

文章编号:1000-8241(2013)08-0779-06

# 输气管道一级地区采用0.8设计系数的可行性

吴宏<sup>1</sup> 张对红<sup>1</sup> 罗金恒<sup>2</sup> 谌贵宇<sup>3</sup> 郭志梅<sup>1</sup>

1. 中国石油管道建设项目经理部,北京 100101; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院,陕西西安 710065;  
3. 中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,四川成都 610041

**摘要:**介绍了国外输气管道一级地区设计系数应用现状。分析了提高设计系数对天然气管道可靠性的影响,结果表明:尽管提高设计系数会导致管道失效概率和运行风险的提高,但仍在可接受的范围内。统计了西气东输二线用 X80 钢管性能情况,表明我国管材质量已经达到国际先进水平,为一级地区提高管道设计系数提供了前提条件,并据此提出了 0.8 设计系数管材关键性能指标及质量控制要求。通过进一步提升钢管性能和配套技术研究,对处于一级地区的部分天然气管道提高设计系数,依托西气东输三线工程,加快开展试验段的建设及 GB50251—2003《输气管道工程设计规范》的修订工作,为今后长输大口径天然气管道建设 0.8 设计系数的工程化应用奠定基础。(表 3,图 4,参 19)

**关键词:**输气管道;设计系数;失效概率;风险;完整性

中图分类号:TE973

文献标识码:A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.08.001

## Feasibility study on the design coefficient of 0.8 for gas pipeline in Class I areas

Wu Hong<sup>1</sup>, Zhang Duihong<sup>1</sup>, Luo Jinheng<sup>2</sup>, Chen Guiyu<sup>3</sup>, Guo Zhimei<sup>1</sup>

1. CNPC Pipeline Construction Administration Department, Beijing, 100101; 2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an, Shaanxi, 710065; 3. China Petroleum Engineering Company Limited Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041

**Abstract:** The paper reviews the application of gas pipeline design coefficient in the Class I areas abroad, and analyzes the impacts of design coefficient on the pipeline reliability. The results show that improving the design coefficient may increase pipeline failure probability and operational risks, which still could be accepted yet. In view of the specifications of X80 steel pipe used in the 2nd West-to-East Gas Pipeline Project, the pipeline quality in China has been proved to be advanced in the world, which is the prerequisite of improving pipeline design coefficient in the Class I areas. The paper hereby presents some key performance indexes and requirements of quality control for a pipeline with design coefficient of 0.8. It is considered that by means of further improving the steel pipe performance and researching the relative supporting technology, increasing the design coefficient for the gas pipelines located in the Class I areas is necessary, and meanwhile, based on the 3rd West-to-East Gas Pipeline Project, speeding up the construction of pipeline test sections and revising the GB50251, a gas pipeline engineering design specification, can lay a foundation for the engineering application of design coefficient of 0.8 to long-distance gas pipelines with large diameters.(3 Tables, 4 Figures, 19 References)

**Key words:** gas pipeline, design coefficient, failure probability, risk, pipeline integrity

随着国民经济和能源战略储备的发展,天然气的需求与日俱增,在保证输量和管道安全可靠的前提下,最大限度地提高管道输送效率、降低管道建设成本,是管道建设投资者和运营企业关注的热点问题。目前,发达国家一般通过提高管道设计系数解决该问题<sup>[1-4]</sup>。所谓提高设计系数,主要是将一类地区的设计系数提高到 0.72 以上。在管道材质和管径一定的情况下,提

高设计系数可以在管道壁厚不变的条件下提高输气压力,从而增加输量,提高输送效益;也可以在输气量一定的条件下,减小管材壁厚,从而节约管材用钢量,减少工程投资。加拿大和美国分别于 20 世纪 70 年代和 90 年代,将一级地区的设计系数提高到 0.8,并且在 Alliance 管道、Rockies Express 管道等工程设计中采用,而我国一级地区管道的设计系数一直为 0.72<sup>[5]</sup>。

随着西气东输一线和二线的成功建设,国内管线钢的冶金和制管技术水平得到了很大提高<sup>[6-9]</sup>,管线钢的实物质量和产品标准已经达到国际先进水平,管道施工和完整性管理技术也取得了长足进步,设计系数采用较低的0.72不仅不能充分发挥管材的效能,而且造成了不必要的资源浪费,因此提高管道设计系数具有重要的现实意义。

## 1 国内外输气管道设计系数应用情况

对于输气管道设计系数的选用,目前国际上尚无统一规定。一级地区管道设计系数,美国 ASME B31.8<sup>[10]</sup>和加拿大 CSA Z662<sup>[11]</sup>规定为0.8,ISO 13623规定为0.83,英国 IGE/TD/1规定为0.73,我国 GB 50251<sup>[5]</sup>和澳大利亚 AS 2885.1<sup>[12]</sup>规定为0.72。

针对提高天然气管道设计系数的应用,早在上世纪五六十年代,北美地区就开始在部分天然气管道采用0.72以上的设计系数,其中主要代表国家为美国和加拿大。迄今为止,美国和加拿大采用0.72以上设计系数运行的输气管道长达数万公里,采用0.8设计系数及以上运行的输气管道超过8 000 km。这些管道并未发生严重的管道安全事故,根据美国机械工程师协会对美国7家天然气公司0.72以上和以下设计系数运行输气管道的失效事故率统计结果,管道设计系数与事故率无直接关系,管理水平的提高是管道事故率降低的根本原因。有关加拿大管道设计系数与管道事故率的关系,目前未见详细的调查和报道资料,但从20世纪70年代采用较高设计系数至今,提高设计系数对管道安全和事故率没有造成明显影响<sup>[12]</sup>。

## 2 提高设计系数对管道可靠性的影响

(1)在输送压力和管径不变的情况下,采用较高设计系数意味着钢管的壁厚减薄,在一定程度上降低了管道缺陷的临界缺陷尺寸,即减少了管道的安全裕量。

(2)设计系数提高,壁厚降低,管道对刺穿的抗力减小。TransCanada 曾对操作压力、设计系数、屈服强度和管径不同的管道的刺穿抗力进行研究对比,结果表明:在相同操作压力、同等钢级与相同外径的情况下,设计系数越高的管道刺穿抗力越低,这是因为,当管道操作压力和外径不变时,设计系数的提高减小了

管道壁厚,故导致管道刺穿抗力降低。以西一线和西二线为例,设计系数由0.72提高至0.8,刺穿抗力分别从602 kN和838 kN降至529 kN和738 kN。美国业界对刺穿抗力的要求值为350 kN<sup>[13]</sup>,我国目前在这方面的研究较少,也没有相关的规定。

(3)提高设计系数,管道应力水平提高,裂纹扩展的驱动力增大,对天然气管道断裂控制提出更高的要求,对于母材,一般提出满足止裂的韧性要求,对于焊接区(包括焊缝和热影响区)韧性要求一般按照防止起裂的韧性计算。

(4)理论上,提高设计系数,管道应力提高,一定程度上增加了应力腐蚀开裂的敏感性。加拿大曾经有20余条管道发生过近中性土壤应力腐蚀开裂失效,发生应力腐蚀开裂的管道应力介于0.46~0.77 SMYS。研究认为,管道应力腐蚀开裂门槛值在0.72 SMYS以下,由此可见,管道应力腐蚀开裂对0.72 SMYS和0.8 SMYS同样敏感。正因如此,加拿大能源管理局(NEB)20世纪90年代末通过对管道应力腐蚀开裂进行调查,认为降低管道压力无法有效减少应力腐蚀开裂事故的发生,而最有效的方法是管道公司实施具体的应力腐蚀开裂管理程序。

(5)提高设计系数,管道壁厚减薄,临界缺陷尺寸减小,刺穿抗力降低,管道失效概率和运行风险会有一定程度的增加,但通过实施基于风险的完整性管理程序,管道失效概率和风险完全可以控制在可接受的范围内。

尽管提高管道设计系数对管道的安全可靠有一定影响,但从美国和加拿大两国大量管道应用状况以及管道事故率的调查分析结果来看,提高管道设计系数并没有造成管道事故率和风险的明显增加。设计系数不是管道失效概率的控制因素,管道失效概率受其他多种因素影响。

## 3 国内钢管质量水平分析

钢管质量水平是决定能否提高管道强度设计系数的核心因素,而我国早期钢管制造受技术水平限制,在进行管道强度设计时通常采用较低的设计系数以降低风险。经过几十年的发展,随着陕京天然气管道、西气东输一线、西气东输二线等重大工程的成功建设,我国管线钢的冶金技术、制管技术、管道施工技术以及质量

控制水平有了长足进步。

对西气东输二线约  $280 \times 10^4$  t X80 管材的力学性能进行统计分析, 结果表明:

(1) X80 螺旋钢管屈服强度样本均值为 604 MPa, 为 API 标准规定最低要求值(555 MPa)的 1.09 倍, 9 351 个样本中仅有 0.5% 小于  $SMYS_{X80}$  (X80 钢管的规定最小屈服强度), 95% 的样本在 1.01 倍  $SMYS_{X80}$  及以上(图 1)。X80 直缝焊管屈服强度样本均值为 628 MPa, 为规定最低要求值的 1.13 倍, 3 059 个样本全部满足要求, 其中 95% 的样本在 1.05 倍  $SMYS_{X80}$  及以上(图 2)。

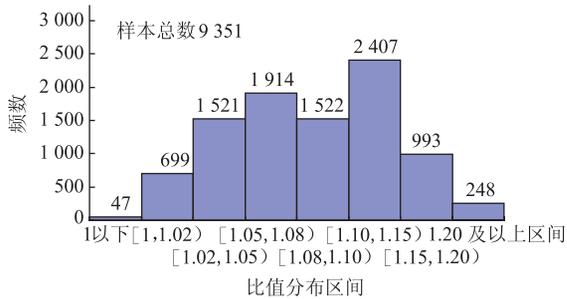


图 1 西二线 X80 螺旋焊管样本频数分布图 (样本值比  $SMYS_{X80}$ )

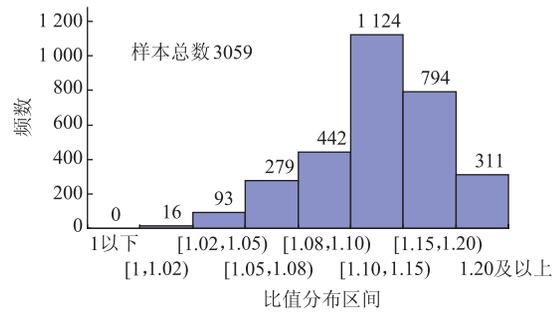


图 2 西二线 X80 直缝焊管样本频数分布图 (样本值比  $SMYS_{X80}$ )

(2) 西二线 X80 钢管实物屈服强度均值为 1.21 倍  $SMYS_{X80}$  (表 1), 比小尺寸试样屈服强度(1.09 倍  $SMYS_{X80}$ ) 约高 12%; 样本标准差为 48.1 MPa, 99% 的样本在 1.01 倍  $SMYS_{X80}$  及以上, 通过进一步控制钢管质量的稳定性, X80 钢管完全能够进行 100% 屈服强度静水压试验。

(3) X80 钢管母材夏比冲击韧性 80% 以上超过 260 J (图 3), 通过进一步提升管线钢冶金水平和制管水平, 冲击韧性指标能够得到进一步提高。

(4) X80 钢管批量生产的焊缝(螺旋)夏比冲击功 100% 超过 80 J (图 4)。

表 1 钢管实物性能统计分析结果

钢级	实物爆破试验样本数	均值	标准差/MPa	大于 $SMYS$ 的概率	95% 概率	99% 概率
X80	14	1.21 $SMYS$	48.1	0.992	1.07 $SMYS$	1.01 $SMYS$

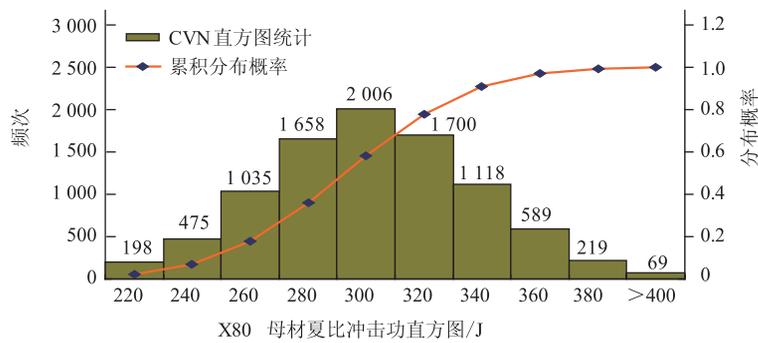


图 3 西气东输二线用 X80 钢管夏比冲击功统计直方图

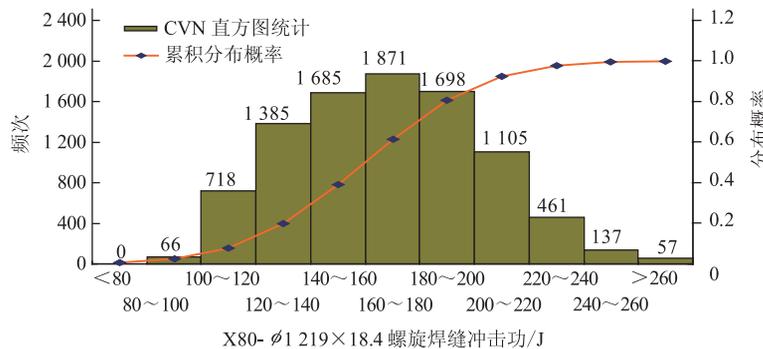


图 4 西气东输二线用 X80 钢管焊缝夏比冲击功统计直方图

国产管材各项性能指标的提高,为管材在不同环境中的使用提供了质量保证,也为一级地区提高管道设计系数及管材的使用效率提供了前提,通过进一步提高和控制,能够满足提高管道设计系数对管材性能的要求。

#### 4 管材关键性能指标及质量控制

为进一步提高我国国产管材的性能水平,开展了管材性能断裂控制和质量控制的研究,并在此基础上制定了 Q/SY GJX-117《西气东输三线 0.8 设计系数管道用 X80 螺旋缝埋弧焊管技术条件》<sup>[14]</sup>,该标准对影响管材质量的关键指标,如冲击韧性、板头与板尾性能、静水压试验、几何尺寸、无损检测等提出了更高要求。

##### 4.1 冲击韧性

管道设计系数由 0.72 增至 0.80 后,要求的止裂冲击功增加较多。文献[13]采用 Battelle 双曲线模

型加修正系数方法和 API 579-2007 适用性二级评价方法<sup>[15]</sup>,确定出设计系数为 0.8 时管材要求的止裂冲击功和起裂冲击功分别为 260 J 和 80 J。因此, Q/SY GJX-117-2012 与 Q/SY GJX-0102《西气东输二线工程用螺旋缝埋弧焊管技术条件》<sup>[16]</sup>相比, X80 螺旋缝埋弧焊管管体韧性有较大提高(表 2, 10 mm×10 mm×55 mm 试样)。

##### 4.2 螺旋缝埋弧焊管板头、板尾性能要求

螺旋缝埋弧焊管的板头、板尾性能相对中部板材差异较大,为了满足 0.8 设计系数管道工程用螺旋缝埋弧焊管的要求,进一步控制焊管性能质量,需要对每个板卷供应商的产品补充板卷头、尾性能试验,以确定不同板卷供应商产品的头部和尾部不符合技术条件的长度。

试验位置为板卷头部(外圈)1~3 m 和尾部(内圈)2.5~5.5 m 对应的钢管管段。对取样部位每 1 m (对应板卷长度方向)按照要求取 1 组试样进行拉伸、DWT T 和夏比冲击试验(表 3)。

表 2 螺旋缝埋弧焊管-10℃夏比冲击韧性要求

标准	钢级代号	位置	夏比冲击剪切面积%		夏比冲击功/J	
			单个试样 最小值	3个试样 最小平均值	单个试样 最小值	3个试样 最小平均值
Q/SY GJX-117-2012	X80	管体横向	80	90	200	260
		焊缝及热影响区	提供数据供参考	提供数据供参考	60	80
Q/SY GJX-0102	X80				150	200
	X80W	管体横向	80	90	170	220
	X80E				140	180
	X80	焊缝及热影响区	30	40	60	80

表 3 螺旋缝埋弧焊管板头、板尾性能试验取样信息表

试样用途	数量	取样位置
横向拉伸试验	2个圆棒试样	焊缝 180°管体横向
冲击试验	1组3个	距焊缝 90°
DWT T 试验	1组2个	距焊缝 90°

##### 4.3 水压试验及几何尺寸检测要求

采用 0.8 设计系数后,钢管水压试验压力提升至 100% SMYS,保压时间至少 15 s。水压试验参考美国标准 DOT 49 CFR Part 192 的相关规定:管道现场的

试压压力为最高运行压力的 1.25 倍,对应的钢管的环向应力为 100% SMYS<sup>[17]</sup>。

管体几何尺寸检测要求:每批(同炉、同生产工艺)抽取 1/2 钢管,检测外径、壁厚、椭圆度是否符合标准要求,检测位置为钢管长度等分的 5 个截面位置;钢管水压后目测无明显鼓胀;对每根钢管的管端进行全面的几何尺寸检测,检测外径、壁厚、椭圆度是否符合标准要求。

##### 4.4 无损检测

针对螺旋焊管的无损检测,采用 0.8 设计系数后,与 API Spec 5L-2007<sup>[18]</sup>(管线管规范)相关规定的差异

为:对焊缝的检测采用射线检查和超声波检查两种方法;对螺旋焊缝两侧 25 mm 的母材采用超声波方法检查分层缺欠;增加了对管体进行超声波检查的要求;增加了对检测焊缝像质计灵敏度测试值的要求;给出了超声波检测对比标样示意图;扫查至少覆盖管体或钢板表面的 50%;增加了“钢管的非分层缺陷的无损检测”。钢管应进行管体或钢板非分层缺陷的超声检测。任何利用超声横波原理,并能够连续不断地检测钢管管体或钢板非分层缺陷的超声波自动检测设备系统均可使用,自动化超声波检测系统应配有喷标及声、光自动报警系统,并具备记录功能。非分层缺陷检测对比试块和检验方法参照 JB/T4730.3<sup>[19]</sup>附录 B 的规定。管体或钢板不允许存在深度超过 3% 的非分层缺陷。

## 5 一级地区 0.8 设计系数试验段建设

2012 年,对 GB 50251<sup>[5]</sup>的修订中增加了“一级地区采用 0.8 设计系数”的相关内容,并同意依托西气东输三线西段工程,在一级地区荒漠无人区开展设计系数为 0.8 的 300 km 试验管道工程设计和工程验证。参照 ASME B31.8<sup>[10]</sup>、CSA Z662<sup>[11]</sup>和 AS 2885.1<sup>[12]</sup>等标准中 0.8 设计系数段的适用条件,按照以下原则确定了在西三线西段建设约 306 km 试验段:管道两侧 200 m 范围内没有永久性居民住房;200 m 范围内没有将来的城镇规划区;不包含特殊地区地段,如沼泽、活动断裂带、大中型穿越等;高差起伏不大,连续段至少 5 km;便于运行管理。

为了确保试验段的顺利建设,组织相关钢厂、管厂依据 Q/SY GJX-117-2012<sup>[14]</sup>规定,开展了西三线 0.8 设计系数试验段用钢管的千吨级试制,并组织开展以下研究:试验段工程用 X80 钢管环焊缝自动焊工艺和焊接材料适应性评价;环焊接头缺陷容限分析及现有无损检测标准适用性评价;试验段工程服役安全可靠性和实际运行风险分析;0.8 设计系数管道完整性管理措施。期望借助试验段的建设及相关配套技术研究,实施对 GB 50251<sup>[5]</sup>的修订工作,为今后西四线长距离输气管道全面推广应用 0.8 设计系数奠定基础。

## 6 结论与建议

(1) 加拿大和美国管道工程标准中明确规定了输

气管道一级地区可采用 0.8 强度设计系数,目前国际上 0.8 设计系数运行的管道已达数万公里,与采用 0.72 设计系数的管道相比,事故率无明显上升。

(2) 尽管提高管道设计系数对管道的可靠性有一定影响,但不是影响管道安全运行的关键因素,可靠的完整性管理措施可以有效降低管道事故率。

(3) 我国管线钢的冶金和制管技术、管道施工技术以及管道运行管理技术已经达到国际先进水平,通过进一步实施管材控制,完全可以满足提高强度设计系数的研究和试验条件。

(4) 依托西三线工程,加快开展试验段建设及 GB 50251 的修订工作,为今后西四线等工程工业化应用 0.8 强度设计系数奠定基础。

(5) 建议加快 0.8 设计系数管道完整性管理措施等相关配套技术的研究,以保障试验段管道的运行安全,进而开展一级地区 0.8 设计系数的推广应用。

### 参考文献:

- [1] Phil H. High design coefficient pipelines: integrity issues[J]. Journal of Pipeline Integrity, 2005, Quarter2: 69-97.
- [2] Robert J, Hopkins P. Impact on operational integrity and safety of high design coefficients for new and upgraded pipelines[C]. International Seminar-launch of the public comment draft of the revision of AS 2885.1, Wollongong, Australia, December 7-8, 2004.
- [3] Gary S, Phill J. Justifying the updating of a transmission pipeline to a stress level of over 72% SMYS: an operator's experience Proceedings of OMAE 99[C]. 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Newfoundland, Canada, July 11-16, 1999.
- [4] Martin M, Phil H. A justification for designing and operating pipelines up to stresses of 80% SMYS[C]. Proceedings of 4th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, September 29-October 07, 2002; IPC 2002-27007.
- [5] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB 50251-2003 输气管道工程设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- [6] 郑磊,高珊. 西气东输工程用大口径 X70 输气管线用板卷的研制[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(3): 46-50.
- [7] 张超. 西气东输工程用针状铁素体钢 X70 的试制[J]. 轧钢, 2005(4): 50-52.

- [8] 李延丰. 西气东输二线管道工程用 X80 钢级  $\phi 1219$  mm 直缝埋弧焊管的研发[J]. 钢管, 2009, 38(3): 33-38.
- [9] 孙宏. 西气东输二线国产 X80 螺旋埋弧焊管性能分析[J]. 焊管, 2010, 33(2): 13-16.
- [10] ASME B31.8S-2001 Managing system integrity of gas pipeline[S]. New York: ASME B31 Committee, 2001.
- [11] CSA Z662-2007 Oil and gas pipeline systems[S]. Ontario: Canadian Standards Association, 2007.
- [12] AS 2885.1-2007 Pipelines-gas and liquid petroleum Part 1: Design and construction[S]. Sydney: Australian Standards, 2007.
- [13] Zhao Xinwei, Zhang Guangli, Luo Jinheng, et al. Impact of improving design coefficient over 0.72 on the safety and reliability of gas pipelines and feasibility justification[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2012, 25(1): 166-172.
- [14] 熊庆人, 李洋, 巨西民, 等. Q/SY GJX-117: 西气东输三线 0.8 设计系数管道用 X80 螺旋埋弧焊管技术条件[S]. 北京: 中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部, 2012.
- [15] The American Society of Mechanical Engineers, American Petroleum Institute. API 579-1/ASME FFS-1: Fitness-for-Service [S]. New York: ASME, 2007.
- [16] 熊庆人, 吉玲康, 庄传晶, 等. Q/SY GJX-0102: 西气东输二线工程用螺旋埋弧焊管技术条件[S]. 北京: 中国石油天然气股份有限公司管道建设项目经理部, 2007.
- [17] Office of the Federal Register National Archives and Records Administration. 49 CFR Part 192: Transportation of natural and other gas by pipeline: minimum federal safety standards[S]. New York: LII, 2010.
- [18] American Petroleum Institute. API SPEC 5L-2007 (44th): Specification for line pipe[S]. Washington D C: API Publishing Services, 2007.
- [19] 合肥通用机械研究所. JB/T 4730.3-2005 承压设备无损检测 第 3 部分超声检测[S]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(收稿日期:2012-07-31;编辑:杜娟)

**作者简介:** 吴宏, 教授级高工, 1958 年生, 2000 年毕业于武汉工业大学管理科学与工程专业, 现主要从事石油天然气管道工程设计与重大管道项目的管理工作。

电话: 010-84889700; Email: wuhong@petrochina.com.cn

Wu Hong, professorate senior engineer, born in 1958, graduated from Wuhan University of Technology, management science and engineering, in 2000, engaged in the design and management of major oil and gas pipeline projects.

Tel: 010-84889700, Email: wuhong@petrochina.com.cn

## • 行业动态 •

# 中国石油天然气管道工程有限公司 0.8 设计系数管段 试压施工方案顺利通过审查

8月2日,在中国石油管道建设项目经理部组织召开的审查会上,中国石油天然气管道工程有限公司“输气管道提高强度设计系数工业性应用研究课题:0.8设计系数管段试压施工方案”顺利通过审查。

0.8设计系数是钢管用材参数,系数越高,管材韧性越强,钢板越薄。中国石油天然气管道局在保障输气管道工程质量和运行安全的前提下,依托西三线西段工程,将300km荒漠无人区确定为0.8设计系数的工业应用段,旨在实现节能、节材、降低工程成本的目标,该工程也是0.8设计系数科研成果在国内管道建设的首次工业应用。

管道工程有限公司与各参研单位通过科学论证,严密设计,对施工中存在的潜在问题和风险进行了充分分析和评价,最终确定0.8设计系数试验段试压方案。

审查会上,专家组一致认为该试压施工方案内容全面、方案合理,能够满足现场试压施工要求,可以成为0.8设计系数试验段现场试压施工方案。

摘自:中国石油报