

4130X气瓶钢管的凹坑缺陷成因分析

谭明¹, 张新文², 沈钊³, 庞德禹¹, 刘永²

1. 扬州诚德钢管有限公司 江苏扬州 225000

2. 江苏永钢集团有限公司 江苏张家港 215600

3. 扬州诚德重工有限公司 江苏扬州 225000

摘要: 针对4130X气瓶钢管内壁凹坑缺陷的产生原因,对气瓶钢管进行了化学成分分析、力学性能试验和非金属夹杂物检测,同时对凹坑处进行了金相组织、扫描电镜及能谱分析。结果表明:钢材冶炼和浇注环节正常,凹坑缺陷非钢质缺陷所致,而是产生于热成形之后的冷拔工序。凹坑的产生是由于氧化铁皮或其他硬质夹杂物在拔制过程中压入了钢管表面,或是原存在于钢管表面的翘皮剥落。制作过程应严格把控冷拔前的准备工作,以防类似缺陷重复发生。

关键词: 4130X; 气瓶钢管; 内壁凹坑; 冷拔

Analysis on the causes of pit defects in 4130X gas cylinder steel pipes

TAN Ming¹, ZHANG Xinwen², SHEN Zhao³, PANG Deyu¹, LIU Yong²

1. Yangzhou Chengde Steel Pipe Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, China

2. Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China

3. Yangzhou Chengde Heavy Industries Co., Ltd., Yangzhou 225000, Jiangsu, China

Abstract: Regarding the causes of pit defects on the inner wall of 4130X gas cylinder steel pipes, chemical composition analysis, mechanical property tests and non-metallic inclusion inspections were carried out on the gas cylinder steel pipes. Meanwhile, metallographic structure analysis, scanning electron microscope (SEM) and energy spectrum analysis were performed on the pits. The results show that the steel smelting and pouring processes were normal, and the pit defects were not caused by steel quality defects but were generated during the cold drawing process after hot forming. The pits were formed because iron oxide scale or other hard skin inclusions were pressed into the surface of the steel pipe during the drawing process, or the peeling of the lifting skin that originally existed on the surface of the steel pipe. During the manufacturing process, the preparatory work before cold drawing should be strictly controlled to prevent the recurrence of similar defects.

Keywords: 4130X; gas cylinder steel pipes; pit defects on the inner surface; cold-drawn

1 序言

据中国国家能源局统计,2023年我国天然气消费重回快速增长,消费规模再创新高。全年天然气消费量 $3945 \times 10^8 \text{m}^3$,同比增长7.6%;天然气在一次

能源消费总量中占比8.5%,较2022年提高了0.1%。

20世纪60年代,大容积钢质无缝钢管气瓶在欧美等发达国家首先得到应用,通常以车载方式运输压缩天然气等高压气体。天然气车载无缝钢管气瓶不仅

受到压缩天然气中残留硫化物、高压氢气等有害物质的侵蚀,还会在使用过程中受到交变应力、疲劳和冲击等载荷作用,所以对天然气车载气瓶的制造过程有着严格的要求^[1-8]。

近年来,随着我国经济建设的快速发展,特种气体的需求量增加,因此对气瓶钢管的制造质量提出了更高的要求。目前,我国生产4130X大容积气瓶用无缝钢管的主要工艺为:穿轧(连轧)→热扩→冷拔/冷轧→调质处理。同时也对原料配方、冶炼和浇注等工序提出了较为严格的要求^[9-12]。

4130X气瓶钢管规格为 $\phi 715\text{mm} \times 23.8\text{mm} \times 12290\text{mm}$,本文研究分析4130X气瓶钢管内表面的凹坑缺陷产生的原因,以期对气瓶钢管生产提供指导。

2 宏观形貌分析

样品凹坑宏观形貌如图1所示。从图1可看出,凹坑分布在钢管内表面,在凹坑周围未发现明显的裂纹、划伤等其他缺陷。

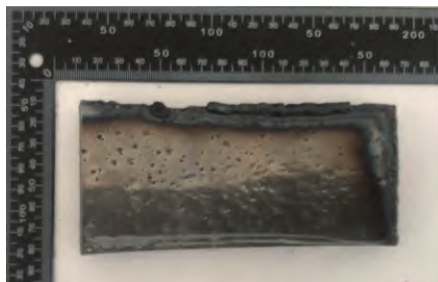


图1 凹坑宏观形貌

3 微观分析

3.1 化学成分分析

对气瓶钢管取样进行化学成分分析,结果符合GB/T 28884—2024《大容积气瓶用无缝钢管》要求,见表1。

3.2 力学性能分析

沿钢管纵向取拉伸试样,采用 $\phi 10\text{mm}$ 圆棒试样,标距50mm,按GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》在CMT5105微机控制电子万能试验机上进行室温拉伸试验,加载位移速率为2mm/min,条件屈服强度使用引伸计测定,试验精度为 $\pm 0.5\%$ 。按照GB/T 229—2020《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》在ZBC-450金属摆锤冲击试验机上进行冲击试验。试样力学性能测试结果见表2。从表2可知,力学性能满足GB/T 28884—2024《大容积气瓶用无缝钢管》要求。

3.3 金相检测

按GB/T 10561—2023《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》中A法评级,对该裂纹样品进行非金属夹杂物检测,结果见表3。从表3可知,样品的非金属夹杂物符合GB/T 28884—2024《大容积气瓶用无缝钢管》要求。

分别取2组不同凹坑位置样品,每组分别制取横向、纵向2个金相试样,室温下用4%的硝酸酒精腐蚀样品5s,观察腐蚀前后金相形貌。

表1 4130X气瓶钢管化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	P+S	Cr	Mo	Ni	Cu
实测值	0.30	0.25	0.85	0.009	0.002	0.011	1.02	0.22	0.02	0.02
标准值	0.25~0.35	0.15~0.35	0.40~0.90	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.020	0.80~1.10	0.15~0.25	≤ 0.30	≤ 0.20

表2 4130X气瓶钢管力学性能

项目	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	伸长率A (%)	屈强比	硬度HBW	(-50℃)纵向冲击吸收能量KV ₂ /J
实测值	765	635	26	0.83	241	125、117、122
标准值	≥ 720	≥ 485	≥ 20	≤ 0.86	≤ 269	平均值 ≥ 60 ;单个试样值 ≥ 48

表3 4130X气瓶钢管非金属夹杂物检测结果 (级)

项目	A粗	A细	B粗	B细	C粗	C细	D粗	D细	DS粗
实测值	0.5	0.5	0	0.5	0	0	0	0.5	0
标准要求	≤ 2.0								

第1组凹坑样品横截面、纵截面表面金相形貌分别如图2、图3所示，横截面、纵截面两种凹坑内壁均比较粗糙，横截面凹坑最大深度约为 $228.84\mu\text{m}$ ，纵截面凹坑最大深度约为 $178.18\mu\text{m}$ 。腐蚀后发现样品横、纵截面均存在组织条带，且表面存在以贝氏体、铁素体为主的条带，这些表面条带在凹坑位置

中断，取样截面均未见组织发生变形，缺陷旁侧无明显脱碳，未发现异常组织流线。第2组凹坑样品横截面、纵截面表面金相形貌分别如图4、图5所示，横截面凹坑最大深度约为 $95.14\mu\text{m}$ ，纵截面凹坑最大深度约为 $48.57\mu\text{m}$ ，其余特征与第1组凹坑样品基本相同。

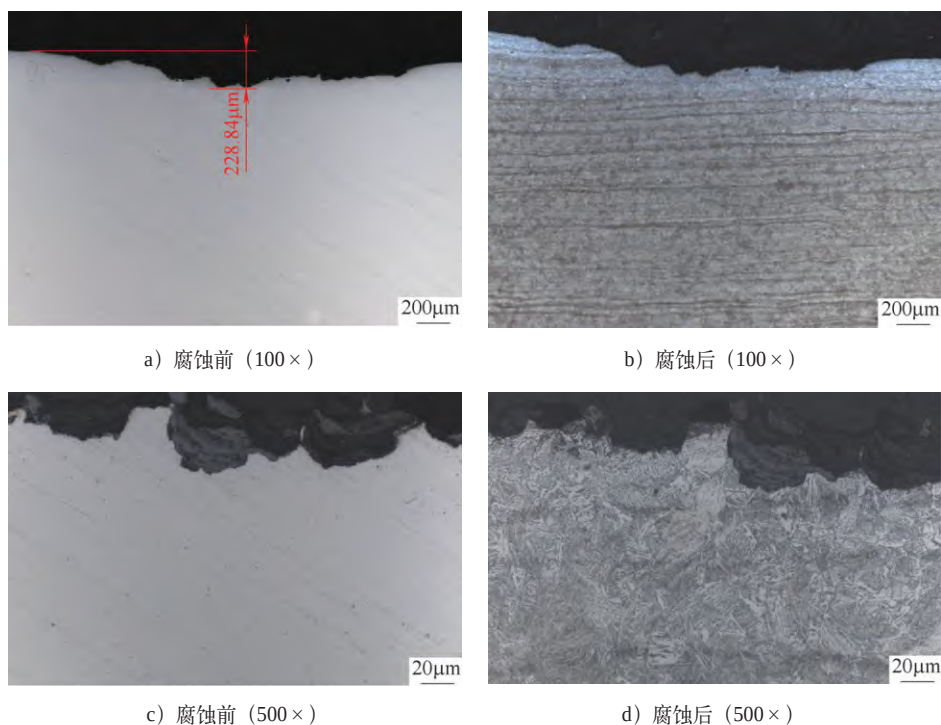


图2 第1组凹坑横截面金相形貌

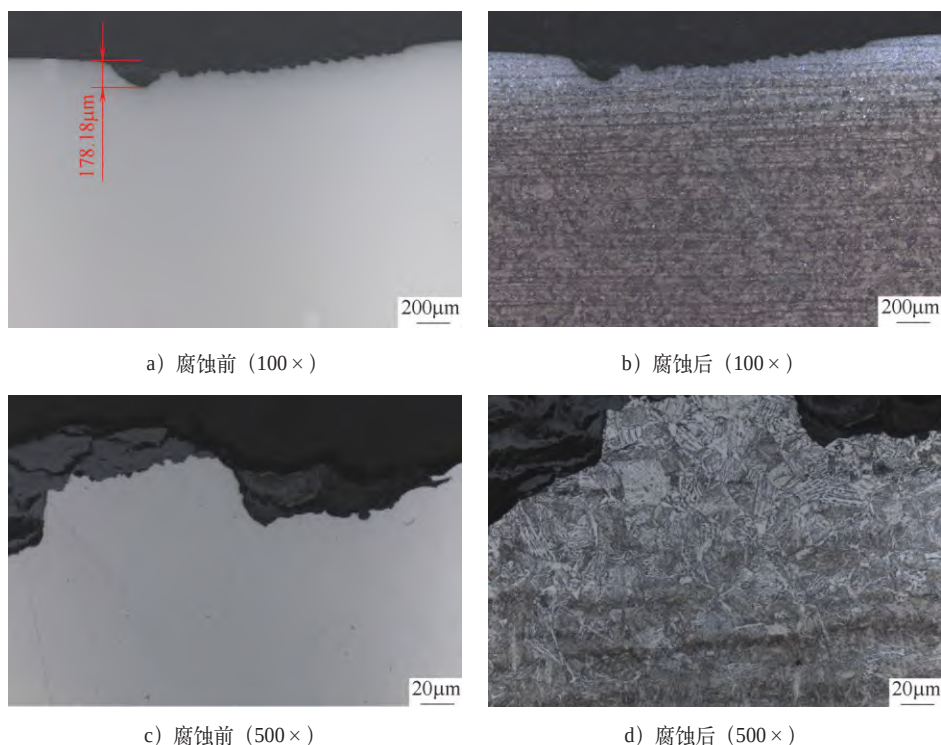


图3 第1组凹坑纵截面金相形貌

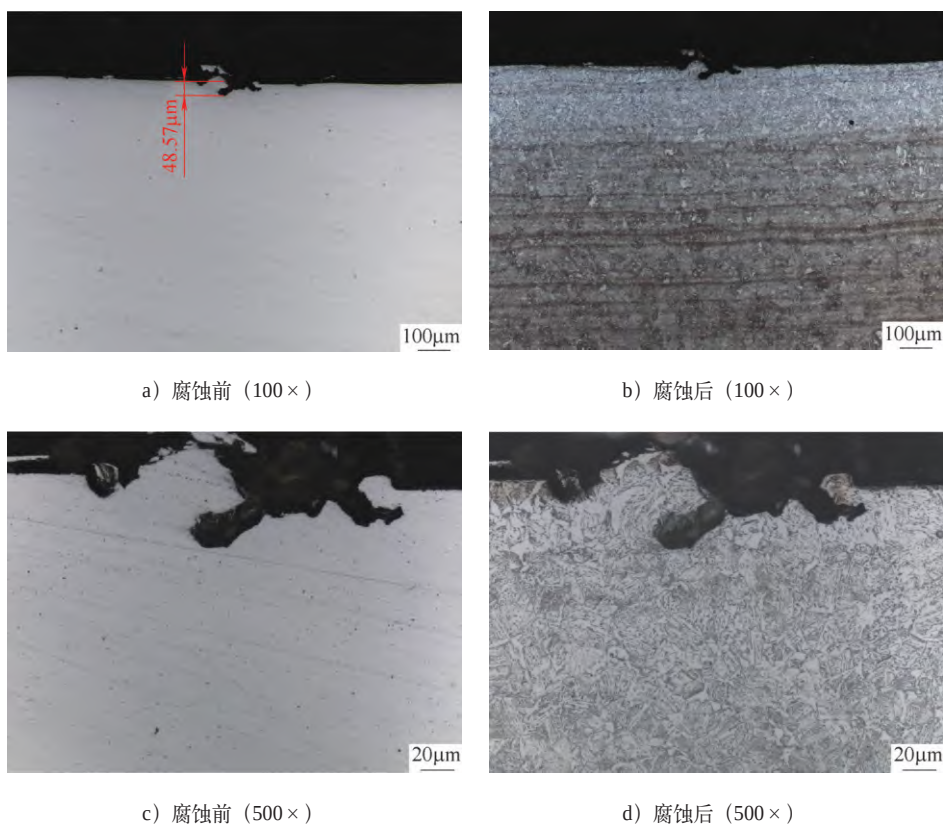


图4 第2组凹坑横截面金相形貌

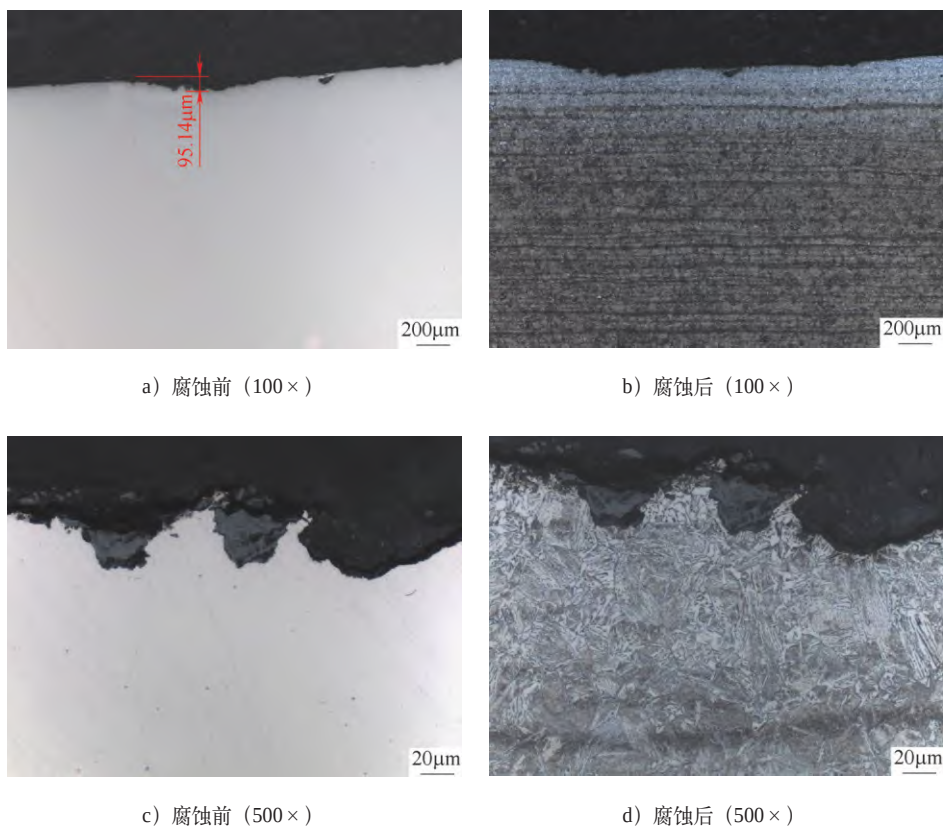


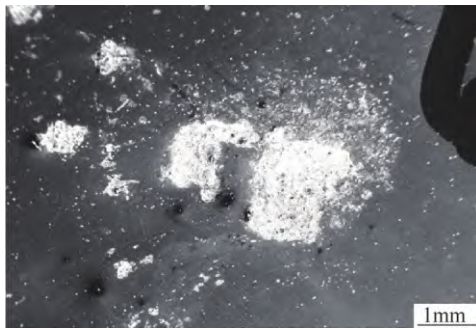
图5 第2组凹坑纵截面金相形貌

3.4 电镜分析

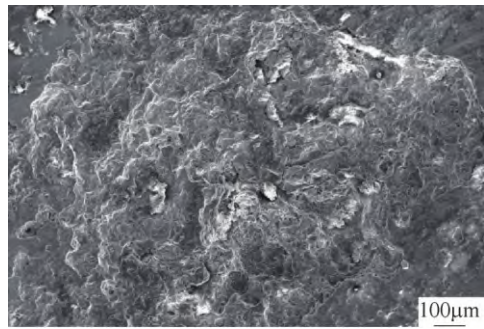
为进一步确定凹坑缺陷产生的原因,取合适大小的样品,清洗后置入场发射扫描电镜中观察,分别得到不同放大倍数下的样品表面凹坑,电镜形貌如图6所示。从图6可看出,样品表面分布有大量凹坑,其边缘形状均不规则,内壁不圆滑。

采用能谱仪对凹坑及附近进行定性及半定量分析,如图7所示。一共选取5处作为测量区域,谱图1、谱图2为凹坑区域,谱图3~谱图5为凹坑外基体区域。凹坑内无夹杂物,无异质金属,主要为氧化铁等锈蚀产物,并未发现其他异常。由图7可知,凹坑底部的Si、Al、O等元素含量比基体少,这是因

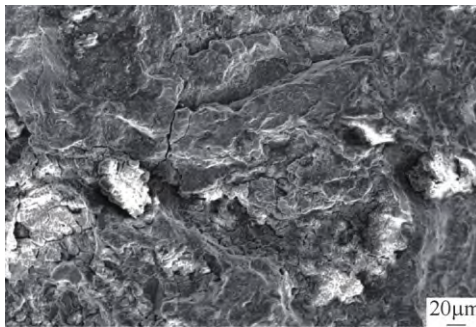
为在冷拔前,需要对钢管进行皂化处理,皂化剂的作用是去除钢管内壁的铁锈。但是,由于皂化剂在钢管内部容易存在涂抹不均匀的情况,导致部分内壁的铁锈没有被去除。在冷拔过程中,钢管纵向受到拉应力,而横向受到氧化铁皮的挤压,从而形成凹坑。由于氧化铁皮是外来物,因此在挤压处形成“喇叭”状凹坑,如图8所示。当钢管在旋转、冷却时发生脱落,而此时凹坑底部本属于钢管内壁,在热轧制管过程中, Si、Al等易氧化元素被氧化,而被完全皂化的部分属于钢管基体,因此两者的化学成分存在细微差别,故能谱分析结果存在差异,表现为凹坑底部的Si、Al、O等元素含量比基体少。



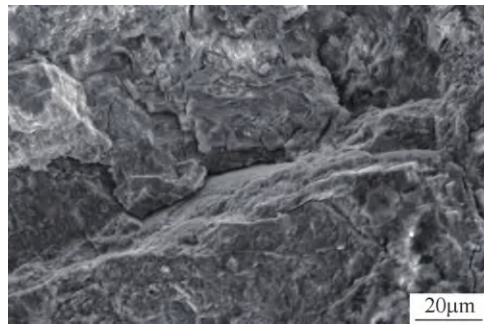
a) 局部放大 (14×)



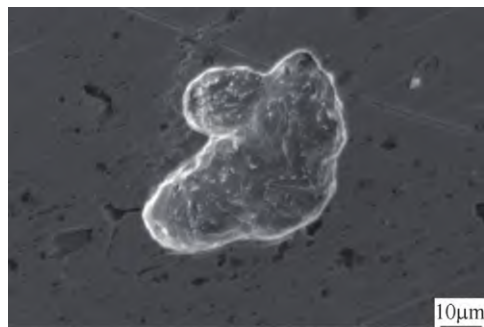
b) 局部放大 (68×)



c) 局部放大 (213×)

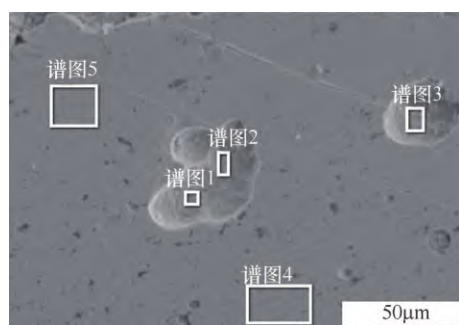


d) 局部放大 (800×)

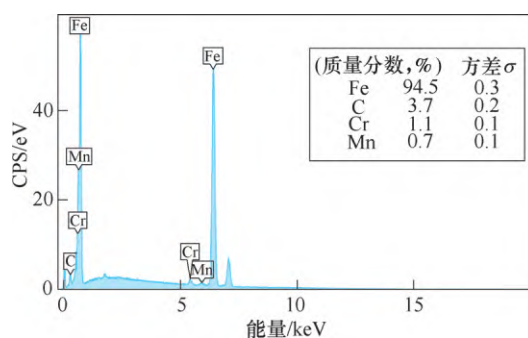


e) 局部放大 (1000×)

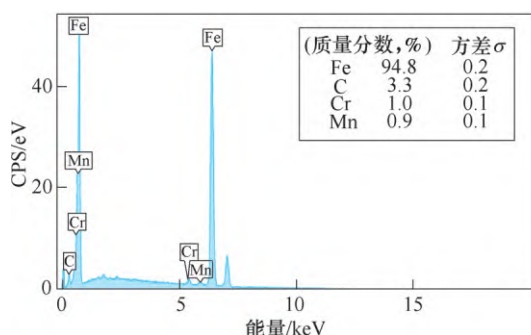
图6 样品表面凹坑电镜形貌



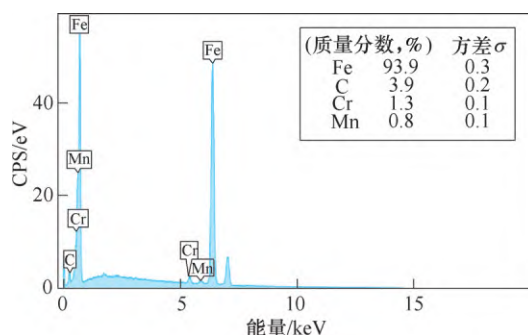
a) 谱图位置



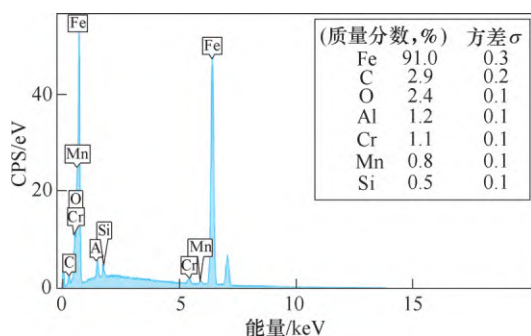
b) 谱图1



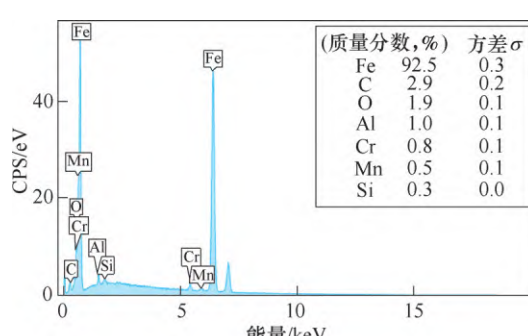
c) 谱图2



d) 谱图3



e) 谱图4



f) 谱图5

图7 能谱成分分析

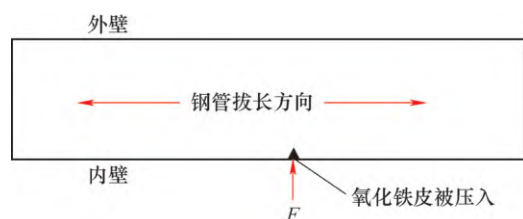


图8 冷拔过程中氧化铁皮被压入示意

4 分析讨论与改进措施

气瓶钢管生产加工工艺流程为连铸坯→加热→穿孔→轧制→退火→冷拔→粗加工→热处理→精加工→检验→包装→入库。

通过对4130X气瓶钢管样品采取化学成分、力学性能、非金属夹杂物检测，结果均符合GB/T

28884—2024《大容积气瓶用无缝钢管》要求。通过对凹坑缺陷的金相形貌和电镜扫描观察分析，发现样品横、纵截面均存在以贝氏体、铁素体为主的组织条带，这些条带在凹坑位置中断，且均未见组织发生变形，说明凹坑是在表面条带组织产生后出现的。缺陷旁侧无明显脱碳，未发现异常组织流线，说明凹坑缺陷不是在热成形中产生的。气瓶钢管本体与凹坑内均无夹杂物和异质金属，主要为氧化铁等锈蚀产物，即均未发现冶金类缺陷。由于气瓶钢管在热成形后需要进行冷拔，且无其他变形工序，由此推断，凹坑的产生是由于氧化铁皮或其他质杂物在冷拔过程中被压入了钢管表面，或者是原存在于钢管表面的翘皮剥落。因此，在冷拔前应严格检

查管料内壁、工模具、润滑剂及场地的清洁状况，防止氧化铁皮和杂物附着在钢管表面。

5 结束语

1) 钢管内壁凹坑缺陷既非冶炼铸造等钢质缺陷导致，也非热成形过程中产生，而是产生于冷拔过程。

2) 应严格把控冷拔前的准备工作，包括现场环境、工模具检查及钢管内壁质量检查，防止氧化铁皮和质硬杂物附着在钢管表面而造成凹坑缺陷。

参考文献:

- [1] 王洪海, 陈冬, 许胜. 大容积气瓶用高强韧材料4130DX的开发[J]. 中国特种设备安全, 2023, 39(12): 90-94.
- [2] 彭朝辉. 大容积钢质无缝气瓶标准简述[J]. 冶金标准化与质量, 2018, 56(1): 28-31.
- [3] 李丹, 敬加强, 白林, 等. 天然气储运技术研究[J]. 管道技术与设备, 2009(1): 4-5, 21.
- [4] 陈冬, 桑伟, 吴宜樞. 大口径薄壁气瓶用无缝钢管的制造工艺[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(7): 487-490, 503.
- [5] 王洪海, 陈俊德, 陈冬, 等. 强力旋压工艺在大直径气瓶钢管制造中的应用[J]. 钢管, 2019, 48

(6): 14-18.

- [6] 王洪海, 桑伟, 陈俊德, 等. 国内大容积气瓶用无缝钢管发展概述[J]. 钢管, 2019, 48(2): 7-13.
- [7] 王丽娜. 压缩天然气运输和长管拖车制造及检验[J]. 河北工业科技, 2011, 28(1): 52-54.
- [8] ISO/TC58技术委员会(SC3气瓶设计分委员会). 气瓶-水容积150~3 000 L的可重复使用的无缝钢制气瓶的设计、结构和试验: ISO 11120: 2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [9] 栗红民, 龙金花. 4130X大容积气瓶用无缝钢管的轧制工艺实践[J]. 现代冶金, 2019, 47(1): 27-28.
- [10] 王勇, 宋光鑫, 彭先明. 大容积气瓶用4130X钢管横向裂纹原因分析[J]. 钢管, 2020, 49(6): 41-44.
- [11] 尹人洁, 马欢鱼, 刘云涛, 等. 采用周期式轧管-拉拔式热扩径工艺开发长管拖车气瓶用无缝钢管: “2011年中南·泛珠三角地区第七届轧钢学术交流会”论文集[C]. 成都: 四川省金属学会等, 2011.
- [12] 张新文, 施嘉凯, 张春香, 等. 4130X连铸开浇炉钢管探伤不合格原因分析[J]. 物理测试, 2023, 41(1): 40-45.

(收稿日期: 20240806)

(上接第145页)



图12 加工面无缺陷

5 结束语

我公司生产的铸件, 有十几种类似结构产品, 通过优化工艺借鉴, 在开发另外一种类似结构产品时, 经过工艺验证, 解决了疏松、起皮及冷隔缺陷。改变了八缸发动机排气歧管法兰冒口设置密集的现象, 从多缸口多孤立热节排气歧管进气法兰口面设计7~9个“热冒口”的传统工艺, 到改进后仅需设计3~4个“冷冒口”的工艺, 提高了工艺出品率, 节约了生产成本, 获得了较好的经济效益。

通过对硅钼耐热球墨铸铁流动性差的性能特

点和此类型铸件的特殊结构特点进行分析, 以提高铸件出品率和综合成品率为目的, 采用合理的浇注工艺系统, 最终采用均衡凝固技术, 利用接触热节和靠近热节, 不仅解决了长久困扰排气歧管易产生铸造疏松的难题, 成功生产出合格铸件, 满足了客户需求, 也为此系列产品开辟了新的铸造工艺设计思路。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(第1卷): 铸铁[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 魏兵, 袁森, 张卫华. 铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 靳宝, 袁彬, 袁超林, 等. 排气芯骨在水冷排气歧管生产中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2024(1): 102-103.
- [4] 中国机械工程学会铸造分会. 铸造手册(第5卷): 铸造工艺[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003.

(收稿日期: 20241207)