

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.11.021

聚全氟乙丙烯耐高温非金属内衬油管的服役工况适应性

郭玉洁¹, 徐创伟¹, 张江江¹, 李芳¹, 孟晓宇^{2,3}, 谢思黔^{2,3}

[1. 中国石油化工股份有限公司西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国石油大学(北京)新能源与材料学院, 北京 102249;
3. 油气装备材料失效与腐蚀防护北京市重点实验室, 北京 102249]

摘要: 选用耐温优异的聚全氟乙丙烯(FEP), 测试了其基础物理力学特性和耐环境特性, 总结分析了FEP挤出内衬油管的服役工况适应性。结果表明, FEP挤出管的熔点高达255℃, 具有良好的耐高温性能; 拉伸强度达到28.0 MPa, 断裂伸长率达到503.58%, 基本性能能够满足内衬管需求; 在模拟塔河油田的工况条件下, 腐蚀前后的FEP样品外观未出现破损、变形现象; 对比腐蚀前后FEP样品的力学性能, 拉伸强度下降了6.8%, 断裂伸长率上升了8.9%, 硬度下降了6%, 质量增加了1.6%。进一步分析对比腐蚀试验前后FEP样品的化学结构、结晶性能和微观结构, 发现FEP样品腐蚀前后的官能团结构和晶体类型基本没有发生变化, 腐蚀前后的拉伸断面粗糙程度略有变化, 但其结构仍保持完整、连续, 没有显著的缺陷。FEP挤出管在高温高压腐蚀介质的环境中具有优异的环境适应性, 是一种适合运用于塔河油田井下耐高温的非金属材料。

关键词: 聚全氟乙丙烯; 内衬油管; 耐高温; 耐环境特性

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)11-0133-06

Adaptability of Polyperfluoroethylene Propylene High Temperature Resistant Non-metallic Lining Tubing in Service Conditions

Guo Yujie¹, Xu Chuangwei¹, Zhang Jiangjiang¹, Li Fang¹, Meng Xiaoyu^{2,3}, Xie Siqian^{2,3}

(1. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China; 2. School of New Energy and Materials, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Beijing Key Laboratory of Failure and Corrosion Protection of Oil and Gas Equipment Materials, Beijing 102249, China)

Abstract : Polyperfluoroethylene propylene (FEP) with excellent temperature resistance was selected, and its basic physical and mechanical characteristics and environmental resistance characteristics were tested. The adaptability of FEP extruded lining tubing in service conditions was summarized and analyzed. The results show that the melting point of FEP extrusion tube is as high as 255℃, which has good high temperature resistance. The tensile strength reaches 28.0 MPa, the elongation at break reaches 503.58%, and the basic performance can meet the demand of the lining tubing. Under the simulated working conditions of Tahe oilfield, the appearance of FEP samples before and after corrosion is not damaged or deformed. Comparing the mechanical properties of FEP samples before and after corrosion, the tensile strength decreases by 6.8%, the elongation at break increases by 8.9%, the hardness decreases by 6%, and the mass increases by 1.6%. Further analysis and comparison of the chemical structure, crystallization performance and microstructure of FEP samples before and after corrosion show that the functional group structure and crystal type of FEP samples don't change after corrosion. Before and after corrosion, the roughness of the tensile fracture surface changes slightly, but the structure remains intact and continuous without significant defects. FEP extrusion tube has excellent environmental adaptability in the environment of high temperature and high pressure corrosive media, which is a kind of non-metallic material suitable for underground high temperature resistance in Tahe oilfield.

Keywords : polyperfluoroethylene propylene ; lined tubing ; high temperature resistance ; resistance to environment

通信作者: 孟晓宇, 副教授, 主要从事高分子复合材料、微观相结构与材料性能关系以及功能高分子研究

收稿日期: 2022-08-14

引用格式: 郭玉洁, 徐创伟, 张江江, 等. 聚全氟乙丙烯耐高温非金属内衬油管的服役工况适应性[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(11): 133-138.

Guo Yujie, Xu Chuangwei, Zhang Jiangjiang, et al. Adaptability of polyperfluoroethylene propylene high temperature resistant non-metallic lining tubing in service conditions[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(11): 133-138.

深层超深层油气资源的开发是未来陆上油气勘探开发的重点。在“十三五”期间,我国超深井数量首次超越美国,井深迈上 8 000 m 新台阶。随着油气勘探开发向深层超深层发展,高温高压的问题更加尖锐,技术新挑战不断出现^[1]。国内以塔河油田、顺北油田为代表的碳酸盐岩油藏储层温度普遍为 120 ~ 160℃^[2]。同时,塔河油田具有井下高 Cl⁻、高矿化度、低 pH 值等特征,随着开发生产的进行,腐蚀问题日趋严重^[3]。

非金属内衬油井管是一种将耐腐蚀塑料管衬于金属油管内部的复合型油井管,其中金属油管起到承受载荷、非金属内衬起到防腐和抗磨损的作用^[4]。其中,以聚乙烯内衬为代表的非金属内衬油井管已经得到广泛的应用。聚乙烯价格低廉、耐腐蚀性能优异、加工性能良好,但其耐温等级较低,难以满足深井超深井开采要求。聚酮材料具有优异的耐蚀性能,其耐温等级能够达到 130℃。聚酮材料的应用,使得非金属内衬油井管的耐温等级向高温拓展^[5],但仍不能够满足 150℃ 以上耐温等级要求。

聚全氟乙丙烯(FEP)是四氟乙烯和六氟丙烯的共聚物(图 1),聚四氟乙烯(PTFE)的改性材料,其既具有与 PTFE 相似的耐蚀特性,又具有良好的加工性能。因而它弥补了 PTFE 加工困难的不足,使其成为代替 PTFE 的材料^[6-10]。FEP 耐热性能优异,能在 85 ~ 200℃ 的温度范围内连续使用^[11-13]。因此,FEP 材料有望在高温腐蚀工况环境下管柱防腐领域得到应用^[14-16]。

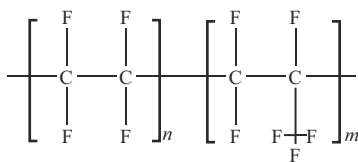


图 1 FEP 的分子结构式

此前对于 FEP 材料的研究多集中在 FEP 材料的改性和填充上。唐志伟等^[17]采用石墨填充 FEP,通过添加碳纤维,制备了导热性能较好、抗冲击且耐腐蚀的石墨改性 FEP 导热材料,主要应用于新型耐腐蚀换热器,用于回收烟气余热;糜万俊等^[18]通过改变聚合介质、改进共聚反应控制方法,对聚合物进行改性及产业化工艺优化,研究出工艺合理、流程简易,以及生产过程中能耗物耗低、人工少的 FEP 聚合工艺,且 FEP 产品性能稳定。FEP 材料本身的

优异性能使其在防腐领域也有巨大的应用前景,李勇等^[19]采用 FEP 树脂对钢质压力容器和压力管道进行防腐蚀研究,结果表明该新型防腐蚀材料的耐蚀性、耐候性、耐热性较好,能有效防止钢质压力容器和压力管道被腐蚀。但 FEP 作为内衬油管材料,其在高温高压下对原油、矿化水、硫化氢(H₂S)及二氧化碳(CO₂)等介质的适应性研究仍属空白。

笔者将 FEP 优秀的耐高温和耐腐蚀性能运用在油田管道领域,在模拟油井环境下进行适用性研究,针对 FEP 材料的熔融挤出内衬管开展基本理化性能测试,重点模拟塔河井下环境(高温、高压、H₂S、塔河原油、矿化水)开展 FEP 的适应性研究,并表征工况环境腐蚀前后内衬管微观结构及性能变化情况,为高温腐蚀工况环境下管柱防腐提供技术支撑^[20-21]。

1 实验部分

1.1 主要原材料

FEP:上海三爱富新材料股份有限公司;

原油:塔河油田;

氯化镁:分析纯,天津欧博凯化工有限公司;

氯化钠:天津市光复科技发展有限公司;

无水氯化钙:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

硫化钠:分析纯,天津市东天正精细化学试剂厂。

1.2 主要仪器及设备

电子天平:JA3003J 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

单螺杆挤出机: SJ 75 型,张家港格兰机械有限公司;

平板硫化机: XLB 型,青岛亚东橡胶集团有限公司;

万能电子拉伸试验机: WDL-5000N 型,扬州市道纯试验机厂;

数显简支梁冲击试验机: XJJ-50S 型,济南恒思盛大仪器有限公司;

橡胶硬度计: LX-A 型,上海六菱仪器厂;

5 L 高压釜系统: 美国 Cortest 公司;

微机控制维卡温度测定仪: XRW-300E 型,济南恒思盛大仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC3 型,梅特勒-托利多仪器公司;

线膨胀系数测试仪:DIL-402型,德国耐驰仪器公司;

X射线衍射(XRD)仪:Smartlab型,日本Rigaku公司;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta200 F型,美国FEI公司。

1.3 样品制备

FEP管制备:使用单螺杆挤出机,在温度270℃、转速50 r/min条件下熔融挤出FEP管。

FEP片材制备:先将FEP管破碎,然后利用平板硫化机将破碎料热压成型为厚度分别为4 mm和1 mm的片材。热压时间为10 min、温度为280℃、压力为15 MPa。热压结束后在冷压机上冷压10 min定型。

冲击测试样品制备:将厚度为1 mm的FEP片材剪碎,利用平板硫化机和缺口冲击试样模具将剪碎的FEP片材热压加工成型,热压温度为280℃。预热5 min后在15 MPa下放气10次;然后热压5 min,压力为15 MPa,最后在冷压机上冷压10 min定型,得到宽10 mm、厚4 mm的缺口冲击样条。

1.4 测试与表征

维卡软化温度按照ISO 2507-1-2017测试,试样为从厚度4 mm的FEP片材上裁取的1 mm长度正方形片材,采用A50和B50两种测试方法。A50法:使用10 N的力,加热速率为50℃/h;B50法:使用50 N的力,加热速率为50℃/h。

缺口冲击强度按照ASTM D256-2010测试,冲击摆锤能量为15 J,所有试验均在室温25℃下进行,每组试样测试5次,取结果的平均值。

拉伸性能按照ISO 527-1-2012测试,试样为从FEP管上裁取得到的长75 mm、宽4 mm、厚3 mm拉伸样条,拉伸速率为50 mm/s,所有试验均在室温25℃下进行,每组试样测试5次,取结果的平均值。

硬度按照GB/T 2411-2008测试,将三张4 mm的FEP片材叠在一起进行测试,所有试验均在室温25℃下进行,每组试样测试5次,取结果的平均值。

采用线膨胀系数测试仪,按照ISO 11359-2-1999测试FEP从室温(25±1℃)到170℃的热膨胀过程曲线,计算得到该温度范围下的线膨胀系数,试样为从厚度4 mm的FEP片材上裁取的长25 mm、宽4 mm、厚4 mm长方体。

采用DSC仪测试FEP的熔点并分析FEP腐蚀

前后的熔融和结晶曲线。试验方法如下:称取3~5 mg的FEP样品,于铝坩埚中制样,将制得的样品于DSC仪中进行测试。温度段设置:先以10℃/min从20℃升温到300℃,得到熔融曲线;再以10℃/min从300℃降温到20℃,得到结晶曲线。

采用SEM观察FEP拉伸断面腐蚀前后的微观形貌,取原始拉伸后和腐蚀拉伸后的FEP样品拉伸断面烘干喷金,然后利用SEM观察断面并拍照。

采用FTIR仪测定FEP样品腐蚀前后结构的变化情况,扫描范围为4 000~400 cm⁻¹。

采用XRD仪表征了FEP样品腐蚀前后的XRD谱图,2 θ 为5°~90°,扫描速率为5°/min。

耐介质试验:采用高压釜系统,自制模拟工装模拟现场工况条件,对FEP样品开展腐蚀试验,分析腐蚀前后FEP样品的性能变化和组织结构变化,以判断材料耐介质性能。腐蚀环境条件见表1。其中气相为H₂S和CO₂的混合气体,H₂S的分压为0.9 MPa,CO₂的分压为1.15 MPa;液相为矿化水和塔河原油(体积比1:1);试验时间为7 d,试验温度为170℃。矿化水水型为CaCl₂,pH值为6.2,矿化度为224 060 mg/L,具体配方见表2。

表1 耐介质试验工况腐蚀环境条件

温度/℃	总压/MPa	H ₂ S分压/ MPa	CO ₂ 分压/ MPa	矿化水/ 油体积比	时间/d
170	20	0.9	1.15	1:1	7

表2 耐介质试验矿化水配方

水型	矿化度	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	硫化 物	总 铁	pH 值
CaCl ₂	224 060	135 080	11 467	1 169	46.9	65 928	38.9	49.8	6.2

2 结果与讨论

2.1 理化性能分析

首先对FEP挤出管的耐热性能进行了研究。表征了FEP挤出管的熔点、维卡软化温度(A50和B50)和25℃~170℃范围内的线膨胀系数,结果见表3。从表3可以看出,FEP挤出管熔点较高,达到了255℃,这为其在高温下的应用奠定了良好基础。

表3 FEP的耐热性能

项 目	数 值
熔点/℃	255
维卡软化温度(B50)/℃	88
维卡软化温度(A50)/℃	217
线膨胀系数(25~170℃)/K ⁻¹	1.71×10 ⁻⁴

为了更好地检验FEP挤出管的耐热性能,分别表征了其A50和B50条件下的维卡软化温度。结果

表明,在B50条件下,FEP的维卡软化温度较低,为88℃;而在A50条件下,其维卡软化温度为217℃。这是因为FEP材料硬度较低,在受力情况下容易发生变形。然而,FEP挤出管在井下高温高压环境下是否发生变形,需进一步开展环境适应性研究。此外,内衬管的热膨胀特性也是一项重要的参数。测试了FEP从25℃到170℃范围内的线膨胀系数,其结果为 $1.71 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,与聚乙烯、聚酮的热膨胀系数($100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)相近。

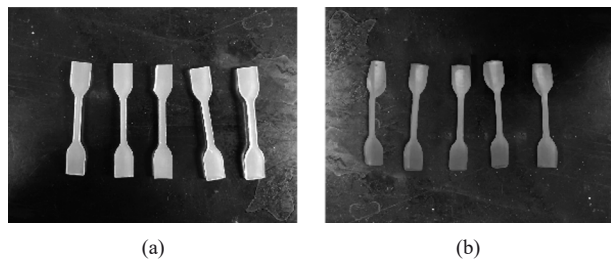
进一步对FEP挤出管的力学性能进行了测试,结果见表4。由表4可以看出,FEP挤出管的拉伸强度为28.0 MPa,断裂伸长率为503.58%,缺口冲击强度为92.7 kJ/m²。从拉伸和冲击性能来看,其性能与PTFE、聚乙烯接近,能够满足内衬管需求。测得的FEP挤出管的邵氏A硬度为50,硬度较低,与PTFE相近。这也使得FEP在受力情况下较易发生变形,B50条件下的维卡软化温度较低。

表4 FEP的力学性能

项 目	数 值
拉伸强度/MPa	28.0±3.7
断裂伸长率/%	503.58±21.7
缺口冲击强度/(kJ·m ⁻²)	92.7±9.5
邵氏A硬度	50

2.2 环境适应性分析

基于塔河油田典型工况,针对FEP开展腐蚀试验,通过比较腐蚀试验前后的力学性能及结构变化,分析FEP挤出管的环境适应性。图2为从FEP挤出管上裁取的拉伸样条在170℃腐蚀试验前后的照片。可以看出,FEP样条腐蚀前后外观没有发生变化,未出现破损、变形现象,腐蚀后样条由于在原油中长时间浸泡呈灰色,初步说明FEP具有良好的环境适应性。



(a) a—FEP 腐蚀前; b—FEP 腐蚀后
图2 FEP挤出管腐蚀前后照片

进一步对腐蚀前后的FEP样条力学性能和质量进行了对比,结果见表5。从表5中数据可以看出,FEP挤出管在经过耐介质试验后,拉伸强度和硬

度略有下降。拉伸强度从腐蚀前的28.0 MPa降为26.1 MPa,邵氏A硬度从50降到47。而断裂伸长率从504%增加到549%,样条质量基本未发生变化。从各项性能的变化率来看,拉伸强度仅下降了6.8%,硬度下降了6%,断裂伸长率上升8.9%,质量基本不变。说明在170℃的腐蚀工况下,FEP挤出管力学性能保持良好,具有较为优异的环境适应性。

表5 FEP腐蚀前后性能数据比

项 目	腐蚀前数值	腐蚀后数值	变化率
拉伸强度/MPa	28.0	26.1	-6.8%
断裂伸长率/%	503	549	+8.9%
邵氏A硬度	50	47	-6%
质量/g	18.5	18.7	+1.6%

进一步分析对比了腐蚀试验前后FEP挤出管的微观结构。首先采用FTIR测定FEP样品腐蚀前后结构的变化情况,如图3所示。从图3可以看出,FEP样品腐蚀前后在1207 cm⁻¹和1151 cm⁻¹处均有一个强度较高的反射峰。其中1151 cm⁻¹处的吸收峰是FEP中CF₃基团的反射峰,1207 cm⁻¹处是FEP中CF₂基团反射峰。FEP样品腐蚀前后反射峰位置几乎未发生变化,说明FEP样品腐蚀前后的官能团结构没有发生改变。

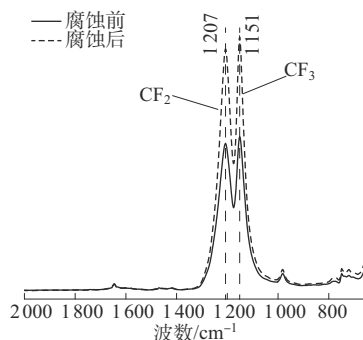


图3 FEP腐蚀前后FTIR谱图

使用DSC和XRD表征FEP挤出管晶体结构的变化情况。图4a为腐蚀前后FEP的DSC熔融和结晶曲线。从图4a的熔融曲线中可以看出,腐蚀前后FEP的熔点未发生显著变化。熔融峰变得更为尖锐,这是因为在腐蚀介质的作用下,FEP的结晶结构更加完善。腐蚀前后FEP的结晶曲线未发生变化。采用XRD仪表征了FEP样品腐蚀前后的晶体结构,如图4b所示。由图4b可以发现,FEP样品腐蚀后,其特征衍射晶面(100)衍射强度增大,特征衍射峰更加尖锐、衍射强度更高,这是由于腐蚀高温处理进一步促进了FEP分子链段沿轴向排列,分子链趋于紧密和有序,使结晶区更加规整、结晶更加完善。

FEP样品腐蚀前后的衍射峰基本保持一致,说明FEP腐蚀前后晶体结构类型基本没有发生变化。

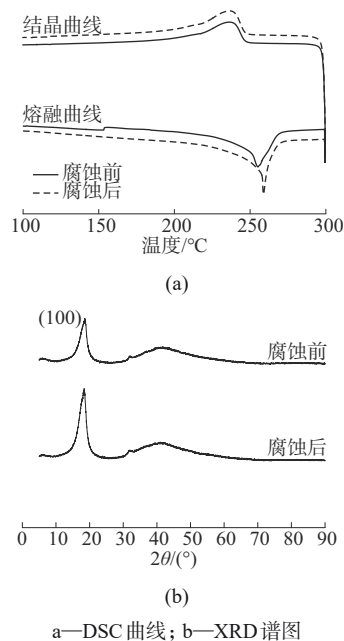


图4 FEP腐蚀前后的DSC曲线和XRD谱图

为了进一步表征腐蚀试验对FEP挤出管微观形貌的影响,使用SEM表征腐蚀前后FEP挤出管的拉伸断面微观形貌,如图5所示。从图5中的SEM照片可以看出,FEP腐蚀后的粗糙程度略有变化,但其结构仍保持完整、连续,没有显著的缺陷,表明FEP挤出管在高温高压腐蚀介质的环境中具有优异的环境适应性。

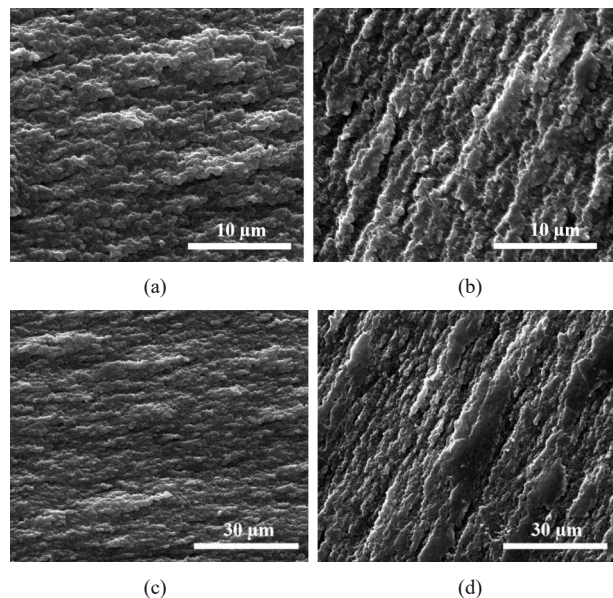


图5 FEP腐蚀前后拉伸断面SEM照片

3 结论

选用耐温优异的FEP作为研究对象,针对其基础物理力学特性和耐环境特性开展研究,总结分析了FEP内衬油管的服役工况适应性,发现在模拟塔河油田的工况条件下,FEP仍具备有优异的耐高温高压和耐介质性能,具有优异的环境适应性,是一种适合运用于塔河油田井下耐高温的非金属材料。

(1) FEP挤出管的熔点为255°C,A50和B50条件下的维卡软化温度分别为217°C和88°C,从25°C到170°C范围内的线膨胀系数为 $1.71 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,具有良好的耐高温性能。

(2) FEP挤出管的拉伸强度为28.0 MPa,断裂伸长率为503.58%,缺口冲击强度为92.7 kJ/m²,邵氏A硬度为50,其性能与PTFE、聚乙烯接近,能够满足内衬管需求。

(3) FEP样条腐蚀前后外观没有发生变化,未出现破损、变形现象;对比腐蚀前后FEP挤出管的力学性能和质量,拉伸强度下降了6.8%,断裂伸长率上升了8.9%;硬度下降了6%,质量几乎不变,略微增加了1.6%。

(4) FEP腐蚀前后的化学结构、熔点和晶体结构类型没有发生明显变化,但在腐蚀介质的作用下,FEP样品的结晶结构更加完善;腐蚀前后FEP样品的拉伸断面粗糙程度略有变化,结构仍保持完整、连续。

参考文献

- [1] 汪海阁,黄洪春,毕文欣,等.深井超深井油气钻井技术进展与展望[J].天然气工业,2021,41(8):163-177.
Wang Haige, Huang Hongchun, Bi Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8):163-177.
- [2] 李新勇,李骁,赵兵,等.顺北油田S井超深超高温碳酸盐岩断溶体油藏大型酸压关键技术[J].石油钻探技术,2022,50(2):92-98.
Li Xinyong, Li Xiao, Zhao Bing, et al. Key technologies for large-scale acid fracturing of ultra-deep fault-karst carbonate reservoirs with ultra-high temperature for Well S in Shunbei Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2):92-98.
- [3] 曾文广,李芳,胡广强,等.塔河油田注水井耐高温缓蚀剂复配研究[J].安全、健康和环境,2020,20(10):34-38.
Zeng Wenguang, Li Fang, Hu Guangqiang, et al. Study on compound of high temperature corrosion inhibitor for water injection well in Tahe oilfield[J]. Safety Health & Environment, 2020, 20(10):34-38.
- [4] 白强,霍富永,孙彦虎,等.聚乙烯内衬复合油管失效分析[J].石油管材与仪器,2020,6(3):47-50.

- Bai Qiang, Huo Fuyong, Sun Yanhu, et al. Failure analysis of polyethylene lined tubing[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2020, 6(3):47-50.
- [5] 郭玉洁, 张江江, 曾文广, 等. 聚酮材料在塔河油田的适应性研究[C]//第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2021:873-874.
- Guo Yujie, Zhang Jiangjiang, Zeng Wenguang, et al. Adaptability research of polyketone materials in Tahe oilfield[C]//Abstracts of the 11th national conference on corrosion and protection. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021:873-874.
- [6] Wu Deyan, Zheng Xuehua, Liu Runduo, et al. Free energy perturbation(FEP)-guided scaffold hopping[J]. Acta Pharmaceutica Sinica B, 2022, 12(3):1 351-1 362.
- [7] 杨晓庆, 高文静, 房新颖, 等. PVDF/FEP 共混物相容性与力学性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(2):166-170.
- Yang Xiaoqing, Gao Wenjing, Fang Xinying, et al. Study on compatibility and mechanical property of PVDF/FEP blend[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(2):166-170.
- [8] 唐思琪, 邱孝涛, 顾爱群, 等. 可熔融加工 PTFE 对 FEP 在干/湿环境中摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2022. DOI:10.16078/j.tribology.2021257.
- Tang Siqi, Qiu Xiaotao, Gu Aiqun, et al. Study on friction and wear performance of melt-processable PTFE/FEP blends under dry and wet conditions[J]. Tribology, 2022. DOI:10.16078/j.tribology.2021257.
- [9] 杨晓庆. PVDF/FEP/PMMA 共混体系的相容性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2021.
- Yang Xiaoqing. Study on the compatibility of PVDF/FEP/PMMA blends[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2021.
- [10] 侯慧玉, 冯彦洪. 聚全氟乙丙烯改性超高分子量聚乙烯的性能研究[J]. 化工新型材料, 2021, 49(2):68-71.
- Hou Huiyu, Feng Yanhong. Performance study on the ultra-high molecular weight polyethylene modified using FEP[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(2):68-71.
- [11] 王悦, 高超锋, 黄捷, 等. 石墨烯及聚苯酯改性共填充 FEP 性能研究[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(5):18-20.
- Wang Yue, Gao Chaofeng, Huang Jie, et al. Study on properties of graphene and polyphenyl ester co-filled FEP[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(5):18-20.
- [12] 邵春明, 高艳林, 孙洪阳, 等. 聚全氟乙丙烯树脂的毛细管流变行为研究[J]. 化工生产与技术, 2020, 26(1):1-4, 7.
- Shao Chunming, Gao Yanlin, Sun Hongyang, et al. Capillary rheological behavior of polyperfluorinated ethylene propylene resin [J]. Chemical Production and Technology, 2020, 26(1):1-4, 7.
- [13] 潘金峰. 聚全氟乙丙烯纤维及织物制备与性能[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
- Pan Jinfeng. Preparation and properties of poly(fluorinated ethylene-propylene) fiber fabric[D]. Tianjin: Tianjin university of technology, 2020.
- [14] 曹志强, 刘海彬, 金叶, 等. 聚四氟乙烯与聚全氟乙丙烯涂层摩擦学性能比较研究[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(16):882-886.
- Cao Zhiqiang, Liu Haibin, Jin Ye, et al. Comparison of tribological properties between polytetrafluoroethylene and polyperfluoroethylene-propylene coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2019, 38(16):882-886.
- [15] 王东亮, 刘贵, 裴雷振, 等. 小直径全氟乙丙烯共聚物薄壁管的热弯成型工艺[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):59-64.
- Wang Dongliang, Liu Gui, Pei Leizhen, et al. Hot bending process of minor diameter FEP thin-walled tubes[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):59-64.
- [16] 付浩, 肖长发. 含氟聚合物纤维研究进展[J]. 高分子通报, 2018 (12):22-31.
- Fu Hao, Xiao Changfa. Research development of fluoropolymer fibers[J]. Polymer Bulletin, 2018(12):22-31.
- [17] 唐志伟, 张学峰, 聂荣华, 等. 石墨改性聚全氟乙丙烯导热复合材料的性能[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(6):933-939.
- Tang Zhiwei, Zhang Xuefeng, Nie Ronghua, et al. Properties of graphite modified FEP thermal conductive composite[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(6):933-939.
- [18] 糜万俊, 阚大清. 聚全氟乙丙烯聚合工艺研究[J]. 有机氟工业, 2017(3):21-22, 64.
- Mi Wanjun, Kan Daqing. Study on FEP polymerization process [J]. Organo-Fluorine Industry, 2017(3):21-22, 64.
- [19] 李勇, 郑鸥. 改性聚全氟乙丙烯(FEP)对钢材腐蚀性能的影响[J]. 河南工程学院学报: 自然科学版, 2017, 29(3):24-27.
- Li Yong, Zheng Ou. Effect of modified polyperfluoroethylene propylene (FEP) on corrosion resistance of steel[J]. Journal of Henan University of Engineering: Natural Science Edition, 2017, 29(3): 24-27.
- [20] 崔炳, 季凌飞, 闫胤洲, 等. 激光辐照制备 PTFE、FEP、PFA 涂层[J]. 中国激光, 2015, 42(9):106-112.
- Cui Bing, Ji Lingfei, Yan Yinzhou, et al. Preparation of PTFE、FEP、PFA coating by laser irradiation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9):106-112.
- [21] Huang Yan, Xiao Changfa, Huang Qinglin, et al. Robust preparation of tubular PTFE/FEP ultrafine fibers-covered porous membrane by electrospinning for continuous highly effective oil/water separation[J]. Journal of Membrane Science, 2018, 568:87-96.