

# 钢渣超微粉取代部分炭黑高强耐磨型 丁苯橡胶复合材料的制备及其性能研究

李帮平<sup>1</sup>, 龙红明<sup>2,3</sup>, 刘自民<sup>1</sup>, 张耀辉<sup>1</sup>, 张浩<sup>2,3\*</sup>

(1. 马鞍山钢铁股份有限公司技术中心, 安徽 马鞍山 243003;

2. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002;

3. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学), 安徽 马鞍山 243002)

**摘要:**采用乙二醇与三乙醇胺为改性剂, 无水乙醇为溶剂配制钢渣助磨剂, 将钢渣助磨剂与钢渣混合后粉磨获得钢渣超微粉。利用钢渣超微粉取代部分炭黑制备一系列钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料。考察钢渣助磨剂配方与钢渣超微粉用量对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料力学性能的影响, 并且分析其作用机理。结果表明, 当乙二醇用量为 0.10 mL、三乙醇胺用量为 0.10 mL、无水乙醇用量为 0.10 mL、电炉渣质量为 20 g、炭黑质量为 30 g 时, 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能较好, 即拉伸强度为 22.01 MPa、拉伸伸长率为 605.27%、撕裂强度为 40.74 kN/m、邵尔 A 硬度为 62。以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂可改善钢渣超微粉的粒度分布, 有利于钢渣超微粉的物理吸附效果与分散效果, 提高钢渣超微粉/丁苯橡胶结构的牢固度与丁苯橡胶包裹钢渣超微粉的效果。

**关键词:** 钢渣超微粉; 炭黑; 丁苯橡胶; 高强耐磨; 复合材料

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2021)01-0149-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.01.030

## Preparation of high strength-wear resistant styrene butadiene rubber composite materials with steel slag ultrafine powder replacing partial carbon black and study on their properties

LI Bang-ping<sup>1</sup>, LONG Hong-ming<sup>2,3</sup>, LIU Zi-min<sup>1</sup>, ZHANG Yao-hui<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>2,3\*</sup>

(1. Technology Center, Maanshan Iron & Steel Co., Ltd., Ma'anshan 243003, China;

2. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

3. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling (Anhui University of Technology), Ministry of Education, Ma'anshan 243002, China)

**Abstract:** With ethylene glycol and triethanolamine as modifiers, and absolute ethyl alcohol as solvent, steel slag grinding aid is prepared. Steel slag ultrafine powder is obtained by mixing and grinding steel slag grinding aid and steel slag together. A series of steel slag ultrafine powder/styrene butadiene rubber composite materials are prepared by using steel slag ultrafine powder to replace carbon black partially. Influences of the formula of steel slag grinding aid and the using amount of steel slag ultrafine powder on the mechanical properties of the prepared steel slag ultrafine powder/styrene butadiene rubber composite materials are studied, and the action mechanism is analyzed. Results indicate that steel slag ultrafine powder/styrene butadiene rubber composite materials have better mechanical properties when the adding amounts of ethylene glycol, triethanolamine, absolute ethyl alcohol, electric furnace slag and carbon black are 0.10 mL, 0.10 mL, 0.10 mL, 20 g and 30 g, respectively. The materials have a tensile strength of 22.01 MPa, an elongation at break of 605.27%, a tearing strength of 40.74 kN·m<sup>-1</sup> and a shore A hardness of 62. Steel slag grinding aid made by ethylene glycol, triethanolamine and absolute ethyl alcohol can improve the particle size distribution of steel slag ultrafine powder, which is beneficial to increase the physical adsorption and dispersion effects of steel slag ultrafine powder, and improve structural firmness of steel slag ultrafine powder/styrene butadiene rubber and the coating effect of styrene butadiene rubber to steel slag ultrafine powder.

**Key words:** steel slag ultrafine powder; carbon black; styrene butadiene rubber; high strength-wear resistant; composite materials

钢渣作为冶金工业中炼钢过程产生的大宗固体废弃物, 其产量约为年粗钢产量的 15%~20%<sup>[1-2]</sup>。随着近年来我国经济与社会的不断发展, 对钢材的需求

越来越大, 造成钢铁企业年均排放钢渣量巨大, 即年排放钢渣在 1 亿 t 以上<sup>[3-4]</sup>。我国对钢渣不仅利用率较低, 约为年钢渣产量的 10% 左右, 而且附加值

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-11-24

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2017M612051); 安徽省博士后研究人员科研活动经费资助项目(2017B168)

作者简介: 李帮平(1965-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为钢铁冶金, 81882602@qq.com; 张浩(1982-), 男, 博士(后), 副教授, 研究方向为冶金固废资源利用, 通讯联系人, fengxu19821018@163.com。

不高,主要用作烧结矿的原料与炼钢返回料,以用于建筑材料、公路建设、农业生产等方面<sup>[5-7]</sup>,给企业与社会带来严重的负担<sup>[8-9]</sup>。因此,如何大规模且高附加值的利用钢渣已经成为热点问题。

橡胶作为工业生产中广泛使用的聚合物材料,其主要包括天然橡胶与合成橡胶,我国橡胶年用量在 1 200 万 t 以上<sup>[10]</sup>。橡胶在生产加工过程中需要添加大量具有补强性能的填料(添加质量约为橡胶质量的 40%~55%)以改善橡胶性能。目前橡胶行业常用的橡胶补强填料为生产工艺繁杂、成本较高、对环境危害严重的炭黑(售价约为 8 000 元/t)或白炭黑(售价约为 6 000 元/t)。因此,近年来利用粉煤灰、漂珠、蒙脱土经改性后代替炭黑作为橡胶补强填料已经取得一定研究成果<sup>[11-13]</sup>。钢渣主要成分为钙、硅、镁、铁、锰、磷的氧化物形成的固熔体<sup>[14]</sup>,其性质与粉煤灰、漂珠、蒙脱土的较为相近,但耐磨性较高。若采用合适的粉磨技术实现钢渣的超微粉化后代替炭黑作为橡胶补强填料是极为可行。

笔者采用乙二醇与三乙醇胺为改性剂、无水乙醇为溶剂配制钢渣助磨剂,将钢渣助磨剂与钢渣混合后经行星式球磨机粉磨获得钢渣超微粉。利用钢渣超微粉取代部分炭黑制备钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料。考察了钢渣助磨剂配方与钢渣超微粉用量对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料力学性能的影响,并且分析其作用机理。

## 1 材料与试剂

钢渣为电炉渣,马钢(集团)控股有限公司生产,其化学成分如表 1 所示;丁苯橡胶(1502),安徽欧耐橡塑工业有限公司生产;炭黑(N220),工业纯,

中橡(马鞍山)化学工业有限公司生产;促进剂(NS),工业纯,华东助剂有限公司生产;硫磺,工业纯,临沂国奥化工有限公司生产;乙二醇,工业纯,上海晟俊实业投资有限公司生产;三乙醇胺( $C_6H_{15}O_3N$ ),工业纯,上海启祚化工有限公司生产;无水乙醇( $CH_3CH_2OH$ ),工业纯,上海振兴化工一厂生产;氧化锌( $ZnO$ ),工业纯,中外合资大连金石氧化锌有限公司生产;硬脂酸( $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ ),工业纯,临清市兴泰橡胶助剂有限公司生产。

表 1 电炉渣的化学成分

成分	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
质量分数/%	36.27	39.44	10.89	3.11	3.20	1.03
成分	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	S	
质量分数/%	4.28	0.46	0.73	0.161	0.124	

## 2 实验方法

### 2.1 材料的制备

首先,将乙二醇、三乙醇胺或乙二醇-三乙醇胺与无水乙醇进行复合获得钢渣助磨剂;其次,将钢渣助磨剂与钢渣进行混合后,利用行星式球磨机以转速 600 r/min 粉磨 90 min 获得钢渣超微粉;最后,将 100 g 丁苯橡胶薄通 5 次后利用密炼机以温度 70℃ 进行混炼 4 min,依次加入 3 g 氧化锌与 1 g 硬脂酸混炼 2 min;加入 30 g 炭黑与 20 g 钢渣超微粉混炼 2 min;加入 1 g 促进剂与 2 g 硫磺进行混炼 2 min 获得密炼胶,并将其薄通 8 次且打三角包 5 次后放置 12 h。取上述密炼胶 60 g 利用硫化机以硫化温度 145℃ 进行硫化 30 min 后放置 24 h 获得钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料,各试样的配方如表 2 所示。

表 2 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的配方

试样	钢渣超微粉			$m(\text{电炉渣})/\text{g}$	$m(\text{炭黑})/\text{g}$	$m(\text{丁苯橡胶})/\text{g}$	$m(\text{氧化锌})/\text{g}$	$m(\text{硬脂酸})/\text{g}$	$m(\text{促进剂})/\text{g}$	$m(\text{硫磺})/\text{g}$
	钢渣助磨剂									
	$V(\text{乙二醇})/\text{mL}$	$V(\text{三乙醇胺})/\text{mL}$	$V(\text{无水乙醇})/\text{mL}$							
0 <sup>#</sup>	0	0	0	0	30	100	3	1	1	2
1 <sup>#</sup>	0	0	0	20	30	100	3	1	1	2
2 <sup>#</sup>	0.20	0	0.10	20	30	100	3	1	1	2
3 <sup>#</sup>	0	0.20	0.10	20	30	100	3	1	1	2
4 <sup>#</sup>	0.05	0.05	0.05	10	40	100	3	1	1	2
5 <sup>#</sup>	0.10	0.10	0.10	20	30	100	3	1	1	2
6 <sup>#</sup>	0.15	0.15	0.15	30	20	100	3	1	1	2

### 2.2 性能测试与表征

依据《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性

能的测定标准》(GB/T 528—2009)测试拉伸强度和拉断伸长率;《硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度测

定标准(裤型、直角形、新月形试样)》(GB/T 529—2008)测试撕裂强度;《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)》(GB/T 531.1—2008)测试邵尔 A 硬度。

利用 LS-POP(9)型激光粒度仪测试粒度分布;利用 Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪测试组成结构;利用 D8 Advance 型 X 射线衍射仪测试矿物组成;利用 NANO SEM430 型场发射扫描电子显微镜测试微观形貌。

### 3 结果与分析

#### 3.1 钢渣助磨剂对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响

钢渣助磨剂对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响如表 3 所示。从表 3 可以看出,对比 1<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能,加入钢渣助磨剂的 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的拉伸强度、拉断伸长率、撕裂强度和邵尔 A 硬度均增加。说明加入钢渣助磨剂有利于提高钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能,当乙二醇用量为 0.10 mL、三乙醇胺用量为 0.10 mL 和无水乙醇用量为 0.10 mL 时,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能较好,即拉伸强度为 22.01 MPa、拉断伸长率为 605.27%、撕裂强度为 40.74 kN/m 和邵尔 A 硬度为 62。

表 3 钢渣助磨剂对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响

试样	拉伸强度/ MPa	拉断伸长率/ %	撕裂强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	邵尔 A 硬度
1 <sup>#</sup>	17.37	500.40	32.31	60
2 <sup>#</sup>	19.87	570.33	36.65	60
3 <sup>#</sup>	20.64	573.76	37.93	61
5 <sup>#</sup>	22.01	605.27	40.74	62

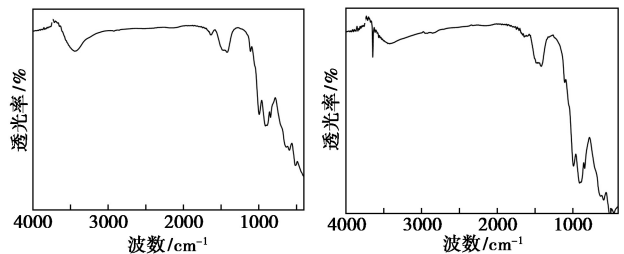
钢渣助磨剂对钢渣超微粉粒度分布的影响如表 4 所示。从表 4 中可以看出,未加钢渣助磨剂的 1<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒径大且分布不均,即  $d_{90} = 93.41 \mu\text{m}$ 、 $d_{50} = 35.19 \mu\text{m}$ 、 $d_{10} = 5.08 \mu\text{m}$  和  $d_{90} - d_{10} = 88.33 \mu\text{m}$ 。加入钢渣助磨剂的 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 和 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒径大幅减小且分布趋向均匀,说明钢渣助磨剂对电炉渣具有良好的粉碎效果与分散效果。2<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒径  $d_{90}$ 、 $d_{50}$  和  $d_{10}$  大于 3<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒径  $d_{90}$ 、 $d_{50}$  和  $d_{10}$ ,而 2<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒度分布  $d_{90} - d_{10}$  小于 3<sup>#</sup>

钢渣超微粉的粒度分布  $d_{90} - d_{10}$ ,说明以乙二醇与无水乙醇为钢渣助磨剂具有较好的分散效果,以三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂具有较好的粉碎效果。这是因为乙二醇是醇类物质,具有极性基团羟基,极性基团羟基吸附在电炉渣表面可以屏蔽剩余电荷,起到良好的分散效果;三乙醇胺的结构含有极性较强的—OH 和—NH<sub>2</sub>,—OH 和—NH<sub>2</sub> 吸附在电炉渣表面不仅可以平衡电炉渣因粉碎之后而产生的不饱和价键,而且可以促使电炉渣的裂缝趋向扩展,起到良好的粉碎效果。5<sup>#</sup> 钢渣超微粉的粒径最小且分布较为均匀,即  $d_{90} = 9.90 \mu\text{m}$ 、 $d_{50} = 3.30 \mu\text{m}$ 、 $d_{10} = 1.06 \mu\text{m}$  和  $d_{90} - d_{10} = 8.84 \mu\text{m}$ ,说明以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂,不仅具有良好的粉碎效果,而且具有良好的分散效果。

表 4 钢渣助磨剂对钢渣超微粉粒度分布的影响

试样	$d_{90}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{90} - d_{10}/\mu\text{m}$
1 <sup>#</sup> 钢渣超微粉	93.41	35.19	5.08	88.33
2 <sup>#</sup> 钢渣超微粉	13.28	6.54	4.85	8.43
3 <sup>#</sup> 钢渣超微粉	10.53	3.62	1.03	9.50
5 <sup>#</sup> 钢渣超微粉	9.90	3.30	1.06	8.84

1<sup>#</sup> 钢渣超微粉与 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉的傅里叶变换红外光谱如图 1 所示。从图 1 可以看出,对比 1<sup>#</sup> 钢渣超微粉,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉在 1400 cm<sup>-1</sup> 处的 C—S—H 凝胶特征吸收峰与 960 cm<sup>-1</sup> 处的沸石类相的特征吸收峰均明显增强,说明以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂有利于电炉渣中的凝胶物质与玻璃体的细化。同时,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉在 3600 cm<sup>-1</sup> 处新增 N—H 伸缩振动特征吸收峰,说明以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂中的官能团较好地吸附在电炉渣表面,提高了电炉渣的粉碎效果与分散效果。



(a) 1<sup>#</sup> 钢渣超微粉

(b) 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉

图 1 1<sup>#</sup> 钢渣超微粉与 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉的傅里叶变换红外光谱

由表 3、表 4 和图 1 可以看出,以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣助磨剂,有利于钢渣超微粉

的粒径变小且分布均匀,提高钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能,这是因为一方面钢渣超微粉的粒径越小、比表面积越大,其具有的物理吸附效果越好,可以建立牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结构;另一方面钢渣超微粉的粒径分布越均匀,其在丁苯橡胶中的分散效果就越好,可以提高丁苯橡胶对钢渣超微粉的包裹效果。

### 3.2 钢渣超微粉用量对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响

钢渣超微粉用量对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响如表 5 所示。从表 5 中可以看出,对比 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 和 6<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能,当乙二醇、三乙醇胺、无水乙醇和电炉渣的用量一定时,随着钢渣超微粉用量的增加,钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的拉伸强度与拉伸伸长率呈先增加后降低的趋势,撕裂强度与邵尔 A 硬度呈稳定的趋势。当钢渣超微粉用量为 0.30 mL+20 g,其中乙二醇用量为 0.10 mL、三乙醇胺用量为 0.10 mL、无水乙醇用量为 0.10 mL 和电炉渣质量为 20 g 时,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能较好。同时,对比 0<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的拉伸强度、拉伸伸长率和邵尔 A 硬度均大幅提高,撕裂强度极为接近,说明钢渣超微粉可以取代部分炭黑作为橡胶补强填料,适量的钢渣超微粉可以大幅提高钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能。

表 5 钢渣超微粉用量对钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料性能的影响

试样	拉伸强度/ MPa	拉伸伸长率/ %	撕裂强度/ (kN·m <sup>-1</sup> )	邵尔 A 硬度
0 <sup>#</sup>	17.84	489.83	41.57	59
4 <sup>#</sup>	20.62	566.79	41.01	61
5 <sup>#</sup>	22.01	605.27	40.74	62
6 <sup>#</sup>	20.31	499.78	40.67	62

不同钢渣超微粉用量钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面扫描电镜图如图 2 所示。从图 2 中可以看出,0<sup>#</sup> 丁苯橡胶复合材料的断面较为平整,说明未加钢渣超微粉的 0<sup>#</sup> 丁苯橡胶复合材料中丁苯橡胶形成的框架结构牢固度较低。4<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面呈现粗糙现象,其表面不存在钢渣超微粉的团聚与堆积,说明钢渣超微粉较好地分散于丁苯橡胶中,丁苯橡胶对钢渣超微粉的有效包裹有利于形成牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结

构。对比 4<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面呈现显著粗糙现象,其表面依然不存在钢渣超微粉的团聚与堆积,进一步说明粒径小且分散性好的钢渣超微粉有利于形成牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结构。6<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面依然呈现显著粗糙现象,其表面存在钢渣超微粉的团聚与堆积,出现钢渣超微粉/丁苯橡胶的不相容界面,这是因为钢渣超微粉用量过多,导致钢渣超微粉在丁苯橡胶中的分散性降低,易出现团聚与堆积的现象,降低钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能。

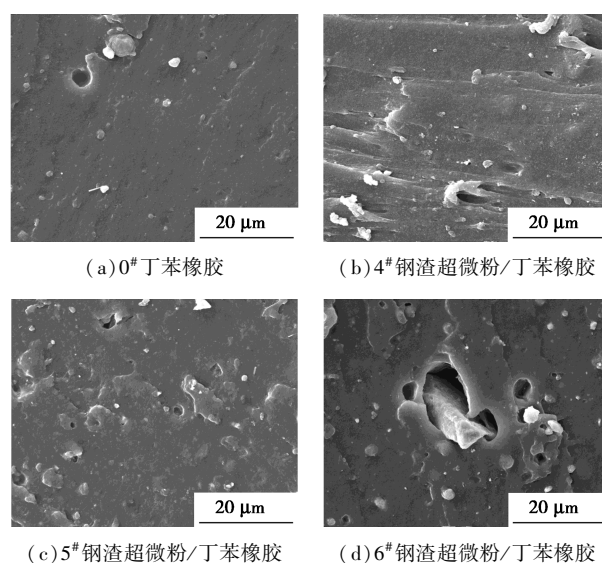


图 2 不同钢渣超微粉用量钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的断面扫描电镜图

5<sup>#</sup> 钢渣超微粉、丁苯橡胶和 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的 X 射线衍射图如图 3 所示。从图 3 中可以看出,5<sup>#</sup> 钢渣超微粉含有大量 Ca(OH)<sub>2</sub>,说明钢渣超微粉属于碱性橡胶补强填料。0<sup>#</sup> 丁苯橡胶呈现多个衍射强度高且峰型宽的“馒头峰”,说明丁苯橡胶中存在非晶态结构。5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料不仅存在钢渣超微粉的特征衍射峰,而且存在丁苯橡胶的特征衍射峰,说明钢渣超微粉与丁苯橡胶之间以物理方式构建牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结构;同时 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料中钢渣超微粉的特征衍射峰强度小于 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉的特征衍射峰强度,而 5<sup>#</sup> 钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料中丁苯橡胶的特征衍射峰强度与丁苯橡胶的特征衍射峰强度基本一致,说明丁苯橡胶对钢渣超微粉具有良好的包裹效果。

综合分析表 5、图 2 和图 3 可以看出,当钢渣超微粉用量为 0.30 mL+20 g、炭黑质量为 30 g 时,钢

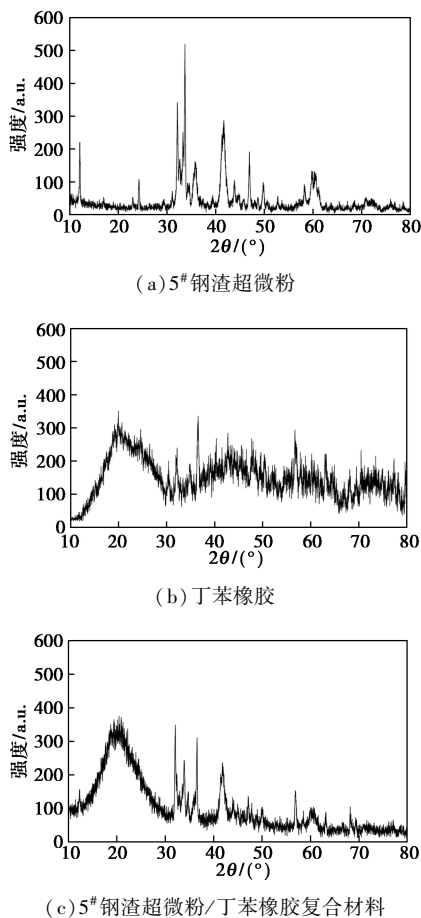


图3 5#钢渣超微粉、丁苯橡胶和5#钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的X射线衍射图

渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能最优,这是因为钢渣超微粉用量/炭黑用量过小,导致不能形成牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结构;钢渣超微粉用量/炭黑用量过大,造成钢渣超微粉的团聚与堆积,丁苯橡胶的包裹效果下降,导致钢渣超微粉/丁苯橡胶不相容界面的出现。

#### 4 结论

(1)当乙二醇用量为0.10 mL、三乙醇胺用量为0.10 mL、无水乙醇用量为0.10 mL、电炉渣质量为20 g和炭黑质量为30 g时,钢渣超微粉/丁苯橡胶复合材料的力学性能较好,即拉伸强度为22.01 MPa、拉断伸长率为605.27%、撕裂强度为40.74 kN/m和邵尔A硬度为62。

(2)以乙二醇、三乙醇胺与无水乙醇为钢渣研磨剂可以改善钢渣超微粉的粒度分布,有利于钢渣超微粉的物理吸附效果与分散效果,提高钢渣超微粉/丁苯橡胶结构的牢固度与丁苯橡胶包裹钢渣超微粉的效果。

(3)适合的钢渣超微粉用量有利于提高力学性能,当钢渣超微粉用量过少时,不能形成牢固的钢渣超微粉/丁苯橡胶结构;当钢渣超微粉用量过多时,造成钢渣超微粉的团聚与堆积,丁苯橡胶的包裹效果下降,出现钢渣超微粉/丁苯橡胶不相容界面。

#### 参考文献

- [1] Sun P, Guo Z C. Sintering preparation of porous sound-absorbing materials from steel slag [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2015, 25(7): 2230-2240.
- [2] Zhou Y Y, Li Y, Cang D Q, *et al.* Investigation of the sintering mechanism of steel slag-based ceramics [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 584-586: 1202-1207.
- [3] Zong Y B, Liu Z B, Hou J J, *et al.* Investigation of glass-ceramics based on steel slag under various sintering atmospheres [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1065-1069: 1784-1970.
- [4] Liu Z B, Zong Y B, Feng H, *et al.* Influence of ferrum on crystallization and microstructure of steel slag based glass-ceramics [J]. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 2015, 74(1): 29-34.
- [5] Xiang L, Xiang Y, Wang Z G, *et al.* Influence of chemical additives on the formation of super-fine calcium carbonate [J]. *Powder Technol*, 2002, 126(2): 129-133.
- [6] Morel F, Bounor-Legaré V, Espuche E, *et al.* Surface modification of calcium carbonate nanofillers by fluoro- and alkyl-alkoxysilane: Consequences on the morphology, thermal stability and gas barrier properties of polyvinylidene fluoride nanocomposites [J]. *Eur Polym J*, 2012, 48(5): 919-929.
- [7] 张浩, 黄新杰, 宗志芳, 等. 基于吸附性能的生物基多孔活性炭制备方案的响应面法优化 [J]. *材料工程*, 2017, 45(6): 67-72.
- [8] Makela M, Watkins G, Poykio R, *et al.* Utilization of steel, pulp and paper industry solid residues in forest soil amendment: Relevant physicochemical properties and heavy metal availability [J]. *J Hazard Mater*, 2012, 207-208: 21-27.
- [9] Navarro M C, Pérez-Sirvent C, Martínez-Sánchez M J, *et al.* Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone [J]. *J Geochem Explor*, 2008, 96(2-3): 183-193.
- [10] Chen L, Lu L, Wu D J, *et al.* Silicone rubber/graphite nanosheet electrically conducting nanocomposite with a low percolation threshold [J]. *Polym Compos*, 2007, 28(4): 493-498.
- [11] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, *et al.* Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(5): 1551-1561.
- [12] 杨涛涛, 范宏, 卜志扬, 等. 蒙脱土填充补强丁苯橡胶及对橡胶硫化特性的影响 [J]. *复合材料学报*, 2005, 22(2): 38-45.
- [13] Raza M A, Westwood A, Brown A, *et al.* Characterisation of graphite nanoplatelets and the physical properties of graphite nanoplatelet/silicone composite for thermal interface applications [J]. *Carbon*, 2011, 49(13): 4269-4279.
- [14] Zhang Y J, Kang L, Liu L C, *et al.* Synthesis of a novel alkali-activated magnesium slag-based nanostructural composite and its photocatalytic performance [J]. *Appl Surf Sci*, 2015, 331: 399-406. ■