

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.08.008

炭黑填充苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段 共聚物导电泡沫材料

夏利平

(三一重工股份有限公司,长沙 410100)

摘要:为研究功能助剂对苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)导电泡沫材料的影响,选择以氧化锌(ZnO)和硬脂酸锌(ZnSt)为发泡助剂,偶氮二甲酰胺(AC)为发泡剂,过氧化二异丙苯(DCP)为交联剂,炭黑(CB)为导电助剂。采用差示扫描量热仪表征了 ZnO/ZnSt 用量对 AC 分解温度的影响,通过硫化仪、物理性能测试、电性能测试以及扫描电子显微镜等测试研究了 CB 含量对 SBS 导电发泡材料的硫化发泡特征性能、物理性能、电性能和泡孔微观结构的影响,以及 AC 含量对电性能和泡孔微观结构的影响。结果表明:采用 ZnO 与 ZnSt 复配使用可高效降低 AC 发泡温度;当 CB 含量为 15 份时,SBS 复合材料的硫化扭矩和发泡时间突增,泡沫由绝缘体变成半导体,当 CB 含量为 20 份时,泡沫材料的压缩永久变形明显下降,泡沫由半导体变成导体,CB 含量变化对泡孔结构影响较小;AC 含量增加会导致泡孔截面从圆形变成多边形,泡孔壁变薄,泡沫的导电性下降。

关键词:泡沫材料;导电性;苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物;炭黑

中图分类号: TQ334.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)08-0044-06

Carbon Black Filled Poly (styrene-b-butadiene-b-styrene) Tri-Block Copolymer Conductive Foams

Xia Liping

(Sany Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract : In order to study the effect of functional additives on poly (styrene-b-butadiene-b-styrene) tri-block copolymer (SBS) conductive foams, zinc oxide (ZnO) and zinc stearate (ZnSt) were selected as foam activators, azodicarbonamide (AC) as the blowing agent, dicumyl peroxide (DCP) as the curing agent, and carbon black (CB) as the conductive agent. Differential scanning calorimetry was used to characterize the effect of ZnO/ZnSt content on the decomposition temperature of AC. The effects of CB content on the vulcanized foaming characteristics, physical properties, electrical properties and cell microstructure of SBS conductive foams were studied by vulcanization instrument, physical properties test, electrical properties test and scanning electron microscopy. The effects of AC content on electrical properties and cell microstructure were also studied. The results show that the combination of ZnO and ZnSt can effectively reduce the decomposition temperature of AC. When the content of CB is 15 phr, the vulcanization torque and foaming time of SBS composites increase sharply, the foam material becomes a semiconductor from an insulator. When the CB content is 20 phr, the compressive permanent deformation of the foam material is obviously reduced, the foam material becomes a conductor from a semiconductor. The change of CB content has little effect on the structure of the bubble hole. With the increasing of AC content, the cross section of the bubble becomes polygon, the wall of the bubble becomes thinner, and the conductivity of the foam decreases.

Keywords : foams ; electrical conductivity ; poly (styrene-b-butadiene-b-styrene) tri-block copolymer ; carbon black

泡沫塑料是一种以塑料为主要成分、气体为填料的复合塑料^[1-2]。与普通塑料相比,它具有质轻、隔音、隔热、比强度高、耐冲击等优点,广泛用于航空航天、机械建筑、电气化和石油化工等行业^[3-4]。

通信作者:夏利平,工程师,主要研究方向为高分子材料改性及应用

收稿日期:2023-06-03

引用格式:夏利平.炭黑填充苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物导电泡沫材料[J].工程塑料应用,2023,51(8):44-49.

Xia Liping. Carbon black filled poly (styrene-b-butadiene-b-styrene) tri-block copolymer conductive foams[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 44-49.

通过在泡沫塑料中添加导电填料,赋予材料一定的导电性能,使泡沫材料应用更加广泛,如用作抗静电材料、电磁屏蔽材料、正温度系数热敏(PTC)材料等^[5-7]。

目前,导电发泡材料的研究主要集中在聚氨酯、聚乙烯和硅橡胶等材料。以苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)为代表的聚烯烃类热塑性弹性体具有优异的力学性能和加工性能,其泡沫产品具有良好的止滑性、透气性、耐低温性、回弹性和高发泡倍率等特点,越来越多地被人们用作发泡材料的基材^[8-11],但有关SBS导电发泡材料的研究报道很少。笔者以SBS为基材,炭黑(CB)为导电填料,偶氮二甲酰胺(AC)为发泡剂,通过氧化锌(ZnO)和硬脂酸锌(ZnSt)调节发泡温度制备SBS导电泡沫材料,研究了CB和AC含量对泡沫材料结构和性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

SBS:苯乙烯含量30%,工业级,中国石化巴陵石油化工有限公司;

AC:工业级,宁夏日盛化工集团;

过氧化二异丙苯(DCP):化学纯,中国医药集团上海化学试剂公司;

导电CB:Ensaco350G,瑞士Timcal有限公司;

ZnO, ZnSt和硬脂酸(HSt):分析纯,成都市科隆化学品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

双辊筒炼塑机:LG-160型,上海勤奋机器厂;

半自动压力成型机:HPD-63(D)型,上海西玛伟力橡塑机械有限公司;

邵氏硬度计:LX-C型,上海六菱仪器厂;

弹性试验机:TY2001型,江苏江都市天瑞试验机械厂;

DIN磨耗试验机:HY-766型,东莞市恒宇仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:NETZSCH DSC 204型,德国耐驰有限公司;

硫化仪:GT-M2000-FA型,高铁检测仪器(东莞)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-5900LV型,日本日立公司;

高阻计:ZC-36型,上海精密科学仪器有限公

司;

半导体性能测试仪:4200-SCS型,美国吉时利仪器公司。

1.3 试样制备

试样配方列于表1,先称取一定量的SBS树脂加入双滚筒炼胶机中,90℃下预塑化至物料包辊,然后加入ZnO, ZnSt和HSt混炼均匀,再加入导电CB混炼5 min,最后加入发泡剂AC和交联剂DCP,继续混炼5 min后打包下料。胶料经室温放置24 h后放入自制发泡模具中高温模压发泡,再取出冷压定形,在空气中放置12 h得到最终待测样品。

表1 CB/SBS复合材料配方

组分	编号												
	C ₀	C ₃	C ₅	C ₇	C ₁₀	C ₁₂	C ₁₅	C ₂₀	A ₁	A ₃	A ₆	A ₉	A ₁₂
AC	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	6	9	12
CB	0	3	5	7	10	12	15	20	20	20	20	20	20

注:以SBS为100份;每个配方中均包含DCP 0.27份, ZnO 1.2份, ZnSt 0.45份, HSt 0.45份。

1.4 测试与表征

泡沫硬度按ISO 2439-2008测试。

泡沫回弹性按GB/T 1681-2009测试。

泡沫材料的体积磨损量(V_{DIN})按GB/T 2439-2008方法B测试,试样单面去表皮,去皮面与滚筒接触,未去皮面用502胶水黏接固定,计算公式(1)如下:

$$V_{DIN} = m_{loss} / \rho \times 1000 \quad (1)$$

式中, V_{DIN} 为体积磨损量, mm^3 ; m_{loss} 为质量损失量, g ; ρ 为密度, g/cm^3 。

压缩永久变形采用自制压缩装置测试:将直径为15 mm,厚为10 mm左右的圆柱形发泡试样置于装置的两平板之间,压缩50%,固定装置将其放入50℃烘箱中,6 h后取出样品置于室温下恢复30 min,测量厚度。按如下公式(2)计算:

$$S = [(t_0 - t_1) / (t_0 - t_n)] \times 100\% \quad (2)$$

式中, S 为压缩永久变形; t_0 为原始厚度; t_1 为最终厚度; t_n 为使用的垫片厚度。

发泡剂AC的热分解曲线由DSC仪测定,称取5 mg左右样品放入微型坩埚中,在氮气保护下样品以20℃/min的升温速率从60℃升温至240℃。

硫化发泡特性:取5 g左右混炼好的胶料放入配有发泡力传感器的硫化仪模子中,测试时间为15 min,模子的摆动角度为1°。

复合材料微观形貌观察:将去皮后的泡沫材料

用刀片切出“V”型槽,置于液氮中脆断,断面喷金后,用SEM观察泡孔结构和CB粒子的分布情况。

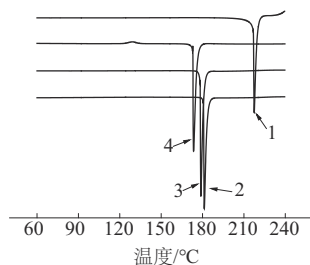
电性能测试:体积电阻率 $\rho > 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时,采用高阻计测量;体积电阻率 $\rho < 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 时,采用半导体性能测试仪测量。

2 结果与讨论

2.1 发泡剂的促进作用

通常泡孔均匀的发泡材料是在物料交联的同时发泡剂分解产生气泡而形成的,一方面,发泡剂分解产生的气体能形成气泡成核体,并不断长大;另一方面,交联剂交联能提供物料必要的熔体强度,防止气体逃逸,并使泡孔稳定不至于塌陷。这就要求发泡剂的分解温度与交联剂的分解温度相近,但事实上AC的分解温度为 205°C ,此温度下DCP分解反应半衰期很短(200°C 和 220°C 下DCP分解半衰期分别为 5.76 s 和 1.20 s)^[12]。因此不含发泡助剂的物料在AC分解之前就已经过度交联,导致聚合物熔体强度太大不能发泡。

不同发泡助剂对AC的活化效果不同^[13-14],分别研究了ZnO和ZnO/ZnSt复合发泡助剂对AC分解温度的影响,如图1所示。由图1可以看出,纯AC的分解峰值温度为 217.6°C ,当添加1.2份ZnO时,峰值温度降低至 190°C ,而同时添加1.2份ZnO和0.45份ZnSt能使峰值温度降至 182.1°C ,与DCP的分解峰值温度(178.5°C)相近。因此通过添加ZnO/ZnSt复合发泡助剂可使发泡和交联反应基本同步,能够形成良好的发泡材料。



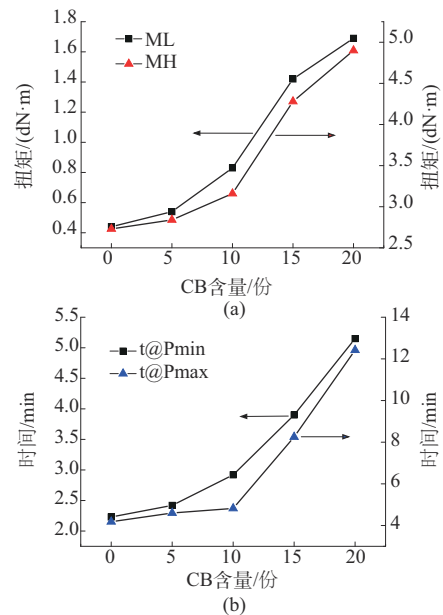
1—AC;2—AC/ZnO=3/1.2;3—AC/ZnO=3/2;
4—AC/ZnO/ZnSt=3/1.2/0.45

图1 AC, AC/ZnO和AC/ZnO/ZnSt的DSC曲线

2.2 CB对发泡时间的影响

不同CB含量的SBS复合材料在 180°C 下硫化发泡的特征参数如图2所示。当CB含量较低时,最小扭矩(ML)和最大扭矩(MH)随CB含量的增加而缓慢增大,当CB含量增加到15份时,ML和MH同时出现跳跃式增长,这可能是由于CB填料在基体

树脂中产生特殊状态的分布。相应地,由于复合材料黏度上升,熔体强度增大,气泡成核越困难,发泡开始时间($t@P_{\text{min}}$)推迟;气泡达到稳定时所需克服的熔体强度也越大,对应发泡结束时间($t@P_{\text{max}}$)也增大。



a—硫化参数;b—发泡参数

图2 不同CB含量硫化发泡特征参数

2.3 CB对物理性能的影响

不同CB含量对泡沫材料物理性能的影响见表2,当CB含量低于15份时,材料密度在 $0.36\sim 0.42\text{ g/cm}^3$ 区间波动,当CB含量为20份时,密度明显增加,这是由于CB的增强作用使熔体强度太大,导致发泡困难,发泡倍率减小。同时泡沫材料的硬度增加,回弹性下降,压缩性能变差,而DIN值变小,说明泡沫材料由于CB的增强作用而更耐磨。

表2 不同CB含量SBS泡沫材料物理性能

项目	C ₀	C ₃	C ₅	C ₇	C ₁₀	C ₁₂	C ₁₅	C ₂₀
密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.38	0.37	0.37	0.36	0.40	0.40	0.42	0.48
硬度(邵氏 C)	60	61	61	64	69	71	75	80
回弹性/%	43	40	36	36	31	30	27	22
压缩永久 变形/%	32	32	35	36	38	38	40	46
DIN值/ mm^3	2 024	1 987	1 899	1 883	1 799	1 794	1 580	1 359

2.4 导电性能

(1) CB含量对导电性能的影响。

材料根据其体积电阻率大小可分为绝缘体($> 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)、半导体($10^4 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)和导体($< 10^4 \Omega \cdot$

cm)。许多人在研究CB填充型导电复合材料时发现,影响复合物的导电性是通过CB粒子在复合体系树脂基体中的分布情况起作用的,主要取决于分布在树脂基体中的导电填料的电子传输问题^[15]。

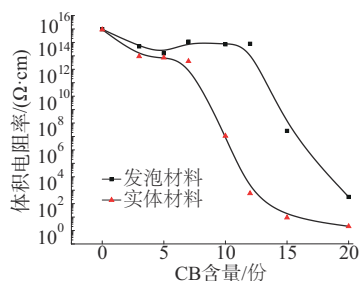
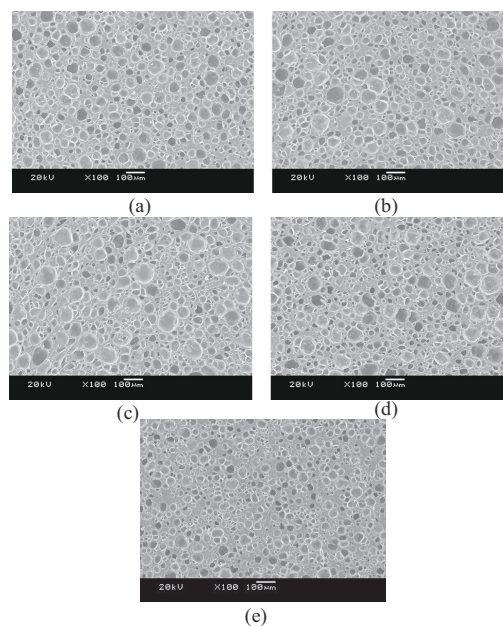


图3 CB含量对SBS/CB复合材料实体和发泡材料电性能的影响

图3为CB含量对SBS/CB复合材料实体和发泡材料电性能的影响。从图3可以看出,实体材料中CB从7份增加到12份时,体积电阻率降低10个数量级,继续增加CB含量,材料的导电性变化甚微。发泡材料中CB含量从12份增加至20份,体积电阻率也出现跳跃式的下降,而在此范围之外,CB含量的增减对泡沫材料的导电性影响甚小。为了解释出现这种突变现象的原因,从泡孔结构以及CB在SBS中的分布情况进行分析。

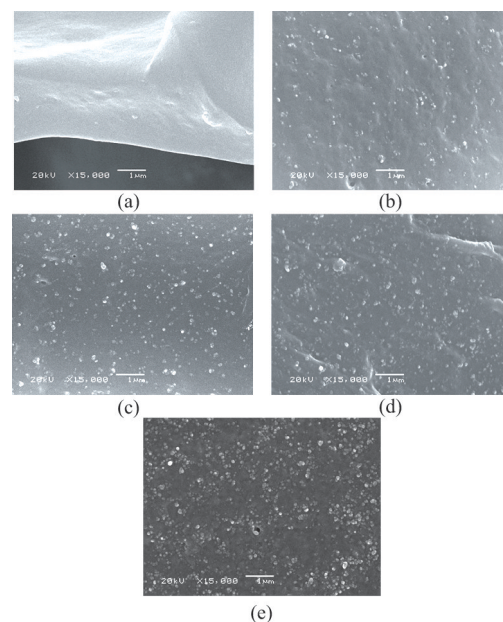
泡孔是构成泡沫材料的基本结构单元,每个泡孔都是由气相(气穴)和固相(壁和柱)组成的。因此气相在固相中的分布以及构成骨架的固相结构是影响泡沫材料各种性能的重要因素。Xu等^[16]发现在高发泡倍率下,泡孔出现缺陷,而且泡孔壁变薄,影响导电填料在其中的分布,引起导电通路中断,泡沫材料的导电性下降。图4显示了不同CB含量泡沫材料的微观泡孔结构,以闭孔结构为主,泡孔呈圆形或椭圆形,大小泡孔相间分布,均匀地分散在以SBS复合材料为连续固相的骨架结构中,泡孔柱无明显断裂和塌陷,它们相互交织在一起形成蜂巢状结构,CB含量对泡沫材料的结构影响较小。但也不难发现图4e泡孔数量相对较少,泡孔壁较厚,可提供的导电通路更多,同时也是其密度大的原因。

CB是由许多CB粒子组成的,但这些粒子并不能单独存在,而是在CB生成过程中聚融在一起形成CB聚集体,聚集体才是CB单独存在的最小单元。因此CB聚集体在树脂基体中的分布直接影响复合材料的导电性能^[17]。图5是经15 000倍放大后CB聚集体在SBS树脂中的分散情况。不含CB的



a—C₀; b—C₅; c—C₁₀; d—C₁₅; e—C₂₀

图4 不同CB含量泡孔的SEM图



a—C₀; b—C₅; c—C₁₀; d—C₁₅; e—C₂₀

图5 不同CB含量在SBS树脂中的分布情况

复合材料断面光滑,没有颗粒物质存在,表明在此放大倍数下其它助剂对观察CB聚集体分布没有影响。由于不含导电填料,材料的体积电阻率很高,属于绝缘体。当在SBS树脂中添加5份CB时,CB在强剪切作用力下相互分离,以直径为70 nm左右的聚集体形式存在,均匀地分散在SBS基体树脂中,聚集体与聚集体间距离较大,很难形成贯穿整个材料的导电通路。因此CB填充量较低时,体系电阻率较高,不因CB含量改变而发生大的变化。

当CB含量增加至10份时,大部分聚集体尽管还是以孤立形式存在,但相互间的距离更小。根据隧道效应理论^[18],当导电粒子间的距离较小时,电子通过热震动可在导电粒子间迁移,形成导电通路,因此CB/SBS实体材料的导电性在CB添加10份时出现突变,相应的渗流区域为7~12phr。可是由于导电粒子没有紧密接触,导电性不稳定,泡孔的存在很容易使导电通路中断,因此SBS/CB发泡材料在CB为10份时体积电阻率依然很高。

当CB含量为15份时,CB聚集体已经相互接触。CB在SBS中形成连续相,使得基体树脂与CB粒子相互作用力更大,这也是导致复合材料在CB含量为15份时硫化扭矩突然增大的原因。同时接触网络的形成使导电通路更加完善,实体材料的导电性进一步提高,而泡孔结构对接触式导电网络影响作用有限,因此CB含量为15份的泡沫材料体积电阻率明显下降。

(2) AC含量对导电性能的影响。

泡沫材料中气相部分来源于发泡剂,通过改变发泡剂的含量可以改变气相的含量,进而改变材料的密度。图6显示了CB含量一定(20份)时,AC含量对泡沫材料密度的影响以及不同密度下体积电阻率。从图6可以看出,随着发泡剂不断增加,材料的密度呈明显下降趋势;AC含量低于3份时,泡沫材料的导电性受AC含量变化的影响较小,而高于此含量时,AC含量对材料导电性的影响明显增强。

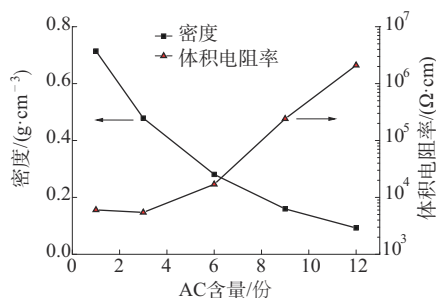
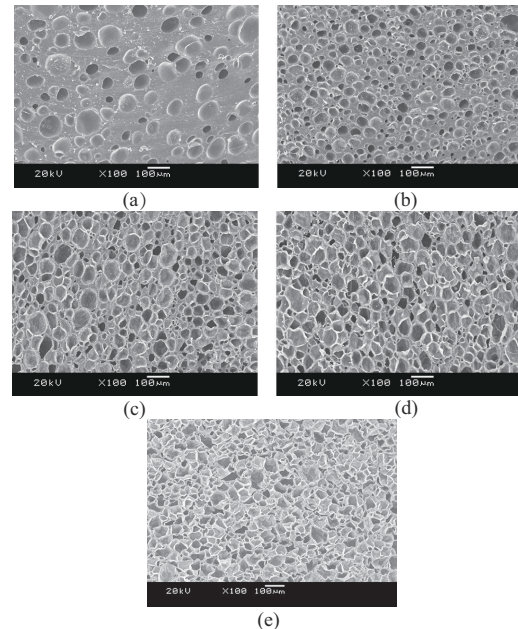


图6 不同AC含量对体积电阻率和密度的影响

图7是不同AC含量泡沫材料的泡孔结构图,从图7可以看出,随着AC含量的增加,泡孔数量逐渐增多,泡孔壁和柱逐渐变薄,泡孔相互挤压,泡孔形态变化趋势为圆形→多边形(边数>6)→六边形→五边形。在体积相同的几何体中,球体的表面积最小,而多面体的表面积相对较大,面数越少,表面积越大。泡沫材料中气相与固相的接触面是阻断导

电通路的绝缘面,接触面积越大,材料导电性能越差。当AC含量从1份增加至12份,泡孔平均壁厚也从45.32 μm下降至1.43 μm,泡孔壁的变薄会影响导电网络在其中的分布,导电通路从3维向2维转变,导电性恶化。因此AC对材料导电性的影响是泡孔形状和泡孔壁厚变化综合作用的结果。



a—A₁; b—A₃; c—A₆; d—A₉; e—A₁₂

图7 不同AC含量泡孔的SEM图

3 结论

通过添加ZnO(1.2份)/ZnSt(0.45份)复合发泡助剂可使发泡和交联反应同步,且效率比单独使用ZnO高;CB含量为15份时,发泡时间和扭矩均迅速增大;CB含量为20份时泡沫材料的回弹性和压缩性能明显下降。SBS泡沫材料与实体材料一样存在明显的渗流效应,CB含量对泡沫材料的结构影响较小,但随着AC含量的增加,泡孔逐渐从圆形变成多边形,泡孔壁变薄,泡沫材料从导体变成半导体。因此当CB含量为15份,发泡剂AC为3份时能获得物理性能优良、泡孔结构良好的半导体导电泡沫材料。

参考文献

- [1] Marton T, Marton A L, Richard D P, et al. Measuring and mathematical modeling of cushion curves for polymeric foams[J]. *PolymerTesting*2023;117.DOI:10.1016/j.polymeresting.2022.107837.
- [2] 李绍棠,拉梅什.泡沫塑料:机理与材料[M].北京:化学工业出版社,2012.
Li Shaotang, Ramesh. Polymeric foams: Mechanisms and materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.

- [3] 古栋列. 聚氨酯/纳米孔硅复合材料泡沫塑料的制备及其保温性能的研究[J]. 塑料科技, 2021(11):62-65.
Gu Donglie. Research on preparation and thermal insulation performance of polyurethane/nanoporous silicon syntactic foam[J]. *Plastics Science and Technology*, 2021(11):62-65.
- [4] 杨建斌, 李洪堰, 王明远. 飞机用聚酰亚胺泡沫材料的国内生产与应用[J]. 大连大学学报, 2020, 41(3):36-41.
Yang Jianbin, Li Hongyan, Wang Mingyuan. The introduced of polyimide foam material application of the aircraft[J]. *Journal of Dalian University*, 2020, 41(3):36-41.
- [5] 贾亚兰, 张文焕, 刘涛, 等. 导电硅橡胶泡沫材料的制备与性能研究[J]. 功能材料, 2020, 3(51):56-65.
Jia Yalan, Zhang Wenhuan, Liu Tao, et al. Preparation and properties of conductive silicone rubber foams[J]. *Journal of Functional Material*, 2020, 3(51):56-65.
- [6] 徐杰, 付栋梁, 李广富, 等. 导电型辐照交联聚乙烯发泡材料的制备及其性能[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2022, 43(2):90-94.
Xu Jie, Fu Dongliang, Li Guangfu, et al. Preparation and properties of conductive radiation cross-linked polyethylene foam material[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(2):90-94.
- [7] 霍雷敏. 基于聚氨酯泡沫的煤矿采空区贯通面封堵材料试验研究[J]. 现代矿业, 2022(11):203-206.
Huo Leimin. Experimental study on plugging material of coal mine goaf penetration face based on polyurethane foam[J]. *Modern Mining*, 2022(11):203-206.
- [8] 王振辉. 发泡鞋底材料研究进展分析[J]. 鞋类工艺与设计, 2021(2):10-11, 14.
Wang Zhenhui. Research progress of foamed sole materials[J]. *Shoes Technology and Design*, 2021(2):10-11, 14.
- [9] 陈金山. SBS改性沥青发泡机理与影响因素研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(7):26-29.
Chen Jinshan. Research on foaming mechanism and influencing factors of SBS modified asphalt[J]. *Railway Construction Technology*, 2020(7):26-29.
- [10] Tian Dingkun, Xu Yadong, Wang Yong, et al. In-situ metallized carbon nanotubes/poly(styrene-butadiene-styrene) (CNTs/SBS) foam for electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 420(3). DOI:10.1016/j.cej.2021.130482.
- [11] Shen Youkang, Lin Zhiqiang, Liu Xuebin, et al. Robust and flexible silver-embedded elastomeric polymer/carbon black foams with outstanding electromagnetic interference shielding performance[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 213. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.108942.
- [12] 王克俭, 涂剑刚, 王小黎. 衣康酸接枝乙烯-1-辛烯共聚物的制备[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(10):46-48, 53.
Wang Kejian, Tu Jiangang, Wang Xiaoli. Preparation of itaconic acid-grafted thylene-1-octene copolymer[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2011, 27(10):46-48, 53.
- [13] 程珍珍. 丁腈橡胶的配位硫化与发泡材料研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
Cheng Zhenzhen. Research on coordination vulcanization and foaming materials of nitrile rubber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [14] 岂林霞, 王克俭, 孙小杰, 等. 交联聚乙烯回收料填充高密度聚乙烯的发泡特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2019, 35(5):76-83.
Qi Linxia, Wang Kejian, Sun Xiaojie, et al. Foaming characteristics of recycled crosslinked polyethylene filled high density polyethylene[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2019, 35(5):76-83.
- [15] 刘家好, 吴赟, 吕海洋, 等. CB填充型导电高分子材料的研究进展[J]. 广州化工, 2020, 48(9):19-21, 49.
Liu Jiahao, Wu Yun, Lyu Haiyang, et al. Research progress on conductive polymer filled with carbon black[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(9):19-21, 49.
- [16] Xu Xiangbin, Li Zhongming, Shi Lei, et al. Ultralight conductive carbon-nanotube-polymer composite[J]. *Small*, 2007, 3(3):408-411.
- [17] 李忠磊, 赵宇彤, 韩涛, 等. 高压电缆半导体屏蔽材料研究进展与展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9):2341-2354.
Li Zhonglei, Zhao Yutong, Han Tao, et al. Research progress and prospect of semi-conductive shielding composites for high-voltage cables[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(9):2341-2354.
- [18] 宁廷州, 张敬芝, 付玲. 导电高分子材料在电子器件中的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11):162-167.
Ning Tingzhou, Zhang Jingzhi, Fu Ling. Research progress of conductive polymer materials in electronic devices[J]. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(11):162-167.