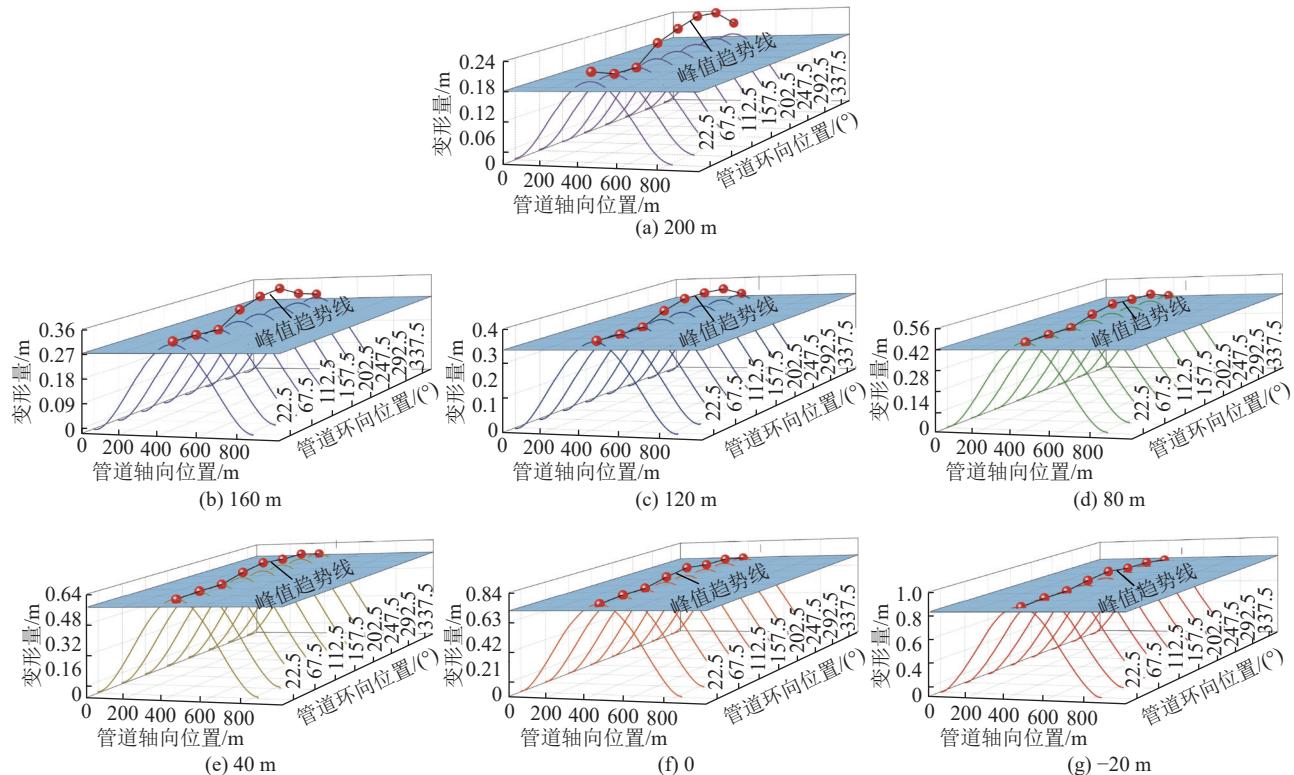


图 5 工作面推进过程中管道环向位置的变形曲线

Fig.5 Deformation curve of pipeline circumferential position in process of panel advancing

依次提取图 5a—5g 中管道轴向最大变形截面位置的峰值数据, 可得到环向的峰值发育曲线。随着工作面距离管道越近, 环向峰值发育曲线的起伏程度越小, 而起伏程度则反映了管道最大变形处截面的椭圆度, 由此认为管道的椭圆度随着管道与工作面间距离的缩小而减小。依次计算图 5 的管道椭圆度, 二者的呈现指数函数关系可用式(14)描述。这与图 3c 反映的现象一致, 与管道物理力学属性有关。

$$y = 4.24 \times 10^{-4} \exp(x/116.58) + 0.0036 \quad (14)$$

式中: y 为椭圆度; x 为管道与工作面的间距, m。

参考石油天然气管线 9711.1、9711.2 等国标的规定: 油气管道的椭圆度极限取值为 2%。通过图 6 的数据计算得到管道的最大椭圆度为 0.6% (图 5a), 据此判定管道处于安全状态。随着管道变形量越大越接近强度极限, 在原有基础上产生的变形增量越

小。针对椭圆度而言, 弹塑性材料在初始变形时处于弹性范围内, 环向受力不均容易引起较大的位移波动。但随着变形的增大管体逐渐接近于塑性, 弹性变形空间被逐渐压缩。此时为了达到受力平衡不均匀变形(椭圆度)就越小。

5.3 管道轴向破坏方位分析

通过变形可以描述管道的破坏位置, 而体积的改变则反映了物体三个维度上的变形, 因此体积变化量可以更加准确地描述单元的破坏。为了明确工作面推进过程中管道的轴向上的破坏方位, 引入了体积应变。体积应变 δ (Volumetric strain, 简称 VS) 描述物体单位体积的改变量。当体积 V 增大或者缩小 ΔV 时, 体积应变用 $\delta = \Delta V/V$ 表示。结合 508 管道的物理力学参数, 通过式(12)和式(13)确定管道拉伸状态、压缩状态下体积应变极限分别为 0.42%、-0.31%。结合数值结果, 利用 FLSH 依次计算工作面推进后管道单元的体积应变。为了方便展示将圆

管的体积应变进行展开和分级,其中 $270^\circ\rightarrow90^\circ$ 为管

道底部、 $90^\circ\rightarrow270^\circ$ 为顶部,如图6所示。

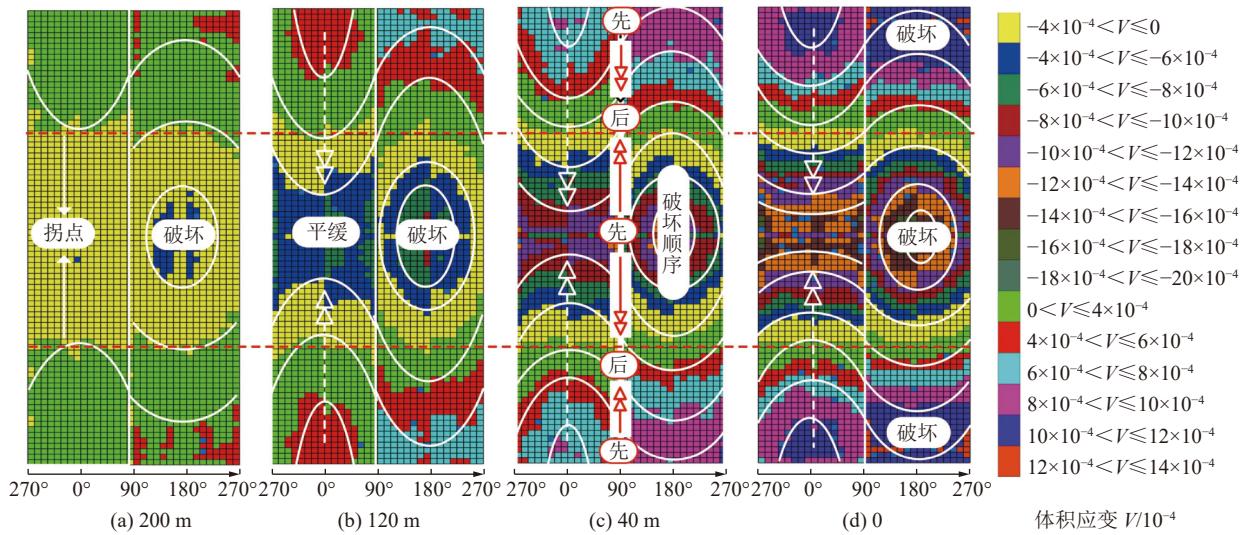


图6 工作面推进过程中管道的体积应变分布特征

Fig.6 Distribution characteristics of volume strain of pipeline during panel advancing

拉伸状态下管道单元体积增大,体积应变大于0;压缩状态下管道单元体积减小,体积应变小于0。由图6可知,无论工作面距离管道远近,体积应变绝对值最大位区域总处于管道顶部中心;最小绝对值处管道单元的体积应变很小约等于0(图6中黄色-绿色连接位置)。已知管道拐点处受力平衡,因此可以确定体积应变为0区域为拐点。以 $V=0$ 为界限将体积应变区分看待,拐点之间的体积应变总小于零(受压缩作用)、拐点至端部的体积应变总大于零(受拉伸作用),最大值和最小值处于管道底部的端头和中心,工作面与管道间的距离对该规律无影响。整体对比发现,管道体积应变关于管道中心位置左右对称;但是底部和顶部的体积应变分布并不对称,且同一轴向位置处顶部的体积应变绝对值总大于底部,整体分布呈现“S”形。

数值模型中管道单元的力学性质相同。同一开采条件下单元体积应变越大,越易产生塑性破坏。已知管道单元拉伸状态、压缩状态下体积应变极限依次为0.42%、-0.31%,超过其极限便认为其发生失效。据此确定管道轴向上最易破坏位置处于管道顶部的两端和中心,中心位置产生压缩破坏、两端则产生拉伸破坏。从管道失效的时序角度出发,管道单元与极限值越接近失效越早。通过对分析图6a—6d,发现压缩状态下体积应变值(绝对值)总大于拉伸状态,且压缩状态下的体积应变极限(绝对值)小于拉伸状态,据此判断最先失效位置为沉陷中心,其次为沉陷区边缘;且同一轴向位置处管道顶部失效

早于底部。因此,同一工况下管道失效规律:首先,管道中心至拐点从先到后依次产生破坏;其次,管道端部至拐点从先到后依次破坏;与此同时管道顶部失效要早于底部。管道顶部失效轮廓呈现外凸椭圆“n”,底部则呈现内凹的椭圆“U”,且越接近管道中心则破坏轮廓越平缓。

参考《现役管道的不停输移动推荐作法》(SY-T 0330—2004)采用公式(1)计算得该工况下管道的极限变形量为3.2 m。由图3c可知,管-面间距为0时管道的最大位移为0.73 m,对应体积应变为图6d,且均未达到自身极限。从整体(理论分析)和局部(数值分析)角度出发分别验证了管道是安全的,二者结论的一致性也表明了数值结果的合理性和可靠性。

5.4 管道环向破坏方位分析

已知管道轴向底部的中心和两端,为确定环向上的具体破坏位置,将图5中的峰值数据绘制成方位图,如图7所示。工作面推进200 m时沉陷区影响范围波及至管道埋设岩层,盆地边缘的岩层主要以水平移动为主,因此图7a中工作面距管道200 m时,环向上的变形主要集中在左侧。随着工作面的推进围岩的移动方向逐渐向竖直方向发展,致使管道环向上的最大变形向底部转移,即最大变形由 270° 向 190° 偏转。在此过程中,环向上最小变形位置也由 $90^\circ\sim120^\circ$ 向 $0^\circ\sim30^\circ$ 偏转。对比发现,环向的极值变形位置不受工作面推进距离的影响,最大值集中于环向上的 $330^\circ\sim150^\circ$ 、最小值集中在 $0^\circ\sim120^\circ$ 。力与变形呈正比,由此认为工作面向管道方向

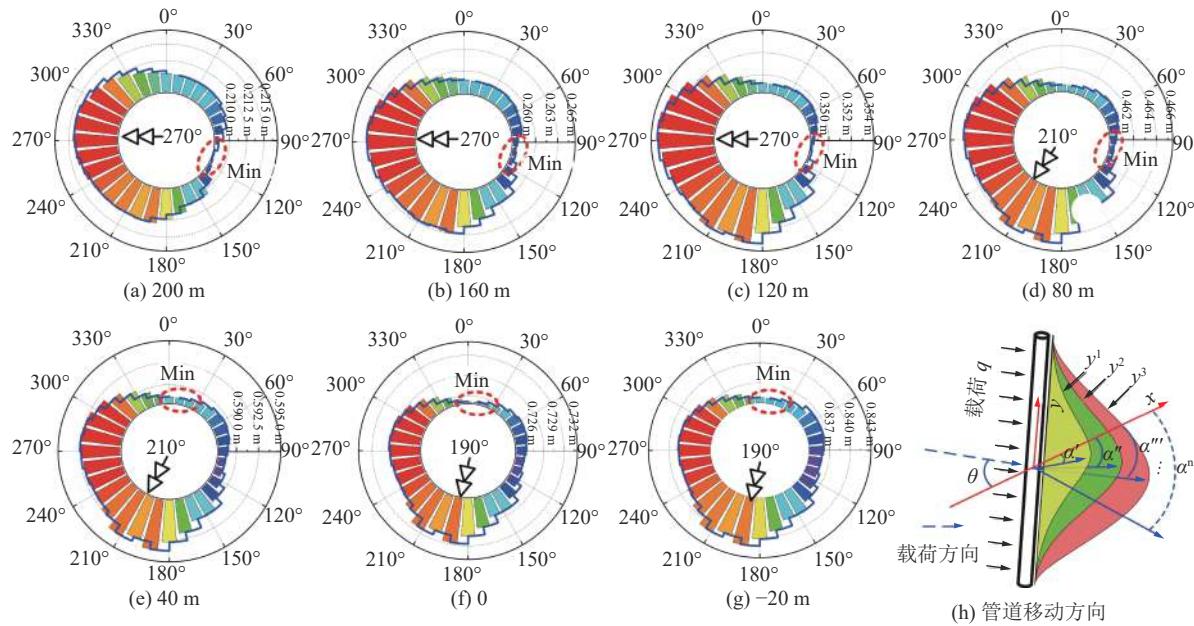


图 7 工作面推进过程中管道环向上的极值位移偏移方向

Fig. 7 Extreme deviation direction of pipeline ring upward displacement in advancing process of the panel

的推进过程中受力主要分布环向 $330^\circ \sim 150^\circ$ 。结合第 2 章节分析可知, 管道变形量越大越易产生破坏, 据此确定环向上 $330^\circ \sim 150^\circ$ 区间是管道最易发生破坏的位置, 应重点关注。

随着采煤工作面的不断推进, 管道周围的岩层逐渐由沉陷区边缘演变为沉陷中心, 岩层的移动方向也由原来的水平方向逐渐向竖直方向发展。在此过程中, 管道由于阻碍了岩层的移动将会承载岩层移动方向施加的载荷, 因此岩层移动方向的改变将导致管道的受力方向发生改变, 即载荷 q 的方向与水平面的夹角 θ 逐渐变化。与此同时, 岩层移动范围的扩大将会导致管道承载的载荷 q 不断增加, 受影响的程度逐渐扩大。因此, 管道产生的变形量也会随之增大、且管道变形曲线围成的曲面与水平面之间的夹角 α 也会不断增加, 具体如图 7h 所示。由于管道自身具有一定抵抗变形的能力, 因此在围岩运移的影响下管道的移动方向与围岩的移动方向并不会完全相同且存在一定的偏差, 这也是管道在环向上极值位置处的演化顺序连续性不强的原因。

由 5.4 节明确了管道轴向的破坏时序规律, 而分析环向的破坏方位, 能够进一步准确掌握采煤影响下管体失效的准确位置, 有利于对沉陷区内的集输管道进行精准的局部维护, 可有效提高诊断效率和维护效果, 以有效避免气煤同时开采引起的泄漏爆炸等事故, 进而促进鄂尔多斯盆地油-气-煤等资源的协调开采。同时, 也为设计出具有穿越采空区、塌陷

坑等能力的高性能管道提供了理论基础, 有利于管道的性能优化和参数改良。

5.5 讨论

综合上述分析, 认为沉陷区管道最易发生破坏的位置: 轴向上的底部中心和底部两端、环向上的 $330^\circ \sim 150^\circ$; 其中同一工况下管道中心的破坏早于两端。为了验证以上分析结果的正确性, 提取工作面推进过程中管道的剪力分布云图, 如图 8a—8g 所示。随着工作面-管道的间距减小, 距拐点越远剪应力越大; 而力与变形成正比, 距拐点越远变形也越大, 据此认为管道轴向上易破坏位置处于中心和端部。工作面推进 $400 \sim 600$ m 时, 最大剪应力集中在管道中心和端部; 而在推进 $600 \sim 620$ m 时管道中心区域将应力转化为应变, 这也是图 8f、图 8g 中心位置的剪应力小于两侧的原因。试验表明对管道施加均匀载荷后管道的变形如图 8h 所示。整体分析可知, 剪应力集中在管道的中心和端部, 且中心位置的剪应力大于端部。这是沉陷区管道易发生破坏的区域, 再次证明了研究结果的准确性。

数值模型严格结合柱状图建立, 管道参数根据现场的管道力学性质进行赋值。模拟充分采动后的地表下沉为 1.65 m, 与现场监测值 1.61 m 大致相同。由于数值模拟是计算达到稳态后的结果, 而实际监测中地表运动存在残余沉降, 因此数值解大于监测值是合理的。同时, 参考现行规范分别从变形量极限和椭圆度极限与数值结果进行对比, 均表明管道未发生破坏, 这也验证了有关体积应变极限的理论

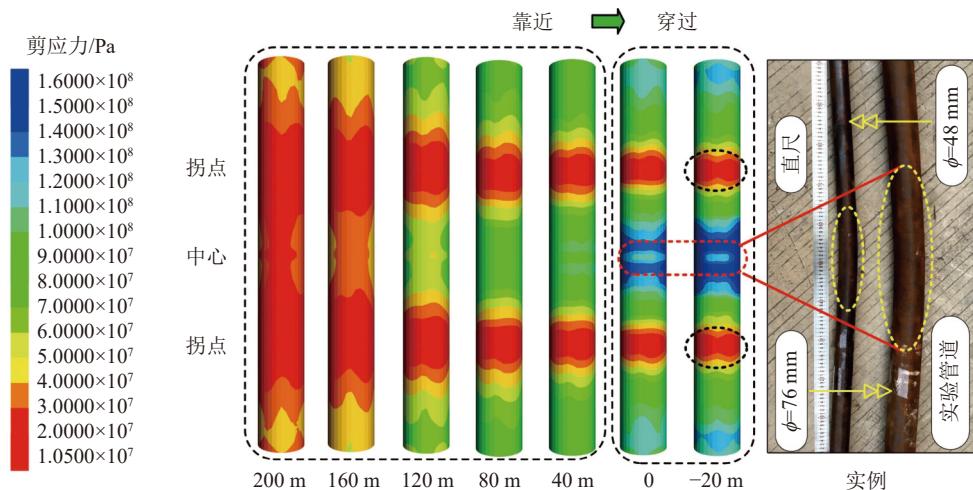


图8 工作面推进过程中管道剪应力分布特征

Fig.8 Distribution characteristics of pipeline shear stress during advancing of panel

推导、以及数值结果的准确性和可靠性。此外,周敏等^[21]、李豪杰等^[22]通过分析地面沉陷作用下管道变形特征,认为管道竖向位移符合高斯曲线,且存在管-土分离现象,表明管道与覆岩间为非协同变形,也验证了5.1节结果的准确性。王坤园^[23]、任建东等^[24]通过数值分析认为整个开采过程中管道的最大下沉点位于采空区中心,变形成漏斗状后下沉随开采的推进逐渐增大,与5.1和5.2节中模拟结果一致。郑大海等^[4]通过数值分析发现管道的变形量在塌陷区的中间和边缘达到最大值,与5.3节模拟结果一致。上述学者通过理论分析和数值模拟等方法得到结果与本文一致,也证明笔者在前人基础上进一步分析得到的结果是合理可靠的。

6 结 论

1)通过理论分析推导了材料体积应变的计算方法;结合采煤沉陷区内埋地管道的受力特征,分别建立了管道拉伸状态和压缩状态下的体积应变极限理论公式,构建了管道局部失效破坏判别的新方法。基于油气管道的材料属性,明确了拉伸状态下体积应变极限为0.42%,压缩状态下的体积应变极限需要结合管道的具体物理力学参数求解。

2)当管道处于沉陷区时,拐点之间的管道体积应变小于零(发生压缩)、拐点至端部的体积应变大于零(发生拉伸),且体积应变的最大值、最小值分别处于沉陷区中心和两端。同一工况下管道失效规律:首先,管道中心至两侧拐点从先到后依次产生破坏;其次,管道端部至拐点从先到后依次破坏;与此同时顶部失效要早于底部。管道顶部破坏轮廓呈现外凸的椭圆“ \cup ”,底部的破坏轮廓大致呈现内凹的椭圆

“ \cup ”,管道体积应变关于管道中心左右对称,同一轴向位置上的破坏轮廓呈现“ S ”。

3)在采煤工作面的推进过程中,管道在环向上的最大变形(破坏)位置由 270° 向 180° 方位偏转,最小变形位置由 120° 向 0° 方位偏转,且管道中心位置的椭圆度逐渐减小。管道中心环向上的极值变形位置不受工作面推进距离的影响,最大变形总集中在 $330^\circ \sim 150^\circ$,且该区域是管道最易发生破坏的位置;安全区域集中在 $0^\circ \sim 120^\circ$ 。

4)采煤工作面向管道靠近过程中,管道轴线方向上的变形曲线均呈现漏斗状,该规律不受管道-工作面间距的影响。同时,管道的变形曲线管道的椭圆度随着管道与工作面间距离的缩小而逐渐减小,且二者间数学关系可用指数函数表达。

5)以鄂尔多斯气煤重叠区高强度回采工作面为例,随着采煤工作面的推进,管道与对应地表的位移均逐渐增大,且管道对自身上覆岩层的移动没有显著的影响。工作面推进过程中管道与覆岩的变形为非协同变形,且随着工作面距离管道越近,管道-土体间的非协同变形程度越大。

参考文献(References):

- [1] 袁亮.煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策[J].煤炭学报,2019,44(1):1-9.
YUAN Liang. Scientific problems and countermeasures for precise mining of coal and associated resource[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 1-9.
- [2] 孙海涛,舒龙勇,姜在炳,等.煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势[J].煤炭科学技术,2022,50(12):1-13.
SUN Haitao, SHU Longyong, JIANG Zaibing, et al. Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas[J]. Coal Science and Technology, 2022,

- 50(12): 1–13.
- [3] 袁亮, 张通, 赵毅鑫, 等. 煤与共伴生资源精准协调开采: 以鄂尔多斯盆地煤与伴生特种稀有金属精准协调开采为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 449–459.
- YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHAO Yixin, et al. Precise coordinated mining of coal and associated resources: A case of environmental coordinated mining of coal and associated rare metal in Ordos basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 449–459.
- [4] 郑大海, 毛建, 赵冬野, 等. 地下采矿对埋地输气管道变形的影响分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 313–316.
- ZHENG Dahai, MAO Jian, ZHAO Dongye, et al. Analysis of the influence of underground mining on the deformation of buried gas pipeline[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2016, 35(3): 313–316.
- [5] 王现中, 王仁超. 复杂山区煤矿采空区油气管道稳定性监测与数值分析[J]. 山地学报, 2022, 40(3): 411–420.
- WANG Xianzhong, WANG Renchao. In-situ monitoring and numerical analysis of oil and gas pipelines in coal seam goaf located in mountainous terrain[J]. Journal of Mountain, 2022, 40(3): 411–420.
- [6] 吴韶艳, 文宝萍. 采空区埋地油气管道变形数值模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(4): 87–91.
- WU Shaoyan, WEN Baoping. Numerical simulation analysis of deformation of oil and gas pipeline buried in goaf[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 87–91.
- [7] 任建东, 王文, 董森, 等. 开采沉陷区埋地管道变形及力学特征分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 82–89.
- REN Jiandong, WANG Wen, DONG Miao, et al. Analysis of deformation and mechanical characteristics of buried pipeline in mining subsidence area[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 82–89.
- [8] 赵江平, 刘士洋. 煤矿采空区管道的破坏机理及影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(9): 127–128.
- ZHAO Jiangping, LIU Shiyang. Study on the failure mechanism and influencing factors of pipelines in coal mine hollow area[J]. Coal Technology, 2017, 36(9): 127–128.
- [9] 王小龙, 姚安林. 埋地钢管局部悬空的挠度和内力分析[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 218–222.
- WANG Xiaolong, YAO Anlin. Deflection and internal force analysis of buried steel pipelines in partial hanging[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 218–222.
- [10] 王文, 任建东, 董森, 等. 采动影响下天然气管道变形演化模拟试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 777–787.
- WANG Wen, REN Jiandong, DONG Miao, et al. A simulation experimental study on deformation evolution of natural gas pipeline under mining influences[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(4): 777–787.
- [11] 徐平. 采动沉陷影响下埋地管道与土相互作用及力学响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- XU Ping. Study on the buried pipeline-soil interaction and its mechanical response by mining subsidence[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [12] 王坚. 采煤沉陷区埋地管道与土体协同变形研究及安全评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- WANG Jian. Research on cooperative deformation of the buried pipeline and soil in coal mining subsidence area and safety evaluation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [13] 王文, 任建东, 王付斌. 鄂尔多斯盆地“煤气走廊”开采模式研究[J]. 金属矿山, 2019(10): 23–31.
- WANG Wen, REN Jiandong, WANG Fubin. Study on the mining mode of “gas corridor” in Erdos basin[J]. Metal Mine, 2019(10): 23–31.
- [14] 王文, 任建东, 李小军, 等. 开采沉陷区天然气井避让距离控制预测方法研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 943–954.
- WANG Wen, REN Jiandong, LI Xiaojun, et al. Research on the prediction method of natural gas well avoidance distance control in mining sinkhole area[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(5): 943–954.
- [15] 李全生, 李晓斌, 许家林, 等. 岩层采动裂隙演化规律与生态治理技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 28–47.
- LI Quansheng, LI Xiaobin, XU Jialin, et al. Research progress on evolution law of mining-induced fissures in rock strata and ecological control technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 28–47.
- [16] 任建东, 赵毅鑫, 王文, 等. 采煤沉陷区油气管道泄漏风险量化分区研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3353–3368.
- REN Jiandong, ZHAO Yixin, WANG Wen, et al. Investigation on quantification partition of oil-gas pipeline leakage risk in coal mining subsidence basin[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3353–3368.
- [17] 刘辉, 左建宇, 苏丽娟, 等. 巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 49–56.
- LIU Hui, ZUO Jianyu, SU Lijuan, et al. Study on surface movement and deformation law of mining under thick water-bearing loose layer[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 49–56.
- [18] 中国石油天然气集团公司工程技术研究院. 现役管道的不停输移动推荐作法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- Research Institute of Engineering Technology, China national petroleum corporation. Recommend practice for movement of in-service pipelines[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [19] REN Jiandong, ZHAO Yixin, WANG Wen, et al. Optimal design of a protective coal pillar with a buried pipeline in a thick loose layer in western China: methodology and case study[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(4): 2879–2896.
- [20] 任建东, 李晓白, 王文. 水平交叉巷道间夹角合理化取值数值模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 1–9.
- REN Jiandong, LI Xiaobai, WANG Wen. Numerical simulation of rationalization of the angle between horizontal crossing roadways[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 40(3): 1–9.

- [21] 周敏,杜延军,王非,等.地层沉陷过程中埋地高密度聚乙烯(HDPE)管道力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(S2): 4177–4187.
ZHOU Min, DU Yanjun, WANG Fei, *et al.* Study on mechanical behavior of buried high density polyethylene (HDPE) pipes during ground subsidence[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S2): 4177–4187.
- [22] 李豪杰,朱鸿鹄,朱宝,等.基于光纤监测的埋地管线沉降模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2): 3645–3654.
LI Haojie, ZHU Honghu, ZHU Bao, *et al.* Model test of buried pipeline settlement based on optical fiber monitoring[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3645–3654.
- [23] 王坤园.煤矿长壁开采条件下埋地管道的变形破坏规律研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
WANG Kunyuan. Research on deformation and failure of buried pipelines under longwall mining conditions[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017.
- [24] 任建东,赵毅鑫,孙中博等.气煤叠置区埋地管道的保护煤柱优化设计及多参量演化规律研究[J].岩土力学,2023,44(9): 2679–2695.
REN Jiandong, ZHAO Yixin, SUN Zhongbo, *et al.* Protective coal pillar optimization and multi-parameter evolution characteristics of buried pipeline in gas-coal superposition area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(9): 2679–2695.