

甲基丙烯酸锌在氯化聚乙烯/三元乙丙橡胶绝缘料中的应用

邓一权¹, 柯凯²

(1. 四川川东电缆有限责任公司, 达州 635000; 2. 四川大学 高分子科学与工程学院, 成都 610065)

摘要:为提升氯化聚乙烯(CM)/三元乙丙橡胶(EPDM)共混绝缘胶料(简称绝缘胶料)的性能,研究了甲基丙烯酸锌(ZDMA)添加方式与用量、过氧化物用量等对绝缘胶料硫化特性、加工性能和物理机械性能的影响。结果表明,在过氧化二异丙苯硫化体系中,ZDMA相较于常用的交联助剂,具有更高的硫化效率,对绝缘胶料机械性能的影响较大。当ZDMA用量为4份且氧化锌(ZnO)/甲基丙烯酸(MMA)的摩尔比为0.8时,原位生成法合成的绝缘胶料物理机械性能和加工性能最佳;当ZDMA用量超过5份时,绝缘胶料容易出现粘模现象,影响加工性能。文中研究可为高性能绝缘电缆胶料的生产制备提供参考。

关键词:甲基丙烯酸锌;原位合成;氯化聚乙烯/三元乙丙橡胶绝缘胶料;物理机械性能

中图分类号:TQ333.7

文献标志码:A

文章编号:1672-6901(2024)06-0020-07

Application of Zinc Methacrylate in Chlorinated Polyethylene/ Ethylene-Propylene-Diene Rubber Insulation

DENG Yiquan¹, KE Kai²

(1. Sichuan CHNDO Cable Co., Ltd., Dazhou 635000, China;

2. College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To enhance performance of chlorinated polyethylene (CM) /ethylene-propylene-diene rubber (EPDM) blend insulating compounds (abbreviated as insulating compounds), the effects of addition method and dosage of zinc methacrylate (ZDMA), amount of peroxide, on vulcanization characteristics, processing performance, and physical mechanical properties of insulating compounds were investigated. Results showed that in dicumyl peroxide vulcanization system, ZDMA had a higher vulcanization efficiency compared to commonly used crosslinking agents and had a significant impact on mechanical properties of vulcanized rubber. When the dosage of ZDMA was 4 parts and the molar ratio of zinc oxide (ZnO) to methyl methacrylate (MMA) was 0.8, physical mechanical properties and processing performance of in-situ synthesized insulating compounds were optimal; when the dosage of ZDMA exceeds 5 parts, insulating compounds were prone to mold sticking, affecting processing performance. The research could provide reference for production and preparation of high-performance insulating cable compounds.

Key words: zinc methacrylate; in-situ synthesis; chlorinated polyethylene/ethylene-propylene-diene rubber; physical mechanical properties

0 引言

氯化聚乙烯(CM)是聚乙烯通过溶液法或水相悬浮法氯化后而制得的含氯聚合物。由于材料价格低廉、加工性能优异,同时还具备优良的阻燃、耐油、耐化学腐蚀、耐热、耐臭氧、耐气候等性能优势,已广泛应用于常规橡胶电线电缆的护套材料。其中,氯

的质量分数为36%的CM具有最佳的弹性和综合性能。三元乙丙橡胶(EPDM)是乙烯、丙烯及少量非共轭二烯烃的三元共聚物,具有优异的耐热老化、耐湿、耐寒和耐臭氧等性能,以及良好的绝缘性能、弹性和柔软性。在CM中添加适量的EPDM,可以改善CM的绝缘性能、弹性、柔软性,以及耐寒、耐湿等性能。CM与EPDM的共混物可以制成具有阻燃和耐油性能的橡胶绝缘料,应用于特种耐油阻燃电缆。

甲基丙烯酸锌(ZDMA),作为一种新型多功能

收稿日期:2024-02-06

作者简介:邓一权(1969—),男,高级工程师。

E-mail:925304788@qq.com

交联助剂,适量添加至橡胶中,可以提高硫化橡胶的机械强度^[1]。近年来,ZDMA已广泛应用于橡胶的改性加工。例如,何平等^[2]在EPDM/聚丙烯(PP)弹性体中加入5份原位合成的ZDMA,使其抗拉强度和伸长率均提升了100%。栗敬君等^[3]采用ZDMA/硫体系硫化天然橡胶,显著提高了其物理力学性能。彭宗林等^[4]利用中和反应在EPDM基体中原位生成甲基丙烯酸各类金属盐,对硫化胶的力学性能进行改性,研究发现锌盐对硫化胶的增强效果最佳。郭尚振等^[5]采用原位合成法制备ZDMA,用于增强EPDM,研究发现当氧化锌(ZnO)/甲基丙烯酸(MMA)的摩尔比为0.75时,改性EPDM的物理机械性能最佳。虞宇力等^[6]在研究ZDMA补强乙丙橡胶时发现,当ZDMA用量为1份时,胶料的综合性能最佳。陈朝晖等^[7]将ZDMA与丁腈橡胶共混,显著提高了合金的力学性能。王增林等^[8]、武守鹏等^[9]采用ZDMA增强氢化丁腈橡胶,制备了性能优异的橡胶。姚亮等^[10]研究发现,在过氧化物体系中,甲基丙烯酸盐能够提高胶料的交联密度和物理机械性能。赵阳等^[11]认为聚ZDMA纳米粒子与橡胶的化学键接枝,可以提高橡胶的耐高温性能。陈旭明等^[12]通过研究发现,ZDMA用量从0增加至4份时,天然橡胶的压缩应变逐渐下降,蠕变增量先增大后减小。曹杨等^[13]在ZDMA/蒙脱土并用补强天然橡胶的研究中发现,复合材料的机械性能、耐热性能和耐酸碱性能均得到了提升。王聿衡等^[14]、陈玉坤等^[15]在研究中发现,通过原位生成法合成的ZDMA可以增强橡胶性能。

以上研究主要集中在橡胶制品行业的应用,对于ZDMA在橡胶绝缘电缆料中的应用研究却鲜有报道。为提高CM/EPDM共混绝缘胶料(简称绝缘胶料)的物理机械性能,本工作探究了ZDMA对绝缘胶料性能的影响,并通过试验确定了ZDMA的最佳用量。

1 试验部分

1.1 主要原材料

CM:牌号为CM3650,山东潍坊硕邑化学有限公司;EPDM:牌号为EPDM4045,中国石油吉林石化公司;过氧化二异丙苯(DCP),上海高桥化工有限公司;ZnO,陕西中科纳米材料股份有限公司;MMA,上海顿美新材料有限公司;硬脂酸铅:PbSt,九江天盛塑料助剂有限公司;ZDMA,广州金昌盛科技有限公司;三烯丙基异三聚氰酸酯(TAIC):牌号为TAIC-70,长沙祥程科技有限公司;三羟甲基丙烷

三甲基丙烯酸酯(TMPTMA):牌号为TMPTMA-70,上海方创化学品有限公司;其余材料均为市售。

1.2 基本配方

CM3650 70份,EPDM4045 30份,轻质氧化镁(MgO) 8份,锻烧陶土 30份,石蜡 4份,重质碳酸钙 50份,滑石粉 100份,增塑剂对苯二甲酸二辛酯 10份,PbSt 4份,防老剂RD与MB各1.5份,硫化剂DCP与交联助剂ZDMA均为变量。

1.3 试验设备

ML-3型密炼机,四川亚西机器有限公司;X(S)K-160型开炼机,大连橡塑机械厂;MT-4000D1型电脑双柱拉力机,扬州明拓试验机械有限公司;MT-4000A型无转子硫化仪和MT-4001A型门尼黏度计,扬州明拓试验机械有限公司;SYX-II型老化箱和YDY-II型空气弹老化试验仪,呼和浩特鸿都线缆有限公司;QLB-D350X型平板硫化机,上海第一橡胶机械厂。

1.4 试样制备

1.4.1 直接添加法

绝缘胶料采用两段混炼工艺。第一段在容量为3L的实验型密炼机中进行,第二段在X(S)K-160型开炼机上进行。

第一段混炼工艺及加料顺序。将生胶放入混炼机中进行初步混炼,持续15s;加入交联助剂ZDMA、TAIC或TMPTMA;随后依次加入MgO、防老剂、石蜡、填充料、增塑剂,继续混炼150s,最后进行排胶,并将温度控制在150℃。

第二段混炼工艺及加料顺序。在第一段混炼完成后,将得到的胶料再次放入混炼机中,进行第二次混炼,持续60s;加入硫化剂DCP,将胶料进行多次薄通,并打6次三角包;最后将胶料下片,存放24h。

1.4.2 原位生成法

绝缘胶料采用三段混炼工艺,第一段和第三段在开炼机上进行,第二段在密炼机中进行。

第一段原位生成ZDMA、混炼工艺及加料顺序。将开炼机辊温控制在(80±5)℃,调节辊距至1mm;加入CM和PbSt后,混炼60~90s;加入EPDM继续混炼120s;随后加入ZnO混炼60s后,滴加MMA,继续混炼150~180s,使其充分反应;之后,将辊距调至0.5mm,进行薄通,并打三角包6次;最后下片,制得原位生成ZDMA生胶。

第二段混炼工艺及加料顺序。将原位生成法合成的ZDMA生胶放入混炼机中混炼15s;依次加入MgO、防老剂、石蜡、填充料、增塑剂,继续混炼150s;混炼完成后,进行排胶,并将温度控制在

150 ℃。

第三段混炼工艺。将第二段混炼得到的胶料再次放入混炼机中,混炼 60 s;加入硫化剂 DCP 后,对胶料进行薄通,并打 6 次三角包;将胶料下片,存放 24 h。

1.4.3 试样压片硫化

混炼胶存放 24 h 后,在平板硫化机上进行压片硫化。设定硫化温度为 170 ℃,硫化时间为 t_{90} (t_{90} 指胶料达到 90% 硫化程度时所需的时间)的 1.1 倍。硫化完成后,将试样取出并存放 24 h,使得绝缘胶料中的应力得到释放,保证后续性能测试的稳定性。

1.5 性能测试

门尼黏度试验按照 GB/T 1232.1—2016《未硫化橡胶用圆盘剪切黏度计进行测定 第 1 部分:门尼黏度的测定》中方法进行测试。硫化特性试验按照 GB/T 16584—1996《橡胶用无转子硫化仪测定硫化特性》中规定进行测试,测试温度为 170 ℃。拉伸性能按照 GB/T 2951.11—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 11 部分:通用试验方法—厚度和外形尺寸测量—机械性能试验》进行测

试,热老化性能和空气老化性能试验按照 GB/T 2951.12—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第 12 部分:通用试验方法—热老化试验方法》进行测试,试片厚度为 2 mm,拉伸速率为 $(250 \pm 50) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。撕裂性能试验按照 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)》中规定进行测试,本试验中采用裤型试样,拉伸速率为 $(100 \pm 10) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。体积电阻率测试按照 GB/T 40719—2021《硫化橡胶或热塑性橡胶体积和/或表面电阻率的测定》中的要求进行测试。

2 结果与讨论

2.1 ZDMA 与常用交联助剂对绝缘胶料硫化性能的对比分析

目前,常用的过氧化物类交联助剂中, TMPTMA 和 TAIC 的效果较好。因此,本文选用 TMPTMA 和 TAIC 两种助剂,并与 ZDMA 进行对比。硫化剂 DCP 用量为 3 份,交联助剂用量为 2 份时,对比 TMPTMA、TAIC、ZDMA 3 类交联助剂对绝缘胶料硫化性能的影响,结果见表 1。

表 1 不同交联助剂对绝缘胶料硫化性能的影响

交联助剂	门尼黏度/ [ML(1+4)100 ℃]	硫化特性(170 ℃)					绝缘胶料性能(170 ℃, 1.1 t_{90})		
		焦烧时间 t_{S1}/min	正硫化时间 t_{90}/min	硫化速率/ (min^{-1})	最低转矩/ ($\text{dN} \cdot \text{m}$)	最高转矩/ ($\text{dN} \cdot \text{m}$)	抗伸强度/ MPa	拉断伸长 率/%	撕裂强度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
TMPTMA	47	0.70	12.92	8.18	0.11	1.11	5.9	438	6.9
TAIC	47	1.03	13.57	8.14	0.11	1.18	5.2	426	6.6
ZDMA	48	0.58	11.55	9.12	0.12	1.52	6.7	442	7.5

由表 1 可知,在交联助剂用量相同的条件下,3 种绝缘胶料的门尼黏度差别较小。其中,交联助剂为 TAIC 时绝缘胶料的焦烧时间与正硫化时间最长,硫化速率最慢,硫化程度中等,但其拉伸强度、拉断伸长率和撕裂强度均为最低;交联助剂为 TMPTMA 时绝缘胶料的焦烧时间、正硫化时间、硫化速率、拉伸强度、撕裂强度和拉断伸长率均处于中等水平,交联密度最低;相比之下,交联助剂为 ZDMA 时绝缘胶料的焦烧时间和正硫化时间最短,硫化速率最快,硫化程度最高,拉伸强度、撕裂强度和拉断伸长率均为最佳。综合考虑,交联助剂为 ZDMA 时绝缘胶料的机械性能最优,TMPTA 次之,TAIC 最差。因此,本文选用 ZDMA 作为交联助剂,并进一步研究 ZDMA 对绝缘胶料硫化性能的影响。

2.2 ZDMA 对绝缘胶料硫化性能的影响

2.2.1 ZDMA 用量对绝缘胶料加工性能和硫化特

性的影响

当硫化剂 DCP 用量为 3 份时,ZDMA 用量对绝缘胶料的加工性能和硫化特性的影响见表 2。

由表 2 可知,随着 ZDMA 用量的增加,绝缘胶料的门尼黏度逐渐降低。这表明 ZDMA 能够提升绝缘胶料的可塑性,改善其混炼和挤出加工性能。同时,ZDMA 用量的增加,使得绝缘胶料的焦烧时间和正硫化时间缩短,硫化速率和交联密度(即最高转矩与最低转矩之差)增加,这表明 ZDMA 对硫化过程具有显著的促进作用。但是,在试验过程中,当 ZDMA 用量为 5 份及以上时,混炼和压片均出现黏结现象,影响了绝缘胶料的混炼和挤出加工性能。因此,ZDMA 的用量应控制在 5 份以内。

2.2.2 ZDMA 用量对绝缘胶料拉伸性能的影响

当硫化剂 DCP 为 3 份时,直接添加法和原位生成结合成的 ZDMA(ZnO/MMA 的摩尔比为 0.6),

表 2 ZDMA 用量对绝缘胶料加工性能和硫化特性的影响

ZDMA 用量/份	门尼黏度/ [ML(1+4)100 °C]	硫化特性(170 °C)				
		焦烧时间 t_{S1} /min	正硫化时间 t_{90} /min	硫化速率/(min^{-1})	最低转矩/($\text{dN}\cdot\text{m}$)	最高转矩/($\text{dN}\cdot\text{m}$)
0	51	1.15	15.65	6.84	0.11	0.80
1	50	0.87	12.95	8.26	0.11	1.22
2	50	0.58	11.55	9.12	0.11	1.52
3	49	0.56	11.05	9.63	0.12	1.56
4	49	0.50	9.15	11.52	0.12	1.89
5	48	0.48	9.01	11.82	0.12	2.07
6	47	0.44	8.42	12.66	0.12	2.26

用量对绝缘胶料拉伸性能的影响分别见表 3 和表 4。

表 3 直接添加法 ZDMA 用量对绝缘胶料拉伸性能的影响

ZDMA 用量/份	拉伸强度/ MPa	拉断伸长率/%	撕裂强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
0	4.6	416	6.8
1	5.4	421	7.0
2	6.7	442	7.3
3	7.1	445	7.5
4	7.4	448	8.2
5	7.8	452	8.0
6	8.2	456	7.3

表 4 原位生成合成法 ZDMA 用量对绝缘胶料拉伸性能的影响

ZDMA 用量/份	拉伸强度/ MPa	拉断伸长率/%	撕裂强度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)
0	4.6	416	6.8
1	6.5	432	7.2
2	7.6	446	7.4
3	9.2	452	7.8
4	11.8	465	8.4
5	9.5	456	8.1
6	9.2	448	7.5

由表 3 和表 4 可知, ①绝缘胶料的拉伸强度、拉断伸长率和撕裂强度均随着 ZDMA 用量的增加而逐渐提高。②原位生成合成法的 ZDMA 用量为 4 份时, 绝缘胶料的拉伸强度、拉断伸长率和撕裂强度均达到最大值; 但当其用量持续增加时, 机械性能则会逐渐下降。③在 ZDMA 用量相同的条件下, 原位生成合成法相较于直接添加法, 制成绝缘胶料的机械性能更优; 具体分析, 当原位生成合成法的

ZDMA 用量为 4 份时, 绝缘胶料的拉伸强度达到最大值(11.8 MPa), 是未添加 ZDMA 绝缘胶料拉伸强度(4.6 MPa)的 256%; 同时, 比直接添加法 ZDMA 用量为 4 份时绝缘胶料的拉伸强度(7.4 MPa)提高约 59%。

从微观层面综合分析, ZDMA 在过氧化物自由基的作用下发生原位聚合, 并接枝到橡胶分子链上形成离子交联键, 增强大分子链之间的连接作用。此外, ZDMA 在橡胶基体中以纳米粒子形式存在, 并通过丙烯酸链产生连接, 形成一定程度的网络结构^[5], 进一步提升绝缘胶料的机械强度。

2.3 ZnO/MMA 的摩尔比对绝缘胶料性能的影响

当硫化剂 DCP 为 2 份、原位生成法合成的 ZDMA 为 4 份时, ZnO/MMA 的摩尔比对绝缘胶料硫化性能的影响见表 5。

由表 5 可知, ①随着 ZnO/MMA 的摩尔比增加, 绝缘胶料的焦烧时间和正硫化时间逐渐缩短, 硫化速率和交联密度逐渐增大。当 ZnO/MMA 的摩尔比为 0.8 时, 绝缘胶料的焦烧时间和正硫化时间最短, 硫化速率和交联密度达到最大值。②绝缘胶料的机械性能随 ZnO/MMA 的摩尔比增大逐渐改善, 并在 ZnO/MMA 的摩尔比为 0.8 时达到最佳。

2.4 DCP 用量对含有 ZDMA 绝缘胶料性能的影响

当交联助剂 ZDMA 用量为 4 份时, DCP 用量对绝缘胶料性能的影响见表 6。

从表 6 可知, ①随着硫化剂 DCP 用量的增加, 绝缘胶料的焦烧时间和正硫化时间不断缩短, 表明胶料加工安全性在降低。②同时, 硫化速率和交联密度随硫化剂 DCP 用量的增加不断增大, 绝缘胶料拉伸强度和撕裂强度也逐渐增强; 当硫化剂 DCP 用量达到 3 份时, 拉伸强度达到最大值, 随后开始下降; ③绝缘胶料的拉断伸长率逐渐减小。综上所述

表5 ZnO/MMA的摩尔比对绝缘胶料性能的影响

ZnO/MMA的摩尔比	门尼黏度/ [ML(1+4) 100 °C]	硫化特性(170 °C)					硫化胶性能(170 °C, 1.1t ₉₀)		
		焦烧时间 t _{S1} /min	正硫化时间 t ₉₀ /min	硫化速率/ (min ⁻¹)	最低转矩/ (dN·m)	最高转矩/ (dN·m)	抗伸强度/ MPa	拉断伸长 率/%	撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)
0	49	1.13	15.62	6.84	0.11	0.81	4.2	425	6.4
0.2	48	0.89	12.97	8.24	0.11	0.93	5.1	446	6.9
0.4	48	0.60	10.86	9.86	0.11	1.48	6.8	475	7.2
0.6	48	0.57	9.54	11.28	0.12	1.52	7.9	482	7.8
0.8	48	0.48	8.73	12.21	0.12	1.68	8.9	496	8.3
1	48	0.52	9.82	10.82	0.12	1.66	7.2	476	8.6

表6 DCP用量对绝缘胶料性能的影响

DCP用量/份	门尼黏度/ [ML(1+4) 100 °C]	硫化特性(170 °C)					硫化胶性能(170 °C, 1.1t ₉₀)		
		焦烧时间 t _{S1} /min	正硫化时间 t ₉₀ /min	硫化速率/ (min ⁻¹)	最低转矩/ (dN·m)	最高转矩/ (dN·m)	抗伸强度/ MPa	拉断伸长 率/%	撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)
1	48	0.62	10.12	10.67	0.14	1.64	6.5	452	6.1
2	48	0.45	8.73	12.18	0.14	2.15	7.6	445	6.8
3	48	0.42	6.92	15.50	0.14	2.30	11.4	438	7.2
4	48	0.40	6.40	16.78	0.14	2.45	10.2	425	6.4

述,硫化剂DCP的最佳用量为3份。

加法和原位生成法合成的ZDMA用量对绝缘胶料老化性能的影响,结果分别见表7和表8。

2.5 ZDMA用量对绝缘胶料老化性能的影响

当硫化剂DCP用量为3份时,分别对比直接添

表7 直接添加法ZDMA用量对绝缘胶料老化性能的影响

ZDMA用量/份	热空气老化(100 °C, 168 h)			空气弹老化(127 °C, 40 h)		
	拉伸强度变 化率/%	拉断伸长率变 化率/%	撕裂强度变化 率/%	拉伸强度变 化率/%	拉断伸长率 变化率/%	撕裂强度变 化率/%
0	-38	-41	-35	-40	-42	-38
1	-23	-22	-20	-26	-24	-20
2	-22	-21	-23	-20	-22	23
3	-21	-23	-24	-21	-20	-24
4	-22	-21	-23	-22	-21	-23
5	-24	-22	-25	-21	-20	-21
6	-24	-23	-23	-22	-23	-20

由表7和表8可知,①与未添加ZDMA的绝缘胶料相比,加入ZDMA能够明显提高绝缘胶料的耐热老化性能和耐空气弹老化性能。②在ZDMA用量相同的条件下,原位生成法相较于直接添加法,制成绝缘胶料的耐热老化性能和耐空气弹老化性能更优。③ZDMA用量对绝缘胶料耐热老化性能和耐空气弹老化性能的影响较小。综上,添加ZDMA有助于提高绝缘胶料的耐老化性能,原位生成法更为有效。

2.6 配方优化和性能验证

根据上述试验与分析结论,对绝缘胶料的配方进行优化,优化后的绝缘胶料配方见表9。其中,交联助剂ZDMA采用原位生成合成法,ZnO/MMA的摩尔比为0.8。参考GB/T 5013.1—2008《额定电压450/750V及以下橡皮绝缘电缆第1部分:一般要求》,按照优化后的配方生产的绝缘胶料及成品线芯的物理性能见表10。由表10可知,硫化胶及成品线芯的物理性能均符合标准要求。

表 8 原位生成合成法 ZDMA 用量对绝缘胶料老化性能的影响

ZDMA 用量/份	热空气老化(100 °C, 168 h)			空气弹老化(127 °C, 40 h)		
	拉伸强度变化率/%	拉伸伸长率变化率/%	撕裂强度变化率/%	拉伸强度变化率/%	拉伸伸长率变化率/%	撕裂强度变化率/%
0	-38	-41	-35	-40	-42	-38
1	-8	-9	-6	-9	-10	-10
2	+6	-7	-8	-12	-11	-13
3	+5	-6	-7	-13	-11	-11
4	+6	-4	-6	-10	-11	-12
5	+4	-6	-5	-12	-13	-12
6	+5	-5	-7	-11	-10	-13

表 9 优化后绝缘胶料配方

材料名称	用量/份	材料名称	用量/份
CM3650	70	滑石粉	100
EPDM4045	30	增塑剂	10
MgO	8	PbSt	4
煅烧陶土	30	防老剂	3
石蜡	4	DCP	3
重质碳酸钙	50	ZDMA	4

3 结论

本文研究了新型过氧化物交联助剂 ZDMA 对 CM/EPDM 共混绝缘胶料加工性能与硫化性能、拉伸性能与老化性能的影响,同时评估了配方优化后的绝缘胶料性能和所制备成品线芯的物理性能,得出以下结论。

1)在硫化剂 DCP 用量相同时,不同交联助剂

表 10 硫化胶及成品线芯的物理性能

测试项目	机械性能试验								绝缘体积电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	绝缘线芯浸水耐压试验
	老化前		热空气老化(100 °C, 168 h)			空气弹老化(127 °C, 40 h)				
	拉伸强度/ MPa	拉伸伸长率/%	拉伸强度变化率/%	拉伸伸长率变化率/%	撕裂强度变化率/%	拉伸强度变化率/%	拉伸伸长率变化率/%	撕裂强度变化率/%		
标准要求	≥ 5.0	≥ 200	± 25	± 25	—	± 30	± 30	—	—	通过
绝缘胶料	11.2	435	5	-6	-4	-11	-12	-10	2.4×10^{12}	—
成品线芯	10.6	426	8	-7	-6	-12	-13	-12	—	通过

中,ZDMA 的硫化效果最好,其对应的 CM/EPDM 共混绝缘胶料的机械性能最好, TMPTMA 次之, TAIC 最差。

2)与直接添加法相比,采用原位生成合成法的 ZDMA 的 CM/EPDM 共混绝缘胶料的机械性能和耐老化性能更优;

3)当 ZnO/MMA 摩尔比为 0.8、原位生成合成法 ZDMA 用量为 4 份时,CM/EPDM 共混绝缘胶料的机械性能最佳;当 ZDMA 用量超过 5 份时,绝缘胶料的加工性能明显下降。

参考文献:

[1] 赵阳,张立群,卢咏来,等. 不饱和羧酸金属盐在橡胶工业中的应用[J]. 橡胶工业,2000(8):497-502.
[2] 何平,彭宗林,任文坛,等. 原位合成甲基丙烯酸锌改性三元

乙丙橡胶/聚丙烯热塑性弹性体[J]. 合成橡胶工业,2006(6):435-438.

[3] 栗敬君,王同海,王海威,等. Zn(MMA)₂ 对硫黄硫化天然橡胶性能的影响[J]. 当代化工,2017,46(3):404-408.
[4] 彭宗林,梁讯,张勇,等. 原位生成甲基丙烯酸盐对 EPDM 的增强(英文)[J]. 合成橡胶工业,2001(2):110.
[5] 郭尚振,庄涛,时金凤,等. 氧化锌/甲基丙烯酸对原位合成甲基丙烯酸锌增强三元乙丙橡胶性能的影响[J]. 合成橡胶工业,2016,39(6):499-503.
[6] 虞宇力,彭宗林,张隐西,等. 甲基丙烯酸锌对 EPDM 的补强作用[J]. 橡胶工业,2001(9):522-525.
[7] 陈朝晖,王迪珍,罗东山,等. NBR/Zn(MAA)₂ 合金性能与结构的关系[J]. 合成橡胶工业,2000(2):107-110.
[8] 王增林,李再峰,孙宝全,等. 甲基丙烯酸锌/炭黑增强氢化丁腈橡胶的性能[J]. 合成橡胶工业,2011,34(3):218-222.

(下转第 30 页)

109.

[2] 赵金明,段肖华.变频串联谐振技术在高压电缆交接试验中的应用[J].电网与清洁能源,2012,28(4):23-25.
[3] 钟志毅,欧景茹,郭铁军.交联聚乙烯绝缘电力电缆交流耐压试验研究[J].电网技术,2007(增刊1):108-111.
[4] 白银浩,王朝刚,刘博,等.220 kV长距离电缆现场交流耐压试验与分析[J].华中电力,2012,25(1):36-38.
[5] 郭陆,胡春江,高立超,等.串联谐振并联补偿方法在110 kV交联电缆现场交流耐压试验中的应用[J].电工技术,2016(12):120-121.
[6] 吴洪伟.电抗器在电缆交流耐压试验中应用及选型计算[J].水电站机电技术,2018,41(1):24-27.
[7] 曹京荣,陈杰,周志成,等.长距离电力电缆多谐振系统耐压试验方法的优化[J].高电压技术,2018,44(5):1692-1698.

[8] 陶劲松,席成员,贺景亮,等.湖南110 kV长距离电缆耐压试验[J].高电压技术,2002(11):48-49.
[9] 陈斌,霍光.交联电缆耐压试验方法的探讨[J].电气应用,2010,29(14):76-80.
[10] 顾清,王亮.电缆耐压试验方法及典型问题分析[J].电工技术,2013(6):14-15.
[11] 戚革庆,吴建军,戴思源,等.高压电力电缆在交流耐压过程中的容升现象研究[J].高压电器,2016,52(8):155-160.
[12] 徐德光.交联聚乙烯电力电缆耐压试验及其电路模型研究[J].南阳理工学院学报,2016,8(6):53-57.
[13] 高旭启,别士光,周明杰,等.基于PSCAD的电缆高阻故障测距仿真研究[J].自动化与仪器仪表,2016(12):174-175.
[14] 郑一鸣,刘石,刘浩军,等.220 kV电力电缆线路合闸操作过电压分析[J].高压电器,2020,56(4):153-158.

(上接第25页)

[9] 武守鹏,王增林,田帅承,等.甲基丙烯酸锌增强氢化丁腈橡胶复合材料的性能[J].合成橡胶工业,2014,37(5):376-379.
[10] 姚亮,丛后罗,王国志,等.甲基丙烯酸盐对NBR/WRP复合材料性能的影响[J].橡塑技术与装备,2016,42(15):57-60.
[11] 赵阳,卢咏来,刘力,等.甲基丙烯酸锌/丁腈橡胶纳米-微米混杂复合材料Ⅱ.微观结构与宏观性能[J].合成橡胶工业,2002(1):35-38.
[12] 陈旭明,郭建华,何邦柳,等.甲基丙烯酸锌用量对天然橡胶高温蠕变性能的影响及数值模拟[J].高分子材料科学与工程,

2019,35(7):147-151.
[13] 曹杨,张景林,顾宁,等.甲基丙烯酸锌与蒙脱土补强天然橡胶的研究[J].中北大学学报(自然科学版),2011,32(3):314-317.
[14] 王聿衡,彭宗林,张勇,等.原位合成甲基丙烯酸锌增强氢化丁腈橡胶[J].合成橡胶工业,2005(3):205-210.
[15] 陈玉坤,贾德民,王小萍,等.原位生成甲基丙烯酸锌对天然橡胶补强的研究[J].现代化工,2005(4):39-42.