# 新型助磨剂对钢渣混合材料的助磨早强效果和作用机理

刘高杰[1,2]，张春燕[3]，袁小兵[2]，刘丙生[2]，赵 阳[2]
（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 中建三局第二建设工程有限责任公司，湖北 武汉 430073；3. 河南师范大学 环境学院，河南 新乡 453007）

**摘要：** 三乙醇胺（TEA）是常用的高效助磨剂的主要成分之一，但其对钢渣混合材料的助磨效果单一且成本较高。本文利用丙烯酸对三乙醇胺改性得到甲基丙烯酸三乙醇胺酯（TA），并将其与三乙醇胺、空白组作对比，借助比表面积、粒度分布、SEM、XRD、FT-IR等手段研究改性药剂对钢渣混合材料颗粒分散度和水化性能的影响和作用机理。试验结果表明：三乙醇胺和丙烯酸的最优摩尔比为1∶1，最佳掺量为混合材料质量的0.03%；最佳条件下TA组颗粒的比表面积较空白组提高13.39%，TA组混合材料的28 d抗压强度较TEA组和空白组分别提高9.26%和11.32%。改性药剂能够增大颗粒的比表面积，改善颗粒级配，促进C-S-H、C-A-H凝胶、CH晶体和钙矾石生成，提高早期强度。

**关键词：** 三乙醇胺；丙烯酸；钢渣；细磨；助磨；早强
**中图分类号：** X757；TQ172.4+63　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-8764(2021)06-0020-07
**doi：** 10.13403/j.sjqt.2021.06.080

# Early strength effect and action mechanism of new grinding aid on steel slag mixed materials

LIU Gaojie[1,2], ZHANG Chunyan[3], YUAN Xiaobing[2], LIU Bingsheng[2], ZHAO Yang[2]
(1. *College of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan* 430081, *Hubei, China*; 2. *The Second Construction Co., Ltd. of China Construction Third Engineering Bureau, Wuhan* 430073, *Hubei, China*; 3. *School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang* 453007, *Henan, China*)

**Abstract:** Triethanolamine(TEA) is one of the main components of commonly used high efficiency grinding aids, but its grinding aid effect on steel slag mixed materials is single and costly. TA is obtained by modifying TEA with acrylic acid and comparing with TEA and blank group under the help of specific surface area, particle size distribution, SEM, XRD, FT-IR etc. to study the effect and action mechanism of the modifying agents on the particle dispersion and hydration properties of the steel slag mixed materials. The results show that the optimum molar ratio between TEA and acrylic acid is 1∶1, and the optimum dosing is 0.03% of the mass of the mixed material. Under the best conditions, the specific surface area of the particles in the TA group is increased by 13.39% compared with the blank group, the compressive strength of the TA group mixed material 28 d, compared with the TEA group and the blank group, is increased by 9.26% and 11.32%. The modifying agent can increase the specific surface area of particles, improve particle gradation, promote C-S-H, C-A-Hgel, CH crystals and calcium alumina generation, and improve early strength.

**Key words:** triethanolamine (TEA); acrylic acid; steel slag; fine grinding; grinding aid; early strength

**收稿日期：** 2021-02-23；**修回日期：** 2021-04-01
**基金项目：** 河南省高等学校重点科研项目(17A610008)；河南省自然科学基金资助项目(182300410153)；河南省基础与前沿科技研究计划资助项目(132300410287)
**作者简介：** 刘高杰(1992—)，男，硕士研究生，从事冶金固体废物综合利用的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

钢渣是炼钢过程中产生的废渣，其排放量约占粗钢产量的 15%～20%[1]。目前搁置的钢渣量达 4 亿吨左右，而且每年都会有 1 亿吨钢渣产生[2-3]。在这些钢渣中，70% 是化学组成与水泥熟料相似的转炉钢渣，具有潜在的胶凝活性[4]。但钢渣早期活性低，限制了其在水泥等建筑材料中的应用[5]，要发挥钢渣中硅酸三钙($C_3S$)和硅酸二钙($C_2S$)水硬胶凝活性，通常须对其进行细磨处理[6-7]。为了提高细磨效率，减少磨矿能耗，激发钢渣的早期活性，通常需要加入助磨剂或激发剂。目前常用的醇胺类助磨剂和激发剂效果单一，主要通过改变颗粒细度来激发其潜在活性，而直接激发钢渣混合材料胶凝活性的有机早强剂开发较少且成本较高。三乙醇胺(TEA)是常用的高效助磨剂的主要成分之一，而且 TEA 的掺量在 0.02%～0.05% 时能够促进 $C_3A$ 水化，但是会阻止 $C_3S$ 水化[8]。

本文利用丙烯酸(AA)对 TEA 改性，酯化生成甲基丙烯酸三乙醇胺酯(TA)，得到一种适用于钢渣混合材料的助磨早强剂；与 TEA 相比，TA 既能提高助磨效果，还可改善颗粒级配，增强药剂的早强效果，同时可促进 $C_3A$、$C_3S$ 水化进行，提高钢渣混合材料的早期强度，并且能够降低药剂成本。

## 1　试验原料与方法

### 1.1　试验原料

试验用三乙醇胺($C_6H_{15}NO_3$)为天津某化工公司生产，纯度大于 85%；丙烯酸($C_4H_6O_2$)为天津某化学试剂厂生产，纯度大于 99.5%。石膏为天然二水石膏($CaSO_4\cdot 2H_2O$)，结晶水质量分数为 17.05%，$SO_3$ 质量分数为 45%。熟料、钢渣和粉煤灰取自安徽某建材公司，其化学成分如表 1 所示。

表 1　钢渣、粉煤灰和熟料的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of steel slag, fly ash and cinker　　%

| 原料名称 | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $K_2O$ | $Na_2O$ | $SO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 钢渣 | 15.51 | 2.00 | 21.63 | 45.13 | 6.78 | 0.16 | 0.68 | 0.03 |
| 粉煤灰 | 45.83 | 35.71 | 4.78 | 4.97 | 0.51 | 0.66 | 0.25 | 0.25 |
| 熟料 | 17.72 | 12.07 | 4.95 | 57.25 | 3.25 | — | — | 0.31 |

### 1.2　改性药剂的制备

将丙烯酸和三乙醇胺按摩尔比为 1∶1 加入到圆底烧瓶中，在 90 ℃ 温度下磁力搅拌 4 h，冷凝回流，降温继续搅拌 2 h，停止后将其配置成质量分数为 50% 的水溶液，即得到改性助磨早强剂 TA。

### 1.3　试样和试件的制备

每次取 $m$(熟料)∶$m$(石膏)∶$m$(钢渣)∶$m$(粉煤灰)=10.0∶5.0∶42.5∶42.5(质量比)的混合材料 400 g，按混合材料质量的 0%、0.015%、0.030%、0.045%、0.060% 分别将等量稀释后的 TEA 和 TA 分别均匀喷洒在物料表面，在相同球磨工艺条件下，将物料放入 KQM-Y/B 型行星式球磨机粉磨 60 min，得到混合粉体试样。

为了排除颗粒级配对早期强度的影响，在球磨时不加入药剂，将球磨后的混合材料按水与胶凝材料质量比为 0.1 混合；按混合材料质量的 0%、0.015%、0.030%、0.045%、0.060% 分别加入稀释后的 TEA 和 TA；按混合材料质量的 1% 加入减水剂；按照 GB/T 23450—2009 中 120 规格墙板要求，利用微气泡控制试件的密度为(800±5) kg/m$^3$；搅拌均匀后将混合材料浇筑到 100 mm×100 mm×120 mm 的模具中。将浇筑后试件在 30 ℃ 恒湿条件下养护 1 d 脱模，再在 55 ℃ 温度下恒湿养护至 7 d 转入自然养护至 28 d。

### 1.4　分析和测试方法

钢渣混合材料的化学成分分析执行《水泥化学分析方法》(GB/T 176—2008)；比表面积测试执行《水泥比表面积测定方法勃氏法》(GB/T 8074—2008)；利用 Mastersizer2000 激光粒度分析仪测定钢渣混合材料的粒度分布；利用 WE-30型液压式万能材料试验机测定试样的抗压强度。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

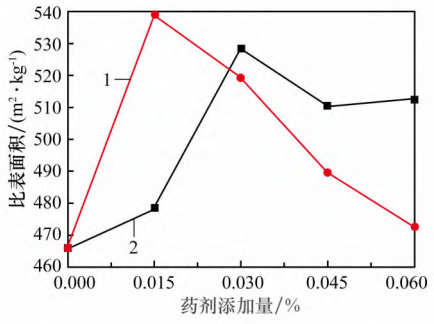
取测试完抗压强度后的内部小块样品，置于含有无水乙醇的样品杯中，使其终止水化；浸泡24 h后抽滤，于(40±1) ℃真空干燥箱中烘干48 h后取出；取合适大小的样品利用PHILIPS XL30 TMP型扫描电子显微镜观察水化产物的形貌；取适量真空干燥后的样品用玛瑙研钵研磨至手触无颗粒感，利用XPert PRO MPD型X射线衍射仪分析试样水化产物的物相，扫描角度为5°～60°，扫描速率为10(°)/min，扫描范围分辨率为0.02°；将上述研磨好的试样与干燥后的溴化钾按质量比为1∶100混合，继续研磨至手触无颗粒感，采用压片法制得固体样品；将吸收池倾斜30°，用无针头注射器吸取待测的样品，由下孔注入直到上孔看到样品溢出为止，用聚四氟乙烯塞子塞好上、下注射孔，用擦镜纸擦去溢出的液体，得到液体试样；利用TENSOR2型傅里叶红外光谱仪分析水化产物中C-S-H凝胶的变化和液体药剂中的官能团，设置信噪比为14 500∶1，波数范围为4 000～500 $cm^{-1}$，扫描速度为40次/s，分辨率为0.5 $cm^{-1}$。

## 2 结果与讨论

### 2.1 助磨和早强效果分析

#### 2.1.1 助磨效果

只改变TEA和TA的添加量，球磨60 min后测得试样的比表面积如图1所示。由图1可知：添加TEA和TA后，钢渣混合材料颗粒的比表面积均比空白组大；TEA掺量为0.015%时，颗粒的比表面积达到539.05 $m^2/kg$；TA掺量为0.03%时，颗粒的比表面积达到最大为528.26 $m^2/kg$，比空白组高13.39%，之后随着掺量的增加比表面积有所降低。助磨剂掺量有合适的范围，掺量过多，包裹物料颗粒形成的吸附层的厚度增大，施加到物料颗粒的破碎力减弱，颗粒更难被破碎，造成颗粒的比表面积减小。

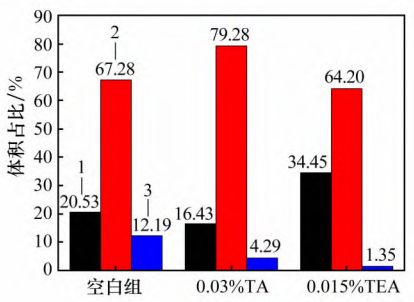



1—TA；2—TEA。

**图1 不同掺量的TEA和TA对钢渣混合材料比表面积的影响**

**Fig. 1 Effect of TEA and TA with different dosages on the specific surface area of steel slag mixture**

胶凝材料的粒度分布直接影响其力学性能，通常认为3～32 μm的颗粒对强度起主要作用[9]。选取试验情况下两种药剂比表面积的最大组和空白组，从微观角度比较两种药剂的助磨效果，结果如图2所示。由图2可以看出：0.015%TEA组－3 μm颗粒的质量分数最高，0.03%TA组3～32 μm颗粒的质量分数最高，比空白组和0.015%TEA组分别高出17.84%和23.49%。这说明TEA造成了一定的过粉磨，导致颗粒过细；TA更能增加对强度有贡献的颗粒的质量分数，使助磨效果更好。




粒度范围/μm：1—1～3；2—3～32；3—+32。

**图2 不同掺量TEA和TA对钢渣混合材料粒度分布的影响**

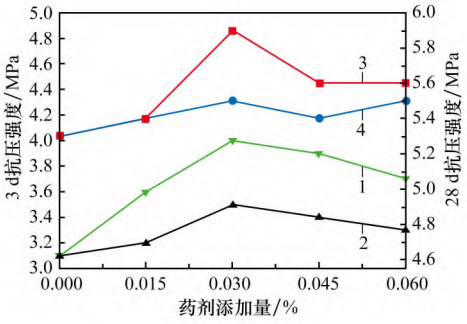
**Fig. 2 Effect of TEA and TA with different dosages on the particle size distribution of steel slag mixed materials**

#### 2.1.2 早强效果

只改变TEA和TA的添加量，测得试样3 d和28 d的抗压强度如图3所示。从图3可以看出，3 d和28 d抗压强度：TA组>TEA组>空白组。TA组的最佳添加量为0.03%，此时试样的3 d抗压强度为4.0 MPa，比空白组和TEA组分别提高了29.03%和14.29%；28 d抗压强度为5.9 MPa，比空白组和TEA组分别提高了

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

11.32%和 9.26%，这说明 TA 能有效地提高钢渣混合材料的早期强度。在水化过程中，激发剂掺量过低，在水化初期消耗完全，无法继续促进水化反应的进行；激发剂掺量过高时，水化反应迅速进行，在短时间内产生的大量水化产物将水化的颗粒包裹住，阻止水化反应继续进行，导致试件抗压强度降低。



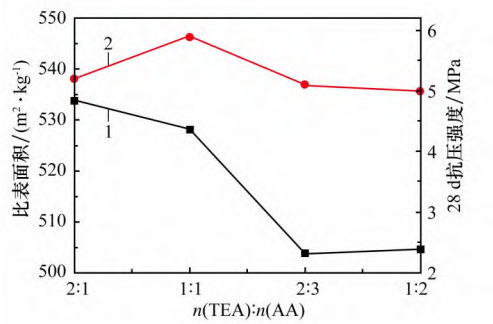

龄期/d：1—3(TA)；2—3(TEA)；3—28(TA)；4—28(TEA)。

**图 3　不同掺量 TEA 和 TA 对钢渣混合材料 3 d 和 28 d 抗压强度的影响**

**Fig. 3　Effect of TEA and TA with different dosages on compressive strength of steel slag mixture after 3 days and 28 days**

## 2.2　改性药剂配方优化

设置药剂添加量为 0.03%，改变 TEA 和 AA 的摩尔比，比较比表面积和 28 d 抗压强度大小，来寻求改性药剂的最优配方。试验结果如图 4 所示。由图 4 可看出，$n$(TEA)∶$n$(AA)=2∶1(摩尔比)时比表面积最大，但仅比摩尔比为 1∶1 时高 1.06%；$n$(TEA)∶$n$(AA)=1∶1 时 28 d 抗压强度最高，比 2∶1 时高 13.46%。TEA 过量时，未反应的 TEA 会阻止 $C_3S$ 水化，造成早期强度较低；AA 过量时，多个羟基被酯化取代，增加了碳链长度，会降低药剂的早强效果。综合考虑，改性药剂最优配方为 $n$(TEA)∶$n$(AA)=1∶1。




1—比表面积；2—抗压强度。

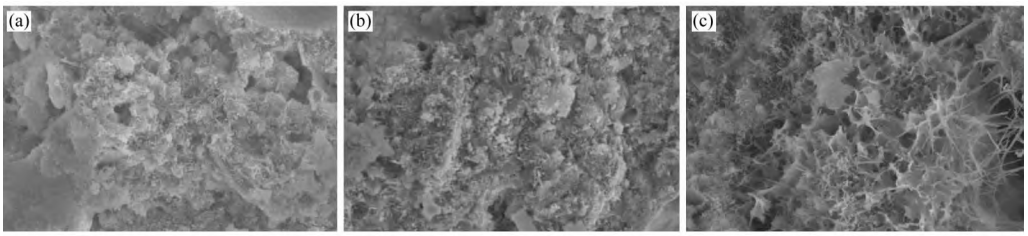
**图 4　药剂配比对钢渣混合材料比表面积和 28 d 抗压强度的影响**

**Fig. 4　Effect of reagent ratio on compressive strengh after 28 days and specific surface area of steel slag mixture**

## 2.3　28 d 水化产物分析

### 2.3.1　SEM 分析

空白组、TEA 组和 TA 组试件 28 d 水化产物 SEM 分析如图 5 所示。由图 5 可知：3 组试件 28 d 水化产物主要为六方板状的氢氧化钙(CH)晶体、无定型絮状 C-S-H 凝胶和针状钙矾石(AFt)。从图 5(a)可以看出：空白组颗粒表面被侵蚀，水化产物主要为团簇状的 C-S-H 凝胶和 CH 晶体，针状 AFt 较少，水化产物之间空洞较多，所以体系强度不高。从图 5(b)可以看出，添加 0.03% TEA 的试件生成较多的 AFt，填充在空洞之间，但分布不均匀，仍存在裂缝和空隙。从图 5(c)可以看出，添加 0.03% TA 的试件生成大量细小的针棒状 AFt、CH 晶体，无定型絮状 C-S-H 凝胶和纤维状、网状 C-A-H 凝胶明显增多，水化产物交织在一起，填补在裂缝和空洞之间，体系网格化程度提高，所以强度更高。




(a)　空白组；(b)　TEA 组；(c)　TA 组

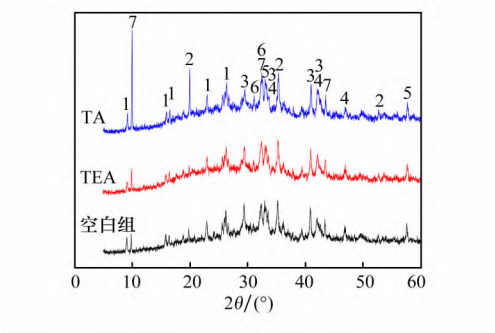
**图 5　28 d 水化产物的 SEM 分析(10 000 倍)**

**Fig. 5　SEM images of hydration products after 28 days (10 000 ×)**

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.3.2 XRD 分析

3 组试样 28 d 水化产物的 XRD 分析如图 6 所示。从图 6 可以看出，3 组试样 28 d 水化产物主要为 AFt、CH、C-A-H 和 C-S-H。其中，TA 组水化产物 AFt、CH、C-A-H 和 C-S-H 的特征峰最为明显，这说明加入 TA 后，TA 促进了 $C_3S$ 水化反应生成 CH、C-S-H，而生成的 C-A-H 进一步与石膏反应生成 AFt，所以体系早期强度较高。与空白组相比，掺加 TEA 试样的 C-S-H、CH 衍射峰强度较弱，$C_3S$ 的衍射峰强度较强，在胶凝材料早期水化过程中 C-S-H、CH 主要由 $C_3S$ 水化产生，说明 TEA 抑制了 $C_3S$ 的水化。



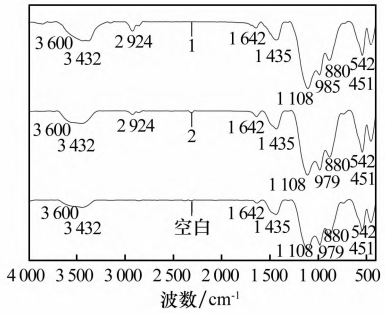

1—AFt；2—CH；3—$C_3S$；4—$C_2S$；5—C4AF；6—C-S-H；7—C-A-H。

图 6 试样水化 28 d XRD 图

Fig. 6 XRD pattens of sample hydration after 28 days

2.3.3 FT-IR 分析

3 组试样 28 d 水化产物 FT-IR 分析如图 7 所示。由图 7 可知，TA 组和 TEA 组均在波长 2 924 $cm^{-1}$ 处出现了 $CH_2$-的振动吸收峰，说明 TA 和 TEA 很好地吸附在了物料表面。3 640 ~ 3 300 $cm^{-1}$ 处出现了较宽的波普带，这是因为水化龄期增长，水化产物 C-H、C-S-H 和钙矾石增多，它们中结晶水的-OH 基团的伸缩振动峰在此处重合。3 600 $cm^{-1}$ 处为水化产物 $Ca(OH)_2$ 中-OH 的吸收峰，3 432 $cm^{-1}$ 处为 Si-OH 中-OH 基团的吸收峰，1 108 $cm^{-1}$ 处为 $SO_4^{2-}$ 的吸收峰，这充分表明水化产物中生成了 AFt。3 640 ~ 3 300 $cm^{-1}$ 处和 1 108 $cm^{-1}$ 处峰面积：TA 组 > TEA 组 > 空白组，这说明 TA 组 CH、C-S-H、C-A-H 和 AFt 生成最多，表明改性药剂有效促进了水化反应的进行，提高了钢渣混合材料的早期强度，这与 28 d 水化产物的 XRD 分析相吻合。




1—0.03% TA；2—0.03% TEA；3—空白组。

图 7 不同试样 28 d 水化产物的 FT-IR 分析

Fig. 7 FT-IR spectra of hydration products of different samples after 28 days

在硅酸盐胶凝材料中，Si-O 键的弯曲振动位于 400 ~ 600 $cm^{-1}$ 处，伸缩振动吸收峰位于 900 ~ 1 000 $cm^{-1}$ 处，542 $cm^{-1}$ 和 981 $cm^{-1}$ 是钢渣混合材料 Si-O 键的弯曲振动和伸缩振动峰[10]。与空白组和 TEA 组相比，TA 组 Si-O 键的伸缩振动峰由 979 $cm^{-1}$ 迁移到 985 $cm^{-1}$，向高波数迁移，这说明 TA 的加入提高了硅氧四面体的聚合度和网格化程度，使 C-S-H 凝胶更加致密，系统的抗压强度更高[11]。

## 3 作用机理

改性药剂的 FT-IR 分析如图 8 所示。由图 8 可知：1 734 $cm^{-1}$ 处出现了很强的 C=O 伸缩振动峰，1 221 $cm^{-1}$ 处出现了很强的 C-O-C 伸缩振动峰，表明体系中有大量的酯键生成。

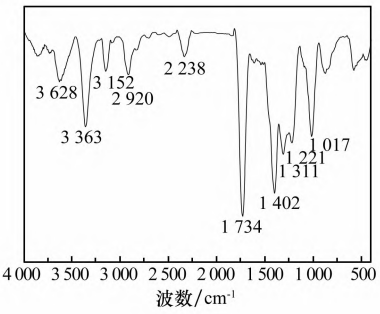
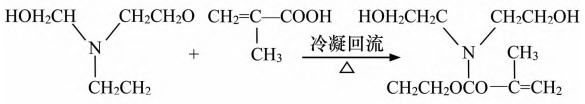



图 8 TA 的 FT-IR 图

Fig. 8 FT-IR diagram of TA

以上结果说明三乙醇胺和丙烯酸酯生成了甲基丙烯酸三乙醇胺酯，反应方程式如下。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net




(1)

### 3.1　助磨作用机理

TA 改变了 TEA 的键型和键长，使得大量的极性分子能够以单分子或多分子层的形式吸附在颗粒表面，降低其表面能，并形成薄膜，增大颗粒的流动性，提高颗粒的分散度，从而使颗粒在粉磨区域内受力的概率趋于均衡，颗粒分布更加集中。这既减少了过粗和过细颗粒，增加了对强度起关键作用的颗粒的质量分数，又节约了磨矿能耗。由于离子键小于共价键的单键键能，在钢渣混合材料颗粒粉磨时，Ca-O 离子键断裂优先发生。离子键断裂后产生电子密度差异，断面两侧的 $Ca^{2+}$ 和 $O^{=}$ 成为活性点，导致颗粒重新互相吸引，聚合成新的大颗粒或者使断裂面重聚[12]。TA 可以提供外来离子或分子满足断面上未饱和的电价键，减弱聚集的趋势，阻止断裂面的复合。消除团聚作用后，机械功更集中作用于单个颗粒，所以粉磨效率得到提高。

### 3.2　早强作用机理

根据 SEM、XRD 和 FT-IR 分析推断，水化时应该存在的反应:

(1) 在药剂激发作用下，体系中的 $C_3S$ 优先与水反应生成水化硅酸钙(C-S-H)。

$$2(3CaO\cdot SiO_2)+6H_2O=3CaO\cdot 2SiO_2\cdot 3H_2O+3Ca(OH)_2 \quad (2)$$

(2) 生成的 $Ca(OH)_2$ 继续与混合材料中的 $SiO_2$ 反应生成水化硅酸钙(C-S-H)。

$$mCa(OH)_2+SiO_2+nH_2O\rightarrow mCaO\cdot SiO_2\cdot (m+n)H_2O \quad (3)$$

(3) 粉煤灰中的活性氧化铝和 $Ca(OH)_2$ 与水反应生成水化铝酸钙(C-A-H)。

$$3Ca(OH)_2+Al_2O_3+3H_2O\rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3\cdot 6H_2O \quad (4)$$

(4) C-A-H 在碱性条件下变成 $C_4AH_{13}$，与石膏反应生成 AFt。

$$3CaO\cdot 2Al_2O_3\cdot 6H_2O+3CaSO_4+25H_2O\rightarrow 3CaO\cdot 2Al_2O_3\cdot 3CaSO_4\cdot 31H_2O \quad (5)$$

分子的基团极性越强、极性基团越多，药剂的早强效果越好[13]。TA 引入了酯键极性基团，与 TEA 相比，其能同时促进胶凝材料中 $C_3A$、$C_3S$ 水化，加速 C-S-H 凝胶生长，提高硅氧四面体的聚合度，促进硅氧四面体网格化，使C-S-H凝胶更加致密，体系强度更高。

TA 引入不饱和烃键后，改变了 TEA 原本的均衡结构，使三乙醇胺中 N 原子上未共用的一对电子，更容易与金属阳离子形成共价键，生成较为稳定的螯合物，这些螯合物能够在溶液中形成许多可溶区，加速水化产物的扩散，导致水化初期颗粒表面 $C_3A$ 水化物层被破坏，提高 $C_3A$、$C_4AF$ 溶解速度，从而加快与 $CaSO_4$ 反应，迅速生成 AFt。体系中 $Ca^{2+}$、$Al^{3+}$ 质量分数降低，又进一步提高 $C_3S$、$C_2S$ 水化速率，从而提高体系的早期强度。

## 4　结　论

(1) 改性药剂的最优配方为 $n$(TEA)∶$n$(AA)=1∶1，最佳掺量为 0.03%，此时颗粒的比表面积达到最大，为 528.26 $m^2/kg$，比空白组高 13.39%。

(2) 改性药剂能显著改善颗粒级配，使颗粒粒度集中在对强度有主要贡献的 3～32 μm。0.03% TA 组的 3～32 μm 颗粒的质量分数，比空白组和 0.015% TEA 组分别高出 17.84% 和 23.49%。

(3) 改性药剂能显著地提高钢渣混合材料的早期强度，28 d 抗压强度比空白组和 TEA 组分别提高 11.32%、9.26%。与空白组和 TEA 组相比，TA 能同时促进 $C_3S$ 和 $C_3A$ 水化反应的进行，促进 C-S-H 凝胶、CH 晶体和 AFt 生成，提高早期强度。改性药剂不仅增强了药剂的助磨早强性能，又因为丙烯酸成本远低于三乙醇胺，减少了钢渣混合材料的生产成本，有助于实现节能减排，对钢铁行业绿色低碳发展具有重要意义。

**参考文献:**

[1]　张忠哲，冯勇，晋强，等. 钢渣替换骨料对混凝土的力学性

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

能及耐水性影响[J]. 混凝土,2017(5):75-78;81.
ZHANG Zhongzhe,FENG Yong,JIN Qiang,et al. Steel slag to replace aggregate effect on the mechanical properties and water resistance of concrete[J]. Concrete,2017(5):75-78;81.

[2] 王勇斌,朱丽娟,杨国辉,等. 钢渣砂在混凝土中的应用研究[J]. 商品混凝土,2019(7):38-42.
WANG Yongbin,ZHU Lijuan,YANG Guohui,et al. Applycation of steel slag in concrete[J]. Ready-mixed Concrete,2019(7):38-42.

[3] 赵立杰,张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. 材料导报,2020,34(S2):1319-1322;1333.
ZHAO Zhijie,ZHANG Fang. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources[J]. Materials Reports,2020,34(S2):1319-1322;1333.

[4] 王强,阎培渝. 大掺量钢渣复合胶凝材料早期水化性能和浆体结构[J]. 硅酸盐学报,2008,36(10):1406-1410;1416.
WANG Qiang,YAN Peiyu. Characteristics of Hydration Products of Steel Slag[J]. Journal of the Chinese Ceramisc Society,2008,36(10):1406-1410;1416.

[5] 林茂松,张凌怡,王琼,等. 用于钢矿粉复合助磨剂的试验研究[J]. 混凝土,2015(2):63-64;68.
LIN Maosong,ZHANG Lingyi,WANG Qiong,et al. Reserch on composite ginding aid of steel slag and blast furnace slag power[J]. Concrete,2015(2):63-64;68.

[6] 张添华,刘冰,李惊涛,等. 钢渣粉磨工艺技术现状及发展方向[J]. 环境工程,2016,34(S1):704-706;725.
ZHANG Tianhua,LIU Bing,LI Jingtao,et al. The current situation and development orientation of stell slag grinding technology[J]. Environmental Engineering,2016,34(S1):704-706;725.

[7] MOTZ H,GEISELER J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources[J]. Waste Management,2001,21(3):285-293.

[8] RAMACHANDRAN V S. Influence of triethanolamine on the hydration characteristics of tricalcium silicate[J]. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology,1972,22(11):1125-1138.

[9] 曹虎,李海燕,陈梦龙,等. 改性醇胺助磨剂的应用研究[J]. 中国建材科技,2020,29(1):34-36.
CAO Hu,LI Haiyan,CHEN Menglong,et al. Application research on modifide alcoholamine ginding aid[J]. China Building Materials Science &Technology,2020,29(1):34-36.

[10] 肖建敏,李辉,朱绘美,等. 利用红外和核磁技术分析矿渣硅酸盐复合胶凝材料的水化产物[J]. 材料科学与工程学报,2018,36(4):644-649;630.
XIAO Jianmin,LI Hui,ZHU Huimei,er al. Analysis on hydration products of cement-slag complex binderpastes by FITR and NMR[J]. Journal of Materials Science & Engineering,2018,36(4):644-649;630.

[11] 彭康,黄从运,杜颖,等. 改性三乙醇胺高分子助磨剂对水泥水化的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(12):4201-4206.
PENG Kang,HUANG Congyun,DU Ying,et al. Effect of modifide triethanolamine polymer grinding aids on composite cement hydration process[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society,2016,35(12):4201-4206.

[12] 江朝华,蔡安兰,严生,等. 硅酸盐类水泥助磨剂的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2001,20(1):10-10.
JIANG Chaohua,CAI Anlan,YAN Sheng,et al. Study on ginding aids for portland-type cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2001,20(1):10-13.

[13] 林辉,王学光,王栋民,等. 不同官能团有机物对矿渣粉磨及矿渣水泥性能的影响[J]. 非金属矿,2014,37(5):53-56.
LIN Hui,WANG Xueguang,WANG Dongmin,et al. The influences of the organic that contains different functional groups on the grinding of slag and the performances of slag cement[J]. Non-Metallic Mines,2014,37(5):53-56.

(上接第7页)

[14] HUANG Xiaoxian,FAN Xiaohui,JI Zhiyun,et al. Investigation into the characteristics of $H_2$-rich gas injection over iron ore sintering process: Experiment and modelling[J]. Applied Thermal Engineering,2019,157:113709.

[15] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature field of sintering bed[D]. Changsha: Central South University,2012.

[16] 裴元东,史凤奎,吴胜利,等. 烧结料面喷洒蒸汽提高燃料燃烧效率研究[J]. 烧结球团,2016,41(6):16-20;52.
PEI Yuandong,SHI Fengkui,WU Shengli,et al. Research on spraying steam on surface of sintering material bed to increase fuel combustion efficiency[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(6):16-20;52.

[17] 刘臣. $SO_2/NO_x/CO_x$ 在铁矿石烟气循环烧结过程中的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
LIU Chen. Research on behavior of $SO_2/NO_x/CO_x$ in the process of flue gas circulation sintering of iron ores[D]. Changsha: Central South University,2013.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net