

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.014

PE 管道热熔焊接工艺参数的实验

卢涛^{1,2}, 文华斌^{1,3}, 张欣欣¹, 杨飞¹, 叶松泽¹

(1. 四川轻化工大学机械工程学院, 四川宜宾 644005; 2. 徐州浩特迈尔机电科技有限公司, 江苏徐州 221100;

3. 四川轻化工大学机械工程学院, 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川宜宾 644005)

摘要: 选择8种不同的焊接压力对4种规格聚乙烯(PE)管道进行焊接。通过对PE管道在热熔焊接过程中的压力、温度和位移量等参数变化进行测量, 结合动态扫描量热试验结果得到相应的熔融层厚度和焊接位移值, 并分析各工艺参数之间的关系。最后辅以拉伸试验验证, 得到能满足焊接要求的焊接压力区间以及熔融厚度挤出段与熔融层厚度之间的比值(S/L)区间。试验结果表明, 当熔融层厚度一定时, 通过控制位移参数, 达到一定范围内的 S/L 值, 可得到合格的管道热熔焊接接头。

关键词: 聚乙烯管道; 热熔焊接; 工艺参数

中图分类号: TQ320.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0069-06

Experimental on Technological Parameters of Hot Melt Welding of PE Pipe

Lu Tao^{1,2}, Wen Huabin^{1,3}, Zhang Xinxin¹, Yang Fei¹, Ye Songze¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Yibin 644005, China; 2. Xuzhou Hot Mail

Electromechanical Technology Co. Ltd., Xuzhou 221100, China; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University of Science and

Engineering, Key Laboratory of Process Equipment and Control Engineering in Sichuan Province, Yibin 644005, China)

Abstract: Eight different welding pressures were selected to weld four specifications of polyethylene (PE) pipes. Through the measurement of the pressure, temperature and displacement of the PE pipe during the hot-melt welding process, the corresponding melting layer thickness and welding displacement value were obtained by combining the dynamic stability control (DSC) test results, and the relationship between the process parameters was analyzed. Finally, supplemented by tensile test verification, the range of welding pressure and the ratio between the extruded section of the melt thickness and the thickness of the melt layer (S/L) that can meet the welding requirements were obtained. The test results show that: when the thickness of the molten layer is constant, by controlling the displacement parameter to reach the S/L value within a certain range, a qualified hot-melt welded joint can be obtained.

Keywords: polyethylene pipe; hot melt welding; process parameters

热熔焊接具有施工简单、成本低、适用范围广、技术简单易于掌握和连接可靠等优点, 在工程建设中得到广泛应用。相关研究表明, 聚乙烯(PE)管道焊接接头的焊接质量是在多种工艺参数条件作用下的综合结果, 各种因素的变化可直接影响管道的使用寿命^[1]。因此, 为保证分子链具有良好的扩散条件, 塑料件连接部位的温度、熔融厚度、焊接压力等参数值表现得尤为重要。

由于材料的不断发展和应用条件的变化, 国内

外对PE管热熔焊接技术的研究一直在进行, 主要研究工艺参数对焊接接头性能的影响因素^[2-7]。当前工艺在实际应用时存在如下问题: 一是管道与地面的摩擦程度在每次焊接过程都有所不同, 导致拖动压力不确定, 进而使焊接压力参数的取值难以确定; 二是每次焊接时环境温度不同, 使得吸热所需时间不确定, 可能造成切换时, 管件熔融层厚度未达到热熔对接的要求。两塑料件对接时, 穿越界面的分子链数量和穿越深度决定了塑料焊接件的接头强

基金项目: 国家自然科学基金项目(11872043), 自贡市应用基础研究项目(2020YGJC15)

通信作者: 文华斌, 教授, 主要研究方向为工程力学 E-mail: sichuanwhb@sina.com

收稿日期: 2021-02-27

引用格式: 卢涛, 文华斌, 张欣欣, 等. PE管道热熔焊接工艺参数的实验[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 69-74.

Lu Tao, Wen Huabin, Zhang Xinxin, et al. Experimental on technological parameters of hot melt welding of PE pipe[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 69-74.

度^[8],因此假设当熔融层厚度达到合理值时,通过控制位移参数,使熔融厚度挤出段与熔融层厚度之间的比值达到一定量后,可得到高质量的焊接接头,从而有效规避上述问题。据此,笔者从试验研究角度出发,验证上述猜想,并获取合格的熔融厚度挤出段与熔融层厚度之间的比值区间,以期实现一种以位移为焊接工艺参数的新工艺在实际工程中的应用,为后续新型热熔焊接装置的研发提供试验依据。

1 试验部分

1.1 原材料

PE 管材: SDR11, SDR17, 江特科技股份有限公司。

1.2 试验设备

(1) 焊接试验设备。

试验所用焊接装置采用自主设计的手动 PE 管道热熔焊接机,其试验装置如图 1 所示,可实现焊接过程中加热温度、焊接位移、焊接压力等参数信息的实时显示。设备通过曲柄滑块机构传递焊接过程所需压力,压力传感器 1 安装在夹持导向装置上,监测焊接过程所施压力;压力传感器 2 安装在加热板水平两端,可对加热压力进行显示;位移测量装置与夹具连接,根据夹具移动量可获取管道在对接时挤出的熔融层厚度;温度测量装置安装在加热板顶部,实时监测管道焊接区域的温度。红外探头采用交错式布置,点位分布如图 2 所示,探头沿轴向分别为距离加热板端面 8.2, 10.2, 12.2, 24.2, 35.2 mm。

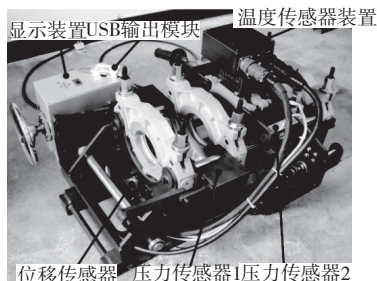


图1 PE管道热熔焊接实验装置

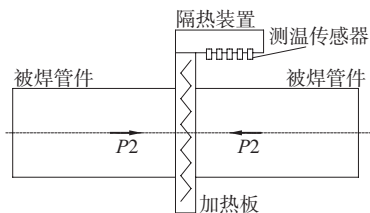


图2 温度测量装置示意图

(2) 拉伸试验设备。

微机控制电子万能试验机: CMT5504 型, 美特

斯工业系统(中国)有限公司。

1.3 试验方案

焊接试验环境控制室内温度为 27℃, 空气无流动, 选取焊接工艺温度为 215℃。根据 HG/T 4281-2011 塑料焊接工艺规程制备热熔焊接接头。接头性能对溶胶压力要求不高^[9-10], 根据试验所用手动式焊接装置施压机构的自锁特点, 施加一定溶胶压力后, 材料受热熔化挤出, 但夹具不因压力的变化而移动, 设备自行泄压, 可实现处理端面不平整目的, 使熔化的塑料在微弱压力下充分流动。因此试验省去加热阶段人为泄压一环, 对各规格管道施加相同溶胶压力, 采用材料熔化泄压的方式对管道进行加热。再通过改变焊件对接时的焊接压力, 保证其余工艺参数不变的条件下进行试验, 利用位移测量装置获取管道在对接时挤出的熔融段长度, 得出不同焊接压力下, 熔融层的挤出厚度值(即焊接位移值)。相关参数设置见表 1, 表中溶胶压力(P_2)与焊接压力(P_0)均为焊件截面压强。

表1 实验过程基本参数

规格参数	P_2 / MPa	P_0 / MPa
SDR 11	DN110 mm	0.02, 0.07,
	DN160 mm	0.10, 0.15,
SDR 17	DN110 mm	0.20, 0.30, 0.45,
	DN160 mm	0.60

1.4 试样制备

根据 GB/T 8804.3 利用机械加工方法, 对焊接试验管道接头进行拉伸试样制备。每种工况下的管道接头进行 3 次重复试样制取。考虑到焊接熔环造成的应力集中可能降低试样拉伸力学性能, 因此在进行试样制备时去掉焊接熔环, 使之与两侧基材等面积, 利用砂纸打磨试样加工面至光滑平整, 最大程度地减小残余应力和应力集中对接头性能带来的影响^[12]。

1.5 性能测试

拉伸性能按照 GB/T 19810-2005 测试, 室温, 拉伸速率为 50 mm/s。

2 结果与分析

2.1 焊接试验结果分析

(1) 焊接过程压力变化趋势。

4 种规格管道按推荐压力值 (0.15 MPa) 进行试验, 管道焊接端面压力变化曲线如图 3 所示。截取焊接过程前 200 s 数据示出。在加热阶段施加相同加热压力后, 管道受热熔化进行自主泄压; 随加热时间的增加, 不同规格的管道在泄压速率上呈现

出了明显的差异,表现为管径越大,泄压速率越高;加热阶段后期,4种管道泄压速率均出现放缓,形成相对平衡的态势,表明此时熔融物的挤出量已逐渐趋于零,端面进行充分吸热;加热结束后,管道进入压焊阶段,并在焊接压力作用下逐渐冷却至室温,焊缝以重结晶的方式结束整个焊接过程。

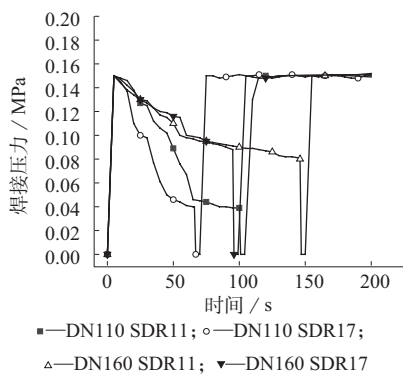


图3 焊接过程压力变化曲线

(2) 场点温度分布规律。

通过温度测量装置,测得加热阶段各场点的温度实时变化过程。图4为加热阶段管壁温度变化图。对加热结束时的场点温度进行数据拟合,结果如图5所示,管道不同场点温度在加热阶段呈现出近似线性增长的趋势。研究过程中利用德国耐驰公司生产的DSC200F3型分析仪对试验材料进行了差示扫描量热(DSC)法试验,获取了材料确切的物理性能。测试条件为:样品 (6.4 ± 0.1) mg;升温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min}$;氮气流量 $50\text{ mL}/\text{min}$;加热温度 $20 \sim 300^\circ\text{C}$ 。结合4种管材温度场和DSC试验结果,以熔融温度(T_{pm})为界限,得出熔融层厚度值(L),见表2。因管道属性不同,各管道实际 L 也有所不同,进一步证明传统工艺下的接头焊接质量,受客观因素影响较大,环境或者材料属性的变化,可能导致管件 L 无法达到热熔对接的要求。

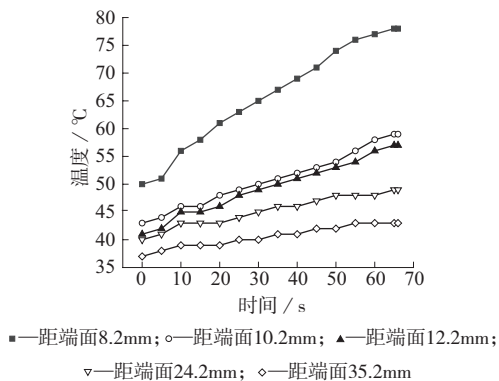


图4 DN110 SDR17 加热阶段管壁温度变化图

(3) 焊接压力与焊接位移的关系。

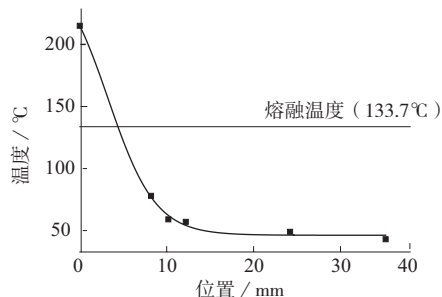


图5 DN110 SDR17 加热阶段温度变化拟合曲线

表2 熔融层厚度值

项目	管道规格			
	DN110SDR11	DN110SDR17	DN160SDR11	DN110SDR17
$T_{\text{pm}}/^\circ\text{C}$	131.9	133.7	132.9	130.6
L/mm	4.4	4.1	4.2	3.9

图6示出焊接压力与焊接位移之间的关系。由图6可见,同种管道下的焊接位移随焊接压力的增大而增大,在增长速率上,PE属于线性非晶态共聚物,加热后的管道存在3种不同聚集状态,分别为玻璃态、橡胶态和熔融态^[11],管材的弹性系数与抗形变能力随温度的降低而增大,因此焊接位移变化速率随焊接压力的增大而减小。

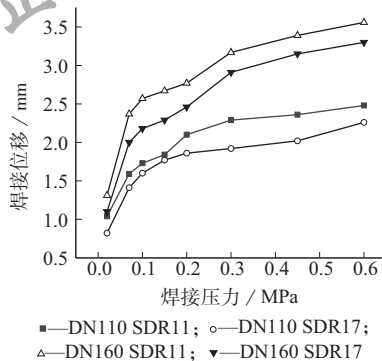
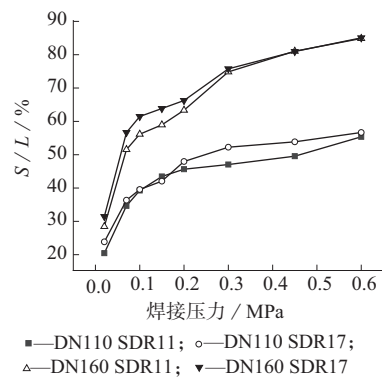


图6 焊接压力与焊接位移的关系曲线

图7为焊接压力与熔融物挤出比例之间的关系, S 为熔融层的挤出厚度值(即焊接位移值)。

图7 焊接压力与 S/L 的关系曲线

由于熔融层厚度值一定,曲线所表现出来的变化规律与图6类似。相同公称直径下的PE管道,

其在相同焊接压力下的熔融厚度挤出段与熔融层厚度之间比值(S/L)十分接近;而对于不同公称直径下的PE管道,同等压力下的 S/L 值存在较大差异。

2.2 拉伸结果分析

主要考察试样拉伸强度、断裂伸长率、断口位置及断裂方式,以此作为评价热熔焊接试验接头性能的依据。以DN160 SDR17为例,不同焊接压力下的拉伸应力-应变曲线见图8。通过4种规格管材在拉伸试验结果对比分析,整体上可将各试样拉伸应力-应变曲线分为3种形式,以下分别分析。

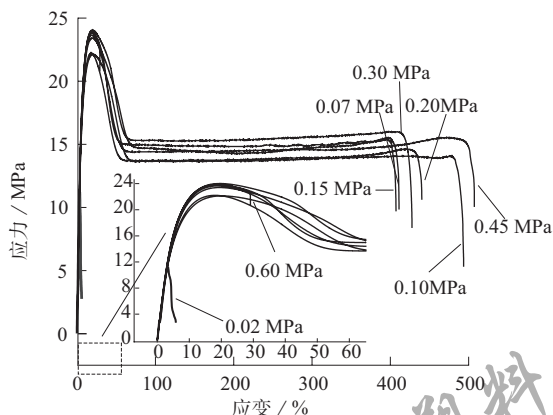


图8 DN160 SDR17 拉伸应力-应变曲线

第一种A型拉伸应力-应变曲线。焊接压力在0.02 MPa下的接头试样拉伸试验结果如图9所示。在低应力且未发生明显的塑性变形情况下,试样在接头焊缝处突然断裂。

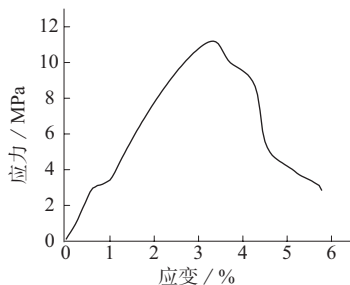


图9 A型拉伸应力-应变曲线

图10为A型拉伸试样断口形貌SEM照片。

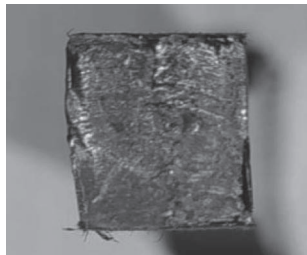


图10 A型拉伸试样断口形貌SEM照片

由图10可见,断口局部区域银纹化,出现明显的脆性断裂特征,表明焊接结果存在缺陷。此类焊

接失效原因为焊接压力过小,焊缝位置PE高分子链缠绕数较少,无法形成高强度的焊接头。

第二种B型拉伸应力-应变曲线主要存在于焊接压力0.07~0.45 MPa下的管道焊接接头,拉伸历程曲线完整包含了弹性变形、材料屈服、变形扩展、材料强化及试样断裂等系列阶段,如图11所示。拉伸过程中,试样于单侧基材处拉伸出现缩颈现象,随后变形逐渐扩展至倒角交界处,最终在拉力作用下,于倒角与焊缝之间基材处发生失效断裂。试样断口形貌的SEM照片如图12所示,此类断裂形式为试样韧性断裂,表明焊接接头强度大于基材强度。

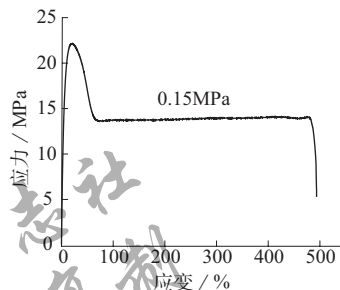


图11 B型拉伸应力-应变曲线



图12 B型拉伸试样断口形貌SEM照片

第三种C型拉伸应力-应变曲线如图13所示。主要存在于焊接压力过大的管道焊接接头。管道在焊接压力为0.60 MPa下的接头试样拉伸试验结果。试样断口形貌的SEM照片如图14所示。断面宏观上呈现大面积白色银纹区域(图14中a区域),中部光滑区域(图14中b区域)出现解理断裂现象,此现象为典型的脆断特征。在此工况下出现拉伸脆断原因:过高的焊接压力致使接头处溶胶被大量挤出,剩余焊接面熔融物不足以满足强度要求,加之管道熔融冷却过程等同于对管材进行了退火处理,使熔融区内晶粒进行再结晶,提高管材结晶度,同时导致韧性下降,因此当拉伸应力到一定程度后,试样在尚未表现出明显形变的情况下,在焊缝处直接脆断。

2.3 拉伸试验数据处理分析

剔除每组拉伸试验中误差较大的异常值,将试验测定的试样平均断裂伸长率和平均拉伸强度分别

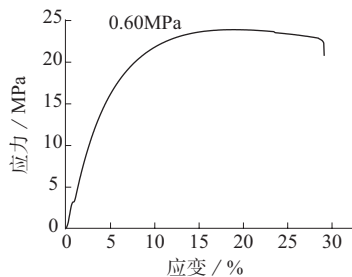


图 13 C 型拉伸应力-应变曲线

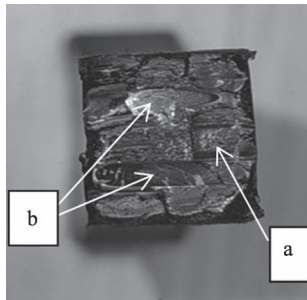


图 14 C 型拉伸试样断口形貌 SEM 照片

以图 15、图 16 示出。从图中所示数据以及对试验过程的观察发现,焊接压力在 0.07~0.45 MPa 内的试样,其断裂伸长率基本达到 400% 以上,断裂形式为基材拉伸-基材断裂,断裂方式为韧性断裂。

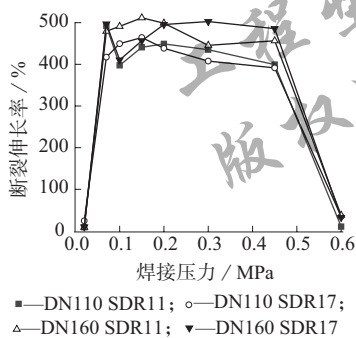


图 15 试样的断裂伸长率

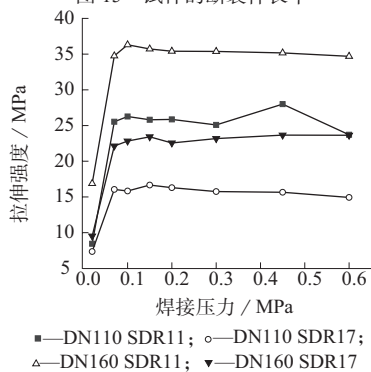


图 16 试样的拉伸强度

根据 GB/T 19810-2005 评价标准做出结论,在 0.07~0.45 MPa 焊接压力区间内所制备的热熔焊接头,其性能可满足标准要求。与焊接压力相对应的焊接位移区间和 S/L 值区间由表 3 统计看出,通

表 3 合理焊接位移参数

管道规格	焊接压力 / MPa	位移 / mm	S/L
DN110 SDR 11	0.07~0.45	1.59 ~ 2.36	36.1 ~ 53.6
DN110 SDR 17		1.41 ~ 2.02	34.4 ~ 49.3
DN160 SDR 11		2.37 ~ 3.39	56.4 ~ 80.7
DN160 SDR 17		2 ~ 3.15	51.3 ~ 80.8
拉伸结果		合格	

过控制位移参数,达到一定范围内的 S/L 值可以得到合格的管道热熔焊接头。DN110 SDR 11 管道的合格 S/L 值区间为 36.1%~53.6%, DN110 SDR 17 为 34.4%~49.3%, DN160 SDR 11 为 56.4%~80.7%, DN160 SDR 17 为 51.3%~80.8%。

3 结论

选择 8 种不同的焊接压力分别对 4 种规格 PE 管道进行焊接,并结合 DSC 试验结果得到相应的熔融层厚度和焊接位移值;最后辅以拉伸试验验证,初步确定出热熔焊接合理的焊接压力区间与 S/L 区间。本次试验旨在找出合理焊接位移范围,以焊接管道的拉伸强度、断裂伸长率、断裂方式和断裂位置来评判焊接管道焊接质量。得到以下结论:

(1) 试验结果证明,溶胶压力对焊接头质量影响不大,利用该焊接设备进行加热阶段自行泄压,也能得到合格的焊接接头。

(2) 焊接压力在 0.07~0.45 MPa 区间内进行热熔焊接可制得合格的焊接头,各规格管道在相同焊接压力下所对应的焊接位移量不同。当 S 一定时,通过控制位移参数,达到一定范围内的 S/L 值,可得到合格的管道热熔焊接头。

参考文献

- [1] 阳代军,霍立兴,张玉凤. 聚乙烯管道热熔对接焊工艺参数对焊接接头性能的影响[J]. 焊管,2004(1):17-20,61.
Yang Daijun, Huo Lixing, Zhang Yufeng. Effect of technological parameters of polyethylene pipe hot melt butt welding on welding joint properties[J]. Welded Pipe and Tube, 2004(1):17-20, 61.
- [2] Pathak S, Pradhan S K. Experimentation and optimization of HDPE pipe electro fusion and butt fusion welding processes[J]. Materials Today:Proceedings, 2020.doi:10.1016/j.matpr.2020.03.517.
- [3] 刘立君,姜婷婷,戴鸿滨. HDPE 管热熔焊接温度场模拟[J]. 哈尔滨理工大学学报,2017,22(2):18-22.
Liu Lijun, Jiang Tingting, Dai Hongbin. Simulation of temperature field of HDPE pipe hot melt welding[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(2):18-22.
- [4] 王建平,霍立兴,谷侃锋. 塑料压力管道热板焊接接头瞬时应力有限元分析[J]. 焊接学报,2006(1):21-25,114.
Wang Jianping, Huo Lixing, Gu Kanfeng. Finite element analysis

- of instantaneous stress in hot plate welded joint of plastic pressure pipe[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006(1):21-25, 114.
- [5] 丁金森. 聚乙烯燃气管道焊接质量分析研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- Ding Jinsen. Study on welding quality analysis of polyethylene gas pipeline[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [6] Riahi M, Arab H, Ghanati M F. Analysis of pressure exertion's effect on electrofusion welding process of polymer pipes[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(1-4):183-188.
- [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 Xiaojuan, Peng Xingyu, Yu Jiansheng, et al. Test and analysis of mechanical properties of hot melt welded joint of PE pipe with process defect[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(15):100-103, 109.
- [8] 马利斌. PE 燃气管道焊接技术的探讨[J]. 居舍, 2019(21):71-72.
- Ma Libin. Discussion on welding technology of PE gas pipeline[J]. Home, 2019(21):71-72.
- [9] 陈胜利, 贺建平. 基于 PE 燃气管道焊接工艺的研究[J]. 塑料科技, 2018, 46(1):51-54.
- Chen Shengli, He Jianping. Study on welding technology of PE gas pipeline[J]. Plastics Science and Technology, 2018, 46(1):51-54.
- [10] 王晓芹. 聚乙烯管材热熔对接焊拉伸性能的研究[J]. 甘肃科技, 2017, 33(11):52-54.
- Wang Xiaoqin. Study on tensile properties of polyethylene pipe hotmelt butt welding[J]. Gansu Science and Technology, 2017, 33(11):52-54.
- [11] 何慧娟. 含缺陷聚乙烯燃气管道热熔接头力学性能研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- He Huijuan. Study on mechanical properties of hot melt joint of gas pipeline containing defective polyethylene[D]. Chengdu: South West Petroleum University, 2015.
- [12] 范自伟, 李俊, 李涛, 等. 温度对 PE 燃气管热熔焊接接头性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(1):36-39.
- Fan Ziwei, Li Jun, Li Tao, et al. The influence of temperature on the performance of PE gas pipe hot melt welding joint[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(1):36-39.
-
- (上接第 52 页)
- application of PVC resin[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):150-153.
- [13] 林旭东, 贾明印, 薛平. 连续玻纤增强 PVC 预浸料的制备成型工艺[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):50-54.
- Lin Xudong, Jia Mingyin, Xue Ping. Moulding process of continuous glass fiber reinforced PVC prepreg[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):50-54.
- [14] 杨良波, 欧相麟, 魏耀富, 等. PVC/ABS 合金成型及模具设计[J]. 现代塑料加工应用, 2019, 31(3):52-55.
- Yang Liangbo, Ou Xianglin, Wei Yaofu, et al. Forming and mold design of PVC/ABS alloy[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2019, 31(3):52-55.
- [15] 贾小波, 肖恩琳, 侯斌. 聚氯乙烯压延生产中的常见问题及解决措施[J]. 齐鲁石油化工, 2019, 47(2):44-48.
- Jia Xiaobo, Xiao Enlin, Hou Bin. Common problems and solutions on calendaring production of PVC[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2019, 47(2):44-48.