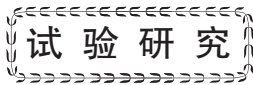


doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2024.06.005



X80 管线钢自动焊焊缝冲击能量分配研究

韩涛¹, 温晓峰², 刘宇¹, 尹长华¹, 王金环²

(1. 中国石油天然气管道科学研究院有限公司, 河北廊坊 065000;

2. 国家管网集团北方管道有限责任公司, 河北廊坊 065000)

摘要:针对 X80 管线钢实心焊丝自动焊的焊缝金属, 采用仪器化冲击试验方法, 研究了焊缝金属冲击能量分配和温度敏感性。结果表明, 工程常用测试温度 (-10 °C) 条件下, X80 管道实心焊丝自动焊的焊缝金属冲击韧性 (128~195 J) 良好; 总冲击吸收能量数据波动显著大于裂纹形成能量, 主要原因是裂纹扩展过程吸收能量波动较大引起的; 系列温度冲击试验的总吸收能量和裂纹形成能量均具有上平台特征, 但裂纹形成能量数据曲线的上平台温度范围 (-40~20 °C) 更大, 且随着试验温度升高, 裂纹形成能量占比表现出非线性降低特性。长输管道工程设计温度范围 (-40~20 °C) 内, 焊缝金属裂纹形成能量测试结果具有温度无关性特征, 依据上平台温度试验结果制定验收指标, 可能不利于对焊缝金属裂纹萌生的控制, 建议进一步开展相关研究, 制定焊缝金属起裂韧性指标, 从根本上控制焊缝金属裂纹的萌生。

关键词: X80 管线钢; 实心焊丝; 自动焊; 焊缝金属; 仪器化冲击试验; 能量分配

中图分类号: TH142; TQ055.8; TG113.26

文献标志码: A

Study of weld impact energy distribution for X80 pipe automatic welding

HAN Tao¹, WEN Xiaofeng², LIU Yu¹, YIN Zhanghua¹, WANG Jinhuan²

(1. China Petroleum Pipeline Research Institute Co., Ltd., Langfang 065000, China;

2. PipeChina North Pipeline Co., Ltd., Langfang 065000, China)

Abstract: The impact energy distribution and temperature sensitivity of the weld metal were studied using the instrumented impact test method for the automatic weld metal using solid wire for X80 pipe steel. The research results show that the automatic weld metal using solid wire for X80 pipe has good impact toughness (128~195 J) under the condition of common test temperature (-10 °C) in engineering. The fluctuation of the total shock absorption energy data is significantly greater than the crack formation energy. It is mainly caused by large fluctuations in the absorption energy during crack propagation; Through a series of temperature tests, it is found that the total absorption energy and crack formation energy have the characteristics of the upper platform, but the upper platform temperature range (-40~20 °C) of cracks form energy data curves is larger. With the increase of the test temperature, the proportion of crack formation energy shows a nonlinear decrease in the proportion of crack formation energy. In the design temperature range of long-distance pipeline engineering (-40~20 °C), the weld metal crack formation energy test results have temperature-independent characteristics, and the acceptance index is formulated according to the temperature test results of the upper platform, which may not be conducive to the control of weld metal crack initiation. It is suggested that further relevant research should be carried out to formulate the crack toughness index of weld metal, so as to fundamentally control the initiation of weld metal cracks.

Key words: X80 steel; solid wire; automatic welding; weld metal; instrumented impact test; energy distribution

0 引言

随着对油气运输系统的经济性、可靠性要求的不断提高,长输管道向着高强度、高韧性、大管径的方向发展。X80管线钢作为新一代高强度管线钢,已经广泛应用于各类油气输送管道中,且表现出优异的服役性能^[1-3]。但近年发生的环焊缝失效事故,使得X80为代表的高钢级管道环焊缝的服役安全问题备受关注,有关X80管线钢焊接接头韧性的探究也日趋深入。HASHEMI^[4-5]通过对X65和X70管线钢的研究发现,对于高钢级管道,仅要求夏比冲击最低值的方法,无法充分保障管道安全,并通过全尺寸爆破试验证明了这一点;同时,开展了系列钢级管道材料的仪器化冲击试验,发现造成这种差异的主要原因与高钢级管道夏比冲击吸收能量中的裂纹形成能量和裂纹扩展能量占比有关,并以此为依据,对传统的基于最小夏比冲击韧性的天然气输送管道破坏模型提出了修正系数。吴金辉等^[6]通过一系列研究,证实了钢级对夏比冲击试验过程中的裂纹形成能量和裂纹扩展能量的占比影响较大,因此在高钢级管道工程设计文件中引入剪切面积技术

指标。对于高钢级管道,冲击韧性相关研究重点侧重于管线钢本身^[7-9],焊缝金属冲击韧性相关的研究较少,且已有相关成果均针对半自动焊工艺^[10-11]。2016年至今,以中俄东线为代表的长输管道工程自动焊工艺,已成为当前长输管道干线采用的首选焊接工艺。本文以实心焊丝自动焊工艺焊口为研究对象,采用仪器化冲击试验方法,研究X80管道自动焊焊缝金属冲击韧性,研究结果可为新建工程焊缝金属韧性指标的制定提供技术参考。

1 试验方法

1.1 试样制备

将现场提供的X80管圈压平后切割成500 mm×250 mm的钢板,管材主要化学成分见表1。试样坡口制备及实心焊丝自动焊工艺参数参考某长输管道工程,坡口形式如图1所示,几何参数见表2。采用的焊材为ER80S-G,主要化学成分见表1。试板采用内焊机完成根焊后,再采用双焊枪焊机完成热焊、充填和盖面的焊接,主要工艺参数见表3。试板焊接完成并检测合格后,在焊缝中心制取标准夏比缺口冲击试样。

表1 管材和焊丝的化学成分

Tab.1 Chemical composition of tubes and wires

材料	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
X80	0.079	0.663	1.461	0.008	0.009	0.037	0.008	0.899	0.013	0.090
ER80S-G	0.049	0.677	1.468	0.010	0.007	0.017	0.007	0.850	0.002	0.093

表2 坡口结构几何参数

Tab.2 Geometry parameters of test plate groove

参数	数值
坡口面角度 / (°)	$\beta=5\pm 1, \alpha=45\pm 1, \gamma=37.5\pm 1$
钝边高度 P/mm	1.1±0.2
对口间隙 b/mm	0~0.5
拐点至内壁高度 H/mm	5.1±0.2
半坡口宽度 W/mm	3.2~3.8
内坡口高度 h/mm	1.7±0.2

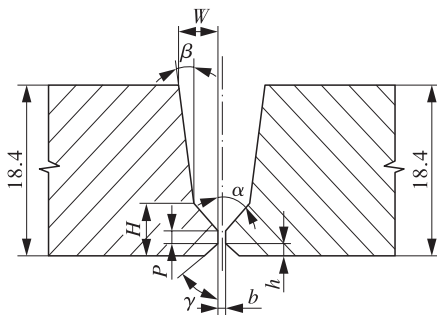


图1 试板坡口加工示意

Fig.1 Schematic diagram of test plate groove processing

表3 焊接工艺参数

Tab.3 Welding process parameters

焊道	电流/A	电压/V	送丝速度 / (cm·min ⁻¹)	焊接速度 / (cm·min ⁻¹)	热输入 / (kJ·mm ⁻¹)
根焊	173~240	18~25	885~1 100	62~74	0.37~0.42
热焊	70~254	22~27	882~1 100	47~64	0.50~0.62
充填	142~256	19~27	765~1 100	33~51	0.52~0.78
盖面	109~165	19~26	540~726	41~60	0.33~0.41

1.2 试验设计

本次试验在工程常用的 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和系列温度 ($20, 0, -10, -20, -40, -60, -80\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下进行实芯焊丝自动焊焊缝金属冲击韧性测试, 试验方法按照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》, 试验结果的评定和处理依据 GB/T 19748—2019《金属材料 夏比 V 型缺口摆锤冲击试验 仪器化试验方法》执行。

2 结果分析

2.1 曲线特征值确定

仪器化冲击载荷位移测试数据复杂, 且绘制的曲线形态变化较大, 难以用确定的函数形式进行拟合, 但曲线拟合仅需要消除动态测试数据的波动, 这种情况适合平滑与滤波的数据处理方法。移动平均法^[12-13]符合曲线数据处理功能需求, 拟合结果见图2。

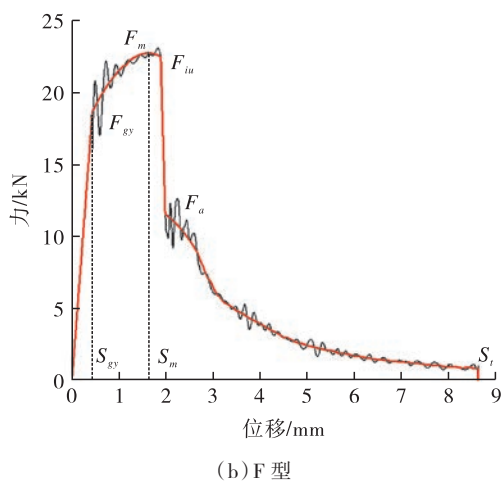
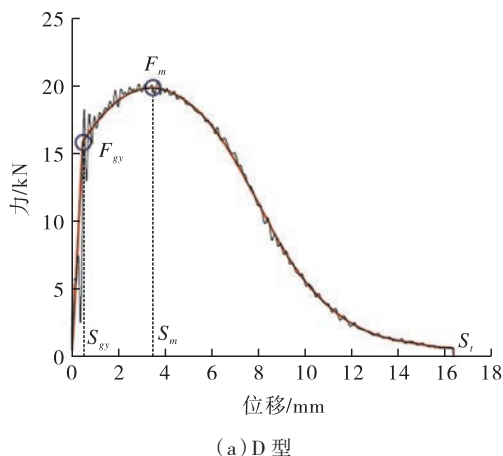


图2 曲线特征值拟合结果

Fig.2 The result of fitting the eigenvalues of the curve

载荷位移曲线特征值拟合后, 依据标准 GB/T 19748—2019 中曲线特征值确定方法: 屈服

力选择载荷位移曲线上第2个峰急剧上升部分与拟合曲线的交点, 确定动态屈服应力 F_{gy} ; 最大力为穿过振荡曲线的拟合曲线上最大值所对应的力, 即 F_m ; 当试验力达到最大力 F_m 时, 裂纹产生, 力-位移曲线下从 $S=0$ 到 $S=S_m$ 的面积为裂纹形成能量 W_i ; 力-位移曲线下从 $S=0$ 到 $S=S_f$ 的面积为总冲击吸收能量 W_t ; 裂纹扩展吸收能量 $W_p = W_t - W_i$ 。

2.2 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的冲击试验结果分析

按照第2.1节相关数据处理方法, 获取试样的 W_i 和 W_t 数值并绘图, 分别如图3、图4所示。测试结果: W_i 的范围为 $34\sim 60\text{ J}$, 波动幅值为 26 J , W_t 的范围为 $128\sim 195\text{ J}$, 波动幅值为 67 J (见图3), 可见 W_t 的数据波动明显高于 W_i ; 能量分配方面, W_i 占 W_t 的比例约为 29.4% , 可见 W_i 数据波动主要是 W_p 波动较大引起的 (见图4)。

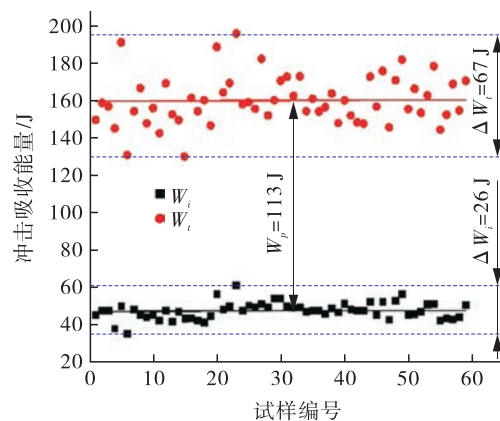


图3 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 总冲击吸收能量与裂纹形成能量

Fig.3 Total impact energy and crack formation energy at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

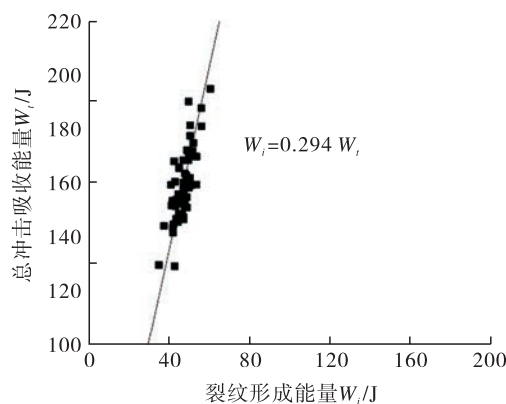


图4 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 裂纹形成能量占比

Fig.4 Percentage of crack formation energy distribution at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.3 系列温度试验结果分析

温度降低会造成金属中位错的滑移更加困难, 致使焊缝金属的屈服点升高, 其塑性变形能

力逐渐降低,从而增加了材料的脆化倾向,出现了失稳扩展过程,导致 S_i 减小。图5示出系列温度测试条件下获得的典型载荷 - 位移曲线。可以看出,当试验温度降低到 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,焊缝金属的 F_{gy} 和 F_m 开始增大;当试验温度降低到 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 时,焊缝金属的 F_{gy} 和 F_m 显著增大;当试验温度不高于 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 时, S_i 显著减小。另外,随温度降低,载荷 - 位移曲线形态发生改变, $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 试验温度下,载荷 - 位移曲线为转变过渡型曲线(D型),冲击试验过程包含稳定和非稳定裂纹扩展过程,且载荷明显升高、位移减小。 $-40, -20, 0, 20\text{ }^\circ\text{C}$ 试验温度条件下,载荷 - 位移曲线均为上平台曲线(F型),冲击试验曲线包含了弹性段、屈服段、应变强化段,载荷达到最大值 F_m 后裂纹稳定扩展,载荷持续下跌,最终断口100%呈现韧性,试验过程中只有稳定裂纹扩展发生。

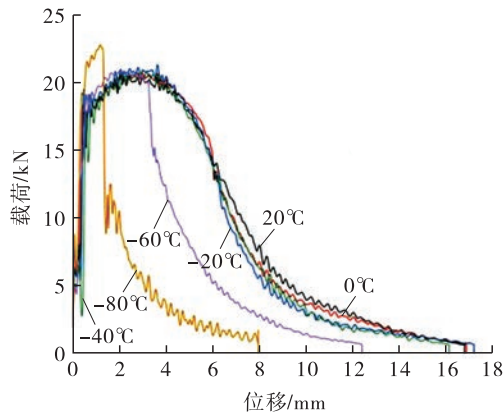


图5 系列试验温度下载荷 - 位移曲线

Fig.5 Load - displacement curves at series test temperatures

采用 Boltzmann 函数^[14]对数据进行拟合,拟合结果如图6、图7所示。

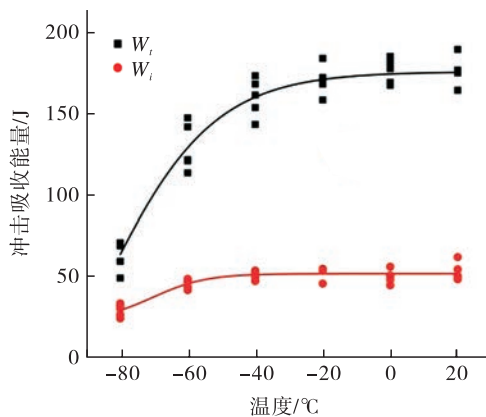


图6 系列温度下冲击吸收能量

Fig.6 Impact absorbs energy at series test temperatures

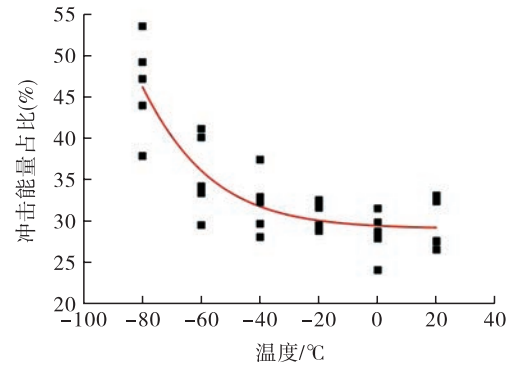


图7 系列温度下裂纹形成能量占比

Fig.7 Crack formation energy ratio at series test temperatures

从图6可以看出,随着试验温度的升高, W_i 曲线具有明显的上平台趋势,在 $-20\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内表现出温度无关性;与 W_i 曲线类似, W_p 曲线也具有明显的上平台趋势,在 $-40\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内表现出温度无关性。显然,相比 W_i 曲线, W_p 曲线的温度无关性更为明显,下限值达到了 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 。另外, W_i 波动幅值为 97 J ($63\sim 160\text{ J}$), W_p 波动幅值为 21 J ($29\sim 50\text{ J}$),与 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 测试结果趋势一致, W_i 波动大于 W_p 。

从图7中可以看出,随着温度的升高, W_i 在 W_i 中的占比非线性下降,且在 $-20\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内拟合曲线具有下平台特征,而图6显示 W_i 在 $-40\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内表现出温度无关性特征,可见,在 $-40\sim -20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, W_i 的温度相关性是由 W_p 作用的结果;在 $-80\sim -40\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内, W_i 的温度相关性是由 W_i 和 W_p 共同作用的结果,其中 W_p 起主要作用。

W_i 表征了初始裂纹形成的难易程度,目前工程用韧性指标仅要求最低 W_i ,如仅依据上平台温度试验结果制定验收指标,则 W_i 较低,此做法可能不利于对焊缝金属裂纹萌生的控制。

2.4 断口分析

试验后,选取各试验温度下典型断口进行了宏观和微观观察,其结果分别如图8、图9所示。可以看出, $-40\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内主要为韧窝断口特征(见图9(c)),也就是说,此温度范围内缺口尖端不满足解理条件; $-60\sim -80\text{ }^\circ\text{C}$ 试样在最大力后出现了解理断裂(见图9(a))和准解理断裂(见图9(b))断口特征,主要原因是低温条件下材料屈服强度提高、缺口尖端三向应力升高,材料塑性变形约束提高,导致材料机体夹杂物敏感性提高,裂纹萌发源的数量大大增加,从而形成了更多微裂纹,促使解理断裂发生。但随着裂纹扩展,试

样有效厚度减小后,裂尖拘束度降低,断口又呈现出以韧窝断裂形式为主的特征。

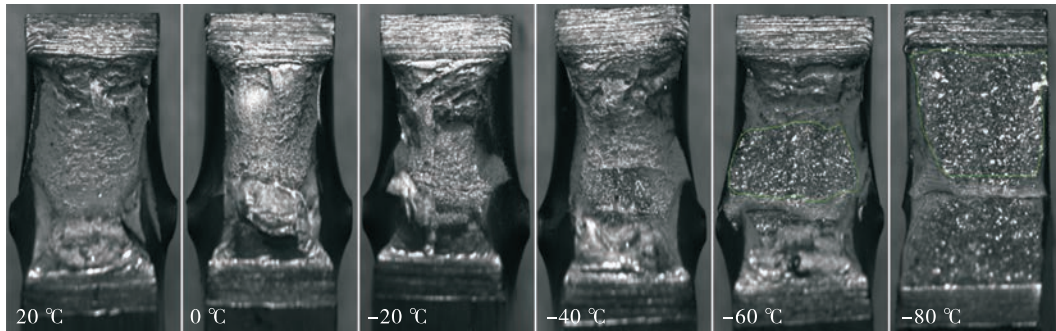
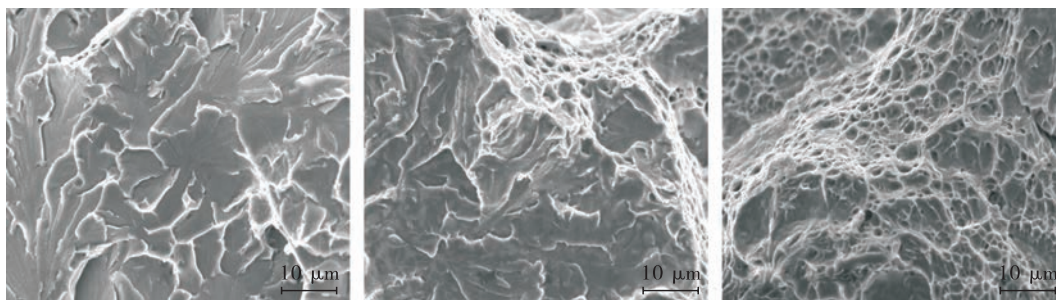


图8 系列试验温度典型宏观断口示意

Fig.8 Typical macroscopic fractures at series test temperatures



(a) 解理断裂

(b) 准解理断裂

(c) 韧窝断裂

图9 系列试验温度下典型断口微观形貌

Fig.9 Microscopic areas of typical fractures at series test temperatures

仪器化冲击试验是对传统冲击试验的补充和扩展,可在夏比冲击试验基础上进一步确定材料 W_i 的能量分配情况,量化 W_i 和 W_p ,解决传统的依靠剪切断面率判断材料韧性方法受观测者主观因素影响较大的问题,对于高钢级管道韧性指标控制和环焊工艺优化具有重要的技术支撑作用。

3 结论

(1) X80级实芯焊丝自动焊工艺焊缝金属冲击韧性良好,焊缝金属的 W_i 数据波动较大,主要是由于 W_p 波动较大引起的。

(2) 获取了高钢级实芯焊丝自动焊的焊缝金属 W_i 的能量分配数据,结果表明, W_i 在 $-80\sim-20\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内,随着温度的升高,数值非线性增大,在 $-20\sim-20\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内,具有上平台特征; W_i 在 $-80\sim-40\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内,随着温度升高,数值非线性增大,在 $-40\sim-20\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内,具有上平台特征。

(3) 获取了高钢级实芯焊丝自动焊的焊缝金属冲击韧性的温度敏感性规律:随着试验温度降低,冲击载荷-位移曲线形态发生改变;载荷逐步

升高、位移减小,出现裂纹失稳和稳定裂纹扩展阶段收窄等现象;随着试验温度升高,裂纹形成能量占比表现出非线性降低特性。因此,依据上平台温度试验结果制定验收指标,可能不利于对焊缝金属裂纹萌生的控制。

(4) 在工程设计温度范围内 ($-40\sim-20\text{ }^\circ\text{C}$),长输管道焊缝金属 W_i 测试结果具有温度无关性特征,建议进一步开展相关研究,制定焊缝金属起裂韧性指标,以控制焊缝裂纹的萌生,保障油气管道运行安全。

参考文献:

- [1] 周桂娟,童志,陈晓华,等. X80管线钢焊接与焊缝开裂影响因素研究进展[J]. 材料导报,2022,36(2): 168-176.
ZHOU G J, TONG Z, CHEN X H, et al. A review on the welding of X80 pipeline steel and factors affecting weld cracking[J]. Materials Reports, 2022, 36(2): 168-176.
- [2] 刘木强,孙超,尤景泽,等. 电子背散射衍射技术在X80管线钢环焊缝塑性应变表征中的应用[J]. 压力容器,2023,40(9): 7-15.

- LIU M Q, SUN C, YOU J Z, et al. Application of electron backscatter diffraction in plastic strain characterization of X80 pipeline steel girth welds [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40 (9): 7 – 15.
- [3] 李玉坤, 杨进川, 焦守田, 等. 基于矫顽力的 X80 管道焊接残余应力测量方法研究 [J]. *压力容器*, 2022, 39 (9): 9 – 18.
- LI Y K, YANG J C, JIAO S T, et al. Study on residual stress measurement of X80 pipeline steel based on the coercive force [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2022, 39 (9): 9 – 18.
- [4] HASHEMI S H. Correction factors for safe performance of API X65 pipeline steel [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009, 86 (8): 533 – 540.
- [5] HASHEMI S H. Apportion of Charpy energy in API 5L grade X70 pipeline steel [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, 85 (12): 879 – 884.
- [6] 吴金辉, 李云龙, 李记科, 等. 夏比冲击功结合剪切面积评价管线钢管韧性的意义 [J]. *石油工业技术监督*, 2010, 26 (3): 12 – 13.
- WU J H, LI Y L, LI J K, et al. Significance of charpy impact energy combined with shear area to evaluate the toughness of pipeline steel pipes [J]. *Technology Supervision In Petroleum Industry*, 2010, 26 (3): 12 – 13.
- [7] 唐雨, 何沫, 刘畅. X80 管线钢夏比冲击功能量分配研究 [J]. *压力容器*, 2017, 34 (4): 1 – 5.
- TANG Y, HE M, LIU C. Study of charpy impact energy apportion for X80 pipeline steel [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2017, 34 (4): 1 – 5.
- [8] 蔺卫平, 仝珂, 任继承, 等. 高钢级管线钢示波冲击试验研究 [J]. *热加工工艺*, 2018, 47 (4): 93 – 95.
- LIN W P, TONG K, REN J C, et al. Study on instrument impact experiment of high grade pipeline steels [J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47 (4): 93 – 95.
- [9] 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.
- [10] 王婷, 陈健, 沙胜义, 等. X80 管线钢焊接层数对环焊缝韧性影响试验 [J]. *油气储运*, 2022, 41 (4): 404 – 410.
- WANG T, CHEN J, SHA S Y, et al. Test for effect of welding layers on girth weld toughness of X80 pipeline steel [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41 (4): 404 – 410.
- [11] 陈延清, 张建强, 牟淑坤, 等. 焊接工艺对 22 mm 壁厚 X80 管道环焊缝冲击韧性的影响 [J]. *焊管*, 2016, 39 (2): 44 – 50.
- CHEN Y Q, ZHANG J Q, MOU S K, et al. Influence of welding technology on circumferential weld impact toughness of 22 mm thickness X80 pipeline [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2016, 39 (2): 44 – 50.
- [12] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用 [J]. *火炮发射与控制学报*, 2001 (1): 21 – 23.
- PEI Y X, GUO M. The fundamental principle and application of sliding average method [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2001 (1): 21 – 23.
- [13] KOBAYASHI T. Analysis of impact properties of A533 steel for nuclear reactor pressure vessel by instrumented Charpy test [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 19 (1): 49 – 65.
- [14] 王烽, 廉晓洁. 冲击韧脆转变曲线数学模型的选择 [J]. *理化检验 (物理分册)*, 2009, 45 (10): 617 – 620.
- WANG F, LIAN X J. Selection of the mathematical model on ductile-brittle transition temperature curve of impact test [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing)*, 2009, 45 (10): 617 – 620.

作者简介: 韩涛 (1984), 男, 高级工程师, 主要从事油气管道缺陷评价等相关工作, 通信地址: 065000 河北省廊坊市金光道 44 号中国石油天然气管道科学研究院有限公司, E-mail: juyahaimin@163.com。

本文引用格式:

韩涛, 温晓峰, 刘宇, 等. X80 管线钢自动焊焊缝冲击能量分配研究 [J]. *压力容器*, 2024, 41 (6): 30 – 35.

HAN T, WEN X F, LIU Y, et al. Study of weld impact energy distribution for X80 pipe automatic welding [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2024, 41 (6): 30 – 35.