

文章编号:1000-582X(2002)07-0079-05

# 氧化铝基复合材料出铁沟预制件的研制

高家诚<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 陈浩<sup>2</sup>, 王勇<sup>1</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆钢铁集团公司材料总厂, 重庆 400040)

**摘要:**研究了防裂剂、减水剂、碳化硅、石墨和钢纤维等加入量与材料性能之间的关系。通过孔隙率、抗弯强度、抗压强度、冷热循环次数、耐渣铁腐蚀等性能, 以及组织结构等的测试分析和工业性试验, 研制出了性价比优异的氧化铝基复合材料出铁沟预制件。铁水线的最优配方为(%):  $Al_2O_3 - 14SiC - 5G - 4SiO_2 - 2$  微粉 - 1 白泥 - 6 水泥; 渣线的最优配方为(%):  $Al_2O_3 - 16SiC - 5G - 4SiO_2 - 2$  微粉 - 1 白泥 - 6 水泥。均外加 0.15 三聚磷酸钠 - 3B 铝粉 - 2 钢纤维。文中还探讨了氧化铝基复合材料出铁沟预制件的损毁机理。

**关键词:**氧化铝; 复合材料; 铁沟预制件; 钢纤维

**中图分类号:** TF065.1

**文献标识码:** A

现代高炉炼铁技术通过提高风温 ( $> 1320\text{ }^\circ\text{C}$ ), 提高风压 ( $> 0.3\text{ MPa}$ ), 提高鼓风的富氧量, 以及喷吹碳氢化合物和煤粉等措施, 大大地提高了高炉的生产能力。但也导致了铁水渣温度上升, 铁渣处理量增大, 出铁速度加快和出铁次数增多, 使出铁沟耐火材料的侵蚀速度加快, 冲刷破坏程度增加, 筑衬与修补的费用大大增加, 原来普通的铁沟料已远远不能满足高炉生产的需要。在这种情况下, 促使了出铁沟用耐火材料的迅速发展, 出现了一系列品种各异、性能更优的耐火材料。其中, 尤以高技术浇注料的开发应用最为活跃<sup>[1]</sup>。

高炉出铁沟耐火材料的使用寿命与高炉的结构和操作、高炉炉渣的碱度、渣铁比、出铁口角度、出铁沟的结构和尺寸外形、出铁沟的筑衬方法、烘烤和使用操作、出铁沟冷却系统的设置等因素有关。重钢由于矿石的原因, 铁水的硫、磷含量高, 渣量大, 炉渣碱度高,

这对出铁沟耐火材料的使用很不利<sup>[2]</sup>。目前重钢各高炉的外购铁沟预制件的抗铁水冲刷能力弱、浸蚀速度快、使用寿命较短, 流铁嘴的普遍寿命在一周至半个月左右; 且炸裂现象比较严重, 有些流铁嘴使用两三次就出现炸裂、漏铁的现象等<sup>[3]</sup>。这样大大地制约了高炉的正常生产, 且人为地增加了维护工人的劳动强度, 更无法适应高炉生产工艺技术进步的需要。为此, 必须进行高性能、长寿命氧化铝基复合材料出铁沟预制件的研制与开发。

## 1 试验材料及方法

试验用主要原材料的名称、成分、性能和生产厂家列入表 1 中。表 1 中的主要成分和性能为实际测量值。

表 1 原材料主要成分及性能测量值

| 原料名称 | 主要成分/%                               | 主要性能   | 生产厂家              |
|------|--------------------------------------|--|-------------------|
| 棕刚玉  | $Al_2O_3 - 95.50$                    | 密度 $3.87\text{ g/cm}^3$ , 耐火度 $1850\text{ }^\circ\text{C}$   | 太原棕刚玉公司           |
| 碳化硅  | $SiC - 93.40$                        | 密度 $3.18\text{ g/cm}^3$ , 粒径 $0\sim 1\text{ mm}$   | 中国第七砂轮厂           |
| 石墨   | $C - 90.12$                          | 挥发分 $1.62\%$ , 水分 $0.51\%$ , 粒径 $150\text{ }\mu\text{m}$   | 鸡西梨树湾厂            |
| 微粉   | $SiO_2 - 92.90$<br>$Al_2O_3 - 99.63$ | $> 45\text{ }\mu\text{m}$ 为 $4.2\%$ , 比表面 $20.1\text{ m}^2/\text{g}$ , $\text{pH}7.1$<br>密度 $3.95\text{ g/cm}^3$ , 粒径 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ | 贵州铁合金厂<br>河南汴和耐火厂 |
| 白泥   | $SiO_2 - 50.70$<br>$Al_2O_3 - 33.30$ | 密度 $2.59\text{ g/cm}^3$ , 耐火度 $\geq 1730\text{ }^\circ\text{C}$  | 广西白泥厂             |
| 水泥   | $Al_2O_3 - 79.60$<br>$CaO - 18.30$   | 初凝时间 $40\text{ min}$ , 终凝时间 $4\text{ h}$ ; $24\text{ h}$ 抗压强度 $25\text{ MPa}$ ,<br>$24\text{ h}$ 抗弯强度 $7\text{ MPa}$                           | 河南汴和耐火厂           |
| 钢纤维  | $1Cr25Si2$                           | $1.0\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 25\text{ mm}$   | 衡阳城南纤维厂           |
| 防裂剂  | $Al - 98$                            | 粒度 $\leq 88\text{ }\mu\text{m}$  | 重庆山城铁合金厂          |
| 减水剂  | $Na_5P_3O_{10}$                      | 工业纯  |                   |

收稿日期: 2002-03-11

作者简介: 高家诚(1947-), 男, 重庆人, 重庆大学教授。主要从事粉末复合材料研究。

试验的工艺流程,即按氧化铝基复合材料铁沟预制件的试验研究方案进行配料混合、成形和烘干,然后对试样进行密度、强度、尺寸变化率、热稳定性、抗渣蚀性,以及其组织结构和工业应用等试验。试验方法按 YB/T52005203-93 和 YB/T2206.2-98 进行,试样的组织结构用 KYKY-1000 型扫描电镜和 D/max-1200 型 X 射线衍射仪进行分析。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 试样的主要性能

试验研究了添加减水剂、防裂剂、石墨、钢纤维和

碳化硅等对氧化铝基复合材料预制件孔隙度、密度、强度和尺寸等性能的影响,试验结果列于表 2~6 中。表中所有数据均为 3 组试样测试结果的平均值。 $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为 110 °C × 24 h 和 1 450 °C × 24 h 的孔隙度(%);  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为 110 °C × 24 h 和 1 450 °C × 24 h 的密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\sigma_{\text{bb}1}$  和  $\sigma_{\text{bb}2}$  分别为 110 °C × 24 h 和 1 450 °C × 2 h 的抗弯强度(MPa);  $\sigma_{\text{bc}}$  为 1 450 °C × 2 h 的抗压强度(MPa);  $\Delta L$  为 1 450 °C × 2 h 的线性变化率(%);  $N$  为 1 100 °C × 20 min 水冷的循环次数。 $h$  为 1 450 °C × 2 h 下坩埚法抗渣蚀试验后浸蚀层的厚度(mm)。

表 2 减水剂对材料性能的影响

| $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}/\%$ | $\theta_1/\%$ | $\theta_2/\%$ | $\rho_1/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\rho_2/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\sigma_{\text{bb}1}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bb}2}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bc}}/\text{MPa}$ | $\Delta L/\%$ |
|---|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 0.15                                    | 16.21         | 17.73         | 2.75                                 | 2.66                                 | 4.82                             | 4.94                             | 12.96                           | 0.109         |
| 0.20                                    | 14.51         | 16.01         | 2.86                                 | 2.75                                 | 4.98                             | 5.14                             | 13.97                           | 0.168         |

表 3 防裂剂对材料性能的影响

| Al 粉末 | $\theta_1/\%$ | $\theta_2/\%$ | $\rho_1/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\rho_2/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\sigma_{\text{bb}1}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bb}2}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bc}}/\text{MPa}$ | $\Delta L/\%$ |
|-------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 3B    | 12.68         | 14.15         | 2.91                                 | 2.82                                 | 4.72                             | 4.84                             | 13.13                           | 0.063         |
| 4B    | 15.47         | 17.06         | 2.78                                 | 2.71                                 | 4.97                             | 5.02                             | 13.46                           | 0.122         |
| 5B    | 17.94         | 19.40         | 2.73                                 | 2.59                                 | 5.02                             | 5.26                             | 13.81                           | 0.233         |

表 4 石墨对材料性能的影响

| G/% | $\theta_1/\%$ | $\theta_2/\%$ | $\rho_1/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\rho_2/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\sigma_{\text{bb}1}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bb}2}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bc}}/\text{MPa}$ | $\Delta L/\%$ | $N/\text{次}$ | $h/\text{mm}$ |
|-----|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| 5   | 12.73         | 14.20         | 2.87                                 | 2.80                                 | 4.60                             | 4.90                             | 12.95                           | 0.009         | 18           | 1.5           |
| 6   | 13.28         | 14.76         | 2.80                                 | 2.72                                 | 3.55                             | 4.00                             | 12.29                           | 0.237         | 20           | 2.0           |

表 5 钢纤维对材料性能的影响

| 1Cr25Si2/% | $\theta_1/\%$ | $\theta_2/\%$ | $N/\text{次}$ | $h/\text{mm}$ |
|------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0          | 2.62          | 4.40          | 17           | 1.75          |
| 2          | 3.91          | 4.39          | 21           | 1.67          |

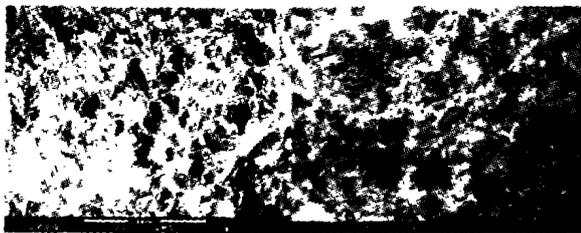
表 6 碳化硅对材料性能的影响

| SiC/% | $\theta_1/\%$ | $\theta_2/\%$ | $\rho_1/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\rho_2/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | $\sigma_{\text{bb}1}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bb}2}/\text{MPa}$ | $\sigma_{\text{bc}}/\text{MPa}$ | $\Delta L/\%$ | $N/\text{次}$ | $h/\text{mm}$ |
|-------|---------------|---------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| 14    | 12.91         | 14.44         | 2.84                                 | 2.77                                 | 3.97                             | 4.37                             | 12.34                           | 0.160         | 22           | 0.75          |
| 15    | 13.10         | 14.52         | 2.83                                 | 2.75                                 | 4.18                             | 4.53                             | 12.90                           | 0.069         | 17           | 1.25          |
| 16    | 13.75         | 14.28         | 2.78                                 | 2.75                                 | 4.78                             | 5.12                             | 12.88                           | 0.047         | 20           | 0.50          |
| 17    | 14.40         | 14.91         | 2.73                                 | 2.71                                 | 4.59                             | 4.93                             | 12.57                           | 0.085         | 14           | 0.50          |
| 18    | 15.67         | 16.17         | 2.68                                 | 2.62                                 | 4.67                             | 4.28                             | 11.59                           | 0.261         | 6            | 0.50          |
| 19    | 16.49         | 21.99         | 2.57                                 | 2.46                                 | 4.55                             | 3.96                             | 9.49                            | 0.046         | 8            | 0.50          |

据文献[4]介绍,当减水剂用量为 0.15% ~ 0.20% 时,材料的烘干抗压强度最佳。从表 2 中可以看出,随着减水剂的加入量从 1.5‰增加到 2.0‰时,试样的孔隙度明显减少,密度则随之增大,强度亦随之增加。这是因为聚磷酸盐能阻止微粉的团聚,使之更充分地填充孔隙,提高水的利用率;但减水剂的加入量太多,会使浇注料的流动性变差,振动难致密,导致强度下降,甚至出现开裂现象。从表 3 中可以看出,随着防裂剂的加入量从 3B 增加到 5B 时,试样的孔隙度明显增大,密度则随之减少,但强度则随之增加。这是因为铝粉的用量太大,其化学反应强烈,产生的气体较多,即留下的排气通道就多,有利于快干,但密度会下降<sup>[5]</sup>。从表 4 中可以看出,随着鳞片石墨的加入量从 5% 增加到 6% 时,试样的孔隙度明显增大,密度则随之减少,强度亦随之下降。这是因为碳对溶渣和铁水均不浸润,可防止其渗入到耐火材料内衬中去;另外,石墨碳的热膨胀系数低,导热系数大,可降低耐火材料剥落和开裂;但碳对氧气敏感,在空气与溶渣接触面和长期暴露于大气中的出铁沟背面,均易被氧化而消失,使结构劣化损坏;碳加入量太少时,其侵蚀指数又较小<sup>[6-9]</sup>。从表 5 中可以看出,添加钢纤维后,1 450 °C 烧结后试样的强度与未加时的强度几乎没有变化,但烘干强度却提高了近 60%,抗热震性能有明显地提高。从表 6 中可以看出,随着碳化硅的加入量从 16% 增加到 19% 时,试样的孔隙度明显增大,密度则随之减少,烘干强度和渣蚀情况变化不大,但 1 450 °C 烧结强度有所下降。这是因为碳化硅可以防止碳的氧化,提高耐火材料的抗氧化性;碳化硅热膨胀系数仅为氧化铝的一半,且导热性好,可以提高耐火材料的抗热震性能等<sup>[10]</sup>。

2.2 试样的组织形貌

试样经 1 450 °C × 2 h 烧结后的 SEM 形貌如图 1 所示。从图 1 中可以看出,铁水线和渣线组织均致密,孔隙小且分布均匀。其主要物相为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 刚玉相,其次为 SiC 相,还有石墨 C、莫来石 A<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 和石英 SiO<sub>2</sub> 等矿相结构。如图 2 所示。



(a) 铁水线 (b) 渣线

图 1 试样的 SEM 形貌

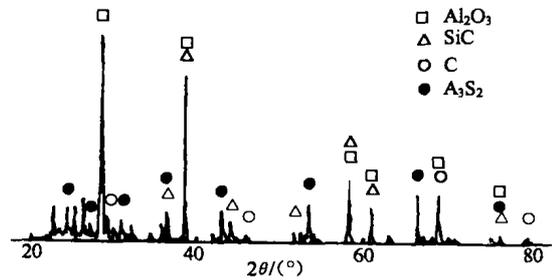


图 2 X 射线衍射谱

出铁沟浇注料直接与铁水接触,表面还暴露在空气中,为了抵抗氧化铁的浸蚀,综合分析 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - FeO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相图可知,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 的比值应大于莫来石组成的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 之比 2.55,并且 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 之比值越大,其抵抗氧化浸蚀的能力越强<sup>[11]</sup>。因为刚玉中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 量比铝钒土中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 高,当然 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 的比值也就高。在本试验中,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 的比值均大于 13,所以材料抗铁水浸蚀的能力很强。为了提高出铁沟浇注料的抗渣蚀性,就要提高其体积密度,降低空隙率。但随着空隙率的下降和体积密度的提高,铁沟预制件的抗热震性能却会下降,会严重影响其使用寿命。由于石墨很难被高炉渣浸润,又具有良好的导热性,因而能够同时提高铁沟预制件的抗渣和热震性能。事实上,石墨 C 阻止了渣中的 CaO、MgO 与铁沟中 SiO<sub>2</sub> 反应形成黄长石低熔相,以及铁渣中的 CaO、MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与铁沟中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应形成疏松的复合尖晶石结构等<sup>[12]</sup>。但往往还应加入 SiC 来防止 C 的氧化。试样被渣蚀试验后几乎看不到浸蚀层,但渣线比铁水线更好。如图 3 所示。



(a) 铁水线 (b) 渣线

图 3 抗渣蚀试验后的形貌

2.3 工业试验结果

根据实验室试验研究的结果,我们分别制作了铁水槽和流铁嘴,在重钢高炉上进行了工业性应用试验,试验的结果列表 7 中。

表 7 工业试验情况

| 编号 | 使用部位    | 使用日期                | 使用天数 | 通铁量/万 t | 修补情况 |
|----|---------|---------------------|------|---------|------|
| 1  | 4 高炉铁水沟 | 19981210 ~ 19990527 | 170  | 8.61    | 后期修补 |
| 2  | 4 高炉铁水沟 | 19990514 ~ 19991025 | 164  | 8.31    | 后期修补 |
| 3  | 4 高炉流铁嘴 | 19981215 ~ 19990416 | 123  | 6.23    | 不修补  |
| 4  | 4 高炉铁水沟 | 19991217 ~ 20000609 | 175  | 8.86    | 后期修补 |
| 5  | 4 高炉铁水沟 | 20000105 ~ 20000704 | 183  | 9.26    | 后期修补 |
| 6  | 3 高炉流铁嘴 | 19991107 ~ 20000208 | 92   | 10.43   | 不修补  |
| 7  | 3 高炉铁水沟 | 19991113 ~ 20000315 | 124  | 11.05   | 后期修补 |
| 8  | 3 高炉铁水沟 | 19991113 ~ 20000315 | 124  | 11.05   | 后期修补 |
| 9  | 5 高炉流铁嘴 | 19991211 ~ 20000119 | 38   | 8.94    | 不修补  |

从表 7 中可以看出,采用本试验研究的铁沟预制件在重钢 3、4、5 号高炉上的实际使用效果是理想的,达到了预期的目标。我们还将某厂生产的铁沟预制件与本研究制备的铁沟预制件在重钢 4 号高炉上进行了对比试验。试验表明,流铁嘴在同样不修补的情况下,对比件出现炸裂和快速浸蚀损毁,其平均使用寿命为 15 d;而试制件则被缓慢浸蚀和冲刷,平均寿命达 123 d;寿命延长了 108 d。出铁槽在同样后期修补的情况下,对比件出现快速开裂和浸蚀,其平均使用寿命为 110 d;而试制件则被缓慢浸蚀和冲刷,平均寿命达 173 d;寿命延长了 63 d。值得指出的是,本试制件与对比件价格相当,均约为 6 500 元/t。即其经济效益和社会效益是十分明显的。

### 3 结 论

1) 研制出了性价比优异的氧化铝基复合材料出铁沟预制件。经重庆钢铁集团公司炼铁厂 3、4、5 号高炉使用,流铁嘴的平均寿命达 123 d,出铁槽的平均寿命达 173 d。

2) 在本试验条件下,铁水线的最优配方为(%):  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 14\text{SiC} - 5\text{G} - 4\text{SiO}_2 - 2$  微粉 - 1 白泥 - 6 水泥;渣线的最优配方为(%):  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 16\text{SiC} - 5\text{G} - 4\text{SiO}_2 - 2$  微粉 - 1 白泥 - 6 水泥。均外加 0.15 三聚磷酸钠 - 3B 铝粉 - 2 钢纤维,且微粉  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$  为 2:1。

3) 在本试验条件下,随着防裂剂铝粉、碳化硅和石墨加入量的增加,减水剂三聚磷酸钠加入量的减少,铁沟预制件的孔隙度增大、密度降低。 $\text{SiC} + \text{C}$  的加入提高了材料的抗渣和热震性能,钢纤维的加入使材料

的烘干强度提高了 60%。

### 参考文献:

- [1] 李庭寿. 中国钢铁工业用耐火材料的技术进展[J]. 耐火材料, 2000, (1): 7 - 8.
- [2] 王伟. 氧化铝基复合材料出铁沟预制件的研制与开发[D]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2001.
- [3] DSIHKA A. Slag Penetration Property to  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{C}$  Material[J]. Shimagawa Technical Report, 1999, 42(2): 39 - 50.
- [4] 蒋明学. 不定形耐火材料工艺学[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1997.
- [5] 徐延庆. 第三届国际耐火材料学术会议评述[J]. 耐火材料, 1999, (2): 5 - 9.
- [6] 朱伯铨. 含碳浇注料的现状与发展[J]. 耐火材料, 1999, (1): 50 - 54.
- [7] 郇力. 出铁沟高温自流修补料的研制与应用[J]. 耐火材料, 1999, (1): 31 - 34.
- [8] 杨志红. 石墨改性处理对浇注料性能的影响[J]. 耐火材料, 2000, (6): 331 - 334.
- [9] WILLIAMS E. Castables with Improved Spalling and Thermal Shock Resistance[J]. Electric Furnace Conference Proceedings, 1998, (2): 245 - 241.
- [10] 桂明玺. 碳化硅耐火材料的特点和用途[J]. 国外耐火材料, 1999, (8): 42 - 47.
- [11] 王维帮. 耐火材料工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 86 - 119.
- [12] 李晓明. 微粉与新型耐火材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 223 - 240.

## Alumina – based Composite Materials for Prefabricated Iron Runner

GAO Jia - cheng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Materials Factory, Chongqing Iron and Steel Company, Chongqing 400040, China)

**Abstract:** The relationship between the properties of the composite and the addition of the preventing crack additives, dispersion agent, SiC, graphite, stainless steel fiber have been researched. Finally, alumina – based composite materials used for prefabricated iron runner with better ratio of properties and price has been developed by the studying of the properties and microstructure of alumina based composite materials. The best composition for the iron line is  $Al_2O_3 - 14\% SiC - 5\% G - 4\% SiO_2 - 2\% \text{micropoeder} - 1\% \text{white clay} - 6\% \text{cement}$ ; the best composition for the slag line is  $Al_2O_3 - 16\% SiC - 5\% G - 4\% SiO_2 - 2\% \text{micropoeder} - 1\% \text{white clay} - 6\% \text{cement}$ ; addition of both is  $0.15\% Na_5P_3O_{10} - 3B \text{ aluminum powder} - 2\% \text{stainless steel fiber}$ . The mechanism on the composite materials eroded by molten iron has also been discussed.

**Key words:** alumina; composite; prefabricated iron runner; steel fiber

(责任编辑 李胜春)

(上接第 74 页)

## An Attentive Problem of 35 kV Power Lines in Mountain Area on Protecting Against

YUAN Tao, LIU Yu - gen, CHEN Xian - lu

(Key Laboratory of High Voltage Engineer and Electrical New Technology, Ministry of Education,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To counteract capacitive current and resume power system, the neutral point of 35 kV power system at the mountainous area is grounding through the arc winding widely. In fact, there is great difficult in selecting the arc winding to satisfy the requirement of system. In a 35 kV power system which neutral point is grounding through the arc winding, the capacitance current are measured in site when a single – phase is grounding. From the measure data, the imbalance of three – phase voltage whether the arc winding exist or not and the operating situation of arc winding are discussed, and bring forward an attentive problem about operation of arc winding and decrease of lightning outage rates.

**Key words:** arc winding; imbalance of three – phase voltage; lightning outage rate

(责任编辑 陈移峰)