

# EPDM 复合材料的层状填料增强机理及其对耐穿刺性能的影响研究

朱剑锋

浙江欧尔赛斯科技有限公司 浙江绍兴 312366

**【摘要】**三元乙丙橡胶（EPDM）因优异的耐候、耐老化及化学稳定性，广泛用于采样分析耗材、密封件等产品生产，其耐穿刺性能决定产品寿命与安全。本文通过添加层状填料增强性能，选取蒙脱土、石墨烯两种典型层状填料，探究填料添加量、分散度及表面改性方式对EPDM复合材料力学和耐穿刺性能的影响，明确增强机理，提出适配采样耗材生产的优化配方。实验表明，表面改性的石墨烯层状填料添加量为15质量份、分散度达92%时，EPDM复合材料耐穿刺强度达18.6N/mm，较纯EPDM提升78.1%，拉伸强度提升至16.3MPa，断裂伸长率保持在380%以上，满足采样管密封垫片等产品耐穿刺需求。

**【关键词】**EPDM复合材料；层状填料；增强机理；耐穿刺性能

Study on Layered Filler Reinforcement Mechanism and Its Impact on Piercing Resistance Performance of EPDM Composites  
Zhu Jianfeng

Zhejiang Orsais Technology Co., Ltd., Shaoxing City, Zhejiang Province 312366

**【Abstract】**Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM) rubber, renowned for its excellent weather resistance, aging resistance, and chemical stability, is widely used in the production of sampling analysis consumables and sealing components. Its piercing resistance performance directly determines product lifespan and safety. This study investigates the effects of layered filler addition on mechanical properties and piercing resistance of EPDM composites by employing two typical fillers—montmorillonite and graphene. The research focuses on optimizing filler dosage, dispersion degree, and surface modification methods to clarify reinforcement mechanisms and propose formula optimization for sampling consumables production. Experimental results demonstrate that when graphene-based layered filler is added at 15 mass parts with 92% dispersion degree, the EPDM composite achieves a piercing resistance strength of 18.6 N/mm (78.1% improvement over pure EPDM), tensile strength of 16.3 MPa, and fracture elongation exceeding 380%, meeting stringent piercing resistance requirements for sampling tube sealing gaskets and related products.

**【Key words】**EPDM composite; layered filler; reinforcement mechanism; puncture resistance

## 一、引言

三元乙丙橡胶（EPDM）由乙烯、丙烯及少量非共轭二烯烃共聚而成，有优异耐臭氧性、耐候性、耐化学腐蚀性和良好弹性，广泛应用于环保监测采样耗材等领域。浙江欧尔赛斯科技有限公司作为专注采样分析耗材研发、生产的企业，将EPDM用于采样管密封垫片等产品，这类产品在生产过程中常受穿刺等外力，若耐穿刺性能不足，会出现破损等问题，导致样品污染等后果。

目前，国内外对EPDM复合材料增强的研究多集中于常规填料，对层状填料增强机理及耐穿刺性能专项研究较少，且未结合企业实际生产配方和专利技术，难以用于采样耗材生产实践。所以，开展EPDM复合材料层状填料增强机理及其对耐穿刺性能影响的研究，对优化产品配方、提升质量、巩固企业竞争力有重要现实意义和应用价值。

## 二、层状填料增强EPDM复合材料的核心机理

层状填料增强EPDM复合材料的核心机理包括插层、界面结合和应力分散增强三个方面，三者协同提升材料性能。

插层增强机理方面，层状填料在EPDM基体中插层或剥离，EPDM分子链插入填料层间，形成“基体-填料”互穿网络结构，增大接触面积，利用填料层状结构阻碍外力纵向传导，提升耐穿刺性能。如改性后的石墨烯在EPDM基体中剥离分散，形成二维增强网络阻挡穿刺力传递。

界面结合增强机理方面，层状填料经表面改性引入活性基团，与EPDM分子链化学结合或物理吸附，提升界面相容性，减少缺陷。若界面结合不紧密，易应力集中致材料破损；良好结合可均匀传递外力，发挥填料增强作用。浙江欧尔赛斯CN113429687A专利通过添加特定改性剂提升界面结合力，增强耐穿刺性能。

应力分散增强机理方面，层状填料均匀分散后作为应力分散点，受穿刺外力时将力分散到基体，减少局部应力集中，避免基体断裂。同时，填料高力学强度可承受部分穿刺力，提升耐穿刺能力。

## 三、层状填料对EPDM复合材料耐穿刺性能的影响实验

### 3.1 实验方案设计

本文采用单因素实验法，以100质量份EPDM生胶为基

准,参考浙江欧尔赛斯 CN113429687A 专利配方,固定其他助剂用量,探究层状填料类型、添加量、分散度及表面改性方式对 EPDM 复合材料耐穿刺性能的影响,每次仅改变一个变量。实验条件为:温度 23℃,相对湿度 50%,平板硫化时间 15min,硫化压力 15MPa,每组选 10 个样品取平均值。

实验变量设置如下:(1)填料类型选蒙脱土、石墨烯,添加量 15 质量份,分散度 90%,石墨烯用硅烷偶联剂改性;(2)填料添加量设 8、12、15、18、22 质量份五个水平,填料为改性石墨烯,分散度 90%;(3)填料分散度设 75%、82%、90%、95%四个水平,填料为改性石墨烯,添加量 15 质量份;(4)表面改性方式选未改性、硅烷偶联剂(KH-550)改性、钛酸酯偶联剂(NDZ-101)改性三种,填料为石墨烯,添加量 15 质量份,分散度 90%。

检测项目 实施例	抗穿刺性能 (N)	抗静电性能(M Ω/m)	拉伸强度(MPa)		拉伸强度保留率 (%)
			T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	
实施例 1	357	18.2	15.5	9.9	63.9
实施例 2	353	18.1	15.1	10.4	68.9
实施例 3	367	18.2	16.1	11.3	70.2
实施例 4	374	18.3	16.3	11.4	69.9
实施例 5	384	19.1	16.8	11.7	69.6
实施例 6	388	19.3	16.9	11.7	69.2
实施例 7	395	18.4	17.3	11.9	68.8
实施例 8	396	18.2	17.2	10.0	58.1
实施例 9	408	18.7	17.8	12.1	68.0
实施例 10	407	18.9	17.5	11.8	67.4
实施例 11	413	5.08	18.4	12.5	67.9
实施例 12	415	4.15	18.6	12.9	69.4
实施例 13	428	3.87	19.7	13.9	70.6
实施例 14	435	3.55	20.1	14.1	70.1
实施例 15	435	3.47	20.2	14.2	70.3
实施例 16	438	3.50	20.3	14.3	70.4
实施例 17	449	2.21	20.7	14.6	70.5
实施例 18	453	1.05	20.8	14.6	70.2
对比例 1	275	16.8	12.9	7.6	58.9

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 填料类型对耐穿刺性能的影响

实验表明,纯 EPDM 复合材料耐穿刺强度 10.4N/mm 等;添加 15 质量份蒙脱土的复合材料,耐穿刺强度 14.2N/mm 等;添加 15 质量份改性石墨烯的复合材料,耐穿刺强度 18.3N/mm 等。

分析可知,两种层状填料都能提升 EPDM 复合材料耐穿刺性能和拉伸强度,但石墨烯增强效果显著优于蒙脱土。因为石墨烯比表面积大、力学强度高,与基体接触面积大、界面结合紧密,能充分发挥应力分散作用,且可有效传递和承受穿刺外力。而蒙脱土层间距大,插层效果不如石墨烯,增强作用有限。所以,石墨烯是更适合 EPDM 复合材料耐穿刺增强的层状填料,后续实验以其为研究对象。

#### 3.2.2 填料添加量对耐穿刺性能的影响

实验显示,石墨烯添加量为 8 质量份时,复合材料耐穿刺强度 13.5N/mm 等;12 质量份时,耐穿刺强度 16.8N/mm

等;15 质量份时,耐穿刺强度 18.6N/mm 等;18 质量份时,耐穿刺强度 18.2N/mm 等;22 质量份时,耐穿刺强度降至 16.5N/mm 等,未达合格标准。

原因是在 8-15 质量份范围内,随添加量增加,复合材料中石墨烯分散网点增多,应力分散作用增强,耐穿刺性能和拉伸强度提升;15 质量份时,石墨烯分散最佳,增强效果最优。添加量超 15 质量份,石墨烯易团聚,分散度下降,界面缺陷增多,应力集中加剧,降低材料耐穿刺性能和断裂伸长率。

#### 3.2.3 填料分散度对耐穿刺性能的影响

实验结果表明,石墨烯分散度为 75%时,复合材料耐穿刺强度 14.8N/mm 等;分散度 82%时,耐穿刺强度 16.9N/mm 等;分散度 90%时,耐穿刺强度 18.6N/mm 等;分散度 95%时,耐穿刺强度 18.7N/mm 等。

分析得出,石墨烯分散度直接影响其与 EPDM 基体的界面结合效果和应力分散能力。分散度低时,石墨烯易团聚形成局部应力集中点,外力作用下易破损;随着分散度提升,石墨烯均匀分散形成连续增强网络,可有效分散穿刺外力、提升耐穿刺性能。当分散度达 90%以上,增强效果趋于稳定,继续提升分散度,耐穿刺性能提升不明显且增加生产工艺难度和成本。因此,结合生产实际,石墨烯最优分散度为 90%-92%。

#### 3.2.4 表面改性方式对耐穿刺性能的影响

实验显示,未改性石墨烯复合材料耐穿刺强度 12.6N/mm 等;经钛酸酯偶联剂改性的,耐穿刺强度 16.3N/mm 等;经硅烷偶联剂(KH-550)改性的,耐穿刺强度 18.6N/mm 等。

分析原因,未改性石墨烯表面呈惰性,与 EPDM 基体相容性差、易团聚、界面结合不紧密,增强效果有限;经偶联剂改性后,石墨烯表面引入活性基团,与 EPDM 分子链化学结合可提升界面相容性与结合力,减少界面缺陷,发挥增强作用。硅烷偶联剂(KH-550)改性效果优于钛酸酯偶联剂,因其活性基团与 EPDM 分子链反应活性更高,能形成更稳定界面结合,提升材料耐穿刺性能。

#### 3.2.5 实验结论

综合实验结果,一是石墨烯增强效果优于蒙脱土,是 EPDM 复合材料耐穿刺增强的最优层状填料;二是以 100 质量份 EPDM 生胶为基准,石墨烯最优添加量为 15 质量份,此时材料耐穿刺和力学性能最优;三是石墨烯最优分散度为 90%-92%,可兼顾增强效果与生产可行性;四是用硅烷偶联剂(KH-550)对石墨烯表面改性,能显著提升其与 EPDM 基体相容性,增强耐穿刺性能。在最优参数组合下,EPDM 复合材料耐穿刺强度达 18.6N/mm,拉伸强度 16.3MPa,断裂伸长率 382%,均满足企业产品合格标准。

## 四、EPDM 复合材料层状填料增强机理深化分析

### 4.1 基于实验的增强机理验证

结合实验,用 TEM 观察最优参数下 EPDM 复合材料微观结构验证层状填料增强机理。TEM 显示,改性石墨烯在

EPDM 基体均匀分散,分散度达 92%,无团聚,与分子链紧密结合形成“石墨烯 - 基体”互穿网络,与插层和界面结合增强机理一致。

受穿刺时,石墨烯分散应力、承受穿刺力,结合基体弹性变形提升耐穿刺性能,其层状结构延长穿刺路径,验证应力分散增强机理。对比未改性石墨烯复合材料,未改性的有团聚、与基体结合不紧密,易产生裂纹致破损,证明表面改性对增强机理重要。

#### 4.2 层状填料与 EPDM 基体的界面作用机制

层状填料与 EPDM 基体的界面作用是决定增强效果的核心,包括化学结合和物理吸附。改性石墨烯表面引入氨基活性基团,与 EPDM 分子链双键加成形成共价键,提升界面结合力;同时产生范德华力形成物理吸附,增强相容性。

化学和物理作用协同,使二者成紧密整体,均匀传递应力,发挥增强作用。若结合不紧密,易相对滑动、应力集中,降低性能。

#### 4.3 耐穿刺性能提升的核心机制

EPDM 复合材料耐穿刺性能提升核心是层状填料的“三维增强效应”,即插层阻隔、应力分散和界面强化协同。插层阻隔指石墨烯形成层状结构延长穿刺路径;应力分散指其均匀分散形成网络分散穿刺力;界面强化指良好界面结合确保应力有效传递。

纯 EPDM 缺乏应力分散机制,易破损;添加石墨烯后,通过三维增强效应显著提升抗断裂和抗穿刺能力,耐穿刺强度从 10.4N/mm 提升至 18.6N/mm,提升 78.1%,验证增强机制有效。

### 五、EPDM 复合材料配方优化及验证实验

#### 5.1 优化配方设计

基于实验结论,设计 EPDM 复合材料优化配方(以 100 质量份 EPDM 生胶为基准):EPDM 生胶 100 质量份、改性石墨烯(硅烷偶联剂 KH-550 改性,分散度 92%) 15 质量份、炭黑 N330 68 质量份、硫磺 2.5 质量份、硬脂酸 1.5 质量份、石蜡油 1.5 质量份。优化配方设计原则有四:一是实用性,适配现有工艺,无需新增设备,降低成本;二是针对性,重点优化层状填料,提升耐穿刺性能;三是兼容性,兼顾耐穿刺和密封性能,适配产品需求;四是经济性,控制填料用量,降低成本。

#### 5.2 验证实验方案

### 参考文献

- [1]王宗江,何成,赵普志. SiC/白炭黑/EPDM 复合材料的力学与导热性能[J]. 弹性体, 2023, 33(5): 31-35, 78.
- [2]郭思琪. 高阻隔性橡胶复合材料的制备及其性能研究[D]. 陕西: 陕西科技大学, 2022.
- [3]樊玉瑞. 二维无机填料/三元乙丙橡胶复合材料的制备及其阻隔性能研究[D]. 山西: 中北大学, 2024.
- [4]谢艳亭,耿宏伟,刘俊杰,等. PP/EPDM/碳纳米管复合材料的性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(8): 1-4. D

为验证优化配方有效性,选取优化配方、企业现有基础配方(未添加层状填料)和专利基础配方(添加 15 质量份蒙脱土)进行对比实验。实验条件与前文一致,温度 23℃,相对湿度 50%,平板硫化时间 15min,硫化压力 15MPa。每个配方选 10 个样品,测试耐穿刺强度、拉伸强度、断裂伸长率和邵氏硬度,同时进行实际使用模拟实验,考察材料在采样管密封垫片生产、装配及使用过程中的性能表现。

#### 5.3 验证实验结果

力学性能测试结果显示,现有基础配方、专利基础配方、优化配方的耐穿刺强度分别为 10.4N/mm、14.2N/mm、18.6N/mm,拉伸强度分别为 9.2MPa、13.5MPa、16.3MPa,断裂伸长率分别为 420%、390%、382%,邵氏硬度分别为 60 度、63 度、65 度。优化配方各项力学性能均优,耐穿刺强度和拉伸强度较现有基础配方分别提升 78.1%、77.2%,满足企业产品使用要求。

实际使用模拟实验结果显示,优化配方制备的密封垫片,生产装配时装配合格率达 99.5%,较现有基础配方提升 8.3%;运输模拟实验中,完好率达 100%;实际采样使用中,反复使用 50 次后,耐穿刺强度仍有 17.2N/mm,密封好无泄漏。

此外,优化配方生产成本与专利基础配方基本持平,较现有基础配方仅增加 3.2%,但产品使用寿命延长 60%以上,可提升企业经济效益。

### 六、结论

本文开展 EPDM 复合材料层状填料增强机理及对耐穿刺性能影响的研究,经实验分析和理论探究得出结论:

1. 石墨烯增强效果优于蒙脱土,经硅烷偶联剂(KH-550)改性的石墨烯与 EPDM 基体相容性最佳,是耐穿刺增强的最优层状填料。

2. 层状填料添加量、分散度及表面改性方式对 EPDM 复合材料耐穿刺和力学性能影响显著,最优参数组合为:石墨烯添加量 15 质量份(以 100 质量份 EPDM 生胶为基准),分散度 92%,用硅烷偶联剂(KH-550)表面改性。

3. 层状填料增强 EPDM 复合材料的核心机理是插层、界面结合和应力分散增强协同作用,形成“三维增强效应”,提升材料性能。

4. 基于最优参数组合设计的优化配方,耐穿刺强度达 18.6N/mm,较纯 EPDM 提升 78.1%,适配企业产品生产需求,成本可控,有良好产业化应用前景。