

应用理论

特高压单柱并联电抗器用宽阻尼温域耐油氟橡胶胶料的配方设计及性能研究

樊超¹, 田一¹, 韩钰¹, 何强¹, 赵凯美²

(1. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102211; 2. 国网浙江省电力有限公司 金华供电公司, 浙江 金华 321001)

摘要:为获得满足特高压单柱并联电抗器苛刻耐油性能和宽阻尼温域等的胶料,进行了氟橡胶胶料的配方设计及其性能研究,通过调整硫化体系、吸酸剂、填料体系来提高氟橡胶胶料的硫化特性、物理性能、热稳定性和阻尼性能。结果表明:双酚AF作为硫化剂用于氟橡胶胶料,其用量为2.4份时胶料综合性能最好;氢氧化钙作为吸酸剂对氟橡胶胶料的硫化程度和不饱和键含量均有较大影响,其最佳用量为9份;硫酸钡/碳化硅并用对减小氟橡胶硫化胶的压缩永久变形作用明显,硫酸钡在一定程度上可屏蔽吸酸剂,因此其应用需适当增大吸酸剂用量;本研究氟橡胶硫化胶可耐400℃以上的高温,阻尼温域范围为-25~70℃,能够满足特高压单柱并联电抗器在使用工况下对热稳定性和阻尼温域的要求。

关键词:氟橡胶;特高压单柱并联电抗器;宽阻尼温域;耐油;压缩永久变形;热稳定性

中图分类号: TQ333.93; TQ336.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)01-0020-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.01.0020

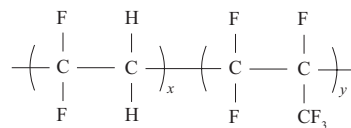


OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

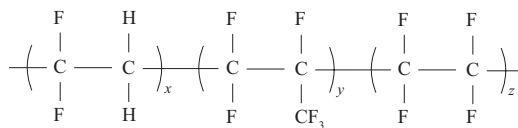
特高压单柱并联电抗器是特高压工程的重要电工装备,其所使用的橡胶阻尼材料需要具有优异的耐变压器油腐蚀性^[1-2]和宽温域阻尼性能以及良好的耐热性能。鉴于特高压单柱并联电抗器用胶料性能指标苛刻,必须对其进行科学的配方设计,这也是高性能橡胶材料发展过程中迫切需要攻克的技术难题。

氟橡胶中碳-氟键键能很高^[3],原因是氟原子具有电负性较高、半径较小和键长较大等特点,使其能够在碳原子的周围紧密排列,在增大碳-碳键键能的同时,还能达到屏蔽碳-碳键的良好效果。因此,氟橡胶在油类和烃类等溶剂中表现出体积溶胀率较小的特性,其不仅具有优良的耐油、耐高温、耐酸碱腐蚀、耐辐射和耐强氧化剂等性能,还具有良好的物理性能、电绝缘性和小的压缩永久

变形^[4]。通常,氟橡胶按照组成单体不同被分为氟橡胶-26和氟橡胶-246两大类型,分子结构分别如图1(a)和(b)所示^[5]。氟橡胶-26的单体组成为偏氟乙烯和六氟丙烯,氟橡胶-246的单体组成为偏



(a) 氟橡胶-26



(b) 氟橡胶-246

图1 氟橡胶分子结构

Fig. 1 Molecular structures of fluororubbers

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5200-201919104A-0-0-00)

作者简介: 樊超(1985—),男,河北石家庄人,国网智能电网研究院有限公司高级工程师,硕士,主要从事噪声与振动控制研究。

E-mail: fanchao006@126.com

引用本文: 樊超,田一,韩钰,等.特高压单柱并联电抗器用宽阻尼温域耐油氟橡胶胶料的配方设计及性能研究[J].橡胶工业,2023,70(1):20-25.

Citation: FAN Chao, TIAN Yi, HAN Yu, et al. Formulation design and performance research of fluororubber compound with wide damping temperature range and oil resistance for UHV single-column shunt reactor[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(1): 20-25.

氟乙烯、六氟丙烯和四氟乙烯,两种氟橡胶的氟质量分数分别为66%和68%。相比于氟橡胶-26,氟橡胶-246有着更低的氢含量,耐候性能更好,可广泛应用于要求耐高温、耐腐蚀和耐热油的特殊材料中^[6-8],例如用于耐油密封和减震降噪等材料中。因此,氟橡胶是特高压单柱并联电抗器用主体材料的理想选择。

本工作旨在研究一种适用于特高压单柱并联电抗器的耐油腐蚀和宽温域阻尼氟橡胶胶料,通过调节硫化剂、吸酸剂和填料用量,获得耐高温、耐油腐蚀和宽温域阻尼等综合性能最佳的氟橡胶胶料,以实现其在特殊条件下长周期使用的目标。

1 实验

1.1 主要原材料

氟橡胶-26,山东华夏神舟新材料有限公司产品;炭黑N330、超细氢氧化钙、氧化镁、双酚AF和促进剂BPP,阿拉丁试剂(上海)有限公司产品。

1.2 基本配方

氟橡胶 100,炭黑N330 20,碳化硅 20,氢氧化钙 5,氧化镁 3,双酚AF 1.8,促进剂BPP 0.5。

1.3 主要设备和仪器

ST-6型两辊开炼机,厦门易仕特仪器有限公司产品;QLLHY-25T型平板硫化机,深圳市群隆仪器设备有限公司产品;TY6002型无转子硫化仪,江苏天源试验设备有限公司产品;邵氏数显A型硬度计,上海纽辉实业有限公司产品;wds-50型MTS电子万能试验机,美斯特(中国)有限公司产品;Diamond 6300型热重(TG)分析仪,美国珀金埃尔默仪器公司产品;Q800型动态力学分析仪,美国TA公司产品。

1.4 试样制备及测试流程

将氟橡胶与各种配合剂进行混炼,辊温为30~40℃,然后将混炼胶在170℃/10 MPa下进行一段硫化,之后在195℃下进行二段硫化。其中混炼胶进行硫化曲线测试,硫化胶进行物理性能和耐老化性能等测试^[9]。试样具体制备流程如图2

所示^[10-11]。

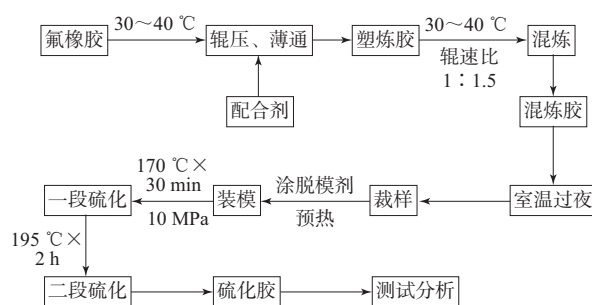


图2 试样制备流程

Fig. 2 Process of sample preparation

1.5 测试分析

1.5.1 硫化特性

硫化特性采用TY6002型无转子硫化仪进行测试,测试条件为170℃×30 min。

1.5.2 硬度

邵尔A型硬度采用邵氏数显A型硬度计按照GB/T 531.1—2008进行测试。

1.5.3 拉伸性能

拉伸性能采用wds-50型MTS电子万能试验机按照ASTM D412—2015进行测试,采用哑铃形试样,拉伸速率为500 mm·min⁻¹,标距25 mm。

1.5.4 压缩永久变形

压缩永久变形按照ASTM D395—2018进行测试,测试条件为125℃×24 h。

1.5.5 热稳定性能

将胶料磨成微量细粉,采用Diamond 6300型TG分析仪进行测试,测试环境 氮气氛围,测试温度 25~900℃,升温速率 10℃·min⁻¹。

1.5.6 动态力学性能

动态力学性能采用Q800型动态力学分析仪进行测试,试样裁剪成35 mm×7 mm×2 mm的长条状,升温速度为5℃·min⁻¹,频率为100 Hz,温度范围为-25~200℃,采用单悬臂形变模式,降温过程需用液氮做冷却处理。

2 结果与讨论

2.1 硫化体系

本研究硫化体系采用双酚AF和促进剂BPP,与其他硫化体系相比其能够更好地改善氟橡胶胶

料的各项性能,包括硫化胶的抗压缩永久变形性能、热稳定性和耐油腐蚀性能^[12]。

双酚AF用量对氟橡胶胶料硫化特性的影响如表1所示。

表1 双酚AF用量对氟橡胶胶料硫化特性的影响
Tab.1 Effect of bisphenol AF amounts on vulcanization characteristics of fluororubber compounds

项 目	双酚AF用量/份				
	1.8	2	2.2	2.4	2.6
$F_L/(N \cdot m)$	0.92	0.96	0.84	0.90	0.99
$F_{max}/(N \cdot m)$	4.33	4.42	4.83	4.97	4.37
t_{10}/s	291	335	318	324	322
t_{90}/s	750	794	859	880	724

从表1可以看出:双酚AF用量对氟橡胶胶料的 F_L 影响不大,说明双酚AF作为硫化剂对混炼胶的加工性能影响不大;随着双酚AF用量的增大,氟橡胶胶料的 F_{max} 先略有增大,同时 t_{10} 和 t_{90} 均延长,当双酚AF用量大于2.4份后, F_{max} 减小, t_{10} 和 t_{90} 缩短。双酚AF主要对氟橡胶胶料的硫化程度产生影响^[13]。

双酚AF用量对氟橡胶硫化胶物理性能的影响如表2所示。

表2 双酚AF用量对氟橡胶硫化胶物理性能的影响
Tab.2 Effect of bisphenol AF amounts on physical properties of fluororubber vulcanizates

项 目	双酚AF用量/份				
	1.8	2	2.2	2.4	2.6
邵尔A型硬度/度	77	79	80	82	82
拉伸强度/MPa	17.2	17.6	18.3	18.2	17.9
拉断伸长率/%	371	372	375	310	298
压缩永久变形/%	8.7	6.7	6.9	6.8	6.2

从表2可以看出,随着双酚AF用量的增大,氟橡胶硫化胶的邵尔A型硬度呈增大趋势,与硫化程度有着一定的正比关系,即氟橡胶硫化胶的硬度与硫化程度有着相同的变化趋势。此外,随着氟橡胶硫化胶硫化程度的增大,拉断伸长率有所减小^[14]。双酚AF用量为2.6份时氟橡胶硫化胶的拉伸强度与双酚AF用量为2.4份时相比有一定的减小,原因可能是反应过程中氟橡胶硫化胶的硫化程度较低,导致其拉伸过程中不能将应力充分吸收应对变形而出现应力集中,减小拉伸强度^[15],因此双酚AF用量不宜过大,以免降低硫化

程度。

压缩过程中,硫化胶会产生一定的永久形变,这是一种由物理松弛和化学松弛共同造成的不可恢复形变。由于硫化胶的物理松弛基本在百分之几及以下,可得出化学松弛主要受硫化程度和交联键稳定性的影响,是引起压缩永久形变的主要因素。从表2可以看出,双酚AF用量为2.4份时氟橡胶硫化胶的压缩永久形变与双酚AF用量为2.2份时氟橡胶硫化胶几乎没有差别,说明两者具有相近的硫化程度。双酚AF用量为1.8份的氟橡胶硫化胶由于欠硫造成其在压缩永久形变明显较大。

综上所述,双酚AF用量为2~2.4份时,氟橡胶胶料的综合性能较优。

2.2 吸酸剂

本研究采用氢氧化钙为吸酸剂,以满足材料酸性使用环境及低迁移率的要求。氢氧化钙用量对氟橡胶硫化胶物理性能的影响如表3所示。

表3 氢氧化钙用量对氟橡胶硫化胶物理性能的影响
Tab.3 Effect of $Ca(OH)_2$ amounts on physical properties of fluororubber vulcanizates

项 目	氢氧化钙用量/份				
	5	7	9	11	13
邵尔A型硬度/度	62	67	71	69	66
拉伸强度/MPa	17.2	17.7	18.6	18.7	17.3

整个硫化过程中氢氧化钙具有交联反应活化剂和吸酸剂的双功能,故能够较为显著地影响胶料的硫化反应速度和硫化程度^[16],但对硫化程度的影响不及硫化剂。从表3可以看出:随着氢氧化钙用量的增大,氟橡胶硫化胶的硬度先增大明显,当氢氧化钙用量超过9份后,硫化胶的硬度有所减小;当氢氧化钙用量由5份增大为13份时,氟橡胶硫化胶的拉伸强度变化总体不大,说明相应硫化胶的硫化程度比较接近,但也能看出,当氢氧化钙用量小于11份时,硫化胶的拉伸强度呈增大趋势,氢氧化钙用量从11份增大到13份时,硫化胶的拉伸强度减小。综上所述,当氢氧化钙用量达到11份时,氟橡胶硫化胶的性能开始呈现出劣化态势,说明氢氧化钙用量已经到达饱和点,即氢氧化钙作为吸酸剂时最佳用量为9份。

2.3 填料体系

炭黑作为常用填料对氟橡胶胶料的硫化过程几乎不产生影响,主要用来提高胶料的刚性和塑性^[17],对减小压缩永久变形作用也较小。为满足氟橡胶硫化胶的拉伸强度要求,本研究炭黑用量控制为20份。硫酸钡和碳化硅作为化学惰性填料,主要作用是改善硫化胶的耐油腐蚀性能^[18-19],并大幅减小压缩永久变形。硫酸钡用量(氢氧化钙用量为9份)对氟橡胶胶料硫化特性和物理性能的影响如表4所示。

表4 硫酸钡用量对氟橡胶胶料硫化特性和物理性能的影响

Tab.4 Effect of BaSO₄ amounts on vulcanization characteristics and physical properties of fluororubber compounds

项 目	硫酸钡用量/份			
	5	10	15	20
$F_1/(N \cdot m)$	1.02	0.88	1.06	1.13
$F_{max}/(N \cdot m)$	5.42	4.85	4.71	4.58
t_{10}/s	312	326	351	351
t_{90}/s	439	712	1 246	1 045
邵尔A型硬度/度	86	88	89	89
拉伸强度/MPa	17.7	17.4	17.9	16.3
拉断伸长率/%	262	297	284	272
压缩永久变形/%	6.7	5.8	7.8	9.8

从表4可以看出,硫酸钡/碳化硅并用在一定程度上减小氟橡胶胶料的硫化程度,对硫化速度影响较大。这是由于加入硫酸钡能够对吸酸剂产生屏蔽作用,在一定程度上降低了吸酸剂的相对浓度,从而严重影响胶料的硫化反应速度,进而影响硫化程度。

从表4还可以看出:硫酸钡用量对氟橡胶硫化胶的拉伸强度和拉断伸长率影响相对较小;当硫化程度降低时,氟橡胶硫化胶的拉伸强度呈减小趋势,压缩永久变形却有增大趋势。此外,硫酸钡用量对氟橡胶硫化胶的硬度也有一定影响。

考虑到硫酸钡对吸酸剂有一定的屏蔽作用,故将硫酸钡/碳化硅并用作为氟橡胶胶料填料时应适当增大吸酸剂用量。

2.4 TG分析

氟橡胶硫化胶的TG曲线如图3所示。
从图3可以看出,氟橡胶硫化胶的热分解温度

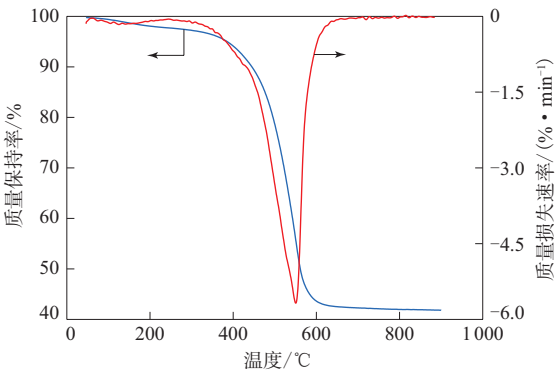


图3 氟橡胶硫化胶的TG曲线
Fig.3 TG curves of fluororubber vulcanizate
达到400 °C 以上,具有非常优异的热稳定性性能,满足工况要求。

2.5 阻尼性能

动态热力学曲线可以表征硫化胶的阻尼性能,硫化胶的有效阻尼温域通常以损耗因子($\tan\delta$) ≥ 0.3 的温度区间表示,该区间 $\tan\delta$ 值越大,表明硫化胶的阻尼性能越好, $\tan\delta \geq 0.3$ 时所涵盖的温度区间越大,说明硫化胶发挥阻尼功效时的使用温度范围越宽,其应用领域也越广泛^[20]。文献[21-22]报道称,纯氟橡胶的最大损耗因子($\tan\delta_{max}$)为1.289,以有较高阻尼因数的氟橡胶作为基体橡胶为复合材料的阻尼性能提供了有效保障,通过改变填料用量调节氟橡胶胶料内部物理缠结点密度,可以控制橡胶分子链移动的自由度,从而实现 $\tan\delta$ 的调控,在宏观上表现为对硫化胶硬度和拉伸强度的调控。本研究氟橡胶硫化胶的 $\tan\delta$ -温度曲线如图4所示。

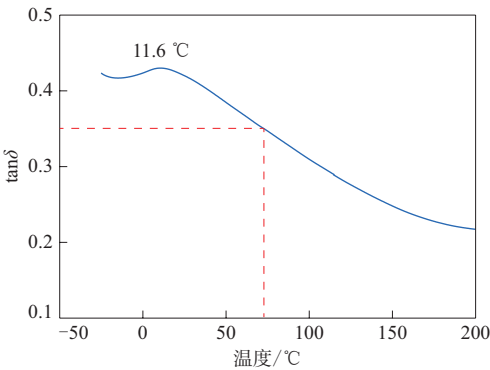


图4 氟橡胶硫化胶的 $\tan\delta$ -温度曲线
Fig.4 $\tan\delta$ -temperature curves of fluororubber vulcanizate

从图4可以看出,氟橡胶硫化胶 $\tan\delta\geq 0.35$ 的阻尼温域范围为 $-25\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,其能够满足其在特定环境中的使用要求。

3 结论

(1) 硫化体系中双酚AF的用量在2.0~2.4份范围内时氟橡胶胶料具有较优的综合性能。较小的硫化剂用量不利于氟橡胶硫化胶拉伸强度的增大,且会导致压缩永久形变增大。

(2) 吸酸剂氢氧化钙对氟橡胶胶料的硫化程度以及不饱和键含量可产生较大影响,因此对氟橡胶硫化胶的硬度和拉伸强度起到重要作用。氢氧化钙作为吸酸剂,最佳用量为9份。

(3) 硫酸钡/碳化硅并用填充氟橡胶胶料能够增大氟橡胶硫化胶的硬度,减小压缩永久变形,但对拉伸性能影响不大;硫酸钡在一定程度下可屏蔽吸酸剂,因此其应用需要适当增大吸酸剂用量。

(4) 本研究制备的氟橡胶硫化胶的热分解温度达到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,其具有非常优异的热稳定性,满足使用工况下的热稳定性要求。

(5) 本研究制备的氟橡胶硫化胶的阻尼温域范围为 $-25\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,其满足使用工况下的阻尼温域要求。

参考文献:

- [1] 陆刚. 氟橡胶加工技术、产品开发与应用[J]. 化学工业, 2014, 32(1): 34-38.
LU G. Fluorine rubber processing technology, product development and application[J]. Chemical Industry, 2014, 32(1): 34-38.
- [2] AMÉDURI B, BOUTEVIN B, KOSTOV G. Fluoroelastomers: Synthesis, properties and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(1): 105-187.
- [3] 杨璠, 陈风波, 王腾, 等. 氟弹性体在航天航空领域的应用[J]. 化学与粘合, 2019, 41(1): 62-67.
YANG F, CHEN F B, WANG T, et al. Application of fluoroelastomer in aerospace area[J]. Chemistry and Adhesion, 2019, 41(1): 62-67.
- [4] TURRI S, VALSECCHI R, LEVI M, et al. Microstructure to property relations in a family of millable polyurethane fluoroelastomers[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(9): 2951-2961.
- [5] 胡居秀. SiC纳米线的改性及其橡胶基纳米复合材料的制备、机理及性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
- [6] 韦璇, 陈磊. 26型/246型氟橡胶并用胶性能研究[J]. 橡胶科技市场, 2008, 6(16): 14-17.
WEI X, CHEN L. Research on properties of 26/246 type FKM blend[J]. China Rubber Science and Technology Market, 2008, 6(16): 14-17.
- [7] 谢忠麟, 马晓, 吴淑华. 高性能特种弹性体的拓展(四)——氟橡胶(1)[J]. 橡胶工业, 2022, 69(1): 64-71.
XIE Z L, MA X, WU S H. Expansion of high performance elastomers (Part 4) —Fluoroelastomer (1) [J]. China Rubber Industry, 2022, 69(1): 64-71.
- [8] 谢忠麟, 马晓, 吴淑华. 高性能特种弹性体的拓展(四)——氟橡胶(2)[J]. 橡胶工业, 2022, 69(2): 149-159.
XIE Z L, MA X, WU S H. Expansion of high performance elastomers (Part 4) —Fluoroelastomer (2) [J]. China Rubber Industry, 2022, 69(2): 149-159.
- [9] KADER M A, LYU M Y, NAH C W. A study on melt processing and thermal properties of fluoroelastomer nanocomposites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(10): 1431-1443.
- [10] WANG Y M, LIU L, LUO Y F, et al. Aging behavior and thermal degradation of fluoro-elastomer reactive blends with poly-phenol hydroxy EPDM[J]. Polymer Degradation and Stability, 2009, 94(3): 443-449.
- [11] 迟书恒. 碳化硼改性氟橡胶复合材料制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [12] 赵志正. 氟橡胶制品生产中的问题及其解决方法[J]. 世界橡胶工业, 2004, 31(4): 29-34.
ZHAO Z Z. Problems and solutions in production of fluororubber product[J]. World Rubber Industry, 2004, 31(4): 29-34.
- [13] 付钰柱, 蔡怀勋, 汪星平. 氟橡胶及硫化机理概述[J]. 化工生产与技术, 2011, 18(5): 1-5.
FU T Z, CAI H X, WANG X P. Overview of fluoroelastomers and its vulcanization mechanism[J]. Chemical Production and Technology, 2011, 18(5): 1-5.
- [14] WANG Y, WANG Y Q, TIAN M, et al. Influence of prolonging vulcanization on the structure and properties of hard rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 107(1): 444-454.
- [15] 申一彤. 硫化工艺对橡胶套靴物理性能和收缩率影响的试验研究[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(7): 21-25.
SHEN Y T. Experimental study on effects of vulcanization process on physical properties and shrinkage of rubber sleeve[J]. Railway Quality Control, 2020, 48(7): 21-25.
- [16] 余慧, 何显儒, 容耀强, 等. 氟橡胶/三元乙丙橡胶密封材料的制备及性能研究[J]. 润滑与密封, 2013, 38(1): 39-44.

- YU H, HE X R, RONG Y Q, et al. Research on properties and preparation of fluoroelastomer/EPDM sealing materials[J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(1): 39–44.
- [17] 吴敏敏, 修天宇, 丁国新. 橡胶增强剂的研究进展[J]. 化工技术与开发, 2019, 48(3): 32–34.
- WU M M, XIU T Y, DING G X. Research progress of rubber reinforcing agents[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2019, 48(3): 32–34.
- [18] 朱杰, 丛川波, 付志明, 等. 填料对四丙氟橡胶耐腐蚀性能的影响[J]. 橡胶工业, 2011, 58(9): 554–557.
- ZHU J, CONG C B, FU Z M, et al. Effect of fillers on corrosion resistance of tetrafluoroethylene-propylene rubber[J]. China Rubber Industry, 2011, 58(9): 554–557.
- [19] HOSSEINI S M, RAZZAGHI-KASHANI M. On the role of nano-silica in the kinetics of peroxide vulcanization of ethylene propylene diene rubber[J]. Polymer, 2017, 133: 8–19.
- [20] 庄婷婷. 丁基橡胶阻尼性能及其应用进展[J]. 塑料工业, 2018, 46(9): 22–25.
- ZHUANG T T. Damping properties of butyl rubber and its application progress[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(9): 22–25.
- [21] 王恣, 吴宏, 郭少云. 氟橡胶耐酸配方设计及基础性能表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(3): 60–63.
- WANG M, WU H, GUO S Y. The ingredients design and properties of acid-resistant fluoroelastomer[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2013, 29(3): 60–63.
- [22] LAMASTRA F R, MORI S, CHERUBINI V, et al. A new green methodology for surface modification of diatomite filler in elastomers[J]. Materials Chemistry and Physics, 2017, 194: 253–260.

收稿日期: 2022-08-16

Formulation Design and Performance Research of Fluororubber Compound with Wide Damping Temperature Range and Oil Resistance for UHV Single-column Shunt Reactor

FAN Chao¹, TIAN Yi¹, HAN Yu¹, HE Qiang¹, ZHAO Kaimei²

(1. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 2. Jinhua Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Jinhua 321001, China)

Abstract: In this study, the formulation design and performance research of fluororubber compounds were carried out. In order to obtain the compound with excellent oil resistance and wide damping temperature range that met the requirements of ultra high voltage (UHV) single-column shunt reactor. The vulcanization characteristics, physical properties, thermal stability and damping property of the fluororubber compound were improved by adjusting the vulcanization system, acid absorbent and filler system. The results showed that when bisphenol AF was used as curing agent for fluororubber compound, the comprehensive properties of the compound were the best when the bisphenol AF amount was 2.4 phr. Calcium hydroxide as acid absorbent had a great influence on the vulcanization degree and unsaturated bond content of the fluororubber compound, and its optimum amount was 9 phr. The compression set of the fluororubber vulcanizate decreased obviously by the combination of barium sulfate and silicon carbide. However, barium sulfate could shield the acid absorbent to a certain extent; therefore, the amount of acid absorbent should be increased appropriately when barium sulfate was applied. The obtained fluororubber vulcanizate in this study could withstand high temperatures above 400 °C, and the damping temperature range was -25 ~ 70 °C, showing good thermal stability and wide damping temperature range, which met the requirements of UHV single-column shunt reactor under service conditions.

Key words: fluororubber; UHV single-column shunt reactor; wide damping temperature range; oil resistance; compression set; thermal stability