doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.05.004

试验研究

高钢级管线环焊缝应变敏感性评价方法研究

左　勇[1],尤景泽[2,3],孙永辉[2,3],王汉奎[2,3],宋　明[2,3],孙立刚[1],蒲　凡[3],禹　婷[2]

(1.国家管网集团工程技术创新有限公司,天津 300457;2.中国特种设备检测研究院,北京 100029;
3.国家市场监督管理总局 技术创新中心(页岩气采输系统质量安全与智能检测技术),四川内江 641000)

摘　要:针对埋地高钢级管线钢在服役期内因外部载荷引发塑性变形后环焊缝韧性退化导致的安全风险问题,提出一套环焊缝应变敏感性评价方法。该方法以材料在不同温度下冲击结果拟合获得的韧脆转变曲线为核心,研究塑性变形对焊缝转变温度的影响,并利用该方法对X80管线目前常用的药芯焊丝自保护焊(FCAW-S)焊材、药芯焊丝气保护焊(FCAW-G)焊材及其匹配焊接工艺建造的环焊缝进行比较。结果表明,经过2%变形后,FCAW-S焊缝在冲击吸收能量为60 J时所对应的转变温度升高44 ℃,相同条件下,FCAW-G焊缝对应的转变温度仅升高5 ℃。相比之下,FCAW-S焊缝韧性对塑性变形更为敏感。研究结果为高钢级管线环焊缝的安全评估及焊材与工艺组合的选择提供了重要依据。

关键词:环焊缝;X80管线;脆性断裂;敏感性评价

中图分类号:TH142;TG441.7;TB301　　**文献标志码:**A

Research on strain sensitivity evaluation method for high-grade pipeline girth welds

ZUO Yong[1],YOU Jingze[2,3],SUN Yonghui[2,3],WANG Hankui[2,3],SONG Ming[2,3],
SUN Ligang[1],PU Fan[3],YU Ting[2]

(1.PipeChina Engineering Technology Innovation Co.,Ltd.,Tianjin 300457,China;
2.China Special Equipment Inspection and Research Institute,Beijing 100029,China;
3.Technology Innovation Center of Quality Safety and Intelligent Inspection on Shale Gas Extraction,Gathering and Transportation System,State Administration for Market Regulation,Neijiang 641000,China)

Abstract: To address the safety risks caused by toughness degradation of girth welds after plastic deformation induced by external loads during the service life of buried high-grade pipeline steel,a set of strain sensitivity evaluation methods for girth welds is proposed.This method is based on the ductile-to-brittle transition curve fitted from impact test results of materials at different temperatures,studying the effect of plastic deformation on the transition temperature of welds.Using this method,a comparison is made between girth welds constructed with flux-cored arc welding self-shielded (FCAW-S) consumables,flux-cored arc welding gas-shielded (FCAW-G) consumables,and their matching welding processes,which are commonly used in X80 pipelines.The results show that after 2% deformation,the transition temperature corresponding to an impact absorbed energy of 60 J increases by 44 ℃ for FCAW-S welds,while under the same conditions,the transition temperature for FCAW-G welds increases by only 5 ℃.In comparison,the toughness of FCAW-S welds is more sensitive to plastic deformation.The research results provide an important basis for the safety assessment of high-grade pipeline girth welds and the selection of consumable and process combinations.

Key words:girth weld;X80 pipeline;brittle fracture;sensitivity evaluation

收稿日期:2025-01-21　**修回日期:**2025-04-27

基金项目:国家石油天然气管网集团有限公司科学研究与技术开发项目(GWHT20240026839);微损评价与失效控制学科团队项目(2021XKTD021)

0 引言

在全球能源需求持续增长及工业发展持续推进的背景下，长输管道作为一种高效、经济且相对安全的长距离能源输送方式，其重要性日益凸显[1-5]。随着冶金技术的不断进步，高钢级管道应运而生，并逐渐在能源输送领域得到广泛应用。高钢级管道具有更高的强度，在较高内压工况下，可显著降低设计壁厚，从而提高输送效率，降低建设成本。目前，X80钢级管道已成为天然气和石油输送的主流选择，X100和X120钢级管道也已进入工程试验阶段，展现出巨大的应用潜力[6-8]。

在现代冶炼技术的推动下，高钢级钢管强度实现了飞跃式增长，但其环焊缝强度的提升相对滞后于管体材料，这使得环焊缝成为高钢级管道的薄弱环节。近年来，我国高钢级环焊缝相关的管线事故频发，如中缅天然气管道晴隆段发生2次环焊缝断裂事故[9-10]，以及泰青威管道环焊缝开裂事故等[11]。国外也曾发生多起长输管线环焊缝断裂事故，相关机构已发布公告提醒管道相关方重视环焊缝质量问题，特别是在可能经受大变形的管线区域[12-13]。

高钢级管线在建造时，对环焊缝的性能有强度和韧性要求。根据GB/T 34275—2024《压力管道规范 长输管道》规定，环焊缝抗拉强度应不低于两侧母材标准要求的下限值，焊接接头的冲击吸收能量不低于规定值。以X80管道环焊缝为例，其焊接接头抗拉强度要求不低于625 MPa，-10 ℃冲击吸收能量单个值不小于60 J，平均值不小于80 J。这些指标能够确保焊缝在静态载荷下的完整性，但未考虑埋地管线服役后的性能退化问题。

此外，埋地管道在服役期间会受到周围土壤作用力的影响。当地震、山体滑坡等地质灾害发生时，管道可能承受额外变形作用，导致焊缝区域产生塑性变形，进而改变焊缝性能。研究表明，X80自保护药芯焊丝环焊缝在经历应变后会出现较大韧性损失，与低钢级管线和一般压力容器的铁素体焊缝相比，其对塑性变形的敏感性更高，经1%应变后，焊缝平均冲击吸收能量下降27.3%，同时，塑性变形后的时效作用可能进一步降低韧性[14]。在高压、高安全性要求的压力容器领域，通常会评估材料服役后的韧性指标。例如，针对核反应堆压力容器和加氢反应器服役过程中可能出现的辐照脆化、回火脆化等问题，国内外标准通过严格的随机取样和冲击试验方法进行监控[15]。然而，目前埋地管线建造标准中尚未建立对焊缝冲击吸收能量塑性变形敏感性的要求。

本文提出一种基于材料韧脆转变曲线的焊缝材料塑性变形敏感性评价方法。根据材料在不同温度下的力学行为，焊缝冲击吸收能量与试验温度具有相关性。因此，通过分析塑性变形后转变曲线中冲击吸收能量60 J对应温度值的变化，可表征焊缝材料对塑性变形的敏感程度。应用该方法，对当前高钢级管线常用的药芯焊丝自保护焊（FCAW-S）和药芯焊丝气保护焊（FCAW-G）及其匹配焊接工艺建造的环焊缝应变敏感性进行比较。

1 材料及方法

1.1 材料来源

文中采用的环焊缝试样依据实际管线建造工艺在实验室焊接制备，母材均取自同一根X80直缝钢管（规格：∅1 219 mm×18.4 mm）。其中，焊缝A采用手工电弧焊（焊材：BOEHLER SG3-P，其牌号为ER70S-G）打底，药芯焊丝自保护焊（FCAW-S，焊材：HOBART FABSHIELD X80，其牌号为E81T8-Ni2J）完成填充和盖面；焊缝B采用钨极氩弧焊（GTAW，焊材：BOEHLER EMK6，其牌号为ER70S-6）打底，药芯焊丝气保护焊（FCAW-G，焊材：HOBART FABCO 91）完成填充和盖面。具体焊接工艺参数如表1所示。

表1 焊接工艺参数

Tab.1 Welding process parameters

项目	焊道	电流/A	电压/V	焊接速度/（cm·min^{-1}）	热输入/（kJ·mm^{-1}）
焊缝A	根焊	110~140	14~18	20~25	0.66~0.76
	填充	160~280	18~24	18~30	1.55~2.24
	盖面	160~240	18~24	16~24	1.38~2.16
焊缝B	根焊	115~155	11~14	8~10	1.06~1.19
	填充	171~260	21~27	13~23	1.40~2.32
	盖面	150~200	21~27	16~20	1.33~1.49

采用直读光谱仪对2种焊缝及母材进行化学成分分析，测定元素涵盖X80钢母材的化学成分。为准确测定焊缝中氧、氮元素含量，在焊缝靠近管道外壁位置取样〔见图1（c）〕，获取直径6 mm、高度6 mm的圆柱形试样，确保试样取自环焊缝填充及盖面焊区域[16]。根据GB/T 20124—2006《钢

铁 氮含量的测定 惰性气体熔融热导法(常规方法)》与GB/T 11261—2006《钢铁 氧含量的测定 脉冲加热惰气熔融-红外线吸收法》,氮元素含量采用惰性气体熔融热导法测定,氧元素含量采用脉冲加热惰性气体熔融-红外吸收法测定。母材及2种焊缝的化学成分分析结果见表2。

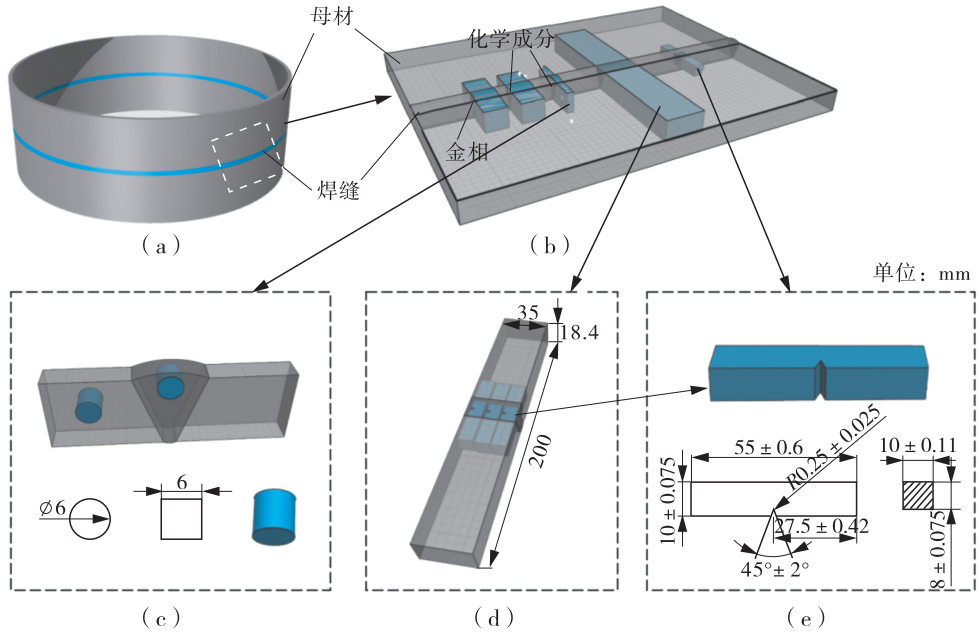


图1 取样位置示意

Fig.1 Sampling position indication

表2 母材及2种焊缝的化学成分

Tab.2 The chemical composition of base metal and two kinds of welds %

元素	试样来源			母材要求(API 5L)
	焊缝A(FCAW-S)	焊缝B(FCAW-G)	X80母材	
C	0.04	0.07	0.05	≤0.12
Si	0.06	0.26	0.20	≤0.45
Mn	1.47	1.47	1.72	≤1.85
P	0.007	0.006	0.009	≤0.025
S	0.001	0.004	0.001	≤0.015
V	0.007	0.001	0.001	—
Nb	0.001	0.001	0.028	—
Ti	0.005	0.058	0.015	—
Cr	0.04	0.05	0.20	≤0.50
Mo	0.03	0.03	0.11	≤0.50
Cu	0.01	0.03	0.01	≤0.50
Ni	1.37	0.28	0.14	≤1.00
Al	1.793	0.008	0.027	—
B	0.001	0.001	0.001	≤0.004
O	0.007 7	0.009 3	0.002 5	—
N	0.014 8	0.003 1	0.003 5	—

1.2 敏感性评价方法

采用系列冲击试验评价2种焊缝的应变敏感性。试验分为两部分:首先,从实验室焊接的管圈4~6点位连续截取24个冲击试样,如图1(e)所示;然后,制备8根拉伸试样〔见图1(d)〕,每根试样经预拉伸后,继续加工为冲击试样,如图1(b)(d)(e)所示。

系列冲击试验完成后,采用Logistic函数对焊缝的冲击吸收能量进行拟合,拟合函数表达式如下:

$$E(t)=E_0+\frac{\Delta E}{\left(1+e^{-(t-T_0)/\Delta T}\right)} \tag{1}$$

式中,$E(t)$为拟合函数,函数值为冲击吸收能量;t为试验温度;E_0为转变曲线的下平台对应的冲击吸收能量;$E_0+\Delta E$为转变曲线的上平台对应的冲击吸收能量;T_0为转变曲线的中心温度点;$1/\Delta T$为拟合函数的斜率。

拟合函数有4个待拟合参数,依次为E_0,ΔE,T_0和ΔT。由拟合函数表达式可知:$\lim\limits_{t\to-\infty}E(t)=E_0$,$\lim\limits_{t\to+\infty}E(t)=E_0+\Delta E$。利用最小二乘法确定拟合函数中的4个待拟合参数,可以计算获得特定冲击吸收能量E_p对应的温度vTr,其表达式为:

$$\mathrm{v}T\mathrm{r}=T_0-\Delta T\ln\left(\frac{\Delta E}{E_p-E_0}-1\right) \tag{2}$$

对环焊缝4~6点位连续截取的冲击试样进行

多温度夏比冲击试验，测定各温度下的冲击吸收能量。通过拟合试验数据获得焊缝材料的韧脆转变温度曲线，并确定冲击吸收能量60 J对应的特征温度v*T*r。采用配备50 mm标距引伸计的拉伸试验机对焊缝试样进行加载，控制应变量达到2%后保持30 s卸载。将应变后的试样加工成标准冲击试样（见图1(e)），测定其不同温度下的冲击吸收能量。拟合应变后试样的转变温度曲线，计算冲击吸收能量60 J对应的温度v*T*r′，得到2%应变导致的温度变化量v*T*r′−v*T*r。在管线服役过程中，若遭遇地震或山体滑坡等地质灾害，焊缝区域可能经历多次较大变形。此时，保证冲击吸收能量60 J所需的最低温度可表示如下：

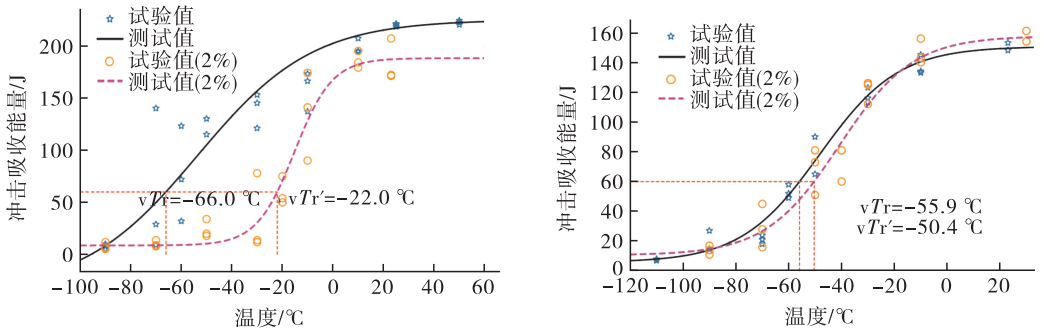
$$T_{\min}=\mathrm{v}Tr+\alpha(\mathrm{v}Tr'-\mathrm{v}Tr) \tag{3}$$

式中，α为安全系数，取$\alpha=2.5$。

2 试验结果及分析

2.1 敏感性研究结果

FCAW-S和FCAW-G焊缝在2%应变前后的温度-冲击吸收能量曲线如图2所示。可以看出，FCAW-S焊缝经2%应变后，其冲击吸收能量拟合曲线整体向右下方偏移，且韧脆转变区变窄。应变前冲击吸收能量60 J对应温度为-66.0 ℃，应变后升至-22.0 ℃，温度上升44.0 ℃；而FCAW-G焊缝的冲击性能变化较小，应变前后，冲击吸收能量60 J对应的温度分别为-55.9，-50.4 ℃，仅上升5.5 ℃。



(a)FCAW-S (b)FCAW-G

图2 2种焊缝在2%应变前后的温度-冲击吸收能量曲线

Fig.2 Temperature-impact absorption energy curves of two kinds of welds before and after 2% strain

基于试验结果，建立焊缝最低吸收能量(60 J)对应的温度可近似为式(3)。当$\alpha=1$时，表示管线经历单次大变形的温度变化；考虑服役中可能遭遇多次大变形（如地震、山体滑坡），取$\alpha=2.5$，此时，计算得到FCAW-S和FCAW-G焊缝的保证温度值分别为44.0 ℃和-42.0 ℃，表明FCAW-S焊缝存在较高的塑性应变脆化风险。2种焊缝在2%应变前后的系列冲击试验结果如表3所示

表3 2%应变前后的系列冲击试验结果(60 J)

Tab.3 Series of impact test results before and after 2% strain(60 J) ℃

项目	初始转变温度v*T*r	应变后转变温度v*T*r′	转变温度差值（v*T*r′−v*T*r）	冲击吸收能量保证温度[v*T*r+2.5×(v*T*r′−v*T*r$_r$)]
FCAW-S(焊缝A)	-66.0	-22.0	44.0	44.0
FCAW-G(焊缝B)	-55.9	-50.4	5.5	-42.0

除韧脆转变温度v*T*r外，材料脆化程度还可通过冲击试样剪切断面率评估。文中以50%剪切断面率对应的试验温度作为断口形貌转变温度(*FATT*)，2种焊缝在不同状态下的*FATT*值见表4。采用体视显微镜分析冲击试样断口，获得FCAW-S和FCAW-G焊缝应变前后温度-剪切断面率关系曲线，如图3所示。可以看出，2种焊缝的*FATT*变化趋势与其韧脆转变温度曲线基本一致，但冲击吸收能量数据较剪切断面率更为离散。

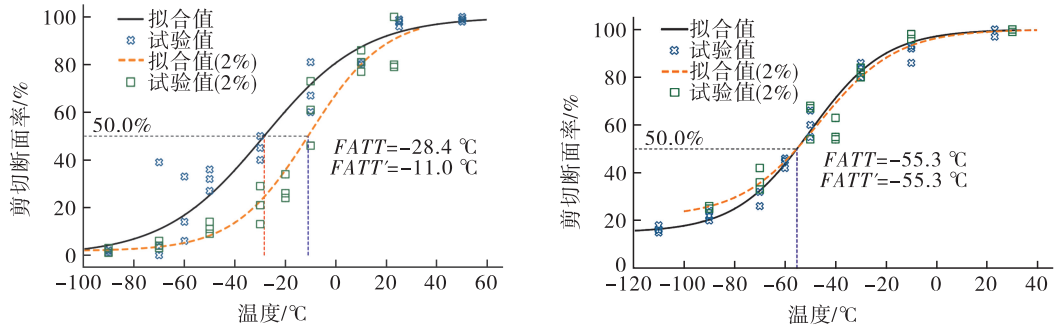
表4 2种焊缝在2%应变前后的*FATT*值

Tab.4 The *FATT* values of two kinds of welds before and after 2% strain ℃

项目	应变前*FATT*	应变后*FATT*′	转变温度差值(*FATT*′−*FATT*)
FCAW-S	-28.4	-11.0	17.4
FCAW-G	-55.3	-55.3	0

FCAW-S焊缝应变后*FATT*升高，呈现明显脆化；而FCAW-G焊缝*FATT*保持不变，表明2%应

变对其韧性影响甚微。这一规律与图2的分析结果相符。



（a）FCAW-S （b）FCAW-G

图3 2种焊缝在2%应变前后试验温度与剪切断面率的关系曲线

Fig.3 The relationship between test temperature and shear section rate before and after 2% strain of two kinds of welds

表5列出2种焊缝在2%应变前后-10 ℃冲击吸收能量，这是管线埋地建造时的重要考核指标。

表5 2种焊缝在2%应变前后-10 ℃冲击吸收能量

Tab.5 The impact absorbed energy of the two kinds of welds at -10 ℃ before and after 2% strain

项目	-10 ℃冲击吸收能量/J	平均冲击吸收能量/J	总体标准差 σ/J
应变前 FCAW-S	173,137,166	159	15.59
应变后 FCAW-S	174,90,141	135	34.56
应变前 FCAW-G	133,145,134	137	5.44
应变后 FCAW-G	143,156,140	146	6.94

从表5可以看出，FCAW-S焊缝在应变前后的平均冲击吸收能量分别为159，135 J，FCAW-G焊缝分别为137，146 J。虽然两者的数值均满足X80管线钢焊缝在-10 ℃下不低于60 J的标准要求，且变化幅度不大，但敏感性评价结果表明，FCAW-S焊缝应变后冲击吸收能量拟合曲线明显右移，韧脆转变区收窄，其冲击吸收能量保证温度达到44 ℃。这说明在实际服役温度下，FCAW-S焊缝经局部大变形后存在较高的脆性断裂风险，严重影响管线安全。

此外，韧脆转变区的冲击吸收能量数据通常具有较大离散性。FCAW-S焊缝应变后-10 ℃冲击吸收能量的总体标准差σ较应变前增加了1倍多，难以准确表征材料整体性能。本研究提出的环焊缝应变敏感性评价方法，通过分析全温度范围内的冲击吸收能量变化，比较应变前后冲击吸收能量60 J对应的温度，获得冲击吸收能量保证温度，有效避免了单温度点数据的波动影响，使评估结果更具科学性和可靠性。

2.2 焊缝组织分析

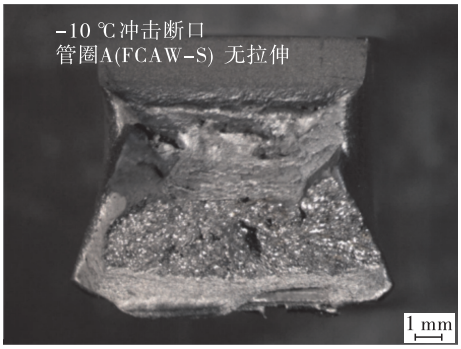
图4示出2种焊缝在-10 ℃下应变前后冲击断口的宏观形貌。

FCAW-S焊缝经应变后呈现明显脆化特征：断口韧性区减小，脆性区扩大，剪切断面率由应变前的61%降至46%。相比之下，FCAW-G焊缝应变前后形貌变化不明显，均保持良好韧性。冲击样品脆性区域的形貌如图5所示。所有试样均呈现准解理断裂特征，但FCAW-S焊缝应变后解理面尺寸增大，并出现大量向内部延伸的二次裂纹，表明材料韧性降低；而FCAW-G焊缝的解理单元尺寸较小，解理面周围分布着韧窝和撕裂脊，应变前后均表现出良好的韧性。

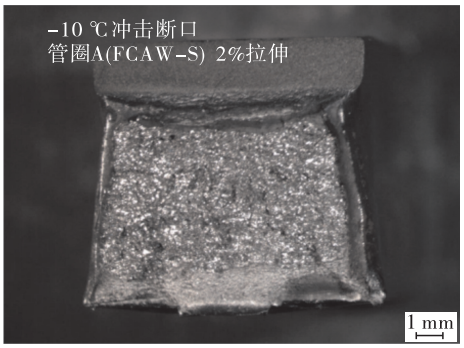
FCAW-S与FCAW-G焊缝的塑性应变敏感性差异，主要源于其微观组织亚结构特征差异。2种焊缝显微组织见图6。FCAW-S焊缝呈现粗大原奥氏体晶粒，其尺寸约为100 μm；内部为上贝氏体组织，具有明显的取向各向异性。这种亚结构导致不同取向板条间变形协调性差，且亚板条边界存在高碳析出物（见图7），在应变时易引发局部应力集中和微裂纹形成，显著降低韧性。

此外，FCAW-S焊缝的高Al含量（1.793%，FCAW-G焊缝为0.008%），促使形成大量Al_2O_3和AlN硬脆夹杂物（见图8），这些夹杂物阻碍位错运动，加剧应力集中[17-18]。相比之下，FCAW-G焊缝具有细小的针状铁素体组织，取向随机分布均匀，表现出更稳定的力学性能和更低的应变敏感性。基于此，建议在地质灾害频发区优先选用FCAW-G工艺，或通过优化焊材成分和工艺改善FCAW-S焊缝组织。同时，在管线建造时可以适

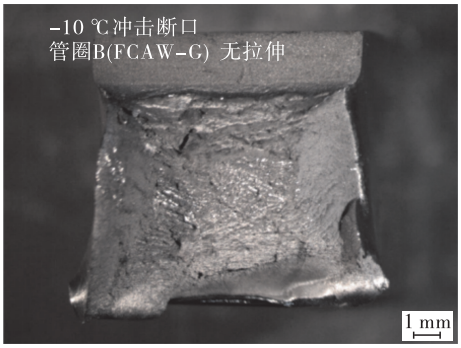
当引入文中的应变敏感性评价方法,预先判定材料服役过程中可能出现的最大应力,并进行应变敏感性评价,在材料满足应变前后冲击吸收能量下,保证温度低于服役温度后再投入使用。



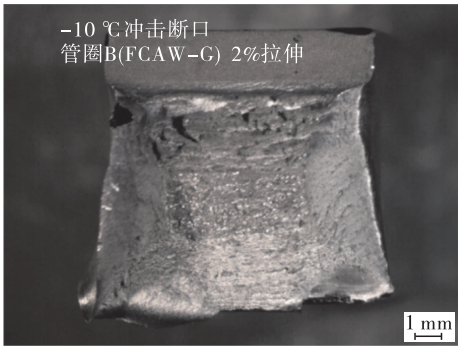
(a)FCAW-S无应变



(b)FCAW-S经2%应变



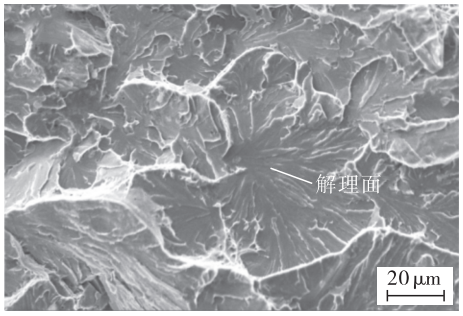
(c)FCAW-G无应变



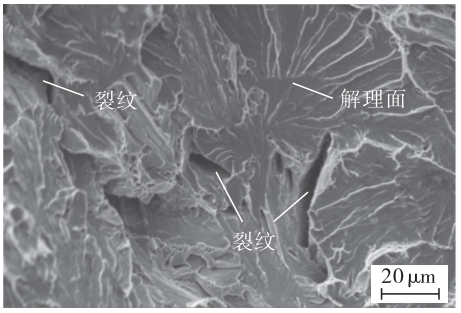
(d)FCAW-G经2%应变

图4 冲击试验断口宏观形貌

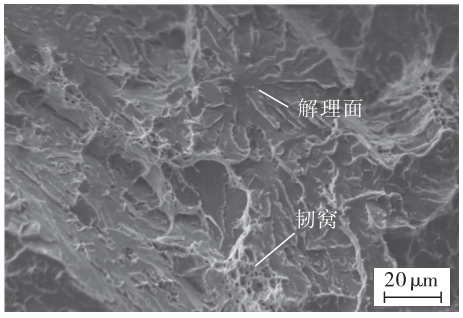
Fig.4 Macroscopic fracture morphology of impact tests



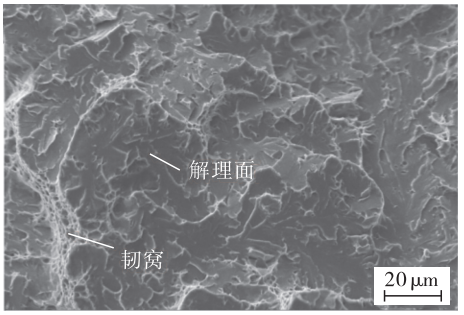
(a)FCAW-S无应变



(b)FCAW-S经2%应变



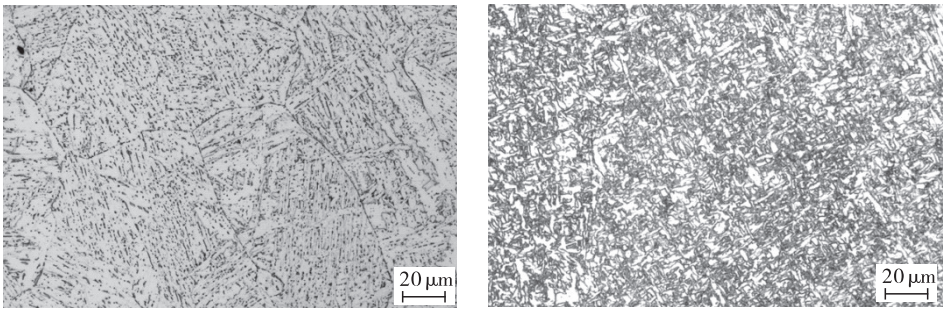
(c)FCAW-G无应变



(d)FCAW-G经2%应变

图5 冲击试验断口微观形貌

Fig.5 Microscopic fracture morphology of impact tests



（a）焊缝A（FCAW-S） （b）焊缝B（FCAW-G）

图6 2种焊缝显微组织

Fig.6 Microstructure of two kinds of welds

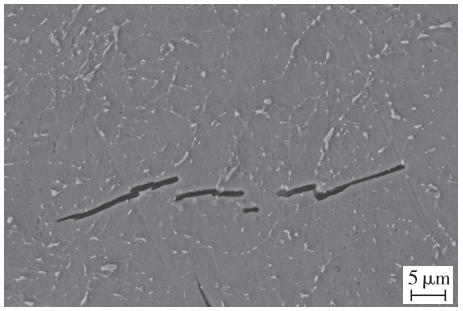


图7 2%应变后FCAW-S焊缝金相组织

Fig.7 Microstructure of FCAW-S weld after 2% strain

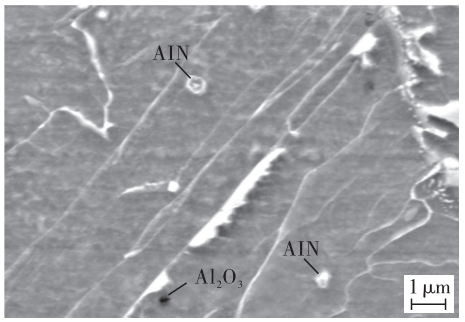


图8 FCAW-S焊缝组织内第二相夹杂物

Fig.8 Second phase inclusions in FCAW-S weld microstructure

3 结论

（1）通过系列冲击试验及能量吸收曲线分析表明，FCAW-S与FCAW-G环焊缝的应变响应特性差异显著。FCAW-S焊缝经变形后，其冲击吸收能量曲线整体右移且韧脆转变区收窄，冲击吸收能量60 J时临界温度从-66.0 ℃显著上升至-22.0 ℃，温度上升44.0 ℃，显示该工艺对塑性应变高度敏感；相比之下，FCAW-G焊缝60 J临界温度仅升高5.5 ℃，冲击性能变化较小。

（2）FCAW-S焊缝经应变后*FATT*值由-28.4 ℃升至-11.0 ℃，升高17.4 ℃，表明材料明显脆化；而FCAW-G焊缝*FATT*值保持不变，2%应变对其韧性基本无影响。该结果与温度-冲击吸收能量曲线的变化规律一致。

（3）冲击吸收能量保证温度计算结果显示，FCAW-S焊缝为44.0 ℃，FCAW-G焊缝为-42.0 ℃。FCAW-S焊缝的显著较高值表明，在遭遇地质灾害等极端工况时，其经多次局部大变形后存在较高的脆性断裂风险，安全隐患较大。

（4）FCAW-S焊缝呈现粗大晶粒和显著各向异性的上贝氏体亚结构，同时高Al含量（1.793%）导致Al_2O_3和AlN硬脆夹杂物富集。这种显微组织使塑性应变时应力分布不均，裂纹易于在应变集中处形核和扩展，导致冲击韧性显著降低，表现出高应变敏感性。与之相比，FCAW-G焊缝具有细小晶粒和均匀组织，应变前后力学性能稳定。

参考文献：

[1] DUBEY L，SPEIRS J，BALCOMBE P，et al.Future use of natural gas under tightening climate targets [J]. Futures，2023，150：103158.

[2] 王汉奎，李阳，姚呈祥，等.不同药芯焊丝工艺条件下X80管线钢焊缝组织与性能对比[J].压力容器，2024，41（1）：12-17.
WANG H K，LI Y，YAO C X，et al. Comparison of microstructure and properties of X80 girthweld joints welded by different flux-cored wire processconditions [J].Pressure Vessel Technology，2024，41（1）：12-17.

[3] 冯庆善.高钢级管道环焊接头强度匹配的探讨与思考[J].油气储运，2022，41（11）：1235-1249.
FENG Q S. Discussion and thinking of high-grade pipeline girth weld strength matching [J]. Oil & Gas Storage and Transportation，2022，41（11）：1235-1249.

[4] 孟彤，孙超，王汉奎，等.X70管线钢残余塑性应变的背散射电子衍射表征方法研究[J].流体机械，2023，51（2）：20-27.
MENG T，SUN C，WANG H K，et al. Electron

backscatter diffraction characterization of residual plastic strain of X70 pipeline steel [J]. Fluid Machinery，2023，51(2)：20-27.

[5] 冯传智，罗雨，许耀波，等.管道全位置焊接机器人结构设计与运动学分析[J].机电工程，2024，41(8)：1489-1499.
FENG C Z，LUO Y，XU Y B，et al.Structural design and kinematics analysis of pipeline al-position welding robot[J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering，2024，41(8)：1489-1499.

[6] 王晓香.超高强度管线钢管研发新进展[J].焊管，2010，33(2)：5-12.
WANG X X. Development progress of pipeline steel with extra-high strength[J]. Welded Pipe and Tube，2010，33(2)：5-12.

[7] BHARDWAJ U，TEIXEIRA A P，SOARES C G.Burst strength assessment of X100 to X120 ultra-high strength corroded pipes[J].Ocean Engineering，2021，241：110004.

[8] 任伟，帅健，张银辉，等.X80管道环焊缝可靠性及其影响因素分析[J].压力容器，2024，41(7)：32-39.
REN W，SHUAI J，ZHANG Y H，et al.The analysis on reliability and affecting factors of X80 pipeline girth weld[J].Pressure Vessel Technology，2024，41(7)：32-39.

[9] 陈宏远，封辉，杨坤，等.地质灾害引发管道失效的应变分析[J].石油管材与仪器，2020，6(2)：21-25.
CHEN H Y，FENG H，YANG K，et al.Strain-based analysis for pipeline failure under geologic hazard[J].Petroleum Tubular Goods & Instruments，2020，6(2)：21-25.

[10] 戴联双，考青鹏，杨辉，等.高强度钢管道环焊缝隐患治理措施研究[J].石油管材与仪器，2020，6(2)：32-37.
DAI L S，KAO Q P，YANG H，et al.Hazard control measurement of girth weld in high strength steel pipeline[J].Petroleum Tubular Goods & Instruments，2020，6(2)：32-37.

[11] 杨辉，王富祥，陈健，等.油气管道环焊缝缺陷适用性评价现状与展望[J].天然气工业，2020，40(2)：135-139.
YANG H，WANG F X，CHEN J，et al.Current status and prospect of fitness-for-service evaluation on the girth weld defects in oil and gas line pipes[J].Natural Gas Industry，2020，40(2)：135-139.

[12] PHMSA. Pipeline construction：hydrogen assisted cracking[R].SE Washington：Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration，2011.

[13] HART P H M.Hydrogen cracking-its causes，costs and future occurrence[R].Cambridge：TWI，1999

[14] GUO L，SU X，DAI L S，et al. Strain ageing embrittlement behaviour of X80 self-shielded flux-cored girth weld metal[J].Materials Technology，2023，38(1)：2164978.

[15] 马韩韩，伏玮，沈志鹏，等.基于步冷试验的2.25Cr-1Mo-0.25V钢母材及焊缝回火脆化研究[J].压力容器，2020，37(2)：1-10.
MA H H，FU W，SHEN Z P，et al.Study on temper embrittlement of 2.25Cr-1Mo-0.25V steel base metal and welded joint based on step-cooling test [J]. Pressure Vessel Technology，2020，37(2)：1-10.

[16] 王汉奎，商学欣，柳旺，等.高钢级油气管线环焊缝应变时效脆化研究[J].压力容器，2021，38(5)：8-13.
WANG H K，SHANG X X，LIU W，et al. Study on strain aging embrittlement of the girth weld of the high strength oil and gas pipeline [J]. Pressure Vessel Technology，2021，38(5)：8-13.

[17] 阎红.Al对药芯焊丝CO_2气体保护焊焊缝质量的影响[J].焊接，2018(3)：48-50.
YAN H.Influence of aluminum on weld quality of CO_2 gas shielded welding [J]. Welding & Joining，2018(3)：48-50.

[18] 魏琪，胡强，蒋建敏，等.铝对自保护药芯焊丝性能的影响[J].焊接学报，2000，21(2)：10-13.
WEI Q，HU Q，JIANG J M，et al.Effect of aluminium on properties of self-shielded flux cored wire [J]. Transaction of the Chine Welding Institute，2000，21(2)：10-13.

作者简介：左勇(1988)，男，高级工程师，主要从事油气管道工艺和材料设计和工程技术研究工作，通信地址：300457天津市滨海新区国家管网集团工程技术创新有限公司，E-mail：zuoyong01@pipechina.com.cn。

通信作者：禹婷(2000)，女，工程师，主要从事材料失效分析和材料力学性能研究工作，通信地址：100029北京市朝阳区和平街西苑2号中国特种设备检测研究院，E-mail：yuting@csei.org.cn。

本文引用格式：
左勇，尤景泽，孙永辉，等.高钢级管线环焊缝应变敏感性评价方法研究[J].压力容器，2025，42(5)：30-37.
ZUO Yong，YOU Jingze，SUN Yonghui，et al.Research on strain sensitivity evaluation method for high-grade pipeline girth welds[J].Pressure Vessel Technology，2025，42(5)：30-37.