

## 技术进展

## 水煤浆添加剂研究及发展动向

刘明强, 刘建忠, 王传成, 高夫燕, 王睿坤, 周俊虎, 岑可法  
(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 简述了水煤浆技术在我国发展的背景及其基本性能, 分析了水煤浆分散剂和稳定剂的作用机理及现在常用的添加剂种类和性能, 介绍了国内外水煤浆添加剂的研究现状和成果, 重点阐述了复配、改性等新技术的应用, 以及两性离子型等新型添加剂的开发情况, 结合目前存在的一些问题, 展望了添加剂的发展趋势。

**关键词:** 水煤浆; 添加剂; 分散剂; 稳定剂

**中图分类号:** TQ423; TQ536

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2011)07-0008-04

### Research and development of coal water slurry additives

LIU Ming-qiang, LIU Jian-zhong, WANG Chuan-cheng, GAO Fu-yan, WANG Rui-kun,  
Zhou Jun-hu, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The development background of coal water slurry (CWS) and its basic performance are briefly reviewed. The mechanism of the CWS dispersants and stabilizers is analyzed in detail. Some commonly used additives and their performance are introduced as well. The research status and achievements of CWS at home and abroad are summarized. The application of new technologies and the development of new additives such as amphoteric ionic additives are focused. The development trends of the new additives are put forwards finally.

**Key words:** coal water slurry; additive; dispersant; stabilizer

煤炭作为一次能源消耗约占我国总能源消耗的72%左右, 在相当长的时间内, 我国的能源消费结构仍将以煤炭为主。由于传统的燃煤方式存在环境污染大、燃料利用率低等问题, 随着构建资源节约型、环境友好型社会目标的提出, 迫切需要一种清洁的煤炭利用方式。

水煤浆是一种高浓度煤水混合物, 由质量分数62%~70%的煤粉、30%~38%的水和约1%的添加剂组成。它既保持了煤炭原有的一些特性, 又具有石油一样的流动性, 并具有一定的稳定性, 可以贮存、泵送、雾化与稳定燃烧。水煤浆由于含硫率和粉尘量都较低, 在燃烧过程中火焰温度比油和煤粉低, 排放的污染物相对较少, 是一种比较理想的代油洁净燃料<sup>[1-2]</sup>。

煤为疏水性物质, 且煤浆中的煤粒很细, 具有很大的比表面积, 容易自发地聚结, 因而煤粒与水不能密切结合成为一种浆体, 很容易产生煤水分离。良好的流变性和稳定性是水煤浆最为重要的性能, 要使水煤浆具有良好的流体特性, 加入化学添加剂必不可少。水煤浆添加剂的主要作用在于改变煤粒的

表面性质, 使煤颗粒能够在水中分散, 使煤浆具有良好的流动性和稳定性。根据作用不同, 添加剂可分为分散剂、稳定剂和辅助添加剂3类。分散剂是最重要的水煤浆添加剂<sup>[3]</sup>。

## 1 分散剂的作用机理和分类

### 1.1 作用机理

水煤浆分散剂是一种表面活性剂, 由疏水基和亲水基2部分构成。制浆时加入少量的分散剂可改变煤粒的表面性质, 使煤粒表面被添加剂分子和水化膜所包围, 让煤粒均匀分散在水中, 从而提高水煤浆的流动性。分散剂的作用机理可从3个方面加以解释: 润湿分散作用、静电斥力分散作用及空间位阻效应<sup>[4]</sup>。

(1) 分散剂一端是非极性的亲油基, 即疏水基, 另一端是亲水的极性基, 即亲水基。在水煤浆中分散剂分子的疏水基和煤表面结合, 亲水基朝水定向排列, 把水分子吸附在煤粒表面, 形成一层水化膜, 变疏水性为亲水性。同时水化膜可将煤粒隔离开, 减少煤粒间的阻力, 达到降黏的作用<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2011-01-24; 修回日期: 2011-04-02

作者简介: 刘明强(1988-), 男, 硕士生, 从事水煤浆添加剂方面研究, 18768133690, 463591981@qq.com; 刘建忠(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤高效清洁燃烧与转化、燃烧源污染物形成与控制、新能源与可再生能源等方面的研究和教学工作, 通讯联系人, 13605708085, jzliu@zju.edu.cn。

(2) 溶胶的经典稳定(DLVO)理论认为,胶体颗粒稳定存在的先决条件是颗粒间的静电斥力大于范德华引力。煤粒在很宽的pH范围内表面均带负电荷。在水煤浆内加入阴离子型分散剂可以提高煤粒表面的负电位值,增强煤粒表面的静电斥力,使煤粒间不易接近,难以聚集,从而增强水煤浆的分散稳定性。

(3) 水化膜中的水因受到表面电场的吸引而呈定向排列。当煤粒相互靠近时,水化膜受挤压变形,引力则力图恢复原来的排列方式,这样就使水化膜具有一定的弹性。煤粒表面吸附添加剂分子时,颗粒间就增加了一层障碍,煤粒、添加剂分子的亲水链及水分子就构成了三维水化膜,当颗粒相互靠近时,由水化膜的弹性作用产生较强的排斥力可阻挡煤粒聚结,产生空间隔离位阻效果。

## 1.2 种类

根据分散剂分子溶于水后是否离解,可将其分为离子型和非离子型,又根据所带电荷性质可将离子型分散剂分为阴离子型和阳离子型。阳离子型分散剂成本高,因此较少使用。常用的分散剂是阴离子型和非离子型两大类。

### 1.2.1 阴离子型分散剂

阴离子型分散剂可分为合成有机高分子分散剂和天然高分子改性分散剂两大类。其中合成有机高分子分散剂主要有煤焦油系、三聚氰胺系、聚烯烃磺酸盐系、聚羧酸盐系等;天然高分子改性分散剂主要有木质素分散剂和腐殖酸分散剂等。

(1) 聚萘磺酸盐系列。萘系分散剂是最常用的煤焦油系分散剂,其主要成分是萘磺酸甲醛聚合物,疏水部分为萘,功能基团是磺酸基。萘系添加剂是目前市场上使用最为广泛的添加剂。其优点是分散性好,减黏作用强,浆体流型好;缺点是浆体稳定性差,易析水产生硬沉淀,价格偏高。Kaushal等<sup>[6]</sup>制得以萘-甲苯为主链的分散剂可使煤浆固含量达到69%(质量分数),表观黏度为998 mPa·s。

(2) 木质素磺酸盐系列。木质素磺酸盐主要来自于造纸废液,其优点是原料丰富,价格便宜,易于加工,且浆体稳定性好;缺点是用量大,成浆浓度低,黏度较大,有较多杂质,浆体流型较粗糙,因此常与其他分散剂复配使用或通过改性提高其性能。李凤起等<sup>[7]</sup>对木质素磺酸钙进行离子交换、氧化、磺化改性后,发现其活性基团增加了,表面活性有所提高,煤浆中煤的质量分数提高了2%,浆体稳定性也明显改善。刘明华<sup>[4]</sup>采用失水山梨醇脂肪酸

Span80和壬基酚聚氧乙烯(30)醚NP-30与木质素磺酸钠按2:3的质量比复配制浆,煤浆质量分数可达70%,表观黏度990 mPa·s,稳定性大于20 d。

(3) 聚烯烃系列。使用这类分散剂制得的水煤浆黏度和稳定性都很理想,用量约为干燥质量的0.5%,但价格昂贵,对煤种要求严格,一般多用于低灰分煤种。实际应用时需严格控制分子质量及其分布,否则会大大降低分散剂的功效。日本Lion公司20世纪90年代初期开发的聚苯乙烯磺酸钠(PSS)是此类分散剂的代表<sup>[8]</sup>。

(4) 腐殖酸系列。此类分散剂从低阶煤中提取,分散性好,可单独使用。实验证明,原料煤越年轻,制得的添加剂降黏效果越好。其缺点是对金属离子敏感,容易形成沉淀,浆体的稳定性差,对制浆水质要求较高。曾凡等<sup>[9]</sup>用含腐殖酸的原料煤和各类含木质素的造纸废液按一定比例混合,经抽提、磺化和缩合等工艺过程后,所得的腐殖酸添加剂制浆黏度低,煤浆质量分数达65%~72%,且长期静置稳定。

此外,用不饱和羧酸单体,如(甲基)丙烯酸、马来酸钠盐和其他单体接枝共聚而成的聚羧酸系分散剂也较为常用,兼有分散和稳定双重作用,可根据实际需要改变其分子质量和分子结构,也可以通过复配改善其性能。还有丙烯酸系添加剂,如丙烯酸和苯乙烯聚合物钠盐、丙烯酸和丙烯酰胺共聚物钠盐、聚丙烯磺酸盐等。此类分散剂减黏作用好,水煤浆质量浓度高,浆液稳定,用量少<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 非离子型分散剂

这类分散剂在水中并不电离,亲水基主要由分子结构中的含氧官能团提供,其亲水端是聚氧乙烯或再配以少许的磺酸基,疏水端是烷基苯或烷基苯酚等,可用通式 $R(CH_2CH_2O)_nH$ 来表示, $n$ 值在50~100时,分散效果才比较明显。这类分散剂可以通过调节EO数(环氧乙烷的聚合度)来实现调节分子的亲水亲油值(HLB值)和相对分子质量,从而达到改变其成浆性能的目的。非离子分散剂既可用作分散剂,又能兼作稳定剂,且不受水质及煤中可溶物影响,但需配用消泡剂,适宜制高质量浓度水煤浆。到目前为止,非离子型分散剂因其价格昂贵而尚未被广泛采用<sup>[11-12]</sup>。

非离子型分散剂主要分为,聚氧乙烯系列,如山梨糖醇聚氧乙烯醚、月桂醇聚氧乙烯醚等;聚氧乙烷系列,如聚氧乙烷与聚氧丙烷嵌段共聚物。

## 2 稳定剂的作用机理和分类

### 2.1 作用机理

水煤浆是一种高浓度固液两相粗分散体系,煤粒具有疏水性,很容易自发聚结,在重力和其他外加力作用下发生沉淀,无论是分子热运动、颗粒间的范德华力,还是颗粒间的静电斥力,都不足以阻止水煤浆颗粒的沉淀<sup>[4]</sup>。由稳定剂作用形成的空间结构对颗粒沉淀产生的机械阻力,可有效阻止颗粒沉淀的发生。制备水煤浆时加入稳定剂,在稳定剂的作用下,已分散的煤粒与周围其他煤粒及水相互交联,形成一种脆弱但有一定强度的三维空间结构。在静置时,这种结构能有效地阻止颗粒沉淀,即使沉淀也是松软的可恢复的软沉淀,而且水被包含在结构的空隙内,使得浆体黏度升高,有较高的静切应力,这有利于浆体的稳定。一旦受到外力剪切作用,空间结构受到破坏,结构中的水被释放出来,浆体黏度又会迅速降下来,即具有剪切变稀的特性。撤除外力后,结构恢复要滞后一段时间,浆体显示出触变性,这对水煤浆的存贮、输送有十分重要的意义<sup>[13]</sup>。

### 2.2 种类

稳定剂主要有无机稳定剂和有机高分子聚合物两大类。其中,无机稳定剂主要是一些无机盐和无机矿物质,如膨润土等种类的黏土。有机高分子聚合物包括瓜尔胶、阿拉伯胶等有机多糖类高分子聚合物、羟乙基纤维素、聚丙烯酰胺,以及一些微细胶体粒子等天然改性或合成的有机高分子物质。实践中大多数有机多糖类高分子聚合物都可作稳定剂。稳定剂的用量随煤种、稳定剂类型、要求的稳定期而异,在干煤质量的 0.006% ~ 0.100% 间变化<sup>[14]</sup>。

## 3 添加剂研究进展

### 3.1 研究成果

从上世纪 70 年代开始,国内外学者对水煤浆添加剂开展了大量的研究,取得了丰硕的成果,开发出了多种性能优良的水煤浆添加剂,其中一些已用于实际生产。日本研究人员开发的水煤浆专用分散剂萘磺酸盐聚合物(NSF)和聚苯乙烯磺酸盐(PSS)已经实现了工业化生产。日本 Lion 公司开发出以聚苯乙烯磺酸钠(PSSNa)为基础的水煤浆添加剂,加入量少,分散性、稳定性都比亚甲基磺酸盐(NSF)等传统分散剂优越<sup>[15]</sup>。美国专利 US005100438A 公开了一种水煤浆添加剂及其制备方法,该添加剂由多羧酸与聚醚多元醇和脂肪胺共聚而成,制得的水

煤浆稳定性好<sup>[16]</sup>。

在国内,中国矿业大学较早地对水煤浆技术开展了系统研究,深入研究了煤与添加剂作用成浆的机理及影响煤成浆性的因素,形成了一套较为完备的水煤浆技术体系。南京大学冉宁庆等<sup>[17]</sup>开发的亚甲基萘磺酸钠-苯乙烯磺酸钠-马来酸钠(NDF)适应的煤种较多,分散性强,在国内已得到较为广泛的应用。此外,国内还有一些企业也在开发水煤浆添加剂并投入应用。淮南矿业集团合成材料有限责任公司开发的 HNF 型水煤浆添加剂可以兼顾水煤浆的分散性和稳定性<sup>[18]</sup>。

### 3.2 研究与发展动向

我国水煤浆技术普遍存在着分散剂与煤种匹配性差的问题,一种添加剂往往只对特定煤种能起到明显的分散降黏的作用,而对其他煤种效果不佳<sup>[19]</sup>,严重制约着添加剂的推广,大大降低新产品的经济效益。所以开发适用性广的添加剂意义重大,是今后添加剂研究的发展方向之一。

萘系分散剂制浆存在着稳定性差和成本较高的问题,木质素系分散剂则存在制浆黏度大、投加量多的问题,腐殖酸系分散剂有稳定性差的缺点,而其他非离子分散剂和聚羧酸类分散剂虽高效但价格昂贵,制浆成本高。不管是哪种添加剂,都存在着限制其推广的缺点。所以,开发出成本较低,兼具分散性和稳定性的多功能复合型高效水煤浆添加剂,是今后研究的趋势。

大量研究发现,几种分散剂复配使用会产生协同效应,有取长补短、协同增效的作用,可以提高水煤浆质量浓度,降低黏度,减少分散剂用量,达到降低成本、提高效能的目的。常见复配方式为阴离子-阴离子型复配,非离子-非离子型复配,非离子-阴离子型复配。其中非离子-阴离子型复配所制得的添加剂性能最佳,如木质素磺酸盐与聚氧乙烯醚的复配等。戴财胜等<sup>[20]</sup>以木质素为主要原料生产的复合型水煤浆添加剂(DCS)具有价格低、工艺简单、煤种适应性广、成浆性能优良等特点。与萘系水煤浆添加剂 NS 相比,不仅添加剂用量少,而且稳定性远超过萘系添加剂。用娄底煤制浆,添加剂 DCS 的用量质量分数仅为 0.2%,制得煤浆质量分数高达 71%,表观黏度为 680 mPa·s,69 d 不产生硬沉淀。

改性是提高分散剂分散效果的另一种途径,可分为物理法和化学法。物理法以膜分离技术为主,通过超滤等分离技术将成分复杂、分子质量不同的

分散剂分离、分级、提纯。化学法包括化学提纯和化学改性。化学提纯指通过化学沉淀除去分散剂中的杂质,进而改变其物化性能;化学改性是通过在分散剂分子上引入其他官能团来改变分散剂自身的性质。常见的化学改性方式有磺化、磺甲基化、缩合、接枝共聚、化学氧化等<sup>[21]</sup>。Zhou 等<sup>[22]</sup>以磺化改性后的造纸黑液为分散剂,获得的分散剂溶解度高。他们发现磺酸基含量和分子质量是影响此分散剂性能的重要因素。在适当的范围内,磺化剂量越大,磺酸基含量越多,大分子质量分子含量越多,分散剂分散性能越好。

一些新型添加剂也越来越为人们所重视,如两性离子添加剂、生物物质添加剂等。目前国内外水煤浆大多采用阴离子型和非离子型添加剂,对同时含有阴阳两种离子基团的两性离子添加剂研究较少。此类添加剂在酸性和碱性溶液中皆可使用,在相当宽的 pH 范围内都有良好的性能,而且几乎可以同所有其他类型添加剂复配。此外两性离子添加剂对水质要求不高,有较好的耐硬水性和耐高浓度电解质性,甚至在海水中也可有效使用<sup>[23]</sup>。朱雪丹等<sup>[24]</sup>以丙烯酸、聚乙二醇为主要原料,制得聚乙二醇—丙烯酸酯类大分子单体,再将该大分子单体与乙烯基磺酸钠和甲基丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵共聚,制备了一种新型两性聚羧酸系水煤浆分散剂。该分散剂分子主链上同时带有阴、阳离子基团,兼具分散和稳定功能。用该分散剂对神府煤做成浆性试验,结果显示,当制浆固体质量分数为 65% 时,水煤浆表观黏度仅为 920 mPa·s,分散剂用量仅为干基煤质量的 0.5%。

无论从研究成果还是实际生产来看,国内对阴离子型分散剂的关注远甚于对非离子型添加剂的研究。非离子型添加剂虽然价格昂贵,但是它兼具分散和稳定的功能,少剂量添加剂即可制得高浓度高稳定性的水煤浆,且对水质要求不高,是一种理想的水煤浆添加剂。因此,大力开展对非离子型分散剂的研究,对我国水煤浆添加剂技术的发展意义重大。

#### 4 结束语

在今后的相当长一段时间内,我国能源仍将以煤炭为主,石油相对稀缺,石油越来越依赖于进口。大力发展水煤浆利用技术,对优化我国能源结构,实现煤炭清洁利用意义重大。

经过多年的努力,我国水煤浆技术基本成熟,在水煤浆添加剂研究与开发上取得了较大的成就,多

种性能优良的水煤浆添加剂已得到较大规模应用。但目前广泛采用的羧系、木质素系、腐殖酸系等类型的添加剂在使用时都有一些不足,特别是对煤种的适应性较差,需要开发新型低成本、高性能、适应性广的添加剂,采用复配、改性技术、两性离子型添加剂等是未来水煤浆添加剂发展的趋势。

#### 参考文献

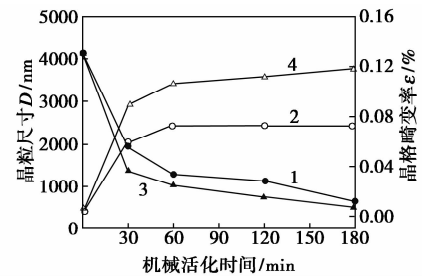
- [1] 刘晓霞,屈睿,黄文红,等. 水煤浆添加剂的研究进展[J]. 应用化工,2008,37(1):1-3.
- [2] 余学海,刘建忠,赵卫东,等. 一种优化煤成浆特性的方法[J]. 热力发电,2009,38(4):14-17.
- [3] 陈荣荣,常宏宏,魏文珑,等. 水煤浆用分散剂的研究进展[J]. 选煤技术,2007,10(5):78-82.
- [4] 刘明华. 水煤浆添加剂的制备及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [5] Mishra S K, Senapatip P K. Rheological behavior of coal-water slurry[J]. Energy Sources,2002,24(2):159-167.
- [6] Tiwari K K, Basu S K, Bitetal K C. High-concentration coal-water slurry from indian coals using newly developed additives[J]. Fuel Processing Technology,2003,85(1):31-42.
- [7] 李风起,朱书全. 水煤浆添加剂改性木质素磺酸钠结构与性能的研究[J]. 煤炭学报,2000,25(4):439-443.
- [8] 孙慈忠. 表面活性剂在水煤浆制浆中的应用[J]. 精细与专用化学品,2002,10(8):17-19.
- [9] 曾凡,高明球,武剑青,等. 高浓度水煤浆添加剂:中国,91105733[P]. 1993-03-10.
- [10] 桂斌. 新型高效水煤浆添加剂的研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [11] 杨荫堂. 聚醚型非离子表面活性剂的制造及性能[J]. 表面活性剂工业,1999,99(4):1-5.
- [12] Nilgün Karatepe. Adsorption of a non-ionic dispersant on lignite particle surfaces[J]. Energy Conversion and Management,2003,44(8):1275-1284.
- [13] 周志军,桂斌,李宁,等. 高分子交联的添加剂对煤粉成浆性的研究[J]. 能源工程,2006,18(4):18-21.
- [14] 王晓春,吴国光,王共远. 水煤浆添加剂及其研究进展[J]. 煤化工,2004,32(6):15-18.
- [15] 张延霖,邱学青,王卫星. 水煤浆添加剂的发展动向[J]. 现代化工,2004,24(3):16-19.
- [16] 谢欣馨,戴爱军,杜彦学. 水煤浆分散剂的发展动向[J]. 煤炭加工与综合利用,2010,28(2):43-46.
- [17] 冉宁庆,戴郁菁,朱光,等. 亚甲基磺酸-苯乙烯磺酸-马来酸盐对水煤浆的分散作用研究[J]. 南京大学学报,1999,35(5):643-647.
- [18] 李少冰. HNF 系列水煤浆添加剂的应用[J]. 洁净煤技术,2002,8(3):19-21.
- [19] 李艳昌,周志强,程军,等. 煤的理化特性对其成浆性能的影响[J]. 煤炭转化,2009,32(3):35-39.
- [20] 戴财胜,杨红波. 复合型水煤浆添加剂的合成与性能研究[J]. 煤化工,2008,36(1):41-43.

Baláz 等人<sup>[3]</sup>在研究机械活化对硫砷钢矿表面性质影响时,通过测定不同活化时间下硫砷钢矿的比表面积发现,随着活化时间的增加,颗粒的比表面积增大,当物料在磨机转速为 1 000 r/min 时活化 60 min,其比表面积是未活化样品的 14 倍。众多研究表明,机械活化初期,由比表面积增大而产生的表面能是机械活化储能增大、反应活性提高的一个重要原因。

## 1.2 晶体结构的变化

在机械力的作用下,晶体的表面会不断形成缺陷,导致表面电子受力被激发产生等离子、表面键断裂引起表面能量变化、表面结构趋于无定形化。随着机械力的持续作用,矿物的晶体结构也会发生多种变化,包括晶格缺陷、晶格畸变、晶型转变、结晶程度降低甚至非晶化等。矿物原料结构的变化通常采用 X 射线衍射法(XRD)加以判定。首先通过 XRD 谱图分析其物相,判断活化过程中是否有新相生成;其次通过衍射线可以计算晶粒大小  $D$ 、晶格畸变率  $\varepsilon$ 、结晶度  $X$ 、无序化程度  $A$  等参数,通过这些参数评价机械活化对矿物结构破坏程度。另外也可以用红外吸收光谱法和穆斯堡尔谱法简单地说明被活化矿物结构的破坏情况。司伟等人<sup>[4]</sup>利用 XRD 对机械活化前后镍铁尾矿进行了表征,发现未处理镍铁尾矿中主要矿物是镁橄榄石  $Mg_2SiO_4$  和磁铁矿  $Fe_3O_4$ 。随着活化的进行,镁橄榄石主要晶面(112)的衍射峰向低角度移动,同时磁铁矿晶面(511)的衍射峰强度降低,衍射峰弥散,半峰宽变大,样品晶格结构产生一定程度的无序化。镍黄铁矿机械活化预处理不同时间后,通过 XRD 衍射线计算无序化程度  $A$  发现,活化时间越长  $A$  值越大,当活化时间  $t_M = 60$  min,  $A = 60\%$ 。而活化时间  $t_M > 30$  min 时,比表面积已不再增加,说明延长活化时间,无定化程度是影响镍黄铁矿反应活性的主要原因<sup>[5]</sup>。Yuan 等人<sup>[6]</sup>在研究干磨和湿磨 2 种活化方式对异极矿结构的影响时,由 XRD 分析发现,干磨和湿磨均使矿样的衍射峰宽化,强度下降,晶粒尺寸  $D$  降低,晶格畸变率  $\varepsilon$  增大,且均随球磨时间的增加更加明显。说明晶体的有序结构在机械力作用下遭到破坏。但是两者

的效果不尽相同,如图 1 所示,湿磨对晶粒大小、晶格畸变的影响更加明显,因此浸出效果更好<sup>[6]</sup>。在相同条件下,湿磨时锌的浸出率要比干磨时提高 2%~4%。从前人的研究发现,机械活化过程中结构的变化是导致机械活化储能增大、反应活性提高的主要原因。



1,2—干磨;3,4—湿磨

图 1 异极矿晶粒尺寸  $D$  和晶格畸变率  $\varepsilon$  随活化时间和活化方式的变化

## 1.3 其他性质的变化

伴随颗粒粒度减小、比表面积增大和晶体结构发生变化的同时,矿物的其他一些性质也会发生变化,如热稳定性、矿物在机械力作用下诱发化学反应而导致矿物表面化学成分变化等。利用差式扫描量热法(DSC/DTA)可以对矿物原料的热稳定性进行研究。曹琴园等人<sup>[7]</sup>报道了利用热重分析(TG)和差式量热扫描(DSC)研究机械活化前后异极矿热稳定性的变化。结果发现,机械活化异极矿的热重曲线与未活化的矿样具有相似的变化规律,但各阶段的质量损失起始温度左移,质量损失率有所增加。说明球磨使矿物的热稳定性降低,反应活性提高,各阶段反应在较低的温度下即可进行。DSC 结果显示,机械活化后的矿样,由于在球磨过程中伴随晶体结构的破坏而导致吸热峰峰值下降。姚金环等人<sup>[8]</sup>通过 DSC 研究了硬锌渣机械活化前后热稳定性的变化,发现搅拌磨机械活化 60 min 以后,DSC 曲线上的吸热峰出峰温度向低温迁移,由未活化时的 420℃ 迁移至 367℃,表明机械活化矿物热稳定性下降,反应活性提高。

机械活化还可能使某些矿物在活化过程中发生

(上接第 11 页)

- [21] 刘彩芳. 水煤浆添加剂及工业废液与煤种的适配规律研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [22] Zhou Mingsong, Kong Qian, Pan Bing, et al. Evaluation of treated black liquor used as dispersant of concentrated coal-water slurry

[J]. Fuel, 2010, 89(3): 716-723.

- [23] 王世荣,李高翔,刘东志,等. 表面活性剂化学[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [24] 朱雪丹,张光华,来智超,等. 两性聚羧酸系水煤浆分散剂的合成及性能研究[J]. 选煤技术, 2010, 2(1): 20-23. ■