

## 四丝内焊+五丝外焊埋弧焊接头软化及其对 焊管承载能力的影响\*

刘 斌<sup>1,2</sup>, 刘 云<sup>1,2</sup>, 牛 辉<sup>1,2</sup>, 韦 奉<sup>1,2</sup>, 李 霄<sup>3</sup>

- (1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;  
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;  
3. 西安石油大学 材料科学与工程学院, 西安 710065)

**摘 要:** 为了研究 X80 钢级焊管多丝焊接头热影响区软化现象, 采用显微硬度分析了 X80 钢级直缝多丝埋弧焊管焊接接头的硬度分布规律, 对焊接接头进行硬度试验、拉伸试验及 ABAQUS 有限元模拟分析。结果表明, 热影响区存在明显的软化区, 软化程度为 14%, 拉伸过程中热影响区存在明显的应变集中情况, 最终在热影响区发生断裂; 随着软化区宽度增大, 焊管承压能力下降, 但是当软化宽度为 20 mm 时, 仍未达到承载极限; 在实际软化宽度情况下, 软化程度增加至 50% 仍未达到软化区屈服强度。采用本研究中四丝内焊+五丝外焊工艺焊接的接头虽然存在明显软化, 但其承载能力仍然远高于工作压力, 不影响管段的承载能力。

**关键词:** X80; 焊接; 热影响区; 软化; 承载能力

中图分类号: TG445

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2021.12.001

### Softening of Four Wire Internal Welding + Five Wire External Welding Submerged Arc Welding Joint and its Effect on Bearing Capacity of Welded Pipe

LIU Bin<sup>1,2</sup>, LIU Yun<sup>1,2</sup>, NIU Hui<sup>1,2</sup>, WEI Feng<sup>1,2</sup>, LI Xiao<sup>3</sup>

(1. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the softening phenomenon of heat affected zone of X80 steel grade welded pipe multi wire welded joint, the hardness distribution law of X80 steel grade longitudinal pipe multi wire submerged arc welded pipe welded joint was analyzed by microhardness. The hardness test, tensile test and ABAQUS finite element simulation analysis were carried out on the welded joint. The results show that there is an obvious softening zone in the heat affected zone, and the softening degree is 14%. There is an obvious strain concentration in the heat affected zone during the tensile process, and finally fracture occurs in the heat affected zone. With the increase of softening zone width, the bearing capacity of welded pipe decreases, but when the softening width is 20 mm, it still does not reach the bearing limit. In the case of actual softening width, the softening degree increases to 50% and still does not reach the yield strength of softening zone. Although the joint welded by the four wire internal welding + five wire external welding process in this study has obvious softening, its bearing capacity is still much higher than the working pressure, which does not affect the bearing capacity of the pipe section.

**Key words:** X80; welding; heat affected zone; softening; bearing capacity

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目“高应变海洋管线管研制”(项目编号 2018YFC0310300)。

## 0 前 言

高钢级管线钢为热机械轧制钢, 由于采用了控制轧制、加速冷却等工艺, 使其具有高密度位错和亚结构、细晶强化、析出相强化及位错强化机制的良好强韧性<sup>[1]</sup>。然而热机械轧制钢对后续加工过程的热量特别敏感, 特别是焊接过程的热输入。由于焊接热量的输入, 热影响区中某些区域的峰值温度一定会超过奥氏体化温度, 发生低温组织向奥氏体的相变, 在随后的冷却过程中奥氏体又重新转变为低温组织, 在这个过程中没有控制轧制、加速冷却的作用, 获得的组织一般为贝氏体、准多边形铁素体、多边形铁素体及 M-A 等。同时由于回复再结晶等因素的作用, 使得热影响区的晶粒变得粗大, 晶内的位错密度降低, 从而导致热影响区软化<sup>[2-5]</sup>。X70、X80、X90 钢级管线钢均出现了明显的软化现象<sup>[6-8]</sup>, 而且近些年, 国内外也出现了多起因软化区强度变低而导致局部应变集中并引起管线断裂的案例<sup>[6]</sup>。X80 钢级管材是我国大输量、高压输气管道的首选钢级<sup>[9-10]</sup>, 因此对 X80 管线钢的软化问题进行深入研究, 对确保管道的安全有重要意义。本研究对 X80 钢级焊管多丝焊接头热影响区软化现象进行了分析, 以期能为工程设计提供理论依据。

## 1 试验材料及方法

本研究采用 X80 钢级  $\Phi 1\ 422\ \text{mm} \times 38.5\ \text{mm}$  规格焊管, 管段长度为 500 mm, 焊接工艺为内焊四丝+外焊五丝的埋弧焊, 坡口为带有钝边的 X 型坡口, 实际的焊接接头尺寸如图 1 所示。

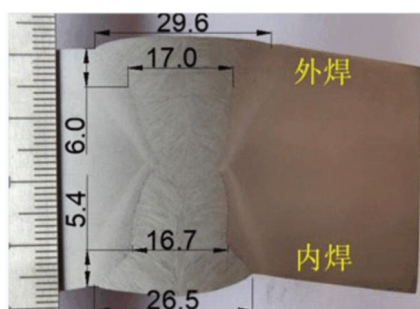


图 1 实际焊接接头尺寸示意图

焊接接头经过砂纸打磨、抛光、腐蚀后, 根据 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》和 GB/T 4340—2009《金属材料维氏硬度试验》使用 HVST-1000ZA 显微硬度计对焊接接头进行硬度测量, 测量点间隔 1 mm, 载荷为 200 g, 保载时间为 15 s。

根据 GB/T 228—2010《金属材料拉伸试验》制备拉伸试样, 试样加工尺寸及取样位置如图 2 及图 3 所示。在 MTS model64 型万能材料试验机进行室温拉伸试验, 加载速率为 0.5 mm/min。从 X80 管线钢焊接接头部位取样, 展平后制成拉伸试样, 采用 ARAMIS 设备利用数字散斑相关技术 (digital image correlation, DIC) 对拉伸过程厚度方向的变形行为进行监测, 试验前在待监测表面喷上黑白斑点, 图像采集速度设置为 0.5 s/张。

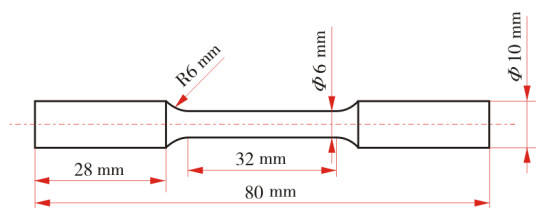
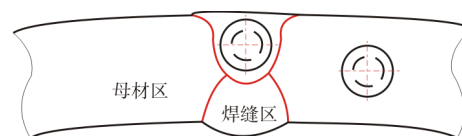
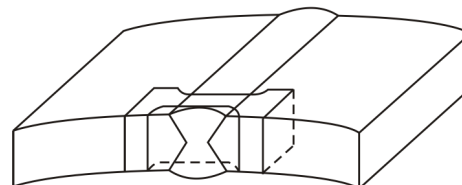


图 2 拉伸试样尺寸示意图



(a) 母材及焊缝的取样位置



(b) 焊接接头的取样位置

图 3 拉伸试样的取样位置示意图

采用 ABAQUS 有限元软件对多丝埋弧焊接头进行数值模拟分析, 结果如图 4 所示。由于直缝管段具有对称性, 因此建立 1/2 管段模型, 如图 4 (a) 所示, 图中红色为焊缝区、黄色为热影响区、蓝色为母材区。按照实际焊接接头尺寸设置外焊缝宽度为 14.8 mm, 内焊缝宽度为 13.3 mm, 热影响区宽度为 6.8 mm, 内外焊道为 1.5 mm。通过拉伸试验确定母材及焊缝的强度及伸长率,

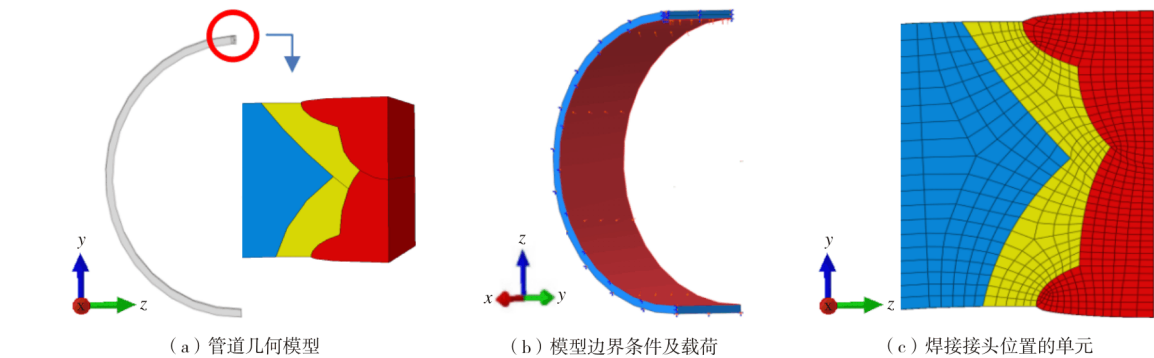


图 4 多丝埋弧焊接头的数值模拟分析

热影响区的性能根据硬度分布规律，以母材强度为基础进行折算，密度、弹性模量、泊松比采用一般钢材的参数，见表 1。

表 1 X80 管线钢的基本材料参数

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比
$7.85\times10^{-6}$	$2.06\times10^5$	0.3

根据模型的对称性，分别在  $xoz$  平面、 $yo z$  平面设置对称边界条件，同时在管段最下部外表面上的节点设置  $z$  向固定约束，并在管段内表面施加不同程度内压，如图 4 (b) 所示。采用 C3D8R 网格类型对模型进行网格划分，单元尺寸为 1~2 mm，由于焊趾部位应力集中程度严重，对焊趾部位网格尺寸进行细化，尺寸设置为 0.8 mm，如图 4 (c) 所示。

2 结果分析与讨论

2.1 母材及焊接接头力学性能分析

通过显微硬度分析了五丝+四丝埋弧焊接头内表面的硬度变化，硬度分布规律如图 5 所示。

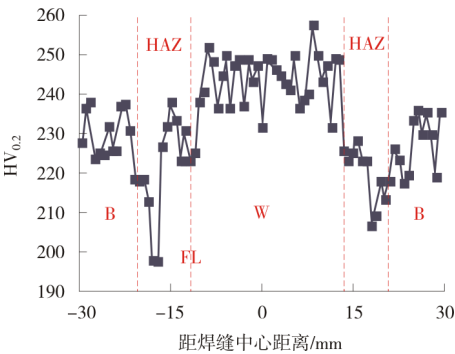


图 5 五丝+四丝的埋弧焊接头内表面的硬度分布

从图 5 可以看出，整个焊接接头的硬度分布不均匀，硬度变化呈现“W”形。其中焊缝区 (W) 硬度高且分布均匀，平均硬度值为 245HV<sub>0.2</sub>；母材 (B) 硬度在 230HV<sub>0.2</sub> 左右；热影响区 (HAZ) 硬度变化范围为 197HV<sub>0.2</sub>~240HV<sub>0.2</sub>，而距离熔合线 (FL) 约 6.8 mm 左右的区域，硬度较于母材下降了 14%，出现了较为明显的软化现象。材料及模型的力学性能见表 2 及表 3。

表 2 X80 管线钢力学性能参数

材料	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	均匀伸长率/%
母材(横向)	701	730	5.7
焊缝(横向)	777	809	5.1

表 3 模型中接头各区域材料的性能

区域	HV <sub>0.2</sub>	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	均匀伸长率/ %
母材	230	709	790	5.7
焊缝区	255	786	876	5.1
热影响区	197	608	677	6.5

2.2 软化对焊接接头单向拉伸过程中应变分布规律的影响

利用 DIC 技术对焊接接头拉伸过程进行应变测试，应变分布如图 6 所示。弹性变形阶段的应变分布如图 6 (a) 所示，此时试样的应变基本均匀，且在整个弹性阶段中应变分布规律变化不大，并没有出现明显的应变集中。试样屈服后某一时刻的应变分布如图 6 (b) 所示，此时拉伸应变集中于软化区，焊接热影响区的应变最高值为 11.2%，而母材及焊缝中的应变明显低于该水平。随着应变水平的进一步提高，应变集中程

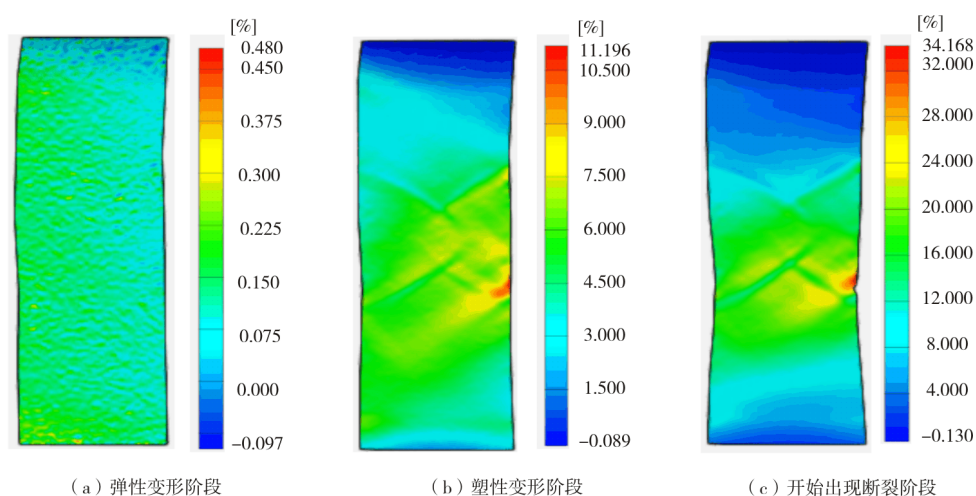


图 6 焊接接头拉伸时的应变分布

度也进一步加剧，导致颈缩出现在接头下部，并且在软化区发生开裂，如图 6 (c) 所示，进而发展到整个试样的断裂。最终测得接头抗拉强度为 675 MPa，由于软化区的存在使得接头的强度相较于母材的抗拉强度降低了 7.5%。

### 2.3 软化对焊管内压承载能力的影响

为探究软化对直焊缝接头承载能力的影响，设置软化区宽度分别为 3 mm、6.8 mm (实际焊接接头软化区宽度)、20 mm，以工作

应力达到材料的屈服强度为判据。图 7 所示为软化区宽度分别为 3 mm、6.8 mm、20 mm 时管段接头的等效力分布状态，管段接头整体应力水平均在 194 MPa 左右，3 种软化宽度下应力分布差别主要在焊接接头内外焊趾部位。3 种软化宽度下接头应力分布规律较为一致，均为管内外焊趾部位有少量应力集中。通过对比可以发现，软化区宽度的增加使得管内焊趾部位应力集中进一步加大。

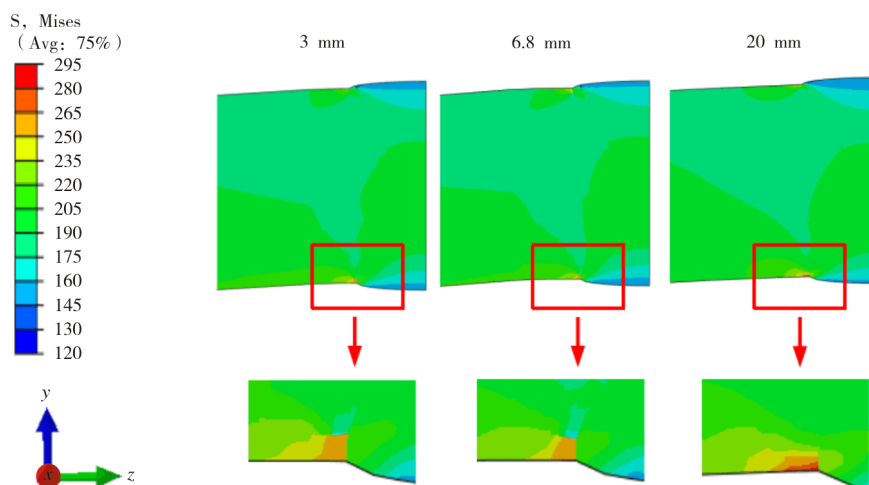


图 7 不同软化区宽度下接头局部的应力分布

图 8 所示为不同软化区宽度对焊管内外焊趾部位的等效力水平的影响，可以看出，随着软化宽度的增加，管内外焊趾部位等效力均呈现增加趋势，且管内焊趾部位应力增加的幅度更大。随着软化宽度的增大，管道承载能力下降，当软化宽度为 20 mm 时，管内外焊趾部位应力

仍在材料的屈服强度以内。

为分析软化程度对焊缝软化区承载能力的影响，软化程度分别设置为 5%、14% (实际软化程度)、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45% 及 50%。热影响区材料属性根据母材的硬度、强度及均匀伸长率进行折算，如软化程度为 5%



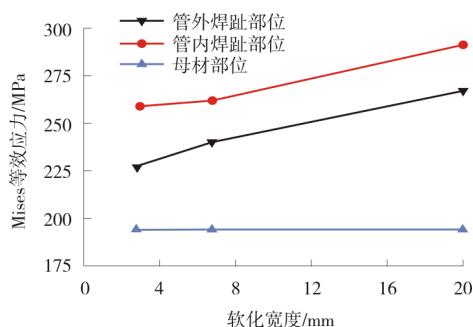


图 8 软化区宽度对焊趾处应力水平的影响

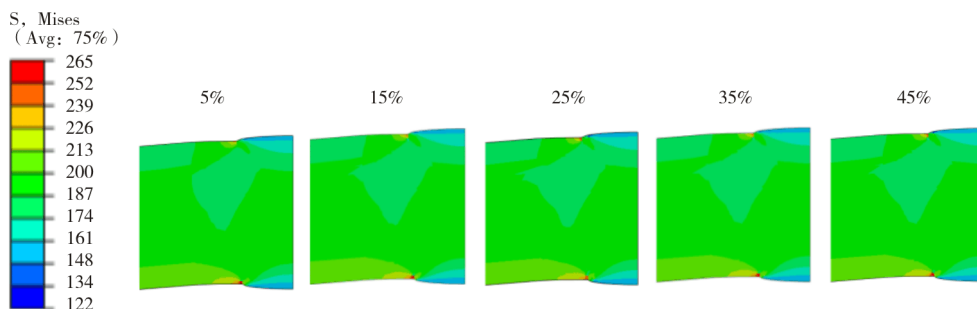


图 9 不同软化程度下接头局部应力分布

图 10 为不同软化程度下管段焊接接头内外焊趾部位应力分布关系, 总体上随着软化程度的增加, 管内焊趾部位等效应力有轻微的减小, 管外焊趾部位等效应力呈现小幅增加的趋势, 管内外焊趾均未达到材料的屈服强度。

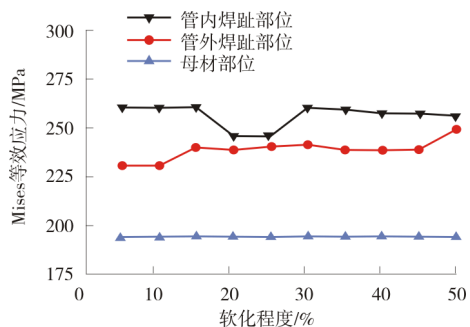
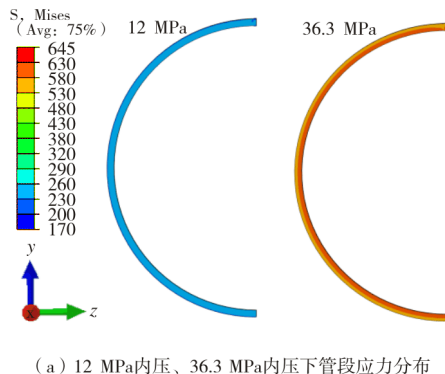


图 10 不同软化程度对应的焊趾部位应力关系

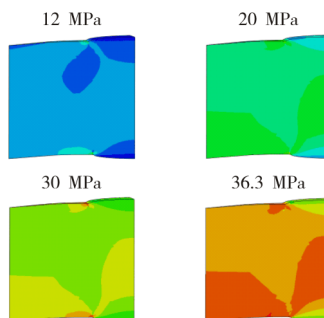


(a) 12 MPa 内压、36.3 MPa 内压下管段应力分布

时, 取母材强度的 95% 作为热影响区的强度, 取母材伸长率的 105% 作为软化区的伸长率, 以此类推建立其他软化程度的强度及塑性指标。

图 9 所示为软化程度为 5%、15%、25%、35% 及 45% 下接头局部应力分布状态, 总体来看, 焊接接头应力分布规律相差不大, 均为管内外焊趾部位有少量的应力集中。对比可以发现, 管外焊趾部位应力集中有增加的趋势, 而管内焊趾部位应力集中程度变化不明显。

焊管承载能力分析结果如图 11 所示, 其中图 11 (a) 为 12 MPa、36.3 MPa 内压下管段的应力分布, 可以看出实际工况 12 MPa 内压下管段母材应力水平约 194 MPa, 接头局部有应力不均匀的现象; 内压增加到 36.3 MPa 时, 内焊、外焊焊趾部位等效应力分别为 640 MPa 和 609 MPa, 已经达到软化区材料屈服强度。分别在 12 MPa、20 MPa、30 MPa、36.3 MPa 内压时对管道接头局部的应力分布进行分析, 结果如图 11 (b) 所示, 可以看出, 12 MPa 内压下焊趾部位有少量的应力集中; 20 MPa 时管道接头整体应力水平提高; 管内压力继续增大到 30 MPa 时, 焊趾部位出现明显应力集中, 其中内焊焊趾部位的应力集中程度远高于外焊焊趾部位。所以,



(b) 不同内压下接头局部应力分布

图 11 不同内压下焊接接头管段的应力分布

虽然采用本研究焊接工艺焊接的接头存在明显软化,但其承载能力仍然远高于 12 MPa 的工作压力,不影响管段的承载能力。

### 3 结 论

(1) 焊接接头硬度分析结果显示,在距离焊缝熔合线 6.8 mm 左右的区域,硬度较母材下降了 14%,该区域出现了较为明显的软化现象。焊接接头拉伸过程 DIC 检测结果显示,焊接热影响区的软化区出现明显的应变集中,且最早出现开裂。

(2) 随着焊接接头软化宽度的增加,管内外焊趾部位等效应力均增加,且管内焊趾部位应力增加的幅度更大。但是,当软化宽度达到 20 mm 时,在 12 MPa 内压作用下软化区的应力水平仍未达到其屈服强度。

(3) 随着接头软化程度的增加,在 12 MPa 内压作用下,焊管内焊趾部位等效应力基本保持不变,焊管外焊趾部位应力呈现增加趋势,但均未达到材料的屈服强度。

(4) 采用本研究焊接工艺焊接的接头虽然存在明显软化,但预测承载能力为 36.3 MPa,远高于 12 MPa 的工作压力,不影响焊管的承载能力。

### 参考文献:

- [1] 卢敏,周晓光,刘振宇,等. 冷却工艺对 X80 级抗大变形管线钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报,2011,32(7):83-89.
- [2] 陈延清,杜则裕,许良红. X80 管线钢焊接热影响区组织和性能分析[J]. 焊接学报,2010,31(5):101-104,118.
- [3] 陈小伟,王旭,王立柱,等. X80 管线钢焊接热影响区软化问题研究[J]. 焊管,2017,40(6):1-8.
- [4] 牛靖,张恩涛,吕玉海,等. X70 大变形管环焊接头及断裂机制研究[J]. 精密成形工程,2020,12(1):86-91.
- [5] 周勇,冯雪楠,毕宗岳,等. 低碳微合金管材 TIG 焊热影响区软化成因分析[J]. 材料导报,2019,33(S1):428-431.
- [6] 牛靖,陈宏远,刘甲,等. X70 大变形钢焊接接头热影响区软化及其影响研究[J]. 热加工工艺,2016(21):176-179.
- [7] 冯耀荣,吉玲康,李为卫,等. 中国 X80 管线钢和钢管研发应用进展及展望[J]. 油气储运,2020,39(6):612-622.
- [8] 谷雨,周小宇,徐凯,等. 高强 X90 管线钢焊接热影响区脆化及软化行为[J]. 金属热处理,2018,43(6):74-78.
- [9] 李鹤林,吉玲康,田伟. 高钢级钢管和高压输送:我国油气输送管道的重大技术进步[J]. 中国工程科学,2010,12(5):84-90.
- [10] 王晓香. 关于管线钢管技术的若干热点问题[J]. 焊管,2019,42(1):1-9,16.

作者简介: 刘 斌 (1984—), 男, 硕士, 主要从事高钢级大直径埋弧焊管焊接工艺研究及产品开发工作。

收稿日期: 2021-07-29

编辑: 袁雪婷

## 欢迎订阅 2022 年《焊管》期刊

《焊管》期刊创刊于1978年,是我国焊管行业国内外公开发行的技术期刊,是陕西省优秀科技期刊;中国核心期刊(遴选)数据库、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊;《中国期刊全文数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国石油文摘》等多家著名数据库收录期刊。《焊管》期刊始终以为我国焊管行业的科技进步服务为办刊方针,以传播科技知识、交流科研成果和先进技术经验为目的,主要报道与焊管生产有关的新材料的开发应用、成型工艺与设备、焊接工艺与设备、无损检测技术、自动控制技术、防腐工艺与设备、管道设计与施工等方面的技术信息与技术成果。

《焊管》期刊为月刊,大16开本,全彩印刷,每月28日出版,刊登彩色广告。国内统一连续出版物号:CN 61—1160/TE;国际标准连续出版物号:ISSN 1001—3938。邮发代号:52—89,每期定价18元,全国各地邮局均可订阅。如因故漏订,可直接与《焊管》期刊社联系补订。

欢迎访问《焊管》期刊网站,投稿网址: <http://www.hgqks.com>。

E-mail: hgqks@vip.163.com 编辑部电话: (0917) 3398448 3398447