

316L/X60 复合板焊接工艺、组织特征 及腐蚀性能研究 *

刘海璋^{1,2}, 毕宗岳^{1,2}, 杨 军^{1,2}, 张万鹏^{1,2}, 杨耀彬^{1,2}

(1. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008;

2. 宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 采用夏比冲击、拉伸、正反弯曲、金相和腐蚀试验研究了 316L 不锈钢/X60 管线钢复合板对接焊缝的性能。结果表明, 该冶金复合板对接焊缝强度达到 523 MPa, 0 °C 冲击韧性为 128 J, 其他力学性能也达到相关标准要求; 焊缝晶间腐蚀试验和 HIC 试验均未见裂纹, 焊缝对晶间腐蚀和氢致裂纹不敏感; 管线钢侧焊缝区组织特征为先共析铁素体+针状铁素体, ER309M 不锈钢填充过渡区及复层 316L 不锈钢侧填充区组织均为奥氏体+铁素体。

关键词: 焊管; 316L/X60 复合板; 过渡层; TIG 焊; MAG 焊

中图分类号: TG407

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2014)12-0005-05

Research on Welding Process, Microstructure Characteristics and Corrosion Property of 316L/X60 Clad Plates

LIU Haizhang^{1,2}, BI Zongyue^{1,2}, YANG Jun^{1,2}, ZHANG Wanpeng^{1,2}, YANG Yaobin^{1,2}

(1. National Engineering Technology Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods, Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Steel Pipe Research Institute of Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China)

Abstract: The properties of clad plate butt weld of 316L stainless steel and X60 pipeline steel were investigated by V-notch Charpy impact toughness test, tensile test, bending test, metallographic test and corrosion test. The results indicated that the weld strength of the above metallurgy composite plate reaches 523 MPa, the impact toughness is 128 J at 0 °C, other mechanical properties are also meet the requirements of relevant standards; No cracks appear in weld intergranular corrosion test and HIC test, it shows that the weld is not sensitive to intergranular corrosion and HIC; The side weld area of pipeline steel structure characteristics of proeutectoid ferrite + acicular ferrite, ER309M stainless steel filling transition zone and cladding 316L stainless steel side filling area organization are all austenite and ferrite.

Key words: welded pipe; 316L/X60 clad plate; transition layer; TIG welding; MAG welding

0 前 言

随着油气资源向着深海、沙漠、南北极地区等含有较高 H₂S, CO₂ 和 CL 等强腐蚀介质环境方向发展, 油气输送管道大量采用高耐蚀合金会

造成生产成本增加以及耐蚀合金材料的浪费。双金属复合管综合了耐蚀材料的抗腐蚀性能和碳钢材料良好的力学性能, 可以达到与内衬耐蚀合金管材相当的性能, 提高了管道安全级别, 延长了管道寿命, 是一种适应油气田防腐需要的新型管

* 基金项目: 国家“863”计划项目课题: 双金属层状结构复合管材技术研究(2013AA031303)。

材,因而广泛应用于石油、化工、医药、建筑、输酸管道、压力容器和水利等领域^[1-4]。

双金属复合钢板由复层(不锈钢)和基层(碳钢、低合金钢等)组成。不锈钢复合钢板的焊接不仅包括基层和复层的焊接,而且在基层和复层焊缝的交界处还需进行过渡层焊接。过渡层的作用是防止基层焊缝、母材对复层 Cr, Ni 元素的稀释,补偿由于稀释所造成不锈钢焊缝合金元素降低,确保复层焊缝化学成分与不锈钢母材化学成分保持一致,使焊缝合金成分能保持相应水平^[5-8]。因此,过渡层焊材的 Cr 和 Ni 含量较高,在相组成上还应确保稀释后的焊缝保持奥氏体与铁素体的双相组织特征。为了使过渡层具有良好的抗裂性及韧性,还要求铁素体含量在 5%~10%之间。但应指出,随着过渡层焊缝中铁素体含量的增加,其耐均匀腐蚀能力相应减弱。焊接中,为保证焊缝合金成分与母材一致,具有足够的 Cr 和 Ni 含量,在焊材选择上偏向于 Cr 和 Ni 含量较高、抗稀释性较好的不锈钢焊丝。一般来说,希望得到的焊缝组织特征为 γ +(4%~10%) δ 铁素体双相组织。焊缝中 4%~10%的 δ 铁素体对提高抗热裂纹及抗晶间腐蚀性能有显著功效,但其含量不能太多,否则会在高温下转变生成 σ 脆性相,严重降低焊缝的抗裂性和抗晶间腐蚀性能^[9-11]。

双金属复合管的生产工艺主要有机械结合和冶金结合两种^[12-15],冶金结合复合管的生产是先将两种不同材质的板坯用超大功率热轧机进行热轧复合,然后卷成管坯,再进行纵缝焊接。本研究进行了 316L/X60 复合管焊接工艺的研究开发工作,为管道防腐工业提供新的技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为 X60 钢和 316L 不锈钢复合钢板,复合板厚度为 10 mm(碳钢)+1 mm(不锈钢),化学成分见表 1。

为了提高基层管线钢焊缝韧性,X60 管线钢的焊接选用 H08Mn2SiA ϕ 1.2 mm 的气保焊丝,采用 MAG 焊。复层 316L 不锈钢的焊接则选用 ER316L ϕ 1.2 mm 的气保焊丝。过渡层材料确定为 ER309M ϕ 1.2 mm 不锈钢气保焊丝。过渡层和复层采用 TIG 焊接。焊接坡口设计如图 1 所示,焊材具体牌号、规格及焊接参数见表 2。

表 1 316L/X60 复合板化学成分 %

钢级	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)
X60	0.046	0.178	1.26	0.009
316L	0.016	0.33	1.34	0.024 4
钢级	w(S)	w(Ni)	w(Cr)	w(Mo)
X60	0.003	0.015	0.018	0.008
316L	0.001	12.6	16.5	2.36

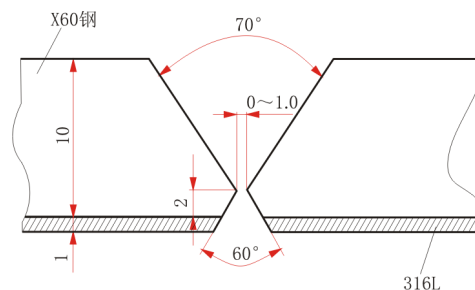


图 1 焊接坡口设计示意图

表 2 焊接材料牌号、规格及焊接参数

焊接位置	焊接方法	焊接牌号	规格/mm	焊接工艺参数				
				电流/A	电压/V	焊速/(mm/min)	气体流量/(L/min)	摆动宽度/mm
复层	TIG 焊	ER316 (H00Cr19Ni12Mo)	ϕ 1.2	125	10	100	20	7.5
过渡层	TIG 焊	ER309M(H1Cr24Ni13)	ϕ 1.2	230	10	200	20	0
基层	MAG 焊	H08Mn2SiA	ϕ 1.2	160~270	23	50~160	20	0~18

1.2 试验方法

焊接接头依据 GB/T 13148—2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》进行性能检测和评价。拉伸试验在 WAW-2000 型微机控制电液伺服万能材料试验机上进行,垂直于补焊焊缝取横向板状拉伸试样,试样标距内宽 38.1 mm,标距段长 50 mm,

厚度 18.4 mm。弯曲试验在 CSS-88100 万能材料试验机上进行,加载方向垂直于焊缝,加载速度为 1 mm/min。冲击试验按照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》,采用 10 mm×10 mm×55 mm 夏比 V 形缺口冲击试样,V 形缺口夹角 45°,在 NAI500F 摆锤式冲击试验机上进

行。低温控温介质采用无水乙醇和液氮混合物，试样在规定温度溶液中保温 15 min 以上，以保证试样表面与内部温度一致，用低温热电偶测量温度，试验温度为 0℃。采用 Leica DMI5000M 金相显微镜对原料复合板、焊缝处基层、复层及过渡层进行观察。

焊接接头耐腐蚀性试验按 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》进行，HIC 试验按照 NACE TM0284—96《管线钢和压力容器钢抗氢致裂纹评估》进行，选用 A 溶液，H₂S 和 CO₂ 分压均为 0.034 5 MPa，Cl 浓度≤5% 进行检测试验。

2 试验结果及分析

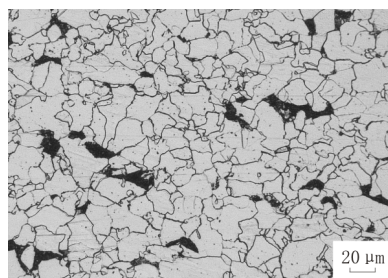
2.1 焊接接头力学性能

焊接接头抗拉强度、弯曲性能及焊缝中心和热影响区冲击试验结果见表 3~表 5。从试验结果看，焊接接头各项力学性能指标均满足 GB/T 13148—2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》；正反弯曲角度达到 180°，拉伸面无裂纹，说明焊接接头的塑韧性（即变形能力）完全满足标准要求，且弯曲性能优良。焊缝中心和热影响区在 0℃下

的冲击功均达到标准要求，确保焊缝具有良好的低温韧性。

2.2 微观组织分析

图 2 是复合板基层 X60 管线钢和 316L 不锈钢复层的微观组织。由图 2 可以看到，基层 X60 管线钢为铁素体+珠光体组织，复层 316L 不锈钢的组织特征为奥氏体。



(a) X60



(b) 316L

图 2 316L/X60 复合板金相照片

表 3 焊接接头拉伸性能

试样编号	取样位置	R_m /MPa	断口位置	检测结果
F-X-1	焊缝横向	525	母材	合格
F-X-2		530		合格
F-X-3		515		合格

表 4 焊接接头弯曲性能

试样编号	取样方向	弯曲方向	弯曲直径/mm	弯曲角度/(°)	检测结果
F-X-1	焊缝 横向	正弯	45	180	合格
F-X-2					
F-X-3		反弯	45	180	
F-X-4					

表 5 0℃焊缝冲击韧性

试样编号	取样位置	冲击功单值/J	冲击功平均值/J
F-X-1	焊缝中心	127	128
F-X-2		134	
F-X-3		122	
F-X-1	热影响区	105	108
F-X-2		111	
F-X-3		108	

复合板焊接接头处微观组织如图 3 所示。在图 3(a)中，黑色区域为过渡层和复层区域，由于腐蚀液对过渡层和不锈钢层的腐蚀作用较弱，组织特征不明显，仍然保留了较为光洁的表面，在光镜观察下呈现黑色。另外，为保证焊缝各项性能，基层钢和不锈钢采用了分开施焊，在完成基层管线钢的焊接后再进行过渡层和不锈钢复层的焊接。图 3(b)为 X60 管线钢的焊缝区组织，为先共析铁素体+针状铁素体。图 3(c)为焊缝区基层钢和过渡层 ER309M 不锈钢的过渡界面。过渡区组织特征见图 3(d)，为奥氏体+少量铁素体组织，铁素体呈骨架状或蠕虫状分布于奥氏体晶界，有阻隔晶界通道并延伸通道长度的作用，对减少晶间腐蚀是有效的，并有利于提高焊缝的抗热裂性能^[6]。图 3(e)为焊缝处复层 316L 不锈钢焊接区的微观组织，其仍为奥氏体+少量铁素体，此种组织特征在提高焊缝抗晶间腐蚀能力和热裂能力方面作用显著。

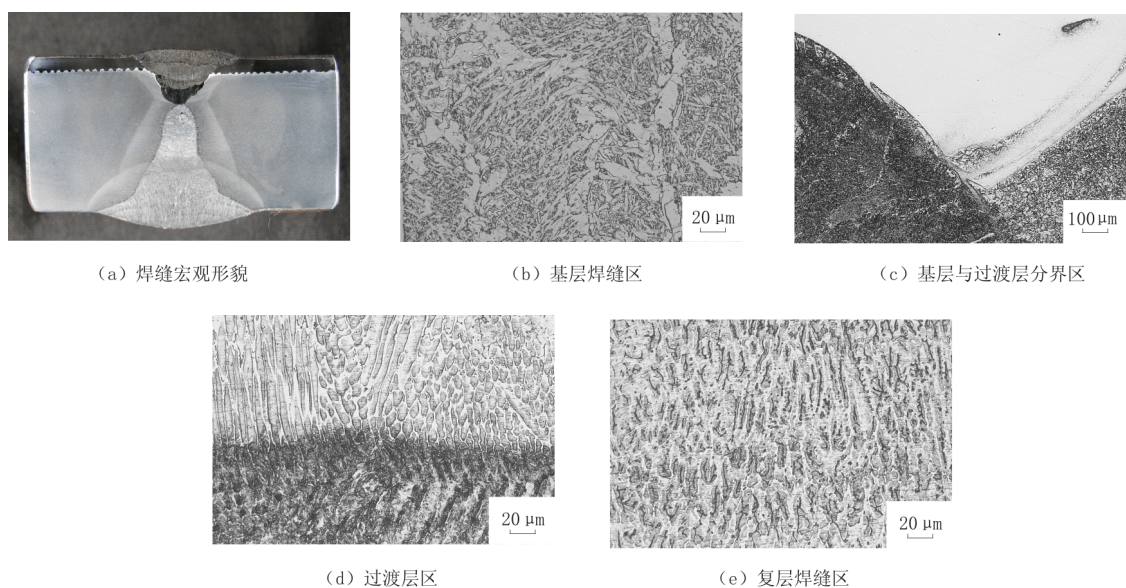


图 3 焊接接头处金相组织

2.3 焊接接头抗腐蚀性能

2.3.1 晶间腐蚀

依据 SY/T 6623—2005, 用线切割取样, 试样规格为 76.2 mm×25.4 mm×10 mm。焊缝处取横向试样, 保证焊缝在试样中间, 取 4 个试样。由于焊缝不平整, 先用铣床将试样表面铣成平面, 再线切割取样。试样表面用金相砂纸逐级打磨、

清洗, 然后将试样浸入溶液中, 溶液连续加热沸腾 24 h, 取出试样, 用硝酸除去表面附着的铜膜, 然后将试样围绕直径等于厚度 2 倍的轴弯曲 180°, 低倍放大检验是否有裂纹, 试样腐蚀和弯曲后的宏观形貌如图 4 所示, 弯曲拉伸面放大 10 倍后的照片如图 5 所示。由图 4 和图 5 可见, 试样没有发现明显可见裂纹, 说明焊缝对晶间腐蚀不敏



图 4 焊缝腐蚀试样及弯曲后的宏观形貌

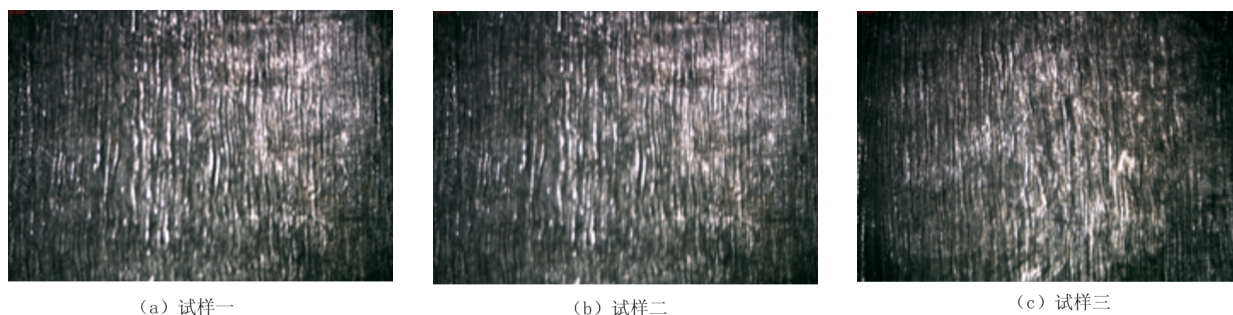


图 5 弯曲试样拉伸面形貌 (10×)

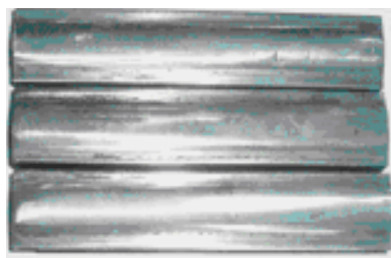
感, 焊缝抗晶间腐蚀性能完全满足制管标准要求。

2.3.2 HIC 试验

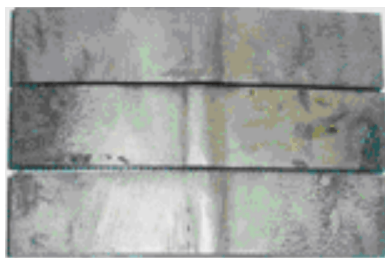
依据 NACE TM0284—2003《管道、压力容器钢抗氢致开裂钢性能评价的试验方法》和 GB/T 911.3—2005 对复合板材焊缝进行 HIC 性能检测。试验时为防止表面氧化层对试验结果的影响, 将试样表面磨削掉其厚度的 10%, 在焊缝的纵向

和横向取样, 试样表面宏观形貌如图 6 所示, 试样截面微观形貌如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可以看出, 焊缝横向和纵向试样腐蚀表面均未出现裂纹, 因此该复合板焊缝 HIC 试验的 CSR, CLR 和 CTR 均为 0。根据标准 GB/T 911.3—2005 可以认为, 该工艺得到的复合板材焊缝对 HIC 不敏感。



(a) 横向



(b) 纵向

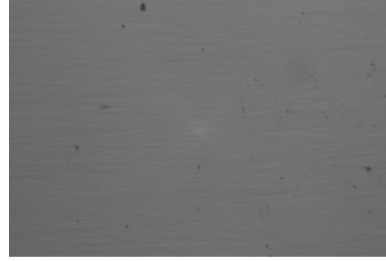
图 6 腐蚀后焊缝表面宏观形貌



(a) 横向试样一



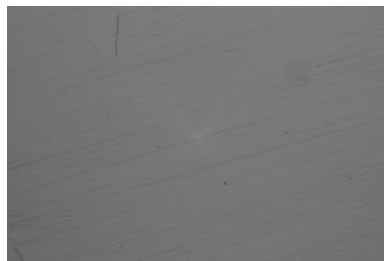
(b) 横向试样二



(c) 横向试样三



(d) 纵向试样一



(e) 纵向试样二



(f) 纵向试样三

图 7 腐蚀后焊缝截面微观形貌

3 结 论

(1) 采用 ER309M 不锈钢焊丝配合 TIG 焊进行 X60/316L 复合板过渡层焊接, 焊接接头力学性能、抗拉强度、正反弯等指标满足标准要求。

(2) 对复合板焊接接头进行了晶间腐蚀、HIC 等腐蚀试验, 焊缝晶间腐蚀试验和 HIC 试验均未见裂纹, 表明焊缝对晶间腐蚀和氢致裂纹不敏感。

参考文献:

- [1] 胡华忠, 闫建议. 不锈钢复合钢板的焊接工艺探讨[J]. 化工施工技术, 1998, 20(05): 3-9.
- [2] GB/T 16957—1997, 复合钢板焊接接头力学性能试验方法[S].
- [3] 何世海, 韦哲. 不锈钢复合板压力容器的焊接工艺[J]. 沈阳工业大学学报, 1998, 20(41): 32-35.

(下转第 15 页)

5 结 论

(1) 以先进洁净钢冶炼为依托, 采用具有动态轻压下技术的 400 mm 特厚连铸坯和优化的 TMCP 生产工艺, 是开发具有优良韧性厚壁管线钢的前提条件。

(2) 研究了 3 种不同成分对厚壁 X70 管线钢低温韧性的影响, 在相同工艺下, C 含量降低及 Mo 含量增加会促进贝氏体转变, 提高贝氏体组织含量, 增加钢板韧性。

(3) 以低 C($w(C)=0.045\%$)-Mo-Ni 复合成分体系为基础, 工业化生产的 30.2 mm 厚壁 X70 管线钢性能分布均匀, 波动范围小, 制管后性能小幅上升, 焊缝及热影响区组织接近母材, 具有良好的焊接性能。

参考文献:

- [1] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 1-4.
- [2] HEIKE M, FLORIAN G, FABIAN G, et al. Development of Modern High Strength Heavy Plates for Linepipe Applications[C]//Proceedings of 9th International Pipeline Conference 2012. Calgary, Canada: IPC 2012-90064.
- [3] 郑磊, 付俊岩. 高等级管线钢的发展现状[J]. 钢铁, 2006, 41(10): 1-10.

- [4] 王春明. 高强韧性管线钢的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2001.
- [5] YONGCHUL H B, YONG M K, SUNGHAK L. Correlation of Microstructure and Fracture Properties of API X70 Pipeline Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2005(03): 725-739.
- [6] KIM Y M, KIM S K, LIM Y J, et al. Effect of Microstructure on the Yield ratio and Low Temperature Toughness of Linepipe Steels[J]. ISIJ International, 2002 (12): 1571-1577.
- [7] 聂燧, 董文龙. 高强度低碳贝氏体钢工艺和组织对性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2006(08):733-738.
- [8] STALHEIM D, LI S, DING W, et al. Research and Development into Low Temperature Toughness of Large Diameter Heavy Wall X80 Pipeline Steels at Shougang Steel[C]//Proceedings of 9th International Pipeline Conference 2012. Calgary, Canada: IPC2012-90326.
- [9] 赵明纯, 肖福仁, 单以银, 等. 超低碳针状铁素体管线钢的显微特征及强韧性行为[J]. 金属学报, 2002 (03): 283-287.
- [10] 张国栋, 李群, 王志勇, 等. 西气东输三线用 X80 管线钢板的研制[J]. 焊管, 2014 (08):52-58.

作者简介: 湛铁强(1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事能源用钢的开发工作。

收稿日期: 2014-07-11

编辑: 李红丽

(上接第 9 页)

- [4] 王一德, 王立新, 李国平. 太钢不锈钢复合板生产发展及展望[J]. 中国管理科学, 2000(S1): 612-622.
- [5] 王文先, 王峰, 刘满才, 等. 1Cr18Ni9Ti+Q235 复合钢板对接焊缝组织和抗腐蚀性能分析[J]. 焊接学报, 2010,31(06): 89-92.
- [6] 陈军. 20+304 不锈钢复合管的焊接[J]. 江西石油化工, 2005,17(01): 40-42.
- [7] 孙树山, 杨利娜, 秦增伟, 等. L245NB+316L 小管径复合钢管焊接工艺研究[J]. 焊接与切割, 2009(14):43-45.
- [8] 郭晶等. 国内复合钢板产品焊接中存在问题分析[J]. 石油化工设备, 2008, 31(01): 17-19.
- [9] 张立君, 张燕飞, 郭崇晓. 2205 双相不锈钢双金属复合管焊接工艺研究[J]. 焊管, 2009, 32(04): 30-34.
- [10] 纪永杰, 刘熙章, 杨致东, 等. 不锈钢复合钢板焊接探讨[J]. 山东机械, 2004(01):30-33.
- [11] 林文光, 赵颖, 郭志刚. 双复层不锈钢复合钢板的焊接性能试验研究[J]. 内蒙古工业大学学报, 2001, 20(01): 39-42.

- [12] 於方, 秦建平. 双金属管在管道输送中的应用[J]. 钢管, 2000(01): 34-36.
- [13] 周振丰. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [14] 顾建忠. 国外双层金属复合钢管的用途及生产方法[J]. 上海金属, 2000, 22(04): 16-24.
- [15] 宋彬. 双金属复合管的制造及应用[J]. 给水排水, 2002, 28(10): 65-66.
- [16] CLEITON C, HELIO C, MIRANDA D, et al. Microstructure, Hardness and Petroleum Corrosion Evaluation of 316L /AWSE 309Mol Weldmetal[J]. Materials Characterization, 2009, 60(01): 346-352.

作者简介: 刘海璋(1976—), 男, 陕西宝鸡人, 工程师, 从事油气管材开发及焊接工艺研究工作。

收稿日期: 2014-08-15

编辑: 李超