

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.012

热熔焊接工艺参数对聚乙烯燃气管道焊接残余应力的影响

闻炯明¹, 孙磊¹, 李兆璞², 武立文², 张毅²

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究所(常熟分院), 江苏常熟 215500; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266400)

摘要: 高密度聚乙烯(PE-HD)管道具有韧性高、抗腐蚀等优点, 广泛应用于输水输气、核工业和氢能等领域。受加工工艺和焊接技术的限制, PE-HD 管道系统存在生产残余应力和焊接残余应力。残余应力的存在, 会加速管道内部裂纹的萌生和扩展, 显著降低了管道的使用寿命。因此, 研究残余应力对准确评价 PE-HD 管道可靠性具有重要意义。分别采用开口圆环法和盲孔法测得了 PE-HD 管基材和热熔接头的环向残余应力, 并基于弹塑性本构建立了温度-位移耦合的热熔焊接有限元模型, 探究了热熔焊接接头残余应力的分布及焊接工艺参数对温度场和残余应力的影响。结果表明: 盲孔法和开口圆环法测量结果近似相等; 与传统的黏弹性模型相比, 建立的弹塑性热熔焊接有限元模型计算结果更接近实验测量值; 熔融层厚度随焊接温度和加热时间的增加而增大, 延长加热时间可导致热熔接头长度增加; 焊缝和熔合区的残余应力为拉应力, 且内壁的拉应力大于外壁的拉应力, 距离焊缝 5 mm 处残余应力由拉应力转变为压应力, 焊接温度升高和加热时间延长会使残余应力数值增大。

关键词: 高密度聚乙烯管; 热熔焊接; 残余应力; 弹塑性本构; 数值模拟

中图分类号: TQ325.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0081-09

Effect of hot-melt welding process parameters on welding residual stress of polyethylene gas pipeline

WEN Jiongming¹, SUN Lei¹, LI Zhaopu², WU Liwen², ZHANG Yi²

(1. Changshu Branch, Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Changshu 215500, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266400, China)

Abstract : Polyethylene (PE-HD) pipeline has the advantages of high toughness and corrosion resistance, and is widely used in the fields of water and gas transmission, nuclear industry and hydrogen energy. Due to the limitation of machining technology and welding technology, there are production residual stress and welding residual stress in PE-HD pipeline system. The existence of residual stress accelerate the initiation and expansion of cracks inside the pipeline, and significantly reduce the service life of the pipeline. Therefore, the study of residual stress is of great significance to accurately evaluate the reliability of PE-HD pipeline. The hoop residual stress of PE-HD pipe substrate and hot-melt joint was measured by open-ring method and blind hole method respectively. Based on the elastic-plastic constitutive model, the finite element model of hot-melt welding with temperature-displacement coupling was established. The distribution of residual stress in hot-melt welded joints and the influence of welding process parameters on temperature field and residual stress were investigated. The results measured by the blind hole method and the open ring method are approximately equal. Compared with the traditional viscoelastic model, the calculation results of the elastic-plastic hot-melt welding finite element model established are closer to the experimental measurements. The thickness of molten layer increases with the increase of welding temperature and heating time, and the length of hot-melt joint increases with the increase of heating time. The residual stress in the weld and fusion zone is tensile stress, and the tensile stress in the inner wall is greater than that in the outer wall. The increase of welding temperature and heating time will increase the residual stress value.

Keywords : high density polyethylene pipe ; hot-melt welding ; residual stress ; elastic-plastic constitutive ; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802343), 江苏省市场监管局科技项目(KJ2023005)

通信作者: 张毅, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要研究方向为聚乙烯燃气管道损伤失效分析、寿命预测及高分子聚合物损伤失效机理与表征

收稿日期: 2024-06-06

引用格式: 闻炯明, 孙磊, 李兆璞, 等. 热熔焊接工艺参数对聚乙烯燃气管道焊接残余应力的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 81-89.

WEN Jiongming, SUN Lei, LI Zhaopu, et al. Effect of hot-melt welding process parameters on welding residual stress of polyethylene gas pipeline[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 81-89.

目前全球经济飞速发展,能源和环境问题日趋严峻,天然气作为清洁能源被广泛关注,燃气管道的需求量也在不断提高。高密度聚乙烯(PE-HD)管道具有质量轻、柔性高、耐腐蚀和抗氧化等优点,在天然气和水资源运输以及核工业废水处理等领域应用已达60余年^[1]。经过多年的利用和发展,中高密度PE-HD燃气管已占据欧洲塑料燃气管道市场份额高达98%,成为塑料燃气管道的最主要组成部分,在发展中国家同样具有巨大的市场潜力^[2-3]。

PE-HD管材的残余应力在生产过程中产生。目前市场最主要的PE-HD管加工方式为挤出成型,PE-HD材料首先被加热熔化,在通过螺旋杆挤压进入磨具,最后冷却成型,如图1所示^[4]。熔融态的PE-HD在冷却定型过程中,管道外表面受水冷或风冷作用,内表面仅与封闭静止的空气接触^[5],两者冷却速率相差较大,导致管壁各部分密度、结晶度和体积等属性发生不规则变化,最终形成加工残余应力^[6-7]。除了冷却不均匀产生的热残余应力以外,还有材料受挤压和约束产生的流动残余应力,但该应力数值较小,在研究残余应力过程中可忽略不计^[8]。

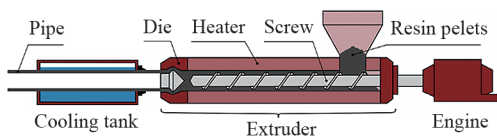


图1 PE-HD管生产示意图

Fig. 1 Production diagram of polyethylene pipe

研究证明,PE-HD管材外层部分存在残余压应力,内层部分在残余拉应力^[9-10]。Frank等^[11]研究发现,残余应力不会随管道服役时间延长而消失,因此需要快速便捷的方法对聚合物管道残余应力进行测量,及时对其承压能力和寿命进行评估。Poduška等^[12]提出了一种开口圆环法,该方法基于弯曲梁理论,通过测量开口圆环的变形即可计算推导出管壁各部分的环向残余应力。Chen等^[13]对开口圆环法进行了改进,并结合数值模拟验证了该方法的准确性。盲孔法可在不改变材料内应力的条件下测得残余应力,在金属领域取得较好成果^[14-16]。Kim等^[17]分别采用盲孔法和开口圆环法测得PE-HD管道残余应力,验证了盲孔法可应用于聚合物领域。

残余拉应力会加速管壁内部裂纹萌生和拓展,影响管道的可靠性和使用寿命^[18-19]。已有诸多学者

对PE-HD管道寿命的预测方法进行研究,例如采用长期静液压实验可以获得PE-HD管道应力与寿命的关系曲线,进而预测管道的使用寿命。Farshad^[20]对管道进行了拉伸实验和长达一年的静液压实验,得到了管材的环向应力、环向应变和畸变能与管道失效时间的关系式。常用的实验测量寿命的方法还有通过预制裂纹并施加载荷。Huang等^[21]通过实验发现PE-HD管道热熔接头耐慢速裂纹扩展(SCG)性能低于基材。杨圳^[22]通过循环载荷循环裂纹圆棒(CRB)实验得到了不同型号PE-HD管材寿命和环向应力的关系曲线。通过分析管道材料的组分也可以进行寿命预估,Hoàng等^[23]对PE100管道的化学成分进行分析,基于Arrhenius公式外推得到管道的使用寿命,并证明该结果与静液压实验结果吻合良好。王洋^[24]对老化的PE-HD燃气管进行差示扫描量热仪测试,基于实验数据得到了管道的寿命预测曲线。

热熔接头作为塑料管道常见的失效位置之一,其性能的研究被人们广泛关注^[25-27]。热熔焊接过程包括材料的熔融和再冷却,结晶度、晶体形状和分子链排布及大小均发生了改变^[28-29],热熔接头的加工残余应力被释放,产生新的焊接残余应力。焊接残余应力分布规律尚未明确,无法使用现有的实验方法测得,因此有学者借助有限元软件对其进行研究。康悦^[30]建立了一维PE-HD管热熔焊接模型,探究了冷却速度对热熔接头温度场和应力场的影响。吕亚峰^[31]基于热黏弹性本构建立了三维PE-HD管热熔焊接有限元模型,模拟得到各个时间热熔接头的温度场和应力场。Sun等^[32]通过松弛试验得到PE-HD的黏弹性本构,建立热熔焊接模型,研究发现焊接残余应力会随管材厚度的增大而增大。

现有研究表明应力状态对PE-HD管道的寿命和可靠性影响显著,但目前的研究很少考虑管道残余应力的影响。笔者首次基于弹塑性本构建立了考虑生产残余应力的热熔焊接有限元模型,探究热熔焊接工艺参数对温度场和环向残余应力分布的影响,为塑料管道工程的建设提供数据支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

燃气用PE-HD管道:PE100, DN90, 河南联塑实业有限公司。

1.2 仪器及设备

半自动热熔焊接机:CHMY160,山东创铭机械设备有限公司;

台锯:M1H-ZP2-250,金华市脉拓工具有限公司;

哑铃式样打磨机:FBS-25Y,深圳弗布斯仪器公司;

万能试验机:UTM5000,深圳三思纵横科技股份有限公司;

电阻应变花:120-3CA,成都电测传感科技有限公司;

应变仪:ASM9-4,济南西格马科技有限公司。

1.3 试样制备

使用半自动热熔焊接机在室温下(25℃)对PE-HD管材进行热熔焊接,焊接温度为210℃,吸热时间为100 s,焊接压力为1.5 MPa,冷却时间为14 min。

1.4 测试与表征

PE-HD管材的环向残余应力表现为内拉外压,变化趋势可简化为一条抛物线,基于该规律和弯曲梁理论提出的开口圆环法可快速准确地测量PE-HD管基材的环向残余应力。首先从管材上切割圆环作为试样,圆环的厚度与管材的壁厚相等。使用线切割机从圆环试样上切除120°圆弧,测量剩余半圆弧的直径,如图2所示。

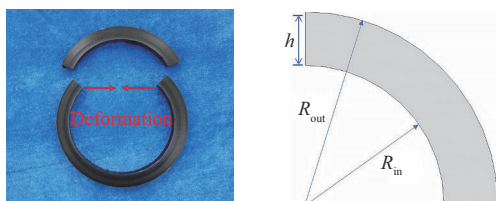


图2 PE-HD开口圆环试样

Fig. 2 Open-ring sample of PE-HD

由于PE-HD材料具有黏弹性特征,每个圆环切除圆弧后静置1 h后,再使用长柄游标卡尺测量直径,并代入下列公式计算环向残余应力^[13]:

$$\sigma_{\text{res}} = C_1 + C_2 e^{3.2x} \quad (1)$$

式中: C_1, C_2 为拟合常数; x 为相对壁厚。

$$C_1 = -7.354C_2 \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{-(D_0 - h - 2R)(R - R')E}{3.382hR'} \quad (3)$$

式中: D_0 为管材直径,mm; h 为圆环试样厚度,mm; R 和 R' 分别为开口圆环变形前后中性层半径,mm,计算公式如下:

$$R = \frac{R_{\text{out}} - R_{\text{in}}}{\ln \frac{R_{\text{out}}}{R_{\text{in}}}} \quad (4)$$

式中: R_{out} 为圆环试样内半径,mm; R_{in} 为圆环试样外半径,mm。

热熔焊接过程中,聚合物材料经过加热熔融和再冷却,热影响区的热历史发生了变化,残余应力的分布规律也因此发生改变,故开口圆环法不适用于测量PE-HD管热熔接头附近的残余应力。笔者采用盲孔法对PE-HD管热熔接头附近和基材的表面残余应力进行实验测量,热熔接头主要分为三个区域,分别是焊缝、熔融区和热影响区,其中焊缝区域在管道表面有一个4~6 mm宽的卷边,因此该位置不适合粘贴应变花,热熔接头处的待测点选为熔融区靠近卷边的位置,如图3所示。基材处待测点与热熔接头处待测点相距100 mm,且处于同一轴线,两个待测点为一组。每根PE-HD管道准备3组待测点,3组待测点相隔120°。参照标准ASTM E837,使用2 mm钻头在应变花中心钻孔,钻孔深度为2 mm,如图4所示。为了消除PE-HD材料热塑性的影响、使实验结果更准确,PE-HD管热熔焊接后静置24 h,每根PE-HD管基材和热熔接头处各均匀粘贴3个应变片,每隔30 min记录应变仪度数,直到应变值不再发生明显变化,测量结果取平均值。

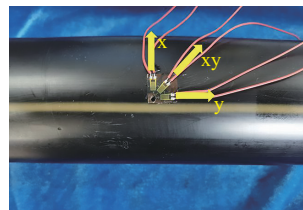


图3 盲孔法示意图

Fig. 3 Diagram of blind hole method

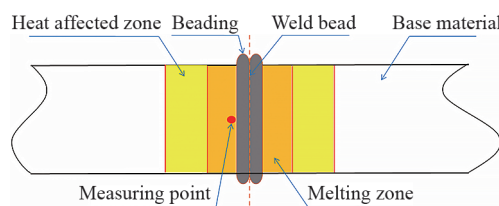


图4 热熔接头处待测点位置

Fig. 4 Position of the hot-melt joint to be measured

2 模拟部分

2.1 模型建立

笔者使用ABAQUS有限元软件进行分析,建立1/4管道有限元模型,管道直径为90 mm,壁厚为6 mm,长1500 mm,与实验所用管道规格一致。热熔

焊接过程中涉及温度边界条件和应力边界条件,因此模拟采用温度-位移耦合的方式,计算过程涉及的热物理性能参数包括密度、导热系数、热膨胀系数、比热容和对流换热系数等。PE-HD属于典型的高分子材料,在焊接升温过程中由玻璃态转变为高弹态,最终变为黏流态,PE-HD材料在不同相态下热物理性能也有较大差异。为考虑相态转变的影响,该有限元模型定义了不同温度条件下的材料属性,具体数值见表1。管道内外壁对流换热系数分别计算,管外为无限空间换热,管内为夹层换热,取值分

表1 PE-HD材料参数

Tab. 1 Material parameters of PE-HD

Temperature/ °C	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Thermal conductivity/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	Heat capacity/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]
28	980	0.49	1 920
125.6	900	0.32	5 560
134.7	850	0.31	15 510
210	780	0.23	2 730

表2 热熔焊接模拟分析步及载荷

Tab. 1 Hot-melt welding simulation analysis steps and loads

Welding stage	Step time	Welding surface boundary conditions	Non-welded surface boundary conditions
Heating	120 s	Axial constraint	1.4 MPa
Switching	5 s	Unrestrained	Unrestrained
Pressure	840 s	Axial constraint	0.375 MPa
Cooling	24 h	Axial constraint	Unrestrained

模型网格与边界条件如图5所示,模拟采用C3D20T温度-位移耦合六面体单元,每个单元含20个节点。模型的变形和温度变化主要发生在焊接面附近,为提高计算结果的精确性,将焊接面的网格细化处理,整个模型共8 200个单元。

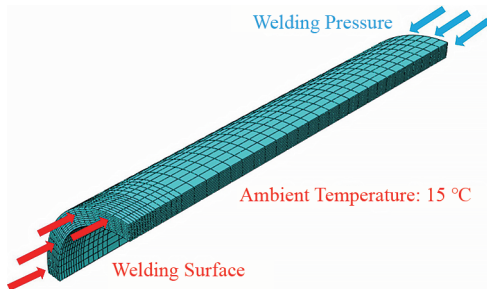


图5 热熔焊接模型载荷及网格划分

Fig. 5 Hot-melt welding model load and mesh division

2.3 初始应力场

PE-HD管本身具有“内拉外压”的环向加工残余应力,为了考虑该因素对热熔焊接残余应力的影响,建立一个与热熔焊接模型尺寸和网格相同的模型,定义该模型管壁不同厚度的热膨胀系数,得到初始环向残余应力场。通过修改热膨胀系数直至

别为 $6.609 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $0.401 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。模型的本构关系采用弹塑性本构,具体参数见文献^[34]。

2.2 分析步和边界条件

模型采用对称面分别设置横向对称边界条件和纵向边界条件,加热过程中,管道与热板接触,焊接面施加 210°C 的温度边界条件,并施加轴向约束;焊接压力作用在非焊接面,因此在有限元模型中施加 1.4 MPa 均布载荷模拟焊接压力。切换过程中加热板被撤走,焊接面不在受轴向约束;非焊接面所受载荷为0。压焊冷却过程中,两个被焊管道受压焊压力作用挤压在一起,形成热熔接头,部分熔融态的PE-HD材料溢出管壁,此时焊接面在实体模型中为焊缝,施加轴向约束;非焊接面施加 0.375 MPa 的压焊压力。自由冷却阶段焊接管件静置冷却,非焊接面处于自由变形状态。热熔焊接模拟过程各分析步时间及加载情况见表2。

应力场分布与开口圆环法结果一致,将该应力场作为热熔焊接模拟的初始应力条件,如图6所示。

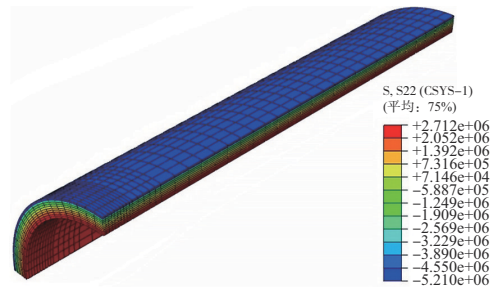


图6 热熔焊接模型初始应力场

Fig. 6 Initial stress field of hot-melt welding model

3 结果与讨论

3.1 实验测量结果

将开口圆环变形值代入式(1)~式(4),可计算得到PE-HD管材沿壁厚各部分的环向残余应力大小,如图7所示。PE-HD管材存在“内拉外压”的加工残余应力,环向拉应力最大值分布在管道内壁,为 2.16 MPa ;环向压应力最大值分布在管道外壁,为 -5.8 MPa 。管壁60%以上环向残余应力为拉应力,不利于管道的长期使用。

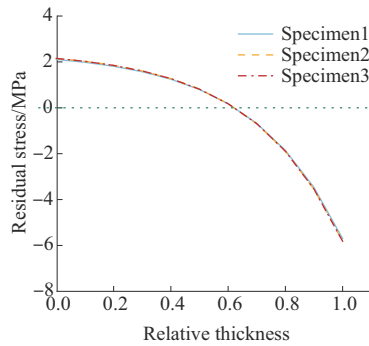


图7 开口圆环法测量结果

Fig. 7 Open-ring method measurement results

由于盲孔法原理和公式推导是基于弹性材料,因此对比开口圆环法和盲孔法的测量结果,以验证盲孔法对PE-HD材料残余应力测量的适用性。由于盲孔法测量的是钻孔深度范围内残余应力平均值,因此需要先对公式(1)积分,求得开口圆环法相对厚度0.75~1.0范围内残余应力数值均值,再与盲孔法结果对比,如图8所示,可以看出两种方法所测残余应力平均数值接近。由于受生产工艺、运输条件和存储环境等影响,同一根管材不同测点残余应力数值也存在一定差异。盲孔法测量PE-HD管基材和热熔接头处残余总应力大小结果如图9所示。

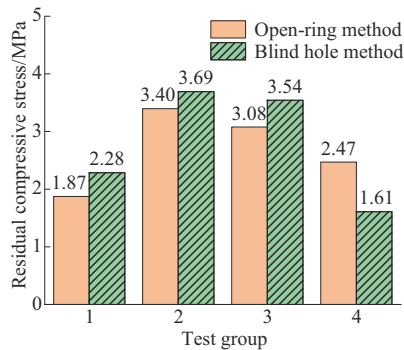


图8 残余应力测试方法对比

Fig. 8 Comparison of residual stress test methods

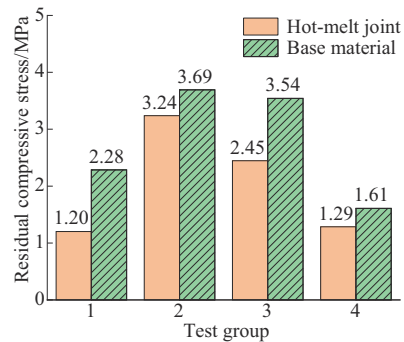


图9 PE-HD管基材和焊缝残余压应力对比

Fig. 9 Comparison of residual compressive stress of PE-HD base material and weld

轴向残余应力在焊接过程中被释放,导致热熔接头处的残余应力总大小普遍低于基材处。通常认为,热熔接头与基材性能差距越小,材料结构稳定性越好。

3.2 热熔焊接参数对温度场的影响

模拟结果显示距焊缝6 mm处管道外壁应力值为-3.66 MPa,与盲孔实验的-3.24 MPa结果近似相等,证明该模型精度较高,可用来分析焊接过程的应力场和温度场分布。热熔焊接过程中管壁各部分受热和变形不同,热熔接头处产生了不均匀的焊接残余应力,其中环向残余应力直接影响管道的承压能力,对管道寿命的影响最大。以管道外壁(路径1)和管道内壁(路径2)为重点研究区域,分析热熔接头温度场和环向残余应力场沿管道轴向的分布和变化,并探究热熔焊接工艺参数对二者分布的影响。热熔焊接温度场分布如图10所示,在加热阶段,热流沿管道轴向由加热端向远端传递,材料熔化的厚度在不断增大。在加热结束时,管道焊接端熔化厚度接近2 mm,与热熔焊接实验熔化厚度一致。由于切换时间仅为5 s,对管道温度场分布没有明显影响。冷却阶段热源被撤离,管道与空气进行对流换热,由于管道内外壁对流换热的速率不同,管道外壁的冷却速率大于管道内壁。此时焊接端的温度仍高于管道基材,部分热量在管道壁内继续沿轴向传递。

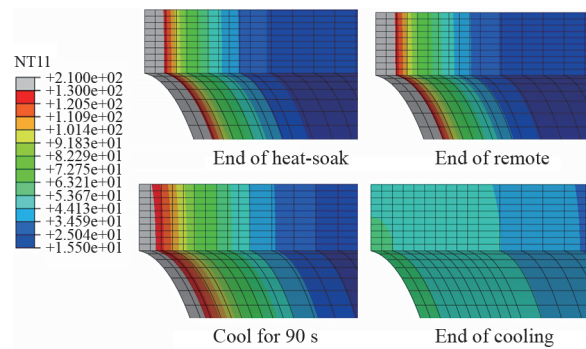


图10 热熔焊接各阶段温度场分布

Fig. 10 Temperature field distribution at each stage of hot-melt welding

焊接温度的高低和加热时间的长短都能直接影响管道温度场的分布,分别研究了上述两种焊接工艺参数对管道温度场分布的影响,如图11所示。研究认为管道内温度超过材料熔点的区域为熔融层,图中水平虚线代表高密度PE-HD材料的熔点,曲线与虚线交点的横坐标即为该条件下管道熔融层的厚度。由图11a可以看出,当加热时间为100 s

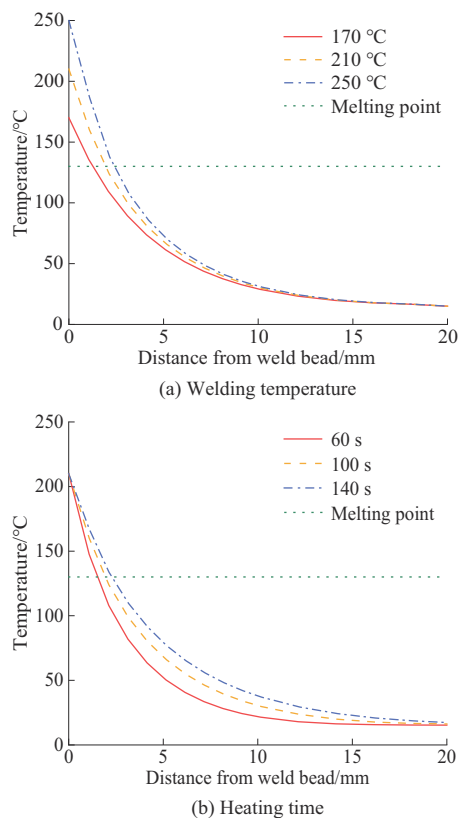


图11 热熔焊接参数对管道轴向温度场分布的影响

Fig. 11 Influence of hot-melt welding parameters on axial temperature field distribution of pipeline

不变、焊接温度升高,熔融层厚度明显增加,焊接温度为170, 210, 250°C时管道熔融层厚度分别为1.25, 1.96, 2.44 mm。焊接温度变化主要影响焊缝和熔合区(离焊缝距离5 mm内)温度场分布,对于离焊缝较远的热影响区影响不明显,这是由于受高密度PE-HD材料热传递性能限制,一定时间内管道热传递能力有限,无法将较高温度传递至较远距离。由图11b可以看出,当焊接温度为210°C不变、加热时间延长时,熔融层厚度小幅度增加,加热时间为60, 100, 140 s时管道熔融层厚度分别为1.56 mm, 1.96 mm和2.28 mm,加热时间相对于焊接温度对熔融层深度的影响较小。加热时间变化对温度场影响范围较广,由图可以看出离焊缝距离15 mm内温度都会随加热时间增大而增大。综上所述,热熔焊接熔融层厚度主要受焊接温度影响,热熔接头的长度主要与加热时间有关。

3.3 热熔焊接参数对残余应力的影响

热熔焊接过程中管壁各部分受热和变形不同,热熔接头处产生了不均匀的焊接残余应力,其中环向残余应力直接影响管道的承压能力,对管道寿命

的影响最大。本研究以管道外壁(路径1)和管道内壁(路径2)为重点研究区域,如图12所示,分析热熔焊接接头焊接环向残余应力场沿管道轴向的分布和变化,并探究热熔焊接工艺参数对应力场分布的影响。模拟结果显示距焊缝6 mm处管道外壁应力值为-3.66 MPa,与盲孔实验的-3.24 MPa结果近似相等,证明该模型结果可靠。

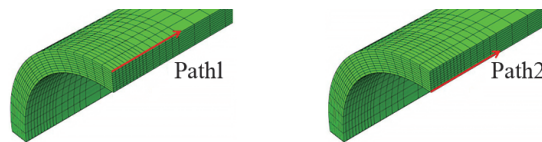


图12 路径示意图

Fig. 12 Path diagram

图13描绘了管道外壁环向残余应力的分布,由图13可知,管道外壁的环向残余应力在熔融层附近数值最大,表现为拉应力。熔融层及附近区域的材料在热熔焊接过程中温度最高、热膨胀导致的变形最大,因此表现出了较高的应力值。环向残余应力的大小沿轴向距离先短暂上升后大幅度降低,在离焊缝5 mm左右位置处降为0,并逐渐转为压应力。环向残余压应力继续沿轴向距离逐渐增大,在离焊缝距离7~10 mm处达到最大值,然后降低并逐渐平稳,最终值略小于基材的残余应力。热熔焊接残余应力分布与焊接温度场和所受载荷有关,因此热熔焊接工艺参数的变化会影响焊接环向残余应力的大小。由图13可知,当焊接温度升高时,焊接环向残余应力的数值增大,拉应力和压应力峰值出现的位置也离焊缝越远;加热时间延长,环向残余应力的数值小幅度增大;焊接压力增大会导致环向残余应力减小,但数值较小可忽略。结合温度场分析可知,焊接温度升高主要影响焊缝附近区域温度升高,因此近焊缝的拉应力变化幅度较大,而远端的压应力变化较小;加热时间延长主要改变热影响区中后部分的温度,因此残余应力主要在压应力部分发生变化;焊接压力不会影响温度场的变化,且力的方向垂直于管道环向,因此对环向残余应力影响不明显。

图14为管道内壁焊接环向残余应力分布情况,可以看出在离热熔接头较远处残余应力值逐渐恢复至基材残余应力大小。内外壁残余应力的变化趋势有相似之处,焊接温度升高和加热时间延长均会导致热熔接头的焊接残余应力数值增加,焊接压

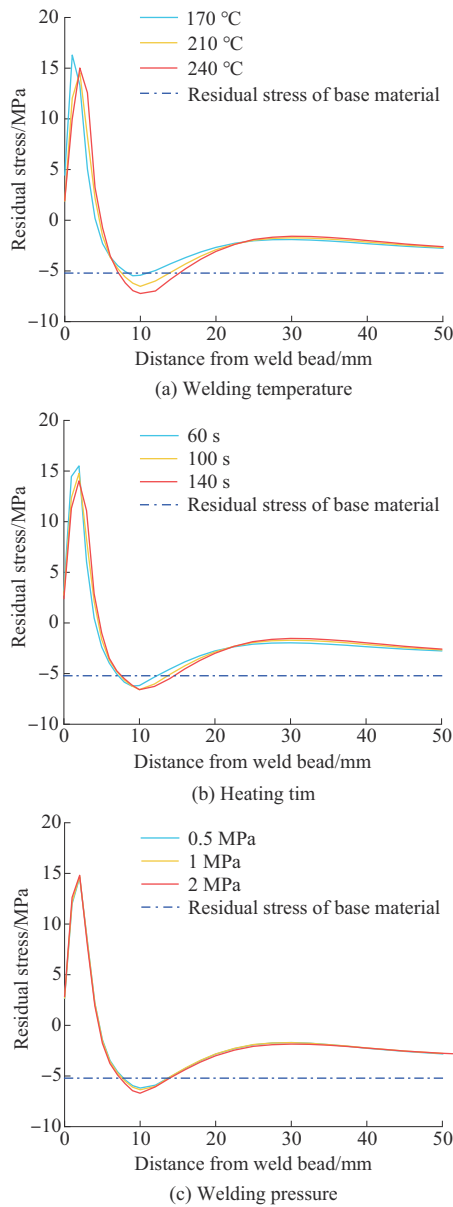


图 13 热熔焊接参数对管道外壁环向残余应力分布的影响

Fig. 13 Influence of hot-melt welding parameters on distribution of hoop residual stress on pipe outer wall

力的影响可忽略。此外,管道热熔接头处内外壁的焊接残余应力数值大小有明显差距。造成上述情况的原因是,管道内外表面受约束情况一致,轴向方向传热效率也相同,热量均来自加热板,因此内外残余应力变化趋势一致。但管道内壁与封闭静止的空气接触,而外壁直接与外界空气接触,内壁换热效率远小于外壁,材料温度升高快、散热慢,热膨胀效果相对较大,因此导致内壁残余应力的峰值大于外壁,同时说明管道热熔接头的内表面部分更容易失效。

综上所述,PE-HD 热熔焊接残余应力主要受焊

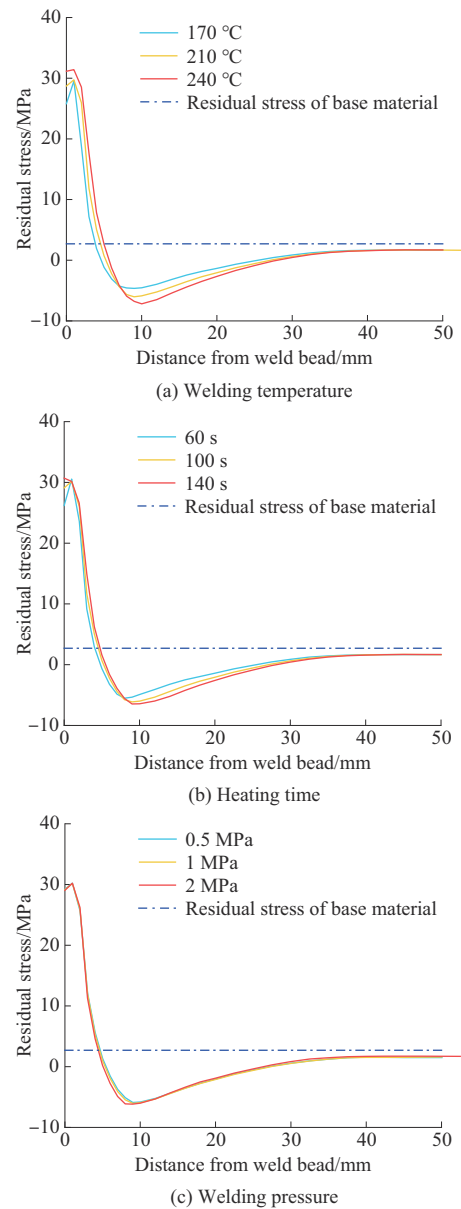


图 14 热熔焊接参数对管道内壁环向残余应力分布的影响

Fig. 14 Influence of hot-melt welding parameters on distribution of hoop residual stress on pipe inner wall

接温度和加热时间影响,在管道焊缝附近内表面和外表面均存在较大值的环向拉应力,若操作不当导致热熔接头的焊缝处及附近出现气泡或缝隙等缺陷,极易导致热熔接头失效。为保证整体管道的可靠性,对 PE-HD 管道进行热熔焊接时焊接端表面应保持光滑整洁,防止杂质混入接头产生应力集中。对在役管道进行检测和寿命预测时,应重点关注热熔接头及焊缝区域。为了降低残余应力的影响,在管道铺设和焊接过程中可以通过调整布局 and 加装支撑的方式,降低热熔接头处承受的载荷。此外,在施工环境允许的情况下,通过预热和回火工艺可

以有效降低PE-HD管道的残余应力。

图15为不同热熔焊接模型的结果对比图,可以看出,当模型没有考虑初始残余应力时,焊缝附近结果没有明显变化,但热影响区应力场数值相对较小,并在远离焊接端处趋近于0,与实际不符。当模型采用蠕变实验得到的黏弹性本构时,经过24 h冷却后热熔接头与管道基材残余应力大小相同,外表面为1.15 MPa,内表面为-2.23 MPa,与试验结果严重不符,未考虑初始残余应力时冷却静置过后应力场数值近似为0。相比之下,采用弹塑性本构模型模拟得到的热熔焊接应力场结果更准确。

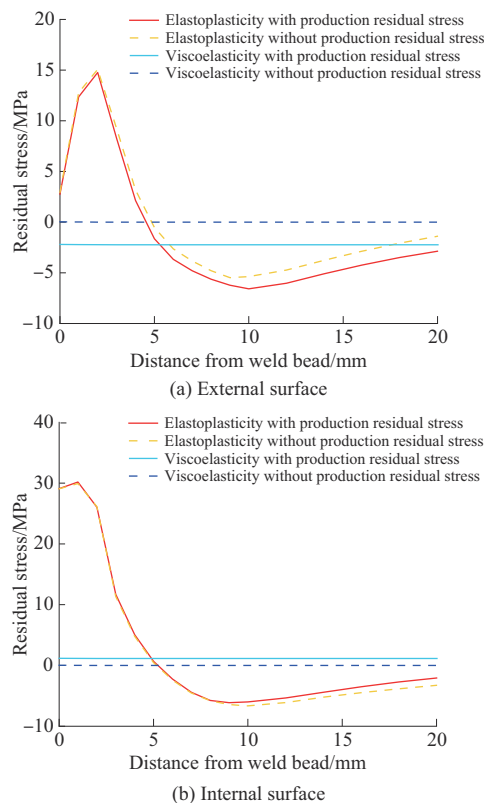


图15 热熔焊接模型结果对比图
Fig. 15 Comparison of hot-melt welding model results

4 结论

采用开口圆环法和盲孔法相结合的方法测得了PE-HD管道基材和热熔接头的残余应力,并建立了温度-位移耦合的热熔焊接有限元模型,探究了热熔焊接参数对热熔接头温度场和残余应力的影响。主要结论如下:

(1)开口圆环法和盲孔法测量结果数值近似相等,实验测得PE-HD管基材处环向残余应力平均值为2.78 MPa,热熔接头附近平均值比基材小0.65 MPa。

(2)建立基于弹塑性本构的热熔焊接数值模型,模拟得到PE-HD管热熔焊接过程的温度场和残余应力分布,考虑了生产残余应力的影响,与传统模型相比计算结果更加准确。

(3)焊接温度升高、加热时间延长会导致管道熔融层厚度增大,焊接温度变化主要影响焊缝和熔合区温度场,加热时间改变主要影响热影响区温度和热熔接头长度变化。

(4)距离焊缝越远、焊接残余应力越小,并在热影响区由拉应力转变为压应力,残余应力数值会随焊接温度升高或加热时间延长而增大,焊接压力对其影响可忽略不计。

参考文献

- [1] 施建峰,胡安琪,郑津洋. 聚乙烯管材标准发展现状分析[J]. 中国塑料, 2021, 35(3): 112-123.
SHI Jianfeng, HU Anqi, ZHENG Jinyang. Development status of technical standards in polyethylene piping[J]. China Plastic, 2021, 35(3): 112-123.
- [2] 周以良,李琼. 聚乙烯燃气管道的应用[J]. 煤气与热力, 2003(9): 564-565.
ZHOU Yiliang, LI Qiong. Application of gas polyethylene pipe[J]. Gas & Heat, 2003(9): 564-565.
- [3] 章迅,沃留杰,黄晓家,等. 中国塑料管材的应用现状与发展趋势[J]. 工程建设与设计, 2009(5): 68-70.
ZHANG Xun, WO Liujie, HUANG Xiaojia, et al. Application and prospect of the plastic pipe in China[J]. Construction & Design for Engineering, 2009(5): 68-70.
- [4] PODUŠKA J, HUTAŘ P, KUČERA J, et al. Residual stress in polyethylene pipes[J]. Polymer Testing, 2016, 54: 288-295.
- [5] JONSON L E. Plastics pipes for water supply and sewage disposal. borealis[J]. CIRCULAR UNDERGROUND PIPE STABILITY ANALYSIS Vasil'ev AI, Golyshev AI Institut Prirodoobustroystva im. AN Kostyakova, Moscow During, 1996: 1 913-2 013.
- [6] JANSON L E. Plastics pipes for water supply and sewage disposal [M]. Borealis, 1995:10-15.
- [7] CLUTTON E Q, WILLIAMS J G. On the measurement of residual stress in plastic pipes[J]. Polymer Engineering & Science, 1995, 35 (17): 1 381-1 386.
- [8] DOUVEN L F A, BAAIJENS F P T, MEIJER H E H. The computation of properties of injection-moulded products[J]. Progress in Polymer Science, 1995, 20(3): 403-457.
- [9] WILLIAMS J G, HODGKINSON J M, GRAY A. The determination of residual stresses in plastic pipe and their role in fracture[J]. Polymer Engineering & Science, 1981, 21(13): 822-828.
- [10] CLUTTON E Q, WILLIAMS J G. On the measurement of residual stress in plastic pipes[J]. Polymer Engineering & Science, 1995, 35(17): 1 381-1 386.
- [11] FRANK A, PINTER G, LANG R W. Prediction of the remaining lifetime of polyethylene pipes after up to 30 years in use[J].

- Polymer Testing, 2009, 28(7): 737–745.
- [12] PODUŠKA J, KUČERA J, HUTAŘ P, et al. Residual stress distribution in extruded polypropylene pipes[J]. Polymer Test, 2014, 40: 88–98.
- [13] CHEN B, JAR P Y B, MERTINY P, et al. A refined one-slit-ring method to quantify residual hoop stress in chlorinated polyvinyl chloride pipe—application to specimens after immersion in primer[J]. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(s2): E296–E309.
- [14] 黄钢, 张清东, 王春海, 等. 钢板残余应力盲孔测量法试验及应用[J]. 焊接学报, 2020, 41(9): 49–59, 80, 99–100.
- HUANG Gang, ZHANG Qingdong, WANG Chunhai, et al. Test and application of blind hole measurement method for residual stress of steel plate[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2020, 41(9): 49–59, 80, 99–100.
- [15] 左善超, 王德成, 杜兵, 等. 塑性效应对盲孔法测量焊接残余应力影响的研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 206–214.
- ZUO Shanchao, WANG Decheng, DU Bing, et al. Plasticity effects in the hole-drilling residual stress measurements in welded structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 206–214.
- [16] 赵卫平, 王振兴, 陈佳麟, 等. 基于盲孔法的高强焊接圆钢管表面残余应力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(10): 332–342.
- ZHAO Weiping, WANG Zhenxing, CHEN Jialin, et al. Experimental research on surface residual stress of high strength welded circular steel tube based on hole-drilling strain-gage method[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(10): 332–342.
- [17] KIM J S, YOO J H, OH Y J. A study on residual stress mitigation of the HDPE pipe for various annealing conditions[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29: 1 065–1 073.
- [18] CHAOUI K, CHUDNOVSKY A, MOET A. Effect of residual stress on crack propagation in MDPE pipes[J]. Journal of materials science, 1987, 22: 3 873–3 879.
- [19] HUTAŘ P, ŠEVČÍK M, FRANK A, et al. The effect of residual stress on polymer pipe lifetime[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 108: 98–108.
- [20] FARSHAD M. Two new criteria for the service life prediction of plastics pipes[J]. Polymer Testing, 2004, 23(8): 967–972.
- [21] HUANG B, Li X, ZENG Z, et al. Study on viscoelastic behavior during slow crack growth of medium density polyethylene pipes[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 69: 1 257–1 265.
- [22] 杨圳. 聚乙烯管材循环载荷法寿命预测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- YANG Zhen. Study on life prediction of polyethylene pipe by cyclic loading method[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [23] HOÀNG E M, LOWE D. Lifetime prediction of a blue PE100 water pipe[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(8): 1 496–1 503.
- [24] 王洋. 城镇燃气聚乙烯管道热氧老化寿命预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG Yang. Research of lifetime prediction method of urban gas polyethylene pipes by thermal-oxidative aging[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [25] 李茂东, 史君林, 黄国家, 等. 美国塑料管道失效数据对我国塑料管道安全管理的启发[J]. 中国塑料, 2018, 32(3): 92–98.
- LI Maodong, SHI Junlin, HUANG Guojia, et al. Revelation of the American Plastic Pipe Failure Data to China Plastic Pipe Safety Management[J]. CHINA PLASTICS, 2018, 32(3): 92–98.
- [26] 戴鸿滨, 姜婷婷, 康悦, 等. 高密度聚乙烯管道热熔接头力学性能[J]. 焊接, 2015(12): 42–47, 71.
- DAI Hongbin, JIANG Tingting, KANG Yue, et al. Mechanical properties of high density polyethylene pipe hot melt welded joint[J]. Welding & Joining, 2015(12): 42–47, 71.
- [27] SHIM D J, KRISHNASWAMY P, FOCHT E. Comparison of parent and butt fusion material properties of high density polyethylene[C]//ASME Pressure Vessels and Piping Conference. 2009, 43697: 1 301–1 308.
- [28] DAI H, PENG J. The effects of welded joint characteristics on its properties in HDPE thermal fusion welding[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(15). DOI: 10.1142/S0217984917501858.
- [29] 王振超, 张莹, 彭伊娟, 等. 聚乙烯管道热熔接头可靠性评价方法研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(1): 148–159.
- WANG Zhenchao, ZHANG Ying, PENG Yijuan. Research progress on reliability assessment methods of polyethylene pipes fusion joint[J]. CHINA PLASTICS, 2022, 36(1): 148–159.
- [30] 康悦. 不同冷却速度下高密度聚乙烯管道热熔焊缝模拟与试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- KANG Yue. Research on simulation and experiment on the weld joint of HDPE pipe under different cooling rate[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [31] 吕亚峰. 高密度聚乙烯管热熔焊接数值模拟研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- LYU Yafeng. Numerical simulation of hot melt welding of high density polyethylene pipe[D]. Chengdu: SouthWest Petroleum University, 2017.
- [32] SUN Y, JIA Y F, HAROON M, et al. Welding residual stress in HDPE pipes: measurement and numerical simulation[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019, 141(4). DOI: 10.1115/1.4043463.
- [33] KWON H J, JAR P Y B. On the application of FEM to deformation of high-density polyethylene[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(11–12): 3 521–3 543.
- [34] 李兆璞, 乔亮, 闻炯明, 等. 热熔焊接工艺参数对聚乙烯管道力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 35–39.
- LI Zhaopu, QIAO Liang, WEN Jiongming, et al. Influence of hot melt welding process parameters on mechanical properties of polyethylene pipeline[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(9): 35–39.