

产品·设计

海上运输管道柔性接头内部弹性体用胶料的配方设计

马美琴, 刘保权, 尹婷, 石臣刚, 孙建帮

(衡橡科技股份有限公司, 河北衡水 053000)

摘要:研究海上运输管道柔性接头内部弹性体用胶料的配方设计。通过对柔性接头内部弹性体用胶料的橡胶[丁腈橡胶(NBR)]、补强填料、增塑剂、硫黄和促进剂进行正交试验分析,确定其最优组合为NBR6240和6280用量分别为60和40份,炭黑N330用量为55份,炭黑N550用量为12份,己二酸二辛酯用量为7份,硫黄和促进剂用量为1.8份(硫黄、促进剂CBS和促进剂TMTD用量分别为0.3, 1和0.5份)。该组合配方的NBR胶料的拉伸强度达到22.6 MPa,海水老化后拉伸强度变化率(绝对值,后同)和拉断伸长率变化率以及油浸泡后体积变化率较小,该组合配方胶料的性能满足柔性接头内部弹性体的性能要求。

关键词:柔性接头;弹性体;丁腈橡胶;海上运输管道;正交试验

中图分类号:TQ336.8;TQ333.7

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)02-0123-07

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2023.02.0123



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着全球深海资源开发的进程不断加快,海上油田勘探不断向深海和远海挺进,海洋浮式平台的应用越来越广泛^[1]。海上管道运输是从海底油井铺设一条管道,将石油或天然气从海底油井输送到海上浮动生产平台上来^[2]。海上运输管道由刚性管段和柔性接头构成,柔性接头是其关键组件,而柔性接头内部弹性体是柔性接头的重要组成部分,能够显著提高运输管道之间的运动力,可以适应运输管道不同的连接方式并灵活转动,同时具有高度抗压性能,使石油或天然气运输更安全^[3-4]。目前,我国还没有成熟的海上运输管道柔性接头(以下简称柔性接头)生产技术体系,因此开发力学性能、耐油性能、耐海水性能和耐老化性能优异的柔性接头内部弹性体是重要的研究课题。

本工作研究柔性接头内部弹性体用胶料的

配方设计,采用多因子正交试验法进行主体材料、补强填料、增塑剂、硫黄和促进剂对胶料性能影响的分析,以获得柔性接头内部弹性体用胶料配方的优化组合,使柔性接头在压力为38 MPa和温度为-10~65℃的海水中拥有至少30年的使用寿命,这具有重要的意义。

1 配方主要组分选择

1.1 主体材料

海洋温度一般在-2~30℃,柔性接头工作海域在约为20 m的深度。柔性接头内部弹性体需要采用耐油性较佳的胶种。部分胶种胶料的性能如表1所示。

硅橡胶的拉伸强度和撕裂强度等力学性能较低,在常温下其力学性能不及大多数合成橡胶;聚氨酯橡胶的拉断伸长率较低、密度较大、造价

基金项目:国家发展和改革委员会科技攻关项目(CCL2020HNFN0183)

作者简介:马美琴(1985—),女,河北保定人,衡橡科技股份有限公司高级工程师,硕士,主要从事高分子材料方面的研究工作。

E-mail:tdksks@163.com

引用本文:马美琴,刘保权,尹婷,等.海上运输管道柔性接头内部弹性体用胶料的配方设计[J].橡胶工业,2023,70(2):123-129.

Citation: MA Meiqin, LIU Baoquan, YIN Ting, et al. Formula design of internal elastomer compound for flexible joint of marine transportation pipeline[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(2): 123-129.

表1 不同胶种胶料的性能
Tab.1 Properties of different rubber compounds

胶种	密度/(Mg·m ⁻³)	IRHD硬度/度	拉伸强度/MPa	拉断伸长率/%	耐油性能	工作温度/℃
天然橡胶	0.95	30~98	5~28	≤1 000	差	-50~140
丁苯橡胶	0.92	40~95	5~24	≤700	差	-50~140
NBR	0.98	40~95	5~27	≤800	很好	-50~140
氯丁橡胶	1.23	40~95	5~27	≤800	好	-50~140
丁基橡胶	0.93	40~90	4~17	≤900	差	-50~140
硅橡胶	1.19	40~90	2~10	≤500	很好	-100~220
聚氨酯橡胶	1.26	65~95	20~320	≤600	好	-30~80

较高;NBR的耐油性能、耐磨性能、耐热性能和粘合性能好,能很好地满足柔性接头的工作环境要求^[5]。因此,选用NBR作为主体材料。

1.2 补强填料

NBR在伸张状态下的结晶能力较差,自身的补强性能较差,而柔性接头内部弹性体用胶料要求具有良好的拉伸性能、耐老化性能和耐油性能。鉴于炭黑N330具有优异的补强性能,能赋予NBR胶料较好的拉伸性能、抗撕裂性能、耐磨性能、弹性和挤出性能,并能在胶料中良好分散;炭黑N550的粒子表面光滑,能赋予NBR胶料较好的延展性能、强度性能、耐磨性能、耐高温性能、导热性能,因此选用炭黑N330和N550作为补强填料^[6-7]。

另外炭黑作为补强填料使用,其用量对胶料性能影响很大,补强填料过少不能发挥补强作用,补强填料过多则影响胶料拉伸结晶,会导致胶料的性能下降,故应确定适合的炭黑用量。

1.3 增塑剂

因柔性接头内部弹性体要求具有高拉伸强度和拉断伸长率,故其胶料的增塑剂用量应尽可能小。NBR为极性不饱和橡胶,NBR胶料一般采用酯类和芳烃油作为增塑剂,但NBR的耐寒性能较差,故采用酯类增塑剂较为适宜^[8]。另外,液体NBR对NBR具有优异的增塑作用,它与NBR有理想的互溶性,不易从NBR中析出,高温下液体NBR也不易发生挥发,因此选用己二酸二辛酯(DOA)和液体NBR作为增塑剂^[9-11]。

1.4 硫化体系

硫化体系分为硫黄硫化体系、有效硫化体系和半有效硫化体系三大类,NBR常采用有效硫化体系(低硫高促硫化体系),由于硫黄在硫化反应

中的交联效率高,因此胶料的拉伸性能较好,且胶料长时间硫化后的性能更好。另需补充采用有利于提高胶料交联密度、耐热性能、抗硫化返原性能以及降低生热的交联助剂^[12-14]。

促进剂可选用的品种有:适用于高温快速硫化及厚制品硫化的次磺酰胺类促进剂CBS;硫化速度快、硫化曲线平坦、有利于提高胶料耐老化性的噻唑类促进剂MBTS;硫化温度低、硫化速度快、可减小硫化剂用量,可提高胶料的交联密度、物理性能和耐热性能的秋兰姆类促进剂TMTD;具有优异的抗硫化还原性,用于有效和半有效硫化体系时提高胶料耐热性能和耐老化性能的促进剂DTDM^[15]。

抗硫化返原剂选用抗硫化返原剂PK-900,当硫化返原发生时,它使得胶料产生热稳定好的C—C交联键以补偿S—S键断裂,使得硫化胶的交联密度和物理性能保持不变。

2 实验

2.1 原材料

NBR,牌号6240和6280,韩国朗盛公司产品;炭黑N330和N550,金能科技股份有限公司产品;液体NBR,衡水瑞恩橡塑科技有限公司产品;氧化锌,高邑县永昌锌业有限责任公司产品;硬脂酸,丰益油脂科技(天津)有限公司产品;DOA,山东齐鲁增塑剂股份有限公司产品;其余配合剂均为市售品。

2.2 主要仪器和设备

1 L密炼机,利拿机械(东莞)实业有限公司产品;XK-160型开炼机,青岛业飞机械有限公司产品;MDR-2000型硫化仪和XLB400×400型平板硫化机,扬州市江都区开源试验机械厂产品;

SHT4305型微机控制电子万能试验机,美特斯工业系统(中国)有限公司产品;SY-401A型热老化试验箱,南通中良实验仪器有限公司产品;GDJS-100型高低温交变湿热试验箱,杭州冠名仪器设备有限公司产品。

2.3 试样制备

胶料的一段混炼在密炼机中进行,密炼室初始温度为90℃,转子转速为30 r·min⁻¹,混炼工艺为:依次加入生胶、小料、炭黑、增塑剂并混炼均匀,在130℃下排胶,胶料在开炼机上薄通、打三角包3次并下片。胶料的二段混炼在开炼机上进行:将停放8 h的一段混炼胶在开炼机上包辊后,加入硫磺和促进剂,混炼均匀后薄通、打三角包3次并下片。

将停放24 h的NBR混炼胶在平板硫化机上硫化,硫化条件为142℃/6 MPa×*t*₉₀。

2.4 性能测试

(1) 邵尔A型硬度。邵尔A型硬度按GB/T 531.1—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶 压入硬度试验方法 第1部分:邵氏硬度计法(邵尔硬度)》测定。

(2) 拉伸性能。拉伸强度和拉伸伸长率按GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定》测定。

(3) 撕裂强度。撕裂强度按GB/T 529—2008《硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度的测定(裤形、直角形和新月形试样)》测试。

(4) 热空气老化性能。热空气老化性能按GB/T 3512—2014《硫化橡胶或热塑性橡胶 热空气加速老化和耐热试验》测试。

(5) 耐液体性能。耐海水老化性能和油浸泡后体积变化率按GB/T 1690—2010《硫化橡胶或热塑性橡胶 耐液体试验方法》测试。

3 配方设计的正交试验结果与讨论

胶料配方设计方法分为2种^[16-17]:一种是单因素试验设计方法,包括黄金分割法、平分法、分数法、分批试验法等;另一种是多因素试验设计方法,包括均匀试验设计法、平行线法、矩形法、正交试验设计法等。

多数研究者进行胶料配方设计时需要同时考虑2个及2个以上的变量因子对胶料性能的影响,采用单因子变量设计方法时,试验次数多,过程冗杂,不能满足需要。如做三因子三水平的试验,按照全面试验法,需进行27种组合试验,且尚未考虑每一组合的重复试验;按照L₉(3³)正交试验设计,仅需做9组试验,显然工作量大大减少。而本配方设计需要确定NBR、炭黑N330、炭黑N550、增塑剂DOA、硫磺和促进剂用量,故采用五因子四水平的L₁₆(4⁵)正交试验设计^[18-21],该方法可实现对试验因子的最优组合,减小试验误差和工作量,确定理想的胶料配方。本正交试验的因子与水平如表2所示,其中A、B、C、D、E分别为NBR6240+6280、炭黑N330、炭黑N550、DOA、硫磺+促进剂用量(份)。

表2 因子与水平
Tab. 2 Factors and levels

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	90+10	40	20	7	1.8
2	80+20	45	16	10	2.3
3	70+30	50	12	13	1.7
4	60+40	55	8	16	3.3

不同因子与水平组合(试验方案)配方胶料的性能如表3所示。

从表3可以看出:各因子与水平组合胶料的拉伸强度和撕裂强度高,均能满足柔性接头内部弹性体用胶料的拉伸性能要求,故不再对其进行分析。

根据柔性接头使用工况,需重点对胶料的耐热空气老化性能、耐海水老化性能和油浸泡后体积变化率进行分析^[22-28]。由于柔性接头是海上运输管道的一部分,其常年浸泡在石油液体中,其弹性体的体积变化会影响管道的密封性能,故以表3中NBR胶料的油浸泡后体积变化率为例,进一步分析不同因子与水平组合的NBR胶料油浸泡后体积变化率,如表4所示。其中,*K_i*(*i*为1—4)为各因子的各水平体积变化率的和,*I_i*为各因子的体积变化率平均值(*K_i*/4),*R*为极差(各因子*I_i*的绝对值最大值与绝对值最小值之差)。各因子的各水平*I_i*越小,说明这一水平对胶料的性能影响越小;各因子

表3 不同因子与水平组合配方胶料的性能
 Tab.3 Properties of compounds with different factor and level combination formulas

项 目	1 [#] 试验 方案	2 [#] 试验 方案	3 [#] 试验 方案	4 [#] 试验 方案	5 [#] 试验 方案	6 [#] 试验 方案	7 [#] 试验 方案	8 [#] 试验 方案
配方组分								
NBR6240用量/份	90	80	70	60	90	80	70	60
NBR6280用量/份	10	20	30	40	10	20	30	40
炭黑N330用量/份	45	55	55	45	50	40	40	50
炭黑N550用量/份	12	20	12	20	20	12	20	12
DOA用量/份	13	10	16	7	16	7	13	10
硫黄用量/份	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3
促进剂CBS用量/份	1	1	0	0	0	0	1	1
促进剂MBTS用量/份	0	0	1	1	1.5	1.5	0	0
促进剂TMTD用量/份	0	0	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5
促进剂DTDM用量/份	0.8	0.8	0	0	1	1	0	0
胶料性能								
邵尔A型硬度/度	63	73	65	68	68	64	63	67
拉伸强度/MPa	16.2	17.3	17.8	18.4	16.4	17.2	17.8	19.6
拉断伸长率/%	558	592	509	526	531	534	542	592
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	52	48	48	51	53	50	47	50
70℃×168h热空气老化后								
邵尔A型硬度变化/度	+1	+2	+1	-1	+1	0	+2	0
拉伸强度变化率/%	+0.69	+4.11	+4.01	+3.59	+1.22	+2.56	+3.56	+6.17
拉断伸长率变化率/%	-0.04	-1.09	-0.85	-0.52	-0.49	-1.52	-1.55	+0.35
80℃×168h海水老化后								
邵尔A型硬度变化/度	+1	0	+3	+4	+2	+1	+2	+1
拉伸强度变化率/%	-7.91	-4.51	-4.58	-5.08	-7.28	-6.07	-5.03	-2.46
拉断伸长率变化率/%	-8.28	-9.06	-9.04	-7.81	-8.62	-9.74	-9.71	-7.84
23℃×168h 1 [#] 标准油浸泡后								
体积变化率/%	-1.21	-1.94	-0.86	-0.97	-1.73	-1.13	-1.26	-1.22
项 目	9 [#] 试验 方案	10 [#] 试验 方案	11 [#] 试验 方案	12 [#] 试验 方案	13 [#] 试验 方案	14 [#] 试验 方案	15 [#] 试验 方案	16 [#] 试验 方案
配方组分								
NBR6240用量/份	90	80	70	60	90	80	70	60
NBR6280用量/份	10	20	30	40	10	20	30	40
炭黑N330用量/份	40	50	50	40	55	45	45	55
炭黑N550用量/份	8	16	8	16	16	8	16	8
DOA用量/份	10	13	7	16	7	16	10	13
硫黄用量/份	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3
促进剂CBS用量/份	0	0	1	1	1	1	0	0
促进剂MBTS用量/份	1	1	0	0	0	0	1.5	1.5
促进剂TMTD用量/份	0.3	0.3	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5
促进剂DTDM用量/份	0	0	0.8	0.8	0	0	1	1
胶料性能								
邵尔A型硬度/度	60	67	66	61	72	60	66	66
拉伸强度/MPa	17.2	16.8	17.4	18.2	17.9	17.1	17.5	17.6
拉断伸长率/%	516	506	508	516	514	528	503	529
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	49	50	42	48	47	49	47	47
70℃×168h热空气老化后								
邵尔A型硬度变化/度	+2	+1	0	+1	+2	-1	0	-1
拉伸强度变化率/%	+1.46	+2.76	+3.54	+3.56	+2.11	+2.85	+2.94	+4.61
拉断伸长率变化率/%	-1.51	-0.83	+0.09	-1.49	+0.85	-1.62	-0.72	+0.56
80℃×168h海水老化后								
邵尔A型硬度变化/度	0	+1	+4	+3	+1	+2	+1	+2
拉伸强度变化率/%	-7.13	-5.83	-5.05	-5.08	-6.51	-5.74	-5.66	-3.98
拉断伸长率变化率/%	-9.67	-8.99	-8.12	-9.65	-7.36	-9.78	-8.92	-7.65
23℃×168h 1 [#] 标准油浸泡后								
体积变化率/%	-3.22	-2.51	-0.61	-0.94	-0.93	-0.83	-1.21	-0.42

注:胶料配方其余组分与用量为氧化锌 5,硬脂酸 1,防老剂4010NA 2,防老剂RD 1.5,2,4-二硝基苯酚 1,微晶蜡 1,抗硫化返原剂PK-900 2,液体NBR 5。

表4 不同因子与水平组合配方胶料的油浸泡后体积变化率
 Tab. 4 Volume change rates of compounds with different factor and level combination formulas after oil immersion

项 目	因 子					油浸泡后体积变化率/%
	A	B	C	D	E	
试验方案						
1 [#]	A ₁	B ₂	C ₃	D ₃	E ₂	-1.21
2 [#]	A ₂	B ₄	C ₁	D ₂	E ₂	-1.94
3 [#]	A ₃	B ₄	C ₃	D ₄	E ₃	-0.86
4 [#]	A ₄	B ₂	C ₁	D ₁	E ₃	-0.97
5 [#]	A ₁	B ₃	C ₁	D ₄	E ₄	-1.73
6 [#]	A ₂	B ₁	C ₃	D ₁	E ₄	-1.13
7 [#]	A ₃	B ₁	C ₁	D ₃	E ₁	-1.26
8 [#]	A ₄	B ₃	C ₃	D ₂	E ₁	-1.22
9 [#]	A ₁	B ₁	C ₄	D ₂	E ₃	-3.22
10 [#]	A ₂	B ₃	C ₂	D ₃	E ₃	-2.51
11 [#]	A ₃	B ₃	C ₄	D ₁	E ₂	-0.61
12 [#]	A ₄	B ₁	C ₂	D ₄	E ₂	-0.94
13 [#]	A ₁	B ₄	C ₂	D ₁	E ₁	-0.93
14 [#]	A ₂	B ₂	C ₄	D ₄	E ₁	-0.83
15 [#]	A ₃	B ₂	C ₂	D ₂	E ₄	-1.21
16 [#]	A ₄	B ₄	C ₄	D ₃	E ₄	-0.42
极差分析						
K ₁	-7.090	-6.550	-5.900	-3.640	-4.240	
K ₂	-6.410	-4.220	-5.590	-7.590	-4.700	
K ₃	-3.940	-6.070	-4.420	-5.400	-7.560	
K ₄	-3.550	-4.150	-5.080	-4.360	-4.490	
I ₁	-1.773	-1.638	-1.475	-0.910	-1.060	
I ₂	-1.603	-1.055	-1.398	-1.898	-1.175	
I ₃	-0.985	-1.518	-1.105	-1.350	-1.890	
I ₄	-0.888	-1.038	-1.270	-1.090	-1.123	
R	0.885	0.600	0.370	0.988	0.830	

的R越大,说明这一因子对胶料的性能影响越大。

从表4可以看出:NBR胶料的耐油性能最佳的组合为A₄B₄C₃D₁E₁;D因子的R最大,即DOA用量对NBR胶料的耐油性能影响最大。

采用上述方法对表3中NBR胶料的耐热空气老化性能和耐海水老化性能进行分析,得出热空气老化后NBR胶料的拉伸强度变化率(绝对值,下同)最小的组合为A₄B₄C₃D₂E₁,拉断伸长率变化率最小的组合为A₄B₄C₃D₁E₁;海水老化后NBR胶料的拉伸强度变化率最小的组合为A₄B₄C₃D₂E₁,拉断伸长率变化率最小的组合为A₄B₄C₃D₁E₁。综合考虑,NBR胶料的综合性能最佳的组合为A₄B₄C₃D₁E₁,即NBR6240和6280用量分别为60和40份,炭黑N330用量为55份,炭黑N550用量为12份,DOA用量为7份,硫黄和促进剂用量为1.8份。

采用A₄B₄C₃D₁E₁组合的优化配方制备NBR胶料,其性能测试结果见表5。

从表5可以看出:采用A₄B₄C₃D₁E₁组合的优化配方的NBR胶料的拉伸强度大幅提高,达到22.6 MPa;海水老化后拉伸强度变化率和拉断伸长率变化率以及油浸泡体积变化率较小,验证了A₄B₄C₃D₁E₁组合为柔性接头内部弹性体用NBR胶料配方的最优组合。

4 结论

(1)对柔性接头内部弹性体用胶料的NBR、补强填料、增塑剂、硫黄和促进剂进行正交试验设计分析,确定其最优组合为:NBR6240和6280用量分别为60和40份,炭黑N330用量为55份,炭黑N550用量为12份,DOA用量为7份,硫黄和促进剂用量为1.8份(硫黄、促进剂CBS和促进剂TMTD用量分别为0.3,1和0.5份)。

(2)优化组合配方的NBR胶料的拉伸强度达到22.6 MPa,海水老化后拉伸强度变化率和拉断伸长率变化率以及油浸泡体积变化率较小,该组

表5 优化组合配方的NBR胶料的性能
Tab.5 Properties of NBR compound with optimized combination formula

项 目	数值
配方组分	60
NBR6240用量/份	60
NBR6280用量/份	40
炭黑N330用量/份	55
炭黑N550用量/份	12
DOA用量/份	7
硫黄用量/份	0.3
促进剂CBS用量/份	1
促进剂TMTD用量/份	0.5
胶料性能	
邵尔A型硬度/度	72
拉伸强度/MPa	22.6
拉伸伸长率/%	586
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	51
70℃×168h热空气老化后	
邵尔A型硬度变化/度	+2
拉伸强度变化率/%	+5.49
拉伸伸长率变化率/%	+0.57
80℃×168h海水老化后	
邵尔A型硬度变化/度	
拉伸强度变化率/%	+1
拉伸伸长率变化率/%	-2.11
23℃×168h油浸泡后	
体积变化率/%	-0.62

注:同表3。

合配方胶料的性能可以满足柔性接头内部弹性体的性能要求。

参考文献:

- [1] 王腾,曲金枝,包兴先,等.深水复合材料柔性管接头设计及密封分析[J].石油机械,2021,49(5):74-80.
WANG T, QU J Z, BAO X X, et al. Design and sealing analysis of deepwater composite flexible pipe joint[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(5): 74-80.
- [2] 侯广成.深水立管柔性接头弹性体结构设计及疲劳特性分析[D].北京:北京石油化工学院,2018.
- [3] 王才,史宏斌,刘沛,等.温度循环载荷对柔性接头界面损伤的影响[J].计算力学学报,2021,38(2):256-263.
WANG C, SHI H B, LIU P, et al. The effect of temperature cyclic load on interface damage of flexible joints[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(2): 256-263.
- [4] 王恩德.深海柔性立管附件研究现状[J].粉煤灰综合利用,2020,34(1):41-44.
WANG S S. Summary of deep ocean flexible riser attachments[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(1): 41-44.
- [5] 刘莉,游海军,马楠楠,等.丁腈橡胶耐疲劳性能的研究[J].橡胶工业,2017,64(5):275-278.
LI L, YOU H J, MA N N, et al. Study on fatigue resistance of NBR[J]. China Rubber Industry, 2017, 64(5): 275-278.
- [6] 聂祝婷,朱学勇,周婷婷.石油平台用耐泥浆电缆护套料配方的研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2019(4):5-9,31.
NIE Z T, ZHU X Y, ZHOU T T. Study on formulation of mud-resistant cable sheath material for oil platform[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2019(4): 5-9, 31.
- [7] 杨清芝.实用橡胶工艺学[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [8] 翁国文.实用橡胶配方技术(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [9] 褚凤民,唐斌,胡宝秀.LNBR对NBR/PVC共混胶性能的影响[J].橡塑资源利用,2010(4):4-6.
CHU F M, TANG B, HU B X. Influence of LNBR on the properties of NBR/PVC blends[J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2010(4): 4-6.
- [10] 高静,李红玉,马瑾玮,等.国内外增塑剂的研究与发展趋势[J].化工技术与开发,2019,48(12):49-52,57.
GAO J, LI H Y, MA J W, et al. Research and development trend of plasticizers in China and abroad[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2019, 48(12): 49-52, 57.
- [11] 林志文,侯振宇,吴圣,等.聚酯/聚醚混合型增塑剂对乙烯丙烯酸酯橡胶性能的影响[J].橡胶科技,2020,18(1):27-30.
LIN Z W, HOU Z Y, WU S, et al. Effect of mixed polyester/polyether plasticizer on properties of AEM[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(1): 27-30.
- [12] 文世鹏.非金属粘结性海洋柔性立管接头结构综述[J].石油矿场机械,2018,47(3):68-71.
WEN S P. Structural review of non-metallic bonding marine flexible riser joints[J]. Oil Field Equipment, 2018, 47(3): 68-71.
- [13] 郭坤荣,王明超,鲁国林,等.助交联剂对EPDM过氧化物硫化体系硫化性能影响[J].固体火箭技术,2021,44(6):818-824.
GUO S R, WANG M C, LU G L, et al. Vulcanization performance of EPDM peroxides vulcanization system with cross-linking agent[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2021, 44(6): 818-824.
- [14] 巩丽,游海军,刘莉.硫化体系对天然橡胶耐磨性的影响及磨损机理的研究[J].橡塑技术与装备,2015,41(17):9-13.
GONG L, YOU H J, LIU L. Study on the impact and abrasion mechanism of curing system on natural rubber wear resistance[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2015, 41(17): 9-13.
- [15] 黎世龙,侯静,刘保权,等.深水柔性接头有限元设计分析[J].湘潭大学学报(自然科学版),2021,43(4):93-101.
LI S L, HOU J, LIU B Q, et al. Finite element design analysis of deepwater flexible joint[J]. Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 93-101.
- [16] 王刚,颜廷俊,李平,等.海洋玻纤增强柔性管用锥套连接型接头密封性能研究[J].压力容器,2021,38(8):42-51.
WANG G, YAN T J, LI P, et al. Study on sealing performance of cone-sleeve joint for marine glass fiber reinforced flexible pipe[J].

- Pressure Vessel Technology, 2021, 38 (8) : 42-51.
- [17] WU L J, WANG Y Z, WANG Y C, et al. Optimal stiffness for flexible connectors on a mobile offshore base at rough sea states[J]. China Ocean Engineering, 2018, 32 (6) : 683-695.
- [18] 吴翔实, 余荣华, 高连新, 等. 非黏结海洋柔性软管接头密封性能的分析[J]. 机械制造, 2018, 56 (1) : 85-88.
- WU X S, YU R H, GAO L X, et al. Analysis of sealing performance of unbonded marine flexible hose joints[J]. Machinery, 2018, 56 (1) : 85-88.
- [19] 郭振亚. 海洋柔性管缆接头连接设计与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [20] 张阿盈. 复合材料胶接搭接接头应力分析方法研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3 (2) : 167-173.
- ZHANG A Y. Stress analysis of adhesively bonded composite lap joints[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2012, 3 (2) : 167-173.
- [21] 李翔云, 毕祥军, 王刚, 等. 海洋非黏结柔性管道接头密封结构分析[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23 (6) : 56-60.
- LI X Y, BI X J, WANG G, et al. Analysis on sealing structure of unbonded flexible marine pipe end fitting[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23 (6) : 56-60.
- [22] 杨敬亭, 杜华太, 张春梅, 等. 含腈基橡胶耐低温性能和耐油性能的研究[J]. 橡胶工业, 2021, 68 (5) : 339-343.
- YANG J T, DU H T, ZHANG C M, et al. Low temperature resistance and oil resistance of rubber containing nitrile group[J]. China Rubber Industry, 2021, 68 (5) : 339-343.
- [23] 葛冰青, 阴义轩, 王亚溪, 等. 溶剂对丁腈橡胶溶解、尺寸、结构和催化加氢的影响研究[J]. 化工学报, 2021, 72 (1) : 543-554.
- GE B Q, YIN Y X, WANG Y X, et al. Study of solvent effect on the dissolution, size, structure and catalytic hydrogenation of nitrile butadiene rubber[J]. CIESC Journal, 2021, 72 (1) : 543-554.
- [24] 徐波, 于新, 刘运新. 盐分对橡胶沥青及橡胶沥青混合料高温性能的影响[J]. 功能材料, 2015 (6) : 6058-6061.
- XU B, YU X, LIU Y X. The effects of salt on high temperature performance of rubber asphalt and rubber asphalt mixture[J]. Journal of Functional Materials, 2015 (6) : 6058-6061.
- [25] 金丽军, 方庆红, 张强, 等. 氟橡胶耐高温酸碱性能的研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2012, 26 (1) : 63-66.
- JIN L J, FANG Q H, ZHANG Q, et al. High-temperature acid-base resistance properties of fluoroelastomer[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2012, 26 (1) : 63-66.
- [26] 谢俊峰, 张冬娜, 耿海龙, 等. 高温柴油浸泡对丁腈橡胶硫化胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2022, 69 (2) : 138-143.
- XIE J F, ZHANG D N, GENG H L, et al. Effect of high temperature diesel oil immersion on properties of NBR vulcanizates[J]. China Rubber Industry, 2022, 69 (2) : 138-143.
- [27] 王云英, 孙旭, 范金娟, 等. 密封级氟橡胶在两种航空油液中耐 150 °C 高温试验研究[J]. 失效分析与预防, 2015, 10 (4) : 212-216.
- WANG Y Y, SUN X, FAN J J, et al. Study on 150 °C high-temperature oil medium-resistance for seal-grade fluoroelastomer[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10 (4) : 212-216.

收稿日期: 2022-09-16

Formula Design of Internal Elastomer Compound for Flexible Joint of Marine Transportation Pipeline

MA Meiqin, LIU Baoquan, YIN Ting, SHI Chengang, SUN Jianbang

(Sino Rubber Technology Co. Ltd., Hengshui 053000, China)

Abstract: The formula design of internal elastomer compound for the flexible joint of the marine transportation pipeline was studied. The rubber[nitrile butadiene rubber (NBR)], reinforcing filler, plasticizer, sulfur and accelerator of the compound were analyzed through the orthogonal test, and the optimized formulation was determined as follows: the amount of NBR6240 and 6280 was 60 and 40 phr, respectively, the amount of carbon black N330 was 55 phr, the amount of carbon black N550 was 12 phr, the amount of dioctyl adipate was 7 phr, and the amount of sulfur and accelerator was 1.8 phr (sulfur, accelerator CBS and accelerator TMTD dosages were 0.3, 1 and 0.5 phr, respectively). The tensile strength of the optimized NBR compound reached 22.6 MPa, and the change rates (absolute value, same after) of the tensile strength and elongation at break after seawater aging and the change rate of the volume after oil immersion were small. The performance of the optimized compound met the performance requirements of the internal elastomer for flexible joints.

Key words: flexible joint; elastomer; NBR; marine transportation pipeline; orthogonal test