

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.14

焊接参数对聚乙烯(PE)圆管电熔焊接头连接强度和失效模式的影响

郑建豹, 刘 剑, 张 海, 张文洲, 易际研, 缪海波, 蔡智会

温州市特种设备检测科学研究院, 浙江 温州 325800

摘要: 电熔焊是工程中连接聚乙烯(PE)管道最为常见、有效的方法,其焊接参数对焊接接头的力学性能和失效模式具有重要影响。研究采用不同的焊接参数对PE100圆管进行电熔焊接,通过拉伸剥离试验评价焊接接头的力学性能,并采用光学显微镜和体式显微镜表征焊接接头与失效界面的形貌。焊接电压、焊接时间和环境温度作为变量,系统评估其对焊接接头质量的影响。试验结果表明,随着焊接电压的提高,熔合区宽度逐渐增大,接头的力学性能呈现出先上升后下降的趋势。焊接电压为39.5V时,焊接接头的拉伸剥离强度最高可达1 191 N;当焊接电压超过41.5 V时,连接界面出现因塑料分解导致的烧蚀与孔洞,显著降低了焊接接头的力学性能。焊接接头呈现出三种典型的失效模式:焊接电压小于37.5V时为脆性+韧性的复合失效模式;焊接电压为39.5 V时为完全的韧性失效模式;焊接电压大于41.5 V时为强度衰退的韧性失效。焊接参数和焊接热输入对电熔焊的影响具有两面性。为了保证接头的力学性能,需要对焊接参数进行优化和调控,避免熔合面破坏和烧蚀孔洞的产生。

关键词: PE100; 电熔焊; 焊接参数; 连接强度; 失效模式

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0107-06

Influence of Welding Parameters on the Joining Strength and Failure Modes of the Electric Fusion Welded PE Pipes

ZHENG Jianbao, LIU Jian, ZHANG Hai, ZHANG Wenzhou, YI Jiyang, MIAO Haibo, CAI Zhihui

Wenzhou Special Equipment Inspection & Science Research Institute, Wenzhou 325800, China

Abstract: Electrical fusion welding is the most common and effective method for connecting polyethylene (PE) pipes in engineering. The welding parameters significantly influence the mechanical properties and failure modes of the welded joints. Different welding parameters were used to perform electrical fusion welding on PE100 pipes. The mechanical properties of the welded joints were evaluated through tensile peeling tests, and the morphology of the welded joints and failure interfaces was characterized using optical microscopes and stereomicroscopes. Welding voltage, welding time, and environmental temperature were taken as variables to systematically assess their impact on the quality of the welded joints. Test results show that as the welding voltage increases, the width of the fusion zone gradually enlarges, and the mechanical properties of the joints first rise and then decline. When the welding voltage is 39.5 V, the tensile peeling strength of the welded joint can reach up to 1,191 N; when the welding voltage exceeds 41.5 V, burnout and holes caused by plastic decomposition begin to appear on the connection interface, significantly reducing the mechanical performance of the welded joints. Three typical failure modes of the welded joints are observed: a combination of brittleness and toughness when the welding voltage is less than 37.5V; a complete toughness failure mode when the welding voltage is 39.5 V; and a strength-declining toughness failure when the welding voltage is greater than 41.5 V. The influence of welding parameters and heat input on electrical fusion welding is a double-edged sword. To ensure the mechanical properties of the joints, it is necessary to optimize and regulate

收稿日期: 2024-04-26 修回日期: 2024-09-07

基金项目: 浙江省市场监督管理局科技计划(ZC2021B066)

作者简介: 郑建豹(1982—),男,学士,工程师,主要从事特种设备检验研究。

通讯作者: 蔡智会(1985—),男,工程师,博士,主要从事承压设备加工、检验技术及无损检测可靠性研究。E-mail: zhihui.cai@wzsci.com。

the welding parameters, avoiding damage to the fusion surface and the occurrence of burnout and holes.

Keywords: PE100; electric fusion welding; welding parameters; joining strength; failure mode

引用格式:郑建豹,刘剑,张海,等. 焊接参数对聚乙烯(PE)圆管电熔焊接头连接强度和失效模式的影响[J]. 电焊机,2025,55(4): 107-112.

Citation:ZHENG Jianbao, LIU Jian, ZHANG Hai, et al. Influence of Welding Parameters on the Joining Strength and Failure Modes of the Electric Fusion Welded PE Pipes[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 107-112.

0 引言

化石能源长期占据着能源消费领域中的主导地位,2021年化石能源占全球能源消费结构的82%,其中天然气占比约24%,仅次于煤炭和石油^[1]。相比而言,天然气更为清洁、低碳、高效,被视为传统化石能源的主要替代品之一。随着“碳达峰、碳中和”发展战略的提出,天然气必将在我国能源结构转型过程中扮演重要的角色^[2-3]。

管道运输是天然气运输的主要方式,天然气管网的铺设与维护直接关系到城镇居民用气的便捷性与安全性^[4]。聚乙烯(PE)管具有使用寿命长、耐腐蚀性好、抗震能力强等优势,已被广泛应用于城市天然气管网输配工程中^[5]。同时,天然气管网的密封性与安全性也对PE管道的连接技术提出了更高的要求。目前,工程中通常采用热熔焊和电熔焊两种方式连接PE管道。热熔焊采用加热盘对PE管的端部进行加热,使材料进入熔融状态,随后施加外力将管道两端紧密贴合,聚乙烯分子链在压力作用下互相缠结,冷却凝固后获得稳固的连接^[5]。但是,PE管道的热熔焊过程较为复杂,尤其是对管道端口的加工精度与定位要求极为严格。电熔焊采用特制的电熔焊套筒实现对聚乙烯管道的定位,预埋在套筒中的电阻丝在电流作用下迅速产热熔化接触面两侧的塑料基体,依靠管道和套筒热胀冷缩产生的挤压力实现聚乙烯分子的缠结。相比而言,电熔焊的操作更为便捷,焊接质量受环境影响较小,在实际生产中也得到了更为广泛的应用^[6]。

PE管道焊接接头的连接强度与质量是决定其使用安全的关键因素。宋晓娟^[7]等人测试了含工艺缺陷的PE管道热熔焊接头的力学性能,发现不同工艺缺陷导致管材拉伸测试中的应力集中有所不同,产生了5种断裂形式。徐书丰^[8]等人评价了焊接缺

陷对PE管热熔焊接头长期性能影响。结果表明,低应力情况下缺陷越大疲劳寿命越短,高应力作用下缺陷对疲劳寿命影响较小。董守江^[9]等人对PE管热熔焊接头的断口特征进行了分类,指出虚焊、假焊是PE管存在的主要缺陷,对焊接强度影响较大。张国强^[10]研究了氧化皮对PE100热熔焊和电熔焊接头性能的影响,发现氧化皮未去除时,热熔焊接头的最大拉应力仅为正常接头的16.1%。熔焊时,高熔点的氧化皮影响了电阻丝对塑料母材的加热过程,因此接触界面两侧聚乙烯分子间未充分扩散缠结,无法形成稳定的连接。曹善刚^[11]分析了大口径HDPE管道电熔焊缺陷的形成机理,提出合理制定电熔焊工艺流程、量化相关工艺参数是提高焊接质量的有效手段。然而,上述文献研究缺乏对PE管道电熔焊接头失效模式与工艺影响机理的分析,不足以指导、解决工程中的电熔焊工艺优化问题。

本研究基于不同的焊接参数制备了PE100圆管电熔焊接头。通过拉伸剥离试验评价了焊接接头的力学性能,采用光学显微镜和体式显微镜表征了焊接接头与失效界面的形貌特征。研究了焊接工艺参数对焊接结果的影响机理,为PE管道电熔焊方法的工艺优化与性能调控提供了理论依据。

1 试验方法

1.1 焊接试验设计

本研究采用电熔焊(EFW)方法连接PE100圆管,原料牌号为HE3490-LS,管材规格为DN110 SDR11,采用配套的电熔套筒进行焊接。PE100圆管和电熔套筒的尺寸参数如图1所示。

焊接前对PE100圆管待连接端进行表面处理,去除氧化层并用酒精清洗、风干,插入电熔套筒进行焊接,单侧插入深度约为75 mm。电熔套筒内壁

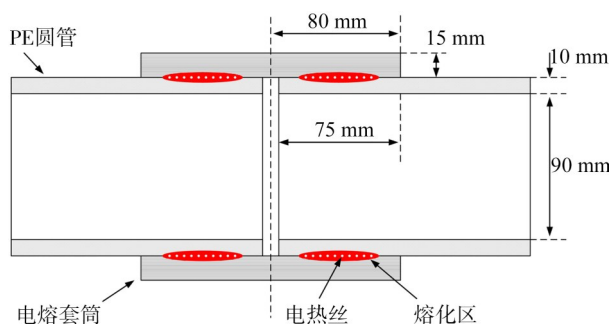


图1 PE100圆管电熔焊尺寸示意

Fig. 1 The dimension of electric fusion welded joint of PE100 pipes

预埋铜质线圈作为发热体,在焊接电流的作用下产生电阻热对塑料基体进行加热,界面附近的塑料基体受热膨胀、熔化后在压力作用下形成分子链之间的缠结,冷却后获得稳定的焊接接头。

本研究设计了5组不同的焊接参数对PE100圆管进行电熔焊连接,具体参数如表1所示。实际焊接接头如图2所示。

表1 PE100圆管电熔焊参数
Table 1 EFW parameters of PE100 pipes

组别	焊接电压/V	焊接时间/s	环境温度/℃
1#	35.5	150	20
2#	37.5	150	20
3#	39.5	150	20
4#	41.5	150	20
5#	42.5	150	20



图2 PE100圆管电熔焊接头

Fig. 2 Photograph of electric fusion welded joint of PE100 pipes

1.2 测试与表征方法

焊接完成后,对PE100圆管电熔焊接头进行车铣加工,获得接头连接区域的试样。取样位置如图3所示。试样采用2000#砂纸打磨并经过超声清理,用于获得熔合区的尺寸及宏观信息。

本研究采用拉伸剥离试验评估焊接接头的力学性能,依据标准GB/T 19808—2005,测试平台为电子万能试验机XWW-20A,拉伸速度为25 mm/min,环境温度为21℃。测试完成后,采用Nikon SMZ-745T体式显微镜对失效界面进行分析,以揭示焊接

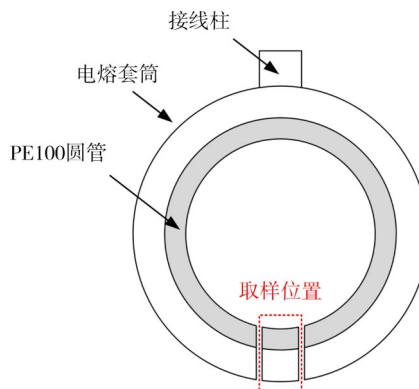


图3 取样位置

Fig. 3 The locations of specimen on EFWed joint

接头的失效机制和微观结构特征。

2 结果与讨论

2.1 PE100电熔焊接头界面形貌

PE100圆管电熔焊接头界面处的宏观形貌照片如图4所示。宏观形貌显示,电熔套筒和PE100圆管界面的塑料在电热丝产生的电阻热作用下熔化并形成稳定连接。由于聚乙烯(PE)是非晶体材料,其熔化和凝固后的基体组织形貌不会发生明显的变化,难以直接观察到熔化区的轮廓,只能通过测定熔化区宽度来评估焊接效果。随着焊接电压的增加,电热丝的发热量和塑料的熔化量持续增加,熔化区宽度逐渐增大,当焊接电压为42.5 V时,熔化区宽度达到最大值35.8 mm。然而,过高的热输入会引发塑料的过热分解,导致基体中出现气孔。如图4d、图4e所示,在连接界面处分别可以观察到轻微的烧蚀现象和明显的气孔,表明所使用的焊接参数已经使塑料发生了分解。由于盘绕的电热丝可以视为一个个功率相同的热源,电熔焊过程中,电热丝排布区域中心的温度最高,塑料的热分解现象也更容易在此处产生。

PE100圆管电熔焊接头界面中心区域的微观形貌(放大倍数为30倍)如图5所示。由于电熔套筒和待连接圆管的材料均为PE100,塑料熔化、冷却后形成整体,因此在连接界面处没有明显分界线。在图5a、图5b中,由于焊接电压较低,电热丝被塑料基体完整地包裹。随着焊接电压增大至41.5 V,电热丝周围的塑料呈现出黑色并在打磨过程产生了明



图4 PE100圆管电熔焊接头界面宏观形貌

Fig. 4 Macro-morphology of the joining interface on EFWed joint of PE100 pipes

显的撕扯特征,这表明局部的塑料已经开始受热发生分解。如图5d、5e所示,更大的热输入会加剧塑料分解,在电热丝附近形成明显的烧蚀和孔洞。

2.2 PE100电熔焊接头的力学性能

不同焊接参数下,PE100圆管电熔焊接头的拉伸剥离试验结果如图6所示。试验结果显示,力-位移曲线在初期表现出相似的变化趋势。与传统金属不同,塑料作为高分子材料,其焊接接头在拉伸过程中没有明显的屈服阶段。焊接参数对电熔焊接头力学性能的影响主要体现在拉伸剥离试验的强度峰值以及最大位移。

试验1#(焊接电压35.5 V)中,电熔套筒与待连接圆管之间可以形成有效的连接,拉伸剥离强度的峰值约为995 N,失效时最大位移约为28 mm。随着焊接电压提高到37.5 V,拉伸剥离强度峰值和最大位移分别提高至1 131 N和40 mm。这表明更高的热输入促进了塑料的熔化膨胀,增强了塑料分子链之间的缠结,从而获得了更好的力学性能。试验



图5 PE100圆管电熔焊连接界面中心区域微观形貌

Fig. 5 The micro-morphology at the centre of joining interface on EFWed joint of PE100 pipes

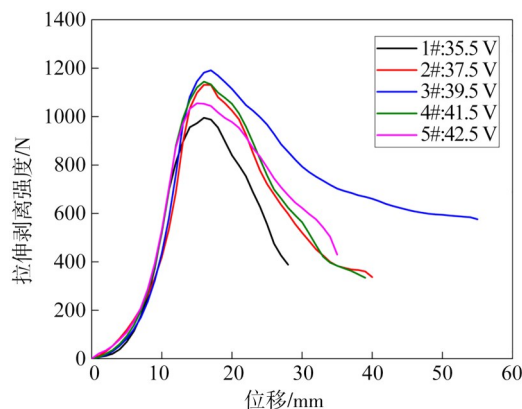


图6 拉伸剥离试验结果

Fig. 6 The results of peel decohesion test

3#中(焊接电压39.5 V),拉伸剥离强度峰值达到约1 191 N,最大位移为55 mm。此时,力-位移曲线达到峰值后缓慢下降,接头呈现出韧性断裂的特征,焊接接头获得了最佳的力学性能。然而,随着焊接电压的继续提升,连接界面的塑料在过量热输入的作用下开始分解、烧损,导致焊接接头宏观力学性能的衰退。试验4#中焊接接头的力学性能与试验2#基本一致。当焊接电压达到42.5 V(试验5#)时,连接界面的塑料在过量热输入的作用下显著分解,产生明显的孔洞,降低了电熔套筒与待连接圆管之

间的有效连接面积,导致焊接接头的力学性能出现显著下降。拉伸剥离试验的强度峰值和最大位移分别降低至1 055 N和36 mm。

PE100圆管电熔焊接头拉伸剥离强度随焊接电压的变化趋势如图7所示。总体而言,本研究中采用的5组焊接参数均能实现PE100圆管与电熔套筒之间的有效连接,拉伸剥离强度均大于900 N。焊接热输入对焊接接头力学行为的影响具有两面性。一方面更高的热输入有助于保证塑料的熔化以及分子链之间的缠结,可以获得更大的熔化区宽度进而实现更高的连接强度;另一方面,过量的热输入又会引发塑料的分解,连接界面上的烧蚀和孔洞降低了有效连接面积,显著削弱了连接强度。因此,设定合理的电熔焊参数对保证PE100圆管电熔焊质量至关重要。本研究中,采用39.5 V焊接电压可以获得最优的接头力学性能。

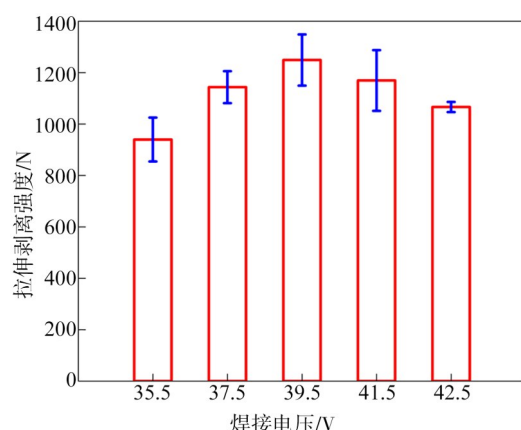


图7 焊接电压对拉伸剥离强度的影响

Fig. 7 The influence of welding voltage on peel decohesion strength

2.3 PE100电熔焊接头的失效模式

PE100圆管电熔焊接头拉伸剥离试验后的失效界面形貌如图8所示。可以看出,失效界面呈现出三种典型的失效模式。图8a中,虚线右侧区域可以看到黄色的电热丝被覆盖在黑色的塑料基体以下,即失效发生在电熔焊套筒与PE100圆管的熔接面上,此处的失效模式为熔接面破坏,呈现出较弱的局部连接强度;虚线左侧区域内,电热丝从其原有位置被拉脱,此处的失效模式为线圈之间拉裂,呈现出较强的局部连接强度,此时焊接接头表现为脆性+韧性的复合失效模式。试验2#的失效模式与试验1#类似,如图8b所示。由于采用了更大的焊接电

压和热输入来提高界面的连接质量,失效界面上右侧的熔接面破坏区域变小,左侧的线圈间拉裂区域变大。因此,接头呈现出更强的宏观力学性能。

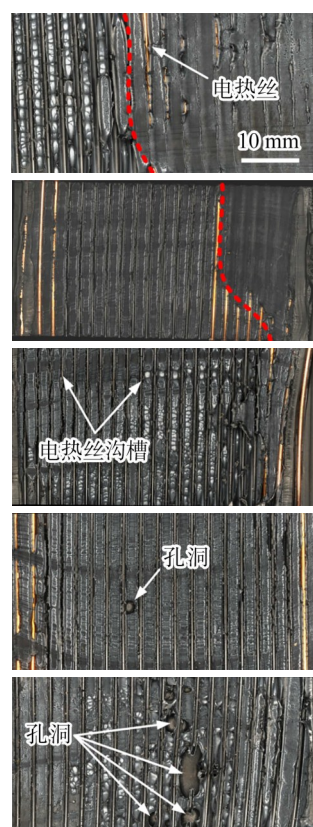


图8 PE100圆管电熔焊拉伸剥离试验失效界面形貌

Fig. 8 The fracture surface of PE100 EFWed joint after peel decohesion test

当焊接电压达到39.5 V时(试验3#),焊接接头表现为完全的韧性失效模式。此时,电熔套筒与PE100圆管沿线圈之间拉裂,电热丝沟槽之间的塑料基体呈现出较为粗糙的拉伸断裂形貌,焊接接头的拉伸剥离强度达到峰值。随着焊接电压的进一步提高,试验4#中电热丝预埋沟槽附近可以观察到较小的孔洞,这表明塑料已经开始过热分解。这一现象在试验5#中更为明显,如图8e所示。塑料的剧烈烧蚀、分解在电热丝预埋沟槽附近产生大量的孔洞,严重降低了电熔套筒与PE100圆管之间的有效连接面积。此时焊接接头的力学性能显著下降,呈现出强度衰退的韧性失效模式。

总体而言,PE100圆管电熔焊过程中,界面温度直接决定了焊接接头的失效模式与宏观力学性能。较高的界面温度可以使失效模式由熔接面破坏转

为线圈之间拉裂,呈现出更高的界面连接强度;同时还要避免连接界面处塑料过热分解形成大量空洞,降低有效连接面积进而削弱接头的力学性能。为了确保电熔焊的质量,有必要对焊接工艺参数进行优化与控制。

3 结论

本研究系统探讨了焊接参数对PE100圆管电熔焊接头连接强度和失效模式的影响。结论如下:

(1)随着焊接电压的提高,PE100圆管电熔焊接头的熔化区宽度逐渐增大。然而,过高的焊接电压(超过41.5 V)会导致塑料过热分解,引发起烧与孔洞,影响焊接接头的完整性。

(2)随着焊接电压的持续提高,PE100圆管电熔焊接头的力学性能呈现出先上升后下降的趋势。焊接电压为39.5 V时,焊接接头的拉伸剥离强度达到峰值(1 191 N)。

(3)PE100圆管电熔焊接头呈现出三种不同的失效模式。焊接电压小于37.5 V时为脆性+韧性的复合失效模式;焊接电压为39.5 V时呈现出完全的韧性失效模式;焊接电压大于41.5 V时呈现出强度衰退的韧性失效模式。界面温度是决定失效模式的关键因素,较高的界面温度有助于提高连接强度,但需避免过热分解。

(4)焊接电压通过焊接热输入影响界面的局部强度与失效模式。为了保证PE100圆管电熔焊接头的力学性能,有必要对焊接参数进行优化调整,避免局部熔接面破坏与烧蚀孔洞的产生。

参考文献:

- [1] Xu G. An outlook analysis on China's natural gas consumption forecast by 2035: Applying a seasonal forecasting method[J]. *Energy*, 2023, 284: 128602.
- [2] 新华社. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-10-24) [2024-04-26]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [3] 杨仁洁. 我国城市燃气行业发展形势分析与思考[J]. *金陵科技学院学报:社会科学版*, 2021, 35(1): 37-41. YANG R J. Analysis and Thoughts on the Development Situation of China City Gas Industry[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 35(1): 37-41.
- [4] 方召君. 浅谈我国城市燃气发展现状与趋势[J]. *大众科技*, 2019, 21(1): 112-114. FANG Z J. Brief Discussion on the Development of Current Situation and Tendency of Urban Gas in China[J]. *Popular Science & Technology*, 2019, 21(1): 112-114.
- [5] 李兆璞, 武立文, 乔亮, 等. 聚乙烯管道热熔焊接技术研究进展[J]. *中国塑料*, 2022, 36(10): 104-116. LI Z P, WU L W, QIAO L, et al. Research progress in polyethylene pipeline hot melt welding technology[J]. *China Plastics*, 2022, 36(10): 104-116.
- [6] 赵红. 聚乙烯管道焊接技术和评价方法[J]. *中国塑料*, 2011(7): 48-53. ZHAO H. Welding Technology and Evaluation Method of Polyethylene Pipes[J]. *China Plastics*, 2011(7): 48-53.
- [7] 宋晓娟, 彭星煜, 喻建胜, 等. 含工艺缺陷PE管道热熔焊接接头力学性能测试分析[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(15): 100-103+109. SONG X J, PENG X Y, YU J S, et al. Testing and Analysis of Mechanical Properties of Hot Melt Welded Joints of PE Pipeline Containing Process Defects[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(15): 100-103+109.
- [8] 徐书丰, 周波, 黄磊, 等. 疲劳试验评价缺陷对PE管热熔焊接接头长期性能的影响[J]. *化工装备技术*, 2022, 43(5): 20-24. XU S F, ZHOU B, HUANG L, et al. Influence of Fatigue Test Evaluation Defects on Long-term Performance of PE Pipe Hot-Melt Welded Joints[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2022, 43(5): 20-24.
- [9] 董守江, 邱建新, 温友林, 等. PE管热熔(焊接)粘接缺陷的研究[J]. *中国特种设备安全*, 2015(07): 65-69. DONG S J, QIU J X, WEN Y L, et al. Research on Hot Melt (Welding) Bonding Defects of PE Pipe[J]. *China Special Equipment Safety*, 2015(07): 65-69.
- [10] 张国强, 孙宝财. 氧化皮对PE管材焊接接头性能的影响[J]. *现代塑料加工应用*, 2022(02): 39-42. ZHANG G Q, SUN B C. Influence of Oxide Scale on Properties of PE Pipe Welded Joints[J]. *Modern Plastics Processing and Applications*, 2022(02): 39-42.
- [11] 曹善刚. 大口径HDPE管道电熔焊接缺陷分析及应对措施[J]. *中国设备工程*, 2022(2): 175-176. CAO S G. Analysis and Countermeasures of Electric Fusion Welding Defects in Large-diameter HDPE Pipes[J]. *China Plant Engineering*, 2022(2): 175-176.