

## 基于正交试验和神经网络的新型充填胶凝材料配比优化

李立涛<sup>1</sup>, 杨志强<sup>1,2</sup>, 高 谦<sup>1</sup>

(1. 金属矿山高效开采与安全教育国家重点实验室, 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:** 针对南谿河铁矿超细全尾砂, 利用高炉矿渣、生石灰、芒硝和无机盐材料, 进行了全尾砂充填胶凝材料优化配方正交试验。根据极差分析确定生石灰添加量 6% 的基础上, 以试验数据为学习样本, 建立了新胶凝材料配方的神经网络模型, 开展激发材料掺量对充填体强度预测与影响规律研究。结果表明, 对充填体 28d 强度影响最大因素是生石灰, 其次是半水石膏, 芒硝最小。综合考虑胶凝材料成本以及南谿河铁矿采矿方法对充填体强度要求, 确定了南谿河全尾砂充填胶凝材料的优化配方是: 生石灰 6%, 半水石膏 18%, 芒硝 1.2%, NaCl 0.6%, CaCl<sub>2</sub> 0.4% 和矿渣微粉 73.8%。采用优化配方进行验证试验, 得到胶结充填体 28 d 的抗压强度达到 2.873MPa, 与正交试验中充填体强度试验的误差仅为 5%, 由此证明, 南谿河铁矿全尾砂充填胶凝材料优化配方具有一定的可靠性。

**关键词:** 矿渣微粉; 正交试验; 极差分析; 神经网络; 最优配比; 充填采 3 矿

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2018.03.024

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2018) 03-0114-07

充填采矿法由于其诸多优点, 成为二十一世纪矿山无废绿色开采的首选开采技术<sup>[1-2]</sup>。不仅有色、黄金等贵重金属矿山的充填法采矿比例在扩大<sup>[3-5]</sup>, 铁矿的充填法矿山数量也逐年增加<sup>[6]</sup>。然而制约充填采矿法广泛应用的一大问题在于其采用水泥作为充填胶凝材料而导致采矿成本居高不下, 并且对于铁矿来说, 其全尾砂粒度较细, 含泥量高, 不仅水泥胶结充填体强度低, 而且充填料浆的流动性差, 因此寻求一种低成本和高性能的全尾砂新型充填胶凝材料替代水泥, 是提高充填体强度, 改善料浆管道输送性能, 降低铁矿充填采矿成本的重要途径<sup>[7-8]</sup>。近年来, 利用水淬渣以及脱硫灰渣等工业固体废弃物制备新型复合胶结材料屡见报道<sup>[9-11]</sup>。杨志强等在对全尾砂充填胶凝材料以及脱硫灰渣研究的基础上, 开展了烧结脱硫灰渣制备新型充填胶凝材料试验研究<sup>[12]</sup>。高

谦等人深入研究了超细全尾砂新型充填胶凝材料的水化机理与性能<sup>[13]</sup>。孙光华、史俊伟等人基于正交试验开展了充填胶凝材料配比的优化决策<sup>[14-16]</sup>。魏微等人采用 BP 神经网络模型, 进行了胶结充填体强度预测研究<sup>[17-18]</sup>。本文针对南谿河铁矿超细全尾砂充填料以及新型充填胶凝材料配料, 采用正交试验获得样本数据, 运用极差分析结果, 结合训练后的高精度神经网络模型进行预测最优配比, 开展南谿河铁矿全尾砂新型充填胶凝材料最优配比决策研究, 由此获得了满足南谿河铁矿充填法采矿强度要求的新型充填胶凝材料。

## 1 试验材料

(1) 矿渣微粉。试验选用唐山钢铁公司炼铁排放的水淬渣, 由唐龙新型建材有限公司生产的矿渣微粉。唐钢公司的高炉水淬渣的化学成分见表 1。

收稿日期: 2016-09-28

基金资助: 国家高技术研究发展计划 (863) (SS2012AA062405) 资助

作者简介: 李立涛 (1989—), 男, 博士研究生。

通讯作者: 高谦 (1956—), 男, 教授, 博士研究生导师。

表 1 唐钢高炉水淬渣化学成分 /%

Table 1 The chemical analysis results of Tang steel blast furnace slag

| CaO   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cl-  | MgO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S <sup>2-</sup> | SO <sub>3</sub> | 其他   |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|-----------------|-----------------|------|
| 38.16 | 33.38            | 16.23                          | 0.44                           | 0.03 | 10.10 | 0.62                           | 0.17            | 0.07            | 0.08 |

根据中国国家标准 GB203《用于水泥中粒化高炉矿渣》规定,高炉矿渣质量系数 K 为:

$$K = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{TiO}_2} = \frac{38.16 + 10.10 + 16.23}{33.38 + 0.44 + 0} = \frac{64.49}{33.82} = 1.91$$

国标规定作为水泥添加料的高炉矿渣质量系数 K 不应小于 1.2,唐钢高炉水淬渣的质量系数达到 1.91,属于质优的矿渣微粉。

(2) 激发剂材料。试验采用的生石灰来自唐山地区的高钙石灰, CaO 含量大于 78%, 半水石膏取自唐山陡河电厂湿法脱硫排放的二水石膏, 采用不高于 800℃ 的高温脱去结晶水后获得的半水石膏, 其中 SO<sub>3</sub> 含量大于 40%。工业芒硝、NaCl、CaCl<sub>2</sub> 等外加剂材料均为市场上购买。

(3) 全尾砂。本研究是针对南铭河铁矿开发适合其现场工业充填所用胶凝材料, 因此试验骨料采用南铭河铁矿选矿全尾砂, 尾砂取自选厂排出管道口, 经烘干或者露天晾晒, 获取干燥的尾砂。

2 超细全尾砂充填胶凝材料配方正交试验

2.1 正交试验

使用水泥胶砂搅拌机将称量材料搅拌成胶砂, 倒入 7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm 三联模具搅拌成胶砂振实成型; 将编号的模具放入到温度为 20℃, 湿度不低于 90% 的标准恒温恒湿养护箱中

养护, 养护 24 h 后脱模至 28 d 龄期测定其试块的单轴抗压强度。南洛河铁矿是一座地下开采矿山, 采用上向分层胶结充填法采矿, 设计 28 d 充填体强度不小于 2.0 MPa, 考虑充填体强度的变异性需要安全储备, 确定的充填体设计强度为 2.5 MPa。根据矿山设计, 试验胶砂比为 1:8 和 70% 料浆浓度, 首先进行超细全尾砂新型充填胶凝材料激发剂配方的探索性试验, 为了充分激发水淬渣粉的活性, 增加两种典型的无机盐激发剂材料 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub>, 进行新型充填胶凝材料的配比优化试验<sup>[19-20]</sup>。表 2 给出了探索性试验的因素和水平, 表 3 给出了胶凝材料配比优化试验的因素和水平, 并采用 32.5R 早强水泥进行了相同胶砂比和料浆浓度的充填体强度对比试验, 两次试验结果见表 4。

表 2 探索性试验的因素和水平

Table 2 Factors and levels of trial test

| 水平 | 半水石膏 /% | 生石灰 /% | 芒硝 /% |
|----|---------|--------|-------|
| 1  | 16      | 4      | 1.0   |
| 2  | 17      | 5      | 1.5   |
| 3  | 18      | 6      | 2.0   |

表 3 配比优化试验的因素和水平

Table 3 Factors and levels of ration optimization test

| 水平 | 半水石膏 /% | 生石灰 /% | 芒硝 /% | NaCl /% | CaCl <sub>2</sub> /% |
|----|---------|--------|-------|---------|----------------------|
| 1  | 16      | 3      | 1.0   | 0.3     | 0.3                  |
| 2  | 18      | 4      | 1.5   | 0.6     | 0.6                  |
| 3  |         | 5      |       |         |                      |
| 4  |         | 6      |       |         |                      |

表 4 南洛河铁矿全尾砂胶凝材料配方正交试验结果

Table 4 The result of rationorthogonal tests about cementitiousmaterial of whole tailings in Nanminghe iron mine

| 试验方案      | 编号 | 半水石膏 /% | 生石灰 /% | 芒硝 /% | NaCl /% | CaCl <sub>2</sub> /% | 矿渣微粉 /% | 28 d/MPa |
|-----------|----|---------|--------|-------|---------|----------------------|---------|----------|
| 探索性<br>试验 | B1 | 16      | 4      | 1     | 0       | 0                    | 79      | 0.64     |
|           | B2 | 17      | 4      | 1.5   | 0       | 0                    | 77.5    | 0.81     |
|           | B3 | 18      | 4      | 2     | 0       | 0                    | 76      | 0.44     |
|           | B4 | 16      | 5      | 1.5   | 0       | 0                    | 77.5    | 1.00     |
|           | B5 | 17      | 5      | 2     | 0       | 0                    | 76      | 1.03     |
|           | B6 | 18      | 5      | 1     | 0       | 0                    | 76      | 0.77     |

|        |              |    |   |     |     |     |      |       |
|--------|--------------|----|---|-----|-----|-----|------|-------|
|        | B7           | 16 | 6 | 2   | 0   | 0   | 76   | 1.18  |
|        | B8           | 17 | 6 | 1   | 0   | 0   | 76   | 1.3   |
|        | B9           | 18 | 6 | 1.5 | 0   | 0   | 74.5 | 1.2   |
|        | 32.5R 水泥对比试验 |    |   |     |     |     |      | 1.09  |
|        | B10          | 16 | 3 | 1   | 0.3 | 0.3 | 79.4 | 1.223 |
|        | B11          | 18 | 3 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 76.3 | 1.901 |
|        | B12          | 16 | 4 | 1   | 0.6 | 0.6 | 77.8 | 2.693 |
| 配比优化试验 | B13          | 18 | 4 | 1.5 | 0.3 | 0.3 | 75.9 | 2.155 |
|        | B14          | 16 | 5 | 1.5 | 0.3 | 0.6 | 76.6 | 2.658 |
|        | B15          | 18 | 5 | 1   | 0.6 | 0.3 | 75.1 | 2.405 |
|        | B16          | 16 | 6 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 75.6 | 3.024 |
|        | B17          | 18 | 6 | 1   | 0.3 | 0.6 | 74.1 | 2.241 |

## 2.2 试验结果分析

表 5 充填胶凝材料配方正交试验极差分析结果

Table 5 The range analysis results of orthogonal test ratiom about cementitious filling material

| 试验方案   | 水平     | 生石灰   | 半水石膏  | 芒硝    | NaCl  | CaCl <sub>2</sub> |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| 探索性试验  | 1      | 0.63  | 0.94  | 0.903 |       |                   |
|        | 2      | 0.933 | 1.047 | 1.003 |       |                   |
|        | 3      | 1.227 | 0.803 | 0.883 |       |                   |
|        | 极差 R   | 0.597 | 0.243 | 0.12  |       |                   |
|        | 相对权值   | 5     | 2     | 1     |       |                   |
| 配比优化试验 | 最优配比/% | 6     | 17    | 1.5   |       |                   |
|        | 1      | 1.562 | 2.4   | 2.141 | 2.069 | 2.202             |
|        | 2      | 2.424 | 2.176 | 2.435 | 2.506 | 2.373             |
|        | 3      | 2.532 |       |       |       |                   |
|        | 4      | 2.633 |       |       |       |                   |
| 探索性试验  | 极差     | 1.071 | 0.224 | 0.294 | 0.437 | 0.171             |
|        | 相对权值   | 6.3   | 1.3   | 1.7   | 2.6   | 1                 |
|        | 最优配比/% | 6     | 16    | 1.5   | 0.6   | 0.6               |
|        | 1      | 1.562 | 2.4   | 2.141 | 2.069 | 2.202             |
|        | 2      | 2.424 | 2.176 | 2.435 | 2.506 | 2.373             |

运用 DPS 软件分析了探索性试验和优化试验中各个因素极差见表 5。由此获得以下几点结论：

(1) 在选定的因素中，两次试验中对 28 d 抗压强度影响最大的均是生石灰激发剂，并且 28 d 抗压强度与生石灰添加量成正比关系。探索性试验中，随着生石灰掺量的逐渐增大，28 d 充填体

抗压强度几乎呈现线性增长趋势（见图 1）。

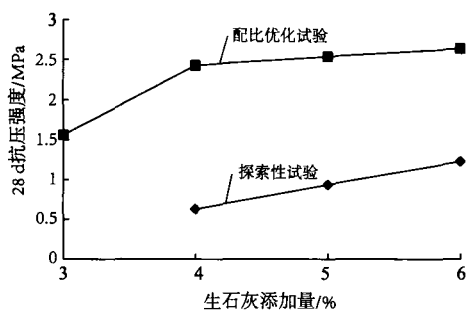


图 1 生石灰与胶结充填体强度的关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between the strength of filling and body and raw lime

(2) 配比优化试验中，当生石灰掺量为 3% ~ 4% 时，28 d 龄期的抗压强度由 1.562 MPa 增长为 2.424 MPa，增长速度显著。当生石灰的掺量为 4% ~ 6% 时，28 d 抗压强度增长速度缓慢。显然试验中生石灰掺量具有合理的范围，满足所需强度要求下，没有必要继续增加生石灰的掺量。因此，根据矿渣微粉的探索性试验和配比优化试验结果可知：在矿渣微粉胶凝材料中，生石灰是主要影响因素，最优配比掺量为 6%。

(3) 探索性试验中，28 d 龄期强度值最高为 1.30 MPa，而优化试验中 B7 组的 28 d 充填体强度已经达到 3.024 MPa，是相同条件下 32.5R 早强水泥胶砂充填体强度的 2.77 倍。由此可见，配方调整后的矿渣微粉胶凝材料已经得到了很大程度上的改善，且完全可以满足南洛河铁采矿技术要求。

3 胶凝材料配方神经网络建模与预测

3.1 数据样本归一化

为了揭示胶凝材料配比对充填体强度影响规律,基于矿渣微粉探索性试验和配比优化试验结果,运用人工神经网络模型,采用表3中B13和B17两组数据作为检验样本,其余15个数据作为训练样本。对其进行训练和学习,建立28 d充填体强度神经网络预测模型。首先对试验因素归一化到[0,1]区间内,将28 d抗压强度结果归一化至[0.05,0.95]区间内<sup>[21]</sup>。归一化结果见表6。

表6 胶凝材料配方试验样本归一化结果

Table 6 The normalized results of test samples of cementitious materials

| 试验<br>编号 | 生石<br>灰/% | 半水<br>石膏/% | 芒硝<br>/% | NaCl<br>/% | CaCl <sub>2</sub><br>/% | 28d<br>/MPa |
|----------|-----------|------------|----------|------------|-------------------------|-------------|
| 1        | 0.25      | 0.25       | 0.25     | 0          | 0                       | 0.120       |
| 2        | 0.25      | 0.5        | 0.50     | 0          | 0                       | 0.179       |
| 3        | 0.25      | 0.75       | 0.75     | 0          | 0                       | 0.050       |
| 4        | 0.5       | 0.25       | 0.50     | 0          | 0                       | 0.245       |
| 5        | 0.5       | 0.5        | 0.75     | 0          | 0                       | 0.256       |
| 6        | 0.5       | 0.75       | 0.25     | 0          | 0                       | 0.165       |
| 7        | 0.75      | 0.25       | 0.75     | 0          | 0                       | 0.308       |
| 8        | 0.75      | 0.5        | 0.25     | 0          | 0                       | 0.350       |
| 9        | 0.75      | 0.75       | 0.50     | 0          | 0                       | 0.315       |
| 10       | 0         | 0.25       | 0.25     | 0.3        | 0.3                     | 0.323       |
| 11       | 0         | 0.75       | 0.50     | 0.6        | 0.6                     | 0.559       |
| 12       | 0.25      | 0.25       | 0.25     | 0.6        | 0.6                     | 0.835       |
| 14       | 0.5       | 0.25       | 0.50     | 0.3        | 0.6                     | 0.823       |
| 15       | 0.5       | 0.75       | 0.25     | 0.6        | 0.3                     | 0.734       |
| 16       | 0.75      | 0.25       | 0.50     | 0.6        | 0.3                     | 0.950       |
| 13       | 0.25      | 0.75       | 0.50     | 0.3        | 0.3                     | 0.647       |
| 17       | 0.75      | 0.75       | 0.25     | 0.3        | 0.6                     | 0.677       |

3.2 神经网络模型结构参数选取

运用3层前向神经网络,仅含有一个隐含层。矿渣微粉配方试验含有生石灰、半水石膏、芒硝、NaCl和CaCl<sub>2</sub>共5个因素,输出为充填体28d抗压强度。因此,确定输入层节点个数为5,输出层节点个数为1。根据计算公式可知;隐含层节点数范围为4~11<sup>[22]</sup>。

建立BP神经网络,根据隐含层节点数范围,不断调节节点数进行训练,采用训练后的神经网络模型,对未参与训练的检验样本进行预测,并

将系统的预测值与试验值进行比较<sup>[23]</sup>。误差值小于5%,则认为建立的神经网络模型满足要求,否则继续进行学习样本的训练。最终,确定该网络的最佳隐含层节点个数为8。由图2可以得知,当隐含层节点数设定为8时,神经网络训练误差曲线已经收敛很快,训练14步后,达到了目标误差。矿渣微粉配方试验结果和预测结果见表7,相应的训练样本函数拟合曲线见图3。

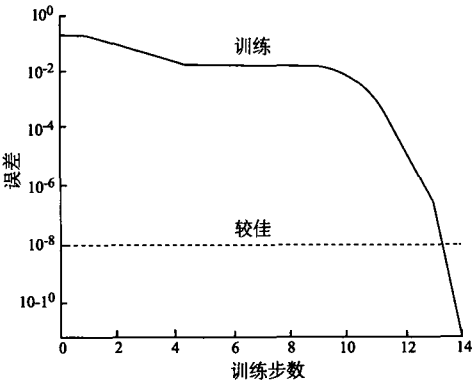


图2 结点数为8的神经网络训练误差曲线

Fig.2 Neural network training error curve with 8 points

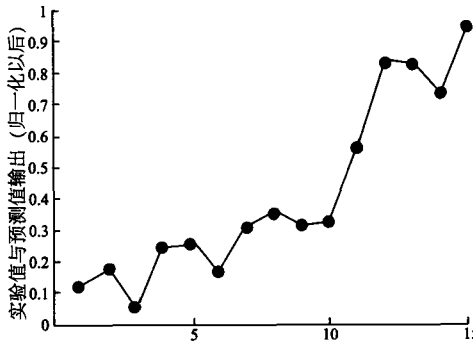


图3 试验样本训练函数拟合曲线

Fig.3 Test sample training function fitting curve

表7 胶凝材料配方试验和预测结果对比分析

Table 7 Comparative analysis of ration test and prediction results of cementitious materials

| 编号 | 试验值 /MPa | 预测值 /MPa | 反归 /MPa | 误差 /% |
|----|----------|----------|---------|-------|
| 1  | 0.64     | 0.1197   | 0.640   | 0.02  |
| 2  | 0.81     | 0.1789   | 0.810   | 0.01  |
| 3  | 0.44     | 0.0500   | 0.440   | 0.00  |
| 4  | 1.00     | 0.2450   | 1.000   | -0.01 |
| 5  | 1.03     | 0.2555   | 1.030   | 0.00  |
| 6  | 0.77     | 0.1649   | 0.770   | -0.01 |
| 7  | 1.18     | 0.3077   | 1.180   | -0.01 |
| 8  | 1.30     | 0.3495   | 1.300   | -0.01 |
| 9  | 1.20     | 0.3147   | 1.200   | 0.00  |

|    |       |        |       |      |
|----|-------|--------|-------|------|
| 10 | 1.223 | 0.3227 | 1.223 | 0.00 |
| 11 | 1.901 | 0.5589 | 1.901 | 0.01 |
| 12 | 2.693 | 0.8347 | 2.693 | 0.00 |
| 13 | 2.658 | 0.8225 | 2.658 | 0.00 |
| 14 | 2.405 | 0.7344 | 2.405 | 0.00 |
| 15 | 3.024 | 0.9500 | 3.024 | 0.00 |
| 16 | 2.155 | 0.6558 | 2.179 | 1.13 |
| 17 | 2.241 | 0.7123 | 2.342 | 4.49 |

3.3 新型充填胶凝材料配比分析

根据新型充填胶凝材料配方试验结果的分析可知, 充填体强度随着生石灰掺量的增加而提高。同时生石灰作为最显著的影响因素, 探索性试验和优化试验的较优结果均为 6%。所以确定生石灰掺加量为 6%。

(1) 充填体强度随半水石膏掺量的变化规律

确定生石灰、芒硝、NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 的掺量分别为 6%、1.5%、0.6% 和 0.6%。当半水石膏掺量发生变化时, 充填体强度预测结果见表 8。图 4 显示了充填体强度与半水石膏掺量的关系曲线。由此看出, 半水石膏掺量小于 17% 时, 充填体强度逐渐增大; 但当大于 17% 后充填体强度迅速减小。但生石灰掺量为 6%, 芒硝掺量为 1.5%, NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量均为 0.6% 的条件下, 充填体强度值均大于 2.98 MPa, 满足南洛河铁矿充填法采矿生产安全要求。此外, 在充填胶凝材料中成本最低, 掺量增加可以降低充填材料成本, 因此, 半水石膏的最合理掺量确定为 18%。

表 8 不同半水石膏掺量的充填体强度预测结果  
Table 8 Prediction results of the strength of filling-body of different admixture amounts semi-hydrated gypsum

| 生石灰<br>/% | 半水<br>石膏 /% | 芒硝 /% | NaCl /% | CaCl <sub>2</sub> /% | 28 d/MPa |
|-----------|-------------|-------|---------|----------------------|----------|
| 6         | 16.4        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.031    |
| 6         | 16.6        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.033    |
| 6         | 16.8        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.034    |
| 6         | 17          | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.034    |
| 6         | 17.2        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.033    |
| 6         | 17.4        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.029    |
| 6         | 17.6        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.021    |
| 6         | 17.8        | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 3.008    |
| 6         | 18          | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 2.986    |

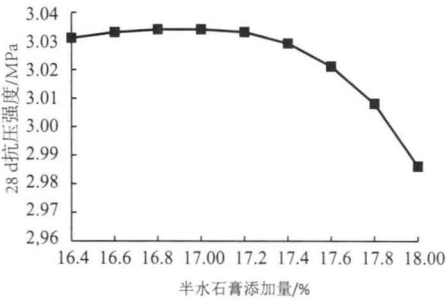


图 4 充填体强度与半水石膏掺量的关系曲线  
Fig. 4 Relationship curve between the strength of filling-body and semi-hydrated gypsum

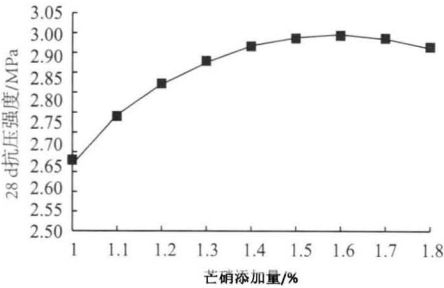


图 5 充填体强度与芒硝掺量的关系曲线  
Fig. 5 Relationship curve between the strength of filling-body and mirabilite

(2) 充填体强度随芒硝掺量的变化规律

确定生石灰、半水石膏、NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 的添加量分别为 6%、18%、0.6%、0.6% 的条件下, 芒硝不同掺量的充填体强度预测结果见表 9。图 5 给出了充填体强度与芒硝掺量的关系曲线。由此可见, 芒硝掺量小于 1.6% 的充填体强度呈现增大趋势。根据胶凝材料配方试验确定芒硝最优掺量为 1.5%。考虑到芒硝的成本, 且当掺量为 1.2% 时, 充填体抗压强度已经达到 2.872 MPa, 因此, 确定芒硝最优化掺量为 1.2%。

(3) 充填体强度与 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量的变化规律

确定生石灰、半水石膏、芒硝的添加量分别为 6%、18%、1.2%。不同 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量的胶结充填体强度预测结果见表 9。图 6 给出了在不同 CaCl<sub>2</sub> 掺量下, 充填体强度与 NaCl 掺量的关系曲线。由此可见, 随着 NaCl 掺量的增加, 充填体抗压强度呈现增大趋势; 随着 CaCl<sub>2</sub> 掺量的增加, 充填体强度呈现降低趋势, 与胶凝材料配比优化试验中极差分析结果不一致, 所以 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量需要进一步验证试验。考虑成本以及充填体强度要求, 确定 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 最优掺量为 0.6% 和 0.4%。

表9 不同芒硝掺量的充填体强度预测结果

Table 9 Prediction results of the strength of filling-body of different admixture amounts mirabilite

| 生石灰 /% | 半水石膏 /% | 芒硝 /% | NaCl /% | CaCl <sub>2</sub> /% | 28d 抗压强度 /MPa |
|--------|---------|-------|---------|----------------------|---------------|
| 6      | 18      | 1     | 0.6     | 0.6                  | 2.680         |
| 6      | 18      | 1.1   | 0.6     | 0.6                  | 2.790         |
| 6      | 18      | 1.2   | 0.6     | 0.6                  | 2.872         |
| 6      | 18      | 1.3   | 0.6     | 0.6                  | 2.929         |
| 6      | 18      | 1.4   | 0.6     | 0.6                  | 2.966         |
| 6      | 18      | 1.5   | 0.6     | 0.6                  | 2.986         |
| 6      | 18      | 1.6   | 0.6     | 0.6                  | 2.993         |
| 6      | 18      | 1.7   | 0.6     | 0.6                  | 2.986         |
| 6      | 18      | 1.8   | 0.6     | 0.6                  | 2.964         |

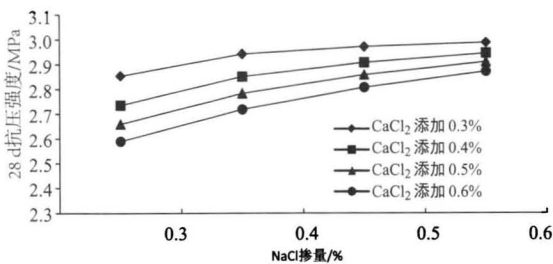


图6 充填体强度与 NaCl 掺量的关系曲线

Fig.6 Relationship curves between the strength of filling and body and NaCl

## 4 结 论

(1) 正交试验的极差分析结果显示, 生石灰是影响充填体强度首要因素, 半水石膏次之, 芒硝最小。

(2) 随半水石膏掺量增加, 28 d 抗压强度先缓慢增加。当掺加量为 17% 的强度达到最大值后迅速降低。

(3) 芒硝是一种早强剂, 充填体强度随芒硝掺量的增加呈现先增加后降低的趋势。当芒硝掺量等于 1.5% 充填体强度达到最高。

(4) 通过添加无机盐 NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 改进胶凝材料配方的试验, 获得了 28 d 充填体强度最大达到 3.024 MPa, 满足南谿河铁矿对 28d 充填体强度 2.5 MPa 的要求。

(5) 胶凝材料配比的极差分析结果表明, 生石灰 6% 为最优掺量。在确定生石灰添加量的基础上, 通过神经网络模型对半水石膏、芒硝、NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 掺量进行充填体强度预测, 揭示了

充填体强度与激发剂掺量的变化规律, 最终确定半水石膏、芒硝、NaCl 和 CaCl<sub>2</sub> 的最优掺量分别为 18%、1.2% 和 0.6%、0.4%。

(6) 根据新型充填胶凝材料的最优配方进行了胶凝材料充填体强度的验证试验, 由此得到胶结充填体的 28d 抗压强度达到 2.873 MPa, 从而验证了本研究所获得的南谿河铁矿全尾砂胶凝材料的最优配方具有一定的可靠性, 与试验结果的误差仅为 5%。

## 参考文献:

- [1] 夏长念, 孙学森. 充填采矿法及充填技术的应用现状与发展趋势 [J]. 中国矿山工程, 2014, 43(1):61-64.
- [2] 于润沧. 我国胶结充填工艺发展的技术创新 [J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5):1-3.
- [3] 苏亮, 张晓华. 用充填技术促进矿山资源开发与环境保护协调发展 [J]. 矿冶工程, 2013, 33(3):117-121.
- [4] 贺兵红. 近十年来充填技术在铁矿中的应用进展 [J]. 工程建设, 2011, 43(4):28-32.
- [5] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 金川矿山充填采矿固体废弃物综合利用关键技术 [J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5):706-711.
- [6] 薛改利, 杨志强, 高谦, 等. 全尾砂新型充填胶凝材料在南谿河铁矿的应用 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2013, 66 (6):66-69.
- [7] 张立新. 全尾砂胶结充填技术在李楼铁矿的应用 [J]. 有色金属: 矿山部分, 2012, 64 (2):17-20.
- [8] 杜聚强, 高谦, 南世卿, 等. 一种全尾砂充填新型胶凝材料的研制 [J]. 金属矿山, 2012, 5:152-155.
- [9] 梁宝瑞, 宋存义, 汪莉, 等. 利用烧结脱硫灰-高炉矿渣-水泥熟料制备胶凝材料 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(5).
- [10] 王有团, 杨志强, 李茂辉, 等. 全尾砂-棒磨砂新型胶凝充填材料的制备 [J]. 材料研究学报, 2015, 29 (4):291-298.
- [11] 吴其胜, 刘学军, 黎水平, 等. 脱硫石膏-矿渣微粉复合胶凝材料的研究 [J]. 硅酸盐通报, 2011, 30 (6):1454-1458.
- [12] 杨志强, 熊良峰, 方林, 等. 利用烧结脱硫灰渣制备新型充填胶凝材料试验 [J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(1), 8-12.
- [13] 董璐, 高谦, 南世卿, 等. 超细全尾砂新型胶结充填料水化机理与性能 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44 (4):1571-1577.
- [14] 孙光华, 魏莎莎, 苏东亮, 等. 基于正交试验的全尾砂胶结充填配比方案优化 [J]. 金属矿山, 2015 (4): 111-113.
- [15] 史俊伟, 魏中举, 刘庆龙, 等. 基于正交试验的煤矿安全开采充填材料配比优化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6):111-115.
- [16] 王有团, 杨志强, 王永前, 等. 金川棒磨砂新型充填胶凝

材料的正交试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 27-31.

[17] 魏微, 高谦. 改进的 BP 神经网络模型预测充填体强度[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 90-95.

[18] 张钦礼, 李谢平, 杨伟. 基于 BP 网络的某矿山充填料浆配比优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(7): 2867-2874.

[19] 张雄, 鲁辉, 张永娟, 等. 矿渣活性激发方式的研究进展[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(3): 379-384.

[20] 蔺喜强, 王栋民, 许晨阳, 等. 硫酸盐类及氯盐类激发剂对粉煤灰活性的影响[J]. 粉煤灰, 2012, 24(1): 4-7.

[21] 柳小桐. BP 神经网络输入层数据归一化研究[J]. 机械工程与自动化, 2010(3): 122-123.

[22] 张雨浓, 肖秀春, 陈扬文, 等. Hermite 前向神经网络隐节点数目自动确定[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(02): 271-275.

[23] 陈果. 神经网络模型的预测精度影响因素分析及其优化[J]. 模式识别与人工智能, 2005, 18(5): 528-534.

## Ration Optimization of New Filling Cementitious Material Based on Orthogonal Test and Neural Network Model

Li Litao<sup>1</sup>, Yang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Gao Qian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology of Beijing, Beijing, China;

2. Jinchuan Group Co. Ltd, Jinchang, Gansu, China)

**Abstract:** According to the superfine full-tailings of Nanminghe, orthogonal test of new filling cementations material optimal proportion about full-tailings is carried out, the use of blast furnace slag, quick lime, mirabilite and inorganic salt. According to range analysis that lime addition amount is 6%, the new cementitious material formulation of neural network model is established in the experiment data as learning samples, the prediction and influence of activator material content of filling-body strength are investigated. The results show that the largest effect of 28d filling-body strength is lime, followed by semi-hydrated gypsum, minimum is mirabilite. Considering the cementations material cost and mining method on the strength of the filling-body in Nanminghe iron mine, optimal proportion of new filling cementations material about whole tailings was determined: 6% lime, 8% semi-hydrated gypsum, 1.2% mirabilite, NaCl 10.6%, CaCl<sub>2</sub> 0.4%, 73.8% slag powder. The optimal proportion of verification test is carried out, 28d filling-body strength get reached 2.873MPa, and orthogonal test in the strength of the filling-body test error is only 5%. So optimal proportion of new filling cementitious material about whole tailings has certain reliability in Nanminghe iron mine.

**Keywords:** Slag powder; Orthogonal test; Range analysis; Neural network; Optimal proportion; The third filling ore

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告