

27SiMn 钢窄间隙 GMAW 环焊缝开裂原因分析

刘晟¹, 常云峰^{2*}, 兰志宇¹, 刘晓芳², 李争¹, 秦建²

(1. 郑州煤矿机械集团股份有限公司, 郑州 450016; 2. 郑州机械研究所有限公司
新型钎焊材料与技术国家重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 目的 以发生开裂的 27SiMn 钢窄间隙 GMAW 环焊缝为研究对象, 研究其裂纹形成原因及扩展过程。
方法 对裂纹附近的母材及焊缝进行化学成分分析、裂纹宏观形貌分析、金相组织分析、扫描电镜分析、结构受力分析等, 探明裂纹的形貌特征、形成原因及扩展路径。**结果** 试样化学成分和金相组织无明显异常, 满足使用要求。裂纹属于明显的张开型(I型)裂纹, 从焊缝根部向缸体表面呈碗状扩展, 形成缸体内部与外部的连接通道, 导致液压油渗漏。裂纹起源于焊缝根部的热影响区, 焊缝根部熔深不稳定, 部分拼接处存在未熔透缺陷, 未熔透处存在的氧化铝、碳酸钙等夹杂物是形成裂纹的主要诱因。在焊接残余应力的作用下, 沿焊缝根部的夹杂物形成轴向裂纹和周向裂纹; 在工作载荷的作用下, 焊缝根部周向拉应力和轴向拉应力达到最大值, 其中周向拉应力约为工作载荷的 5.5 倍, 在周向拉应力的作用下, 裂纹沿径向和轴向发生扩展, 最后形成碗状的裂纹扩展面。**结论** 焊缝根部的未熔透缺陷和非金属夹杂物是产生裂纹的主要原因, 在工作载荷的作用下, 裂纹沿轴向和径向发生扩展, 最后扩展至缸体表面呈碗状。

关键词: 27SiMn; 窄间隙; 裂纹; 夹杂物; 应力

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2023.09.014

中图分类号: TG442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2023)09-0117-08

Cracking Causes of 27SiMn Girth Weld by Narrow Gap GMAW

LIU Sheng¹, CHANG Yun-feng^{2*}, LAN Zhi-yu¹, LIU Xiao-fang², LI Zheng¹, QIN Jian²

(1. Zhengzhou Coal Mining Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Brazing Filler Metals and Technology, Zhengzhou
Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the causes of crack formation and propagation process, in order to provide technical support for the actual production of 27SiMn steel's narrow gap girth weld structure. The crack morphology, crack formation reason and crack propagation path were studied by means of chemical composition analysis, macroscopic morphology analysis, weld metallographic analysis, crack scanning electron microscope analysis and structural stress analysis. There was no obvious abnormality in the chemical composition and metallographic structure of the sample, which met the using requirements. Cracks belonged to obvious open type (type I) cracks, expanding from the root of weld to surface of the cylinder block in a bowl shape, forming a connection channel between internal and external of the cylinder block, resulting in hydraulic oil leakage; Cracks originated from the heat affected zone at the root of weld. The penetration depth at the root of weld was unstable, and some of joints were not penetrated to form incomplete fusion defects. The inclusions such as alumina and calcium carbonate at incomplete fusion were the main causes of cracks. Under the action of welding residual stress, inclusions along the weld root formed

收稿日期: 2023-04-10

Received: 2023-04-10

引文格式: 刘晟, 常云峰, 兰志宇, 等. 27SiMn 钢窄间隙 GMAW 环焊缝开裂原因分析[J]. 精密成形工程, 2023, 15(9): 117-124.

LIU Sheng, CHANG Yun-feng, LAN Zhi-yu, et al. Cracking Causes of 27SiMn Girth Weld by Narrow Gap GMAW[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(9): 117-124.

axial cracks and circumferential cracks. Under the action of working load, the circumferential tensile stress and the axial tensile stress at the root of weld reached the maximum, among which the circumferential tensile stress was the largest, which was about 5.5 times of the working load. Under the action of circumferential tensile stress, axial crack was more likely to expand along radial and axial directions, finally form a bowl shaped crack propagation surface. The incomplete penetration defects and non-metallic inclusions at the root of weld are the main causes of cracks. Under the action of working load, cracks expand along axial and radial directions, and finally expand to surface of the cylinder block in a bowl shape.

KEY WORDS: 27SiMn; narrow gap; crack; inclusion; stress

煤矿是电力行业的重要支柱,其生产安全是我国安全工作的重中之重。随着煤矿行业的飞速发展,对煤矿机械装备提出了更高要求。液压支架作为现代煤矿综采装备的核心支护设备,其稳定性和可靠性是保证煤矿生产安全的关键。液压支架一般包括油缸、结构件、控制系统等,油缸作为液压系统的主要组成部分,是将液压能转变为机械能的液压元件,其性能直接影响液压支架的功能^[1-3]。液压油缸一旦发生渗漏将直接导致液压系统瘫痪,支架作用丧失,影响煤矿生产安全^[4-5],因此油缸的焊缝质量至关重要。27SiMn钢是我国自主研发的一种低合金高强钢,由于其综合性能良好、成本低^[6-8],被广泛应用于制造油缸、柱塞和煤矿用液压支架等。为提升焊接效率、降低成本、减少焊材用量,油缸等结构通常使用窄间隙坡口形式,使用 GMAW 方法进行多层多道焊接,而多层多道焊缝易产生未熔合、夹杂等缺陷,且对焊接过程要求极为严格。

本文以测试过程中发生开裂的 27SiMn 环焊缝为研究对象,研究裂纹在工作载荷作用下的扩展行为,通过对开裂位置进行化学成分分析、微观组织分析、裂纹形貌特征分析和受力分析,研究了裂纹产生的原因和扩展过程,找出了焊缝开裂的原因,提出了液压油缸开裂防控措施和建议,以期为实际工程应用中环焊缝开裂的原因查找和防控提供技术参考和支撑。

1 试验

1.1 试样准备

以 27SiMn 油缸为研究对象,27SiMn 油缸由缸体和缸底组成,材料均为 27SiMn 钢,缸体内径为 $\phi 400$ mm,外径为 $\phi 480$ mm,采用窄间隙 GMAW 多层多道焊方式进行连接,油缸工作载荷为 31.5 MPa。焊接坡口结构示意图及焊道排布结构示意图如图 1 所示。焊接坡口采用底部互锁结构,坡口钝边为 2 mm,坡口深度为 38 mm;共有 7 层焊缝,其中第 1 层焊缝为打底焊,第 2—5 层焊缝为填充焊,第 6—7 层焊缝为盖面焊,主要焊接工艺参数如表 1 所示。

在焊缝开裂位置进行取样,分别进行化学成分分析、金相分析、裂纹形貌特征分析、裂纹形成原因分析和裂纹扩展路径分析。采用 DK7740 线切割机床进行试样切割,开裂位置试样切割示意图如图 2 所示,其中 I 为缸体外壁开裂位置,II 为缸底一侧,III 为与缸体外壁表面平行位置,IV 为沿图 2c 切割处切开后的内部截面形貌。

1.2 试样检测

将取好的试样放置于 200 mL 酒精中,在 QXJ-22 超声清洗机中超声处理 10 min,进行表面处理。为进一步探明开裂原因,对试样进行线切割,经磨制、抛

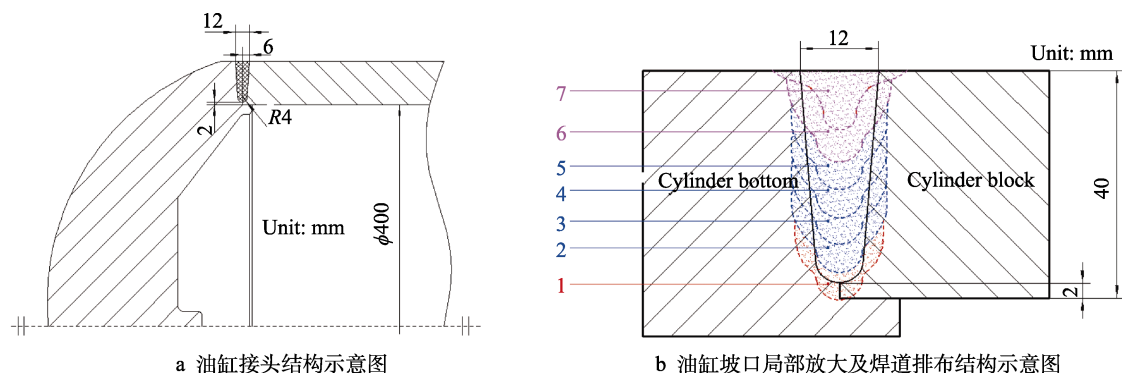


图 1 油缸焊接坡口及焊道排布结构示意图

Fig.1 Diagram of welding groove and welding pass layout structure: a) welding joint structure; b) locally enlarged view of cylinder groove and schematic diagram of weld pass layout structure

表 1 主要焊接工艺参数
Tab.1 Main welding process parameters

Position	Welding current/A	Arc voltage/V	Welding speed/(m·min ⁻¹)	Wire extension/mm	Shielding gas flux/(L·min ⁻¹)	Gas composition
Backing welding	210	23	0.26	20	25	20vol.%CO ₂ +80vol.%Ar
Filler welding	280	30	0.27	20	25	20vol.%CO ₂ +80vol.%Ar
Cosmetic welding	300	31	0.27	20	25	20vol.%CO ₂ +80vol.%Ar

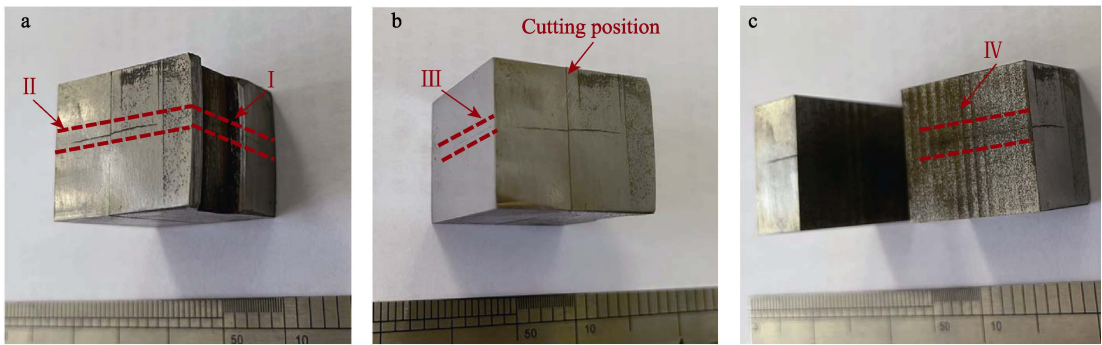


图 2 开裂位置试样切割示意图
Fig.2 schematic diagram of cracking position sample cutting

光后, 用 4% (体积分数) 硝酸酒精溶液腐蚀试样。采用 ZEISS 光学显微镜、体式显微镜和 Phenom XL 台式扫描电镜对开裂位置进行显微分析。

2 结果与分析

2.1 母材化学成分

对开裂位置附近的缸体和缸底进行化学成分分析, 其化学成分如表 2 所示。可知, 缸底和缸体的化学成分均符合 GB/T 17396—2009《液压支柱用热轧无缝钢管》中 27SiMn 钢的成分要求^[9], 说明母材成分合格, 化学成分不是引起油缸开裂渗漏的原因。

2.2 裂纹形貌特征

观察图 2a 中 I 处, 可以清晰看到缸体外壁表面的裂纹; 观察图 2a 中 II 处, 可以看到垂直于油缸外壁的裂纹; 观察图 2b 中 III 处, 可以看到平行于油缸外壁的裂纹。由此可知, 并未存在多条裂纹, 而是一条自根部到缸体表面贯穿的裂纹, 且裂纹在应力作用下形成一个开裂面。

为分析裂纹形成原因与过程, 弄清楚裂纹的形

状、尺寸及扩展特征, 沿轴向以 10 mm 厚度为间隔对油缸开裂位置进行逐层切割观察, 直至切割试样中不再出现裂纹, 根据每层裂纹的形貌与位置绘制出裂纹的形貌示意图, 如图 3 所示。可知, 裂纹从焊缝根部向缸体表面呈碗状扩展, 形成一个开裂面, 为内部液压油提供了一个连通通道, 导致液压油发生渗漏; 由裂纹形貌可知, 裂纹属于明显的张开型 (I 型) 裂纹, 裂纹扩展路径平直, 裂纹面垂直于焊缝方向, 是明显的轴向裂纹。由裂纹分布情况可初步判断, 裂纹起源于焊缝根部, 沿熔合线位置向表面扩展, 但很快裂纹便向母材中沿轴向扩展, 最终形成碗状裂纹面。

焊缝根部裂纹形貌如图 4 所示。由图 4a 可知, 坡口根部焊缝熔深不稳定, 部分位置熔合不良, 形成未熔透缺陷, 极易产生裂纹^[10]。缸底与缸体处均有垂直于拼接间隙的轴向裂纹, 裂纹垂直于拼接间隙向两侧延伸。说明裂纹起源于焊缝根部缸底与缸体的拼接处, 从拼接间隙处分别沿缸底与缸体的焊缝热影响区扩展。

2.3 金相组织

对试样基体、根部裂纹附近进行微观组织形貌分

表 2 母材化学成分
Tab.2 Chemical component of base metal

Material	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	S	P	Fe
Cylinder bottom	0.32	1.25	1.20	0.21	0.30	0.15	0.12	0.010	0.015	Bal.
Cylinder block	0.31	1.28	1.27	0.12	0.28	0.15	0.11	0.006	0.018	Bal.
National standard ^[9]	0.24-0.32	1.10-1.40	1.10-1.40	≤0.30	≤0.30	≤0.20	≤0.15	≤0.035	≤0.035	Bal.

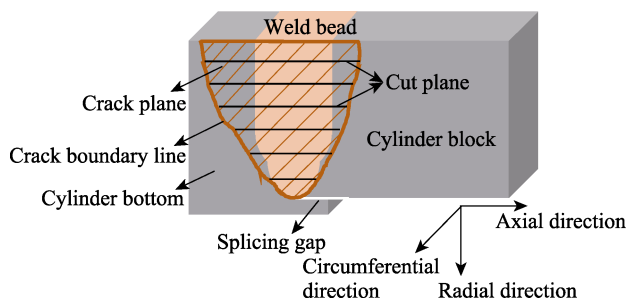
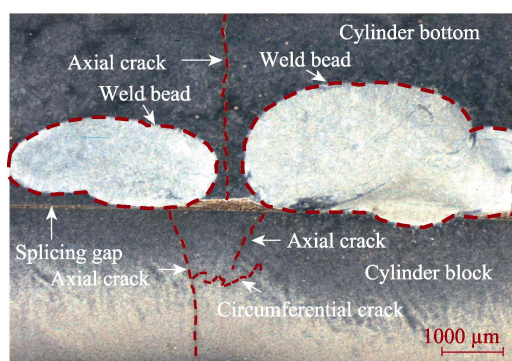
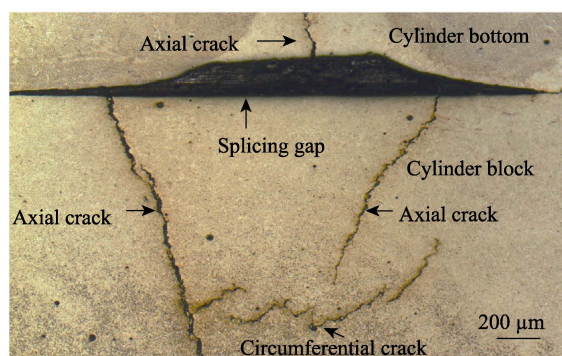


图3 裂纹形貌示意图
Fig.3 Diagram of crack morphology

析,母材及焊缝金相组织如图5所示。由图5a可知,母材基体组织主要为索氏体组织,组织尺寸细小。由图5b可知,焊缝区为明显的柱状晶,有明显的回火特征,组织主要为针状铁素体+回火索氏体。由图5c可知,焊接热影响区的组织粗大,有正火组织,主要是板条状马氏体+下贝氏体组织。由图5d可知,焊缝根部裂纹附近组织与热影响区组织相似,由于焊接温度高、冷却速度快,裂纹两侧主要为板条状马氏体组织,并伴有部分针状铁素体组织,该处是接头的薄弱区域^[11-14]。

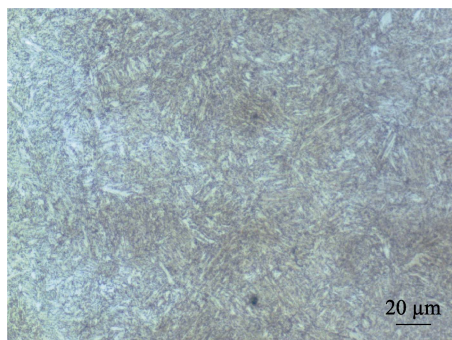


a 宏观形貌

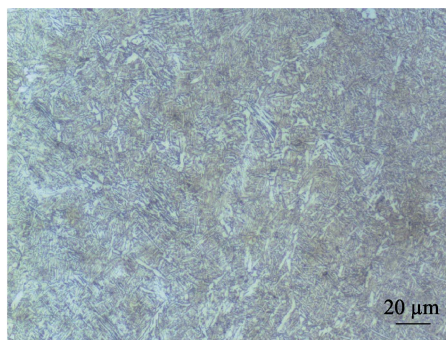


b 显微形貌

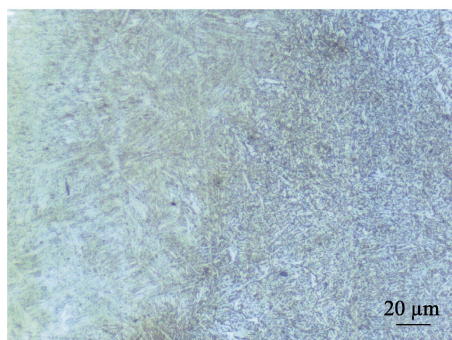
图4 焊缝根部裂纹形貌
Fig.4 Morphology of weld root cracks: a) macro morphology; b) micro morphology



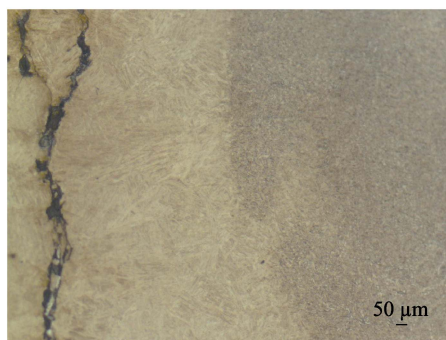
a 母材



b 焊缝区



c 热影响区



d 焊缝根部裂纹附近

图5 母材及焊缝金相组织
Fig.5 Microstructure of base metal and weld metal: a) base metal; b) weld; c) heat affected zone; d) near the crack at the root of weld seam

2.4 裂纹显微分析

工件坡口形式为互锁结构, 拼接处存在拼接间隙, 由于焊接后拼接处存在未熔合缺陷, 是天然的“裂纹源”, 并且拼接间隙处是焊接缺陷的天然聚集地, 极易形成夹杂、裂纹、未熔合等缺陷。为进一步确定裂纹的形成原因, 对焊缝根部裂纹进行扫描电镜分析和能谱分析, 拼装间隙处裂纹显微形貌如图 6 所示。可知, 焊缝根部的裂纹附近组织疏松, 存在大量的夹杂物和孔洞缺陷, 造成根部性能急剧下降。由于大量夹杂物的存在, 形成了天然的裂纹源, 引起了应力集中, 在焊接热循环的作用下, 应力集中加剧, 沿夹杂物形成裂纹并迅速向接头内部扩展, 导致焊缝失效。对图 6 中裂纹附近位置进行能谱分析, 能谱分析结果和裂纹处的微观组织成分分别如图 7 和表 3 所示。

由图 7 和表 3 可知, 裂纹源处存在大量的块状夹杂物, 夹杂物主要含有 Al、C、Ca、O 等元素, 这些元素大多以氧化铝、碳酸钙等常见的形式存在, 结合表 3 的成分分析结果可知, 灰色块状夹杂物为氧化铝, 黑色块状夹杂物为碳酸钙, 白色相为基体相。由此可知, 形成了油缸裂纹主要是由于拼接间隙中存在大量氧化铝、碳酸钙等夹杂物, 且焊接后根部存在未熔合缺陷, 加上焊缝根部熔深不稳定, 根部组织分布不均匀、应力集中较大, 在焊接残余应力和工作载荷

作用下, 沿夹杂物开裂形成了裂纹^[15-19], 并向内部进行扩展, 直至表面, 因此, 形成了贯穿通道, 进而导致开裂失效。

2.5 结构受力

为分析裂纹扩展路径, 弄清裂纹路径的形成原因, 对油缸焊接后残余应力分布和使用过程中应力分布特征进行分析。对于环形焊缝, 一般将平行于焊缝

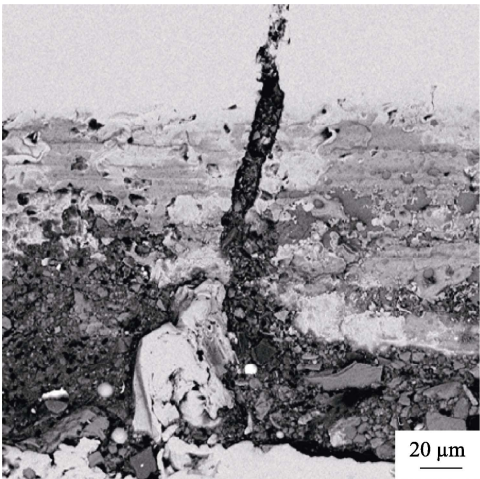


图 6 拼装间隙处裂纹显微形貌
Fig.6 Micro morphology of crack in assembly gap

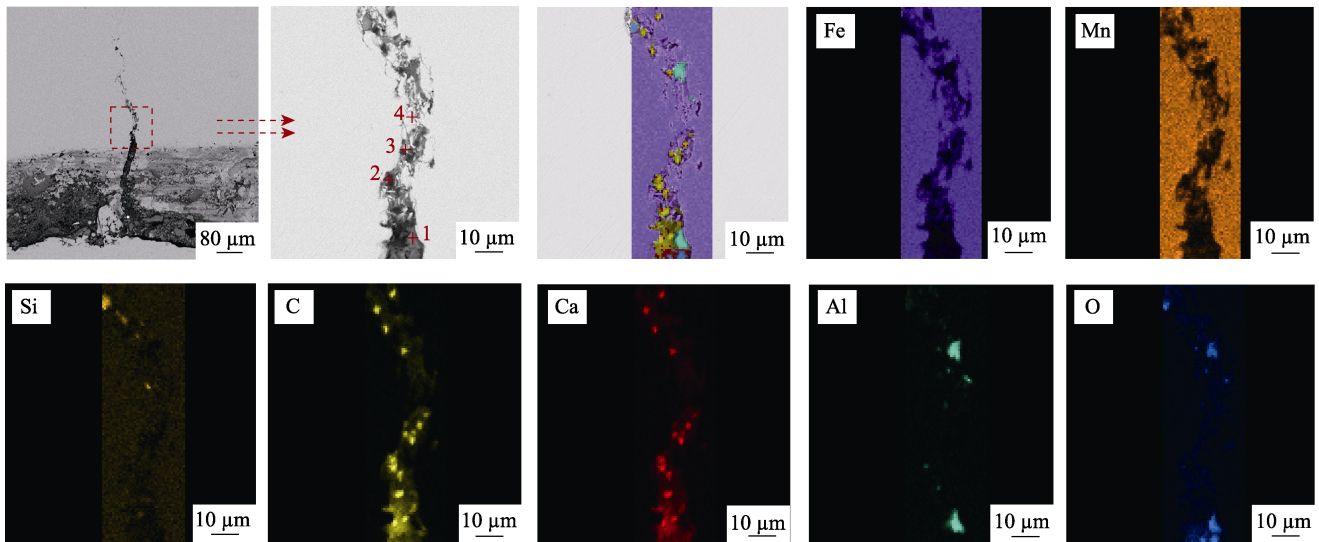


图 7 裂纹位置附近能谱分析
Fig.7 Energy spectrum analysis near the crack

表 3 裂纹处微观组织成分
Tab.3 Microstructure composition of crack

Position	wt. %						Ga
	Fe	Si	Mn	C	O	Al	
1	—	—	—	0.71	35.35	63.97	—
2	70.29	3.38	—	4.49	19.06	1.70	1.08
3	—	—	—	33.74	66.26	—	—
4	97.14	1.55	1.30	—	—	—	—

方向的残余应力称为周向残余应力,垂直于焊缝方向的残余应力称为轴向残余应力。焊后轴向残余应力和周向残余应力较大^[20],径向残余应力较小,可将其忽略。轴向残余应力沿厚度方向呈对称分布,内部为压应力,外表面热影响区表现为拉应力。周向残余应力沿厚度方向呈对称分布,且沿整个厚度方向都表现为拉应力,在焊缝根部和表面达到最大值。在轴向残余应力和周向残余应力的作用下,焊缝根部极易沿拼接处的夹杂物形成轴向或周向裂纹^[21-23]。

在平面应变内压载荷下,厚壁筒内表面 I 型裂纹尖端应力强度因子 K_I 的计算公式如式(1)所示^[24]。

$$K_I = \frac{2.24K^2}{K^2 - 1} P \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{t}, K\right) \quad (1)$$

式中: K 为厚壁筒外径与内径之比; P 为裂纹尖端应力, MPa; a 为裂纹深度, mm; t 为缸筒壁厚, mm; $f(a/t, K)$ 为几何函数。

K_I 主要与裂纹的尺寸、构件几何特征及载荷有关, K_I 越大,表示裂纹尖端的应力越大,裂纹越容易扩展,反之,裂纹越不容易扩展。随着裂纹初始角 β 的增大,裂纹前沿应力强度因子逐渐减小,轴向裂纹最大,周向裂纹最小,即轴向裂纹比周向裂纹更容易发生扩展^[25]。另外,焊缝熔深存在波动,最深处在缸体与缸底拼接间隙附近,焊缝根部易与缸底产生熔合不良的现象,加上氧化铝、碳酸钙等夹杂物的存在,导致裂纹沿轴向形成并扩展。

在油缸服役过程中,其内部受到液压油的压力作用,外部除了大气压外,无其他压力作用,因此忽略外部压力作用,只考虑内部液压油的压力作用。以油缸焊缝任一位置为例,该位置受到轴向应力、径向应力和周向应力作用,轴向应力沿横截面均匀分布。焊缝位置横截面受力示意图如图 8 所示。其中,油缸内部压力 P_0 为 31.5 MPa,油缸内筒半径 R_0 为 200 mm,外筒半径 R_1 为 240 mm, $K=1.2$,因此将开裂的液压油缸按照厚壁筒结构进行受力分析^[26]。

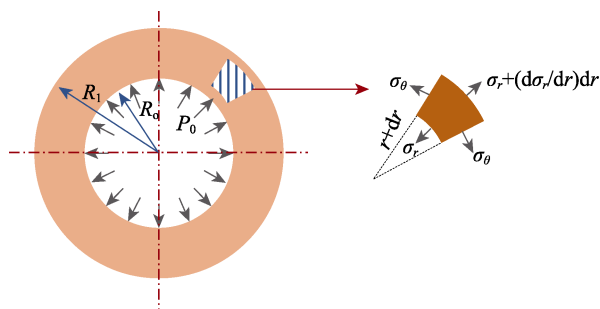


图 8 液压油缸服役过程受力分析示意图

Fig.8 Force analysis diagram of hydraulic cylinder in service

由拉美公式可知,当液压油缸外部压力为 0 时,焊缝处所受周向应力、径向应力、轴向应力的计算公式如式(2) — (4) 所示。

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_0}{K^2 - 1} \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_r = \frac{P_0}{K^2 - 1} \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{P_0}{K^2 - 1} \quad (4)$$

式中: σ_{θ} 为周向应力, MPa; σ_r 为径向应力, MPa; σ_z 为轴向应力, MPa; r 为油缸圆筒上任意位置处的半径, mm。

由式(2) — (4) 可知,当内部液压压力固定时,轴向应力为拉应力(应力为正值),且数值不变,沿壁厚方向均匀分布,为周向应力和径向应力之和的一半;周向应力为拉应力(应力为正值),且距离油缸内壁越近,应力越大,当在油缸内壁位置时,周向应力最大,为轴向应力的 $(1+K)$ 倍,在外壁表面位置时,周向应力最小,为轴向应力的 2 倍;径向应力为压应力(应力为负值),当在油缸内壁时,径向应力最大,等于油缸内部压力 P_0 ,在油缸外壁表面位置时,径向应力最小,为 0。

将 $P_0=31.5$ MPa、 $R_1=240$ mm、 $K=1.2$ 代入式(2) — (4),可得焊缝任一位置 r 处所受的三向应力值。在仅受内压力作用下,缸筒内的各应力分布情况如图 9 所示。

由图 9a—c 可知,在液压油缸服役过程中,整个

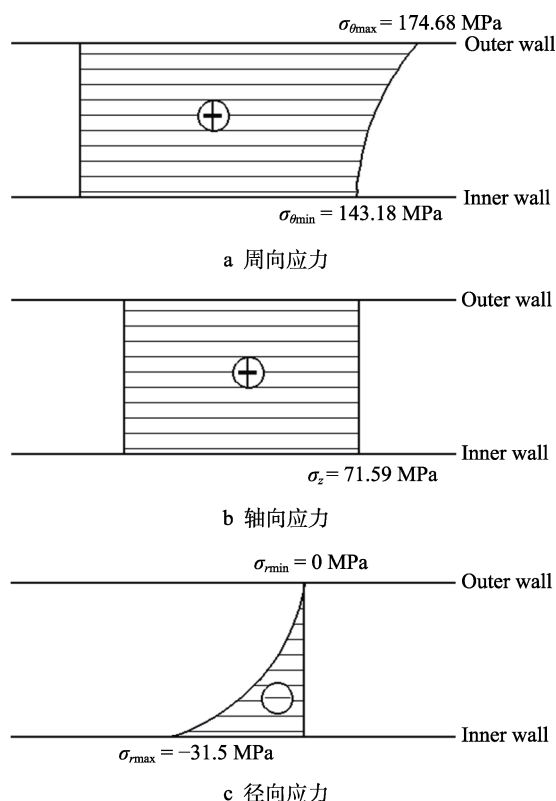


图 9 液压油缸筒体内各方向应力分布图

Fig.9 Stress distribution in hydraulic cylinder in different directions: a) circumferential stress; b) axial stress; c) radial stress

焊缝位置根部承受的应力最大,其中周向应力约为 174 MPa,远大于工作载荷,径向应力约为 31.5 MPa,轴向应力为 71.59 MPa。加上焊缝根部夹杂物的聚集,在焊接残余应力和工作载荷的作用下,沿夹杂物形成轴向裂纹源,并在周向应力的作用下,裂纹沿轴向和径向发生扩展,最后形成碗状的裂纹扩展面,与缸体内部形成连通通道,导致液压油发生渗漏。

对于此类液压油缸渗漏问题,通过焊前清理坡口,尤其是焊道根部,可有效避免根部裂纹缺陷的产生,同时适当升高焊前预热温度,降低焊接热输入,焊后缓冷或增加焊后去应力退火,减少焊接残余应力,可有效减少裂纹产生倾向,降低液压油缸渗漏风险。

3 结论

1) 通过对焊缝开裂位置进行逐层分析,发现裂纹属于明显的张开型(I型)裂纹,从焊缝根部向缸体表面呈碗状扩展,为内部液压油提供了一个连通通道,导致液压油发生渗漏。

2) 通过对裂纹附近区域进行微观组织和扫描电镜分析,发现焊缝根部熔合不良,部分拼接处存在未熔透缺陷,造成附近区域组织分布不均匀、应力集中较大,形成接头的薄弱区域,而未熔透处存在的大量氧化铝、碳酸钙等夹杂物,引起了局部应力集中,在焊接残余应力和工作载荷的作用下,沿夹杂物开裂形成裂纹,焊缝根部的未熔透缺陷和非金属夹杂物是形成裂纹的主要原因。

3) 通过对工件内焊接残余应力和工作载荷的分布情况进行分析,发现在工作载荷作用下,焊缝根部周向拉应力和轴向拉应力达到最大值,其中周向拉应力约为工作载荷的 5.5 倍,在周向拉应力作用下,裂纹沿径向和轴向发生扩展,最后形成碗状的裂纹扩展面。

参考文献:

- [1] 侯星梅,邢雪迪,魏龙涛,等. 液压油缸焊缝渗漏问题的解决[J]. 航天制造技术, 2014(4): 53-56.
HOU Xing-mei, XING Xue-di, WEI Long-tao, et al. Solution about the Weld Leakage of Hydraulic Cylinder[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(4): 53-56.
- [2] 杨峰,陆兴华,宋阳. 液压缸焊接接头开裂原因分析[J]. 电焊机, 2015, 45(6): 154-157.
YANG Feng, LU Xing-hua, SONG Yang. Cracking Cause Analysis of Hydraulic Cylinder Welded Joint[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(6): 154-157.
- [3] 衡钊,舒林森. 激光功率对 27SiMn 钢激光熔覆力学性能的影响[J]. 中国激光, 2022, 49(8): 118-126.
HENG Zhao, SHU Lin-sen. Effect of Laser Power on

- Mechanical Properties of Laser Cladded 27SiMn Steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(8): 118-126.
- [4] 周宪海,郑桂芸,张佩. 27SiMn 钢表面裂纹形成原因分析及控制措施[J]. 特钢技术, 2019, 25(1): 48-50.
ZHOU Xian-hai, ZHENG Gui-yun, ZHANG Pei. Analysis and Control of Surface Crack Defect of 27SiMn steel[J]. Special Steel Technology, 2019, 25(1): 48-50.
- [5] 王志军,崔荣,吴长明. 推头液压缸底板与缸筒环缝纵向开裂的分析[J]. 金属加工(热加工), 2014(10): 81-82.
WANG Zhi-jun, CUI Rong, WU Chang-ming. Analysis of Longitudinal Cracking Between Bottom Plate of Push Head Hydraulic Cylinder and Cylinder Ring Seam[J]. MW Metal Forming, 2014(10): 81-82.
- [6] 周阿芳,王志远,韦金钰,等. 液压缸用高强钢焊接接头性能及组织研究[J]. 压力容器, 2013, 30(9): 20-23.
ZHOU A-fang, WANG Zhi-yuan, WEI Jin-yu, et al. Mechanical Property and Microstructure of the High Strength Steel Welded Joint Used in Hydraulic Cylinder[J]. Pressure Vessel Technology, 2013, 30(9): 20-23.
- [7] 黄上甫,王梗蕊,富泉,等. 27SiMn 钢中厚板焊接工艺研究[J]. 金属加工(热加工), 2022(3): 53-56.
HUANG Shang-fu, WANG Geng-rui, FU Quan, et al. Research of Welding Process of 27SiMn Medium Thick Plate[J]. MW Metal Forming, 2022(3): 53-56.
- [8] 易军,黄皓磊,洪旭. 热处理温度对改性 27SiMn 钢液压缸体组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(8): 217-219.
YI Jun, HUANG Hao-lei, HONG Xu. Effect of Heat Treatment Temperature on Microstructure and Properties of Modified 27SiMn Steel Hydraulic Cylinder[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(8): 217-219.
- [9] GB/T 17396—2009, Hot-rolled Seamless Steel Tubes for Hydraulic Pillar Service[S].
- [10] 汪凤,隋永莉,冯大勇,等. L360 钢级天然气管道环焊缝裂纹成因分析及预防[J/OL]. 热加工工艺, [2022-08-24]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD643Qm4HxTlJ5_8sqFyCBqN9Wnvf0-BsJlHK9gPqH7MVBt086GLzE7vn&uniplatform=NZKPT.
- [11] 郭俊锋,周旭东,李汉. 铸态 27SiMn 钢热变形行为及热加工图[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(12): 128-133.
GUO Jun-feng, ZHOU Xu-Dong, LI Han. Hot Deformation Behavior and Processing Maps of as-Cast 27SiMn Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,

- 2014, 35(12): 128-133.
- [12] 崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- CUI Zhong-qi, LIU Bei-xing. Metallurgy and Heat Treatment Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004.
- [13] 洪磊, 贺文, 刘红生. 高强度钢-普通钢拼焊板热冲压成形机理研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(5): 109-119.
- HONG Lei, HE Wen, LIU Hong-sheng. Hot Stamping Mechanism of High Strength Steel-Common Steel Tailor Welded Blanks[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(5): 109-119.
- [14] 谢胜楠, 张会杰, 孙舒蕾, 等. 高转速 FSW 工艺特征及焊缝组织性能演变规律研究[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 61-66.
- XIE Sheng-nan, ZHANG Hui-jie, SUN Shu-lei, et al. Process Characteristics and Weld Structure-Property Evolutions of High Rotation Speed FSW[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(2): 61-66.
- [15] 李亮, 黄磊, 聂向晖, 等. 含缺陷 X70 管线钢环焊缝检验及分析[J]. 压力容器, 2021, 38(2): 66-72.
- LI Liang, HUANG Lei, NIE Xiang-hui, et al. Inspection and Analysis of Defect-Containing Girth Welds Cut off From the X70 Pipeline in Service[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(2): 66-72.
- [16] 陈建国, 王泽军, 马青军, 等. X80M 管道环焊缝开裂原因分析[J]. 压力容器, 2021, 38(6): 70-78.
- CHEN Jian-guo, WANG Ze-jun, MA Qing-jun, et al. Analysis on Cracking Causes of X80M Pipeline Girth Weld[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(6): 70-78.
- [17] 杨锋平, 许彦, 曹国飞, 等. X80 管线钢环焊缝力学性能及缺陷成因分析[J]. 压力容器, 2020, 37(1): 68-73.
- YANG Feng-ping, XU Yan, CAO Guo-fei, et al. Analysis of Key Mechanical Properties and Defect Causes of X80 Girth Weld[J]. Pressure Vessel Technology, 2020, 37(1): 68-73.
- [18] 张宏, 吴锴, 冯庆善, 等. 高钢级管道环焊缝断裂韧性与裂尖拘束关系[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 385-393.
- ZHANG Hong, WU Kai, FENG Qing-shan, et al. Relationship between Fracture Toughness and Crack Tip Constraint of Girth Weld of High Grade Steel Pipeline[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 385-393.
- [19] 张神良, 何玉龙, 毕玉龙, 等. 管道环焊缝根部裂纹的有限元评价方法研究[J]. 当代化工研究, 2023, 127(2): 129-131.
- ZHANG Shen-liang, HE Yu-long, BI Yu-long, et al. Research on the Finite Element Evaluation of the Root Cracks of Pipeline Girth Weld[J]. Modern Chemical Research, 2023, 127(2): 129-131.
- [20] 徐甄真, 尤奇桑, 王仪, 等. 不同焊接参数下 CT70 连续钢管高频电阻焊残余应力分布的数值模拟[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 66-74.
- XU Zhen-zhen, YOU Qi-shen, WANG Yi, et al. Numerical Simulation of Residual Stress Distribution of CT70 Coiled Tubing Welded by High Frequency Resistance Welding under Different Welding Parameters[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 66-74.
- [21] 陈勇, 徐育焱, 杨海波, 等. 304 不锈钢薄壁管件纵缝焊接接头残余应力数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 155-163.
- CHEN Yong, XU Yu-lang, YANG Hai-bo, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in Longitudinal Welded Joint of 304 Stainless Thin-Walled Pipes[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 155-163.
- [22] 吕刘帅, 张小春, 苏博, 等. 镍基合金压力容器环形焊缝残余应力数值模拟与失效力分析[J]. 核技术, 2019, 42(7): 74-82.
- LYU Liu-shuai, ZHANG Xiao-chun, SU Bo, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in Girth Weld and Failure Stress Analysis of Reactor Vessel[J]. Nuclear Techniques, 2019, 42(7): 74-82.
- [23] 胡建英, 叶金铎. 残余应力对液压油缸缸筒承载能力影响的有限元分析[J]. 机床与液压, 2006(10): 111-113.
- HU Jian-ying, YE Jin-zhuo. FE Analysis of the Residual Stress on Bearing Capacity of the Hydraulic Cylinder[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(10): 111-113.
- [24] 秦媛媛, 秦晓峰, 陈占春. 厚壁筒内表面平行双轴向裂纹间影响规律研究[J]. 机电工程, 2022, 39(2): 276-280.
- QIN Yuan-yuan, QIN Xiao-feng, CHEN Zhan-chun. Factors Influence on the Interference of Parallel Biaxial Cracks in Inner Surface of Thick of Thick-Walled Pipe[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(2): 276-280.
- [25] 贾明辉. 核反应堆压力容器 J 型坡口残余应力及裂纹扩展研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- JIA Ming-hui. Research on Residual Stress and Crack Propagation in J-Bevel of Nuclear Reactor Pressure Vessel Head[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [26] 张皓斌. 厚壁圆筒强度及开孔补强的分析与讨论[J]. 化工设计, 2020, 30(6): 19-24.
- ZHANG Hao-bin. Analysis and Discussion on Strength of Thick Wall Cylinder and Opening Reinforcement[J]. Chemical Engineering Design, 2020, 30(6): 19-24.

责任编辑: 蒋红晨