



推荐阅读：

[智能化煤矿分类、分级评价指标体系](#)

[煤矿智能化标准体系框架与建设思路](#)

[煤矿智能化\(初级阶段\)研究与实践](#)

[综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践](#)

[煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望](#)

[智慧煤矿主体架构设计与系统平台建设关键技术](#)

[虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望](#)

[德国工业4.0与中国煤机装备智能制造的发展](#)

[智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向](#)

[智能矿井安全生产大数据集成分析平台及其应用](#)

[基于TOA压缩感知的矿井分布式目标定位方法](#)

[松软突出煤层瓦斯抽采钻孔施工技术及发展趋势](#)

[我国煤层气钻井技术及装备现状与展望](#)

[煤矿井孔钻进技术及发展](#)

[2311m顺煤层超长定向钻孔高效钻进技术](#)

[我国煤矿区钻进技术装备发展与应用](#)

[煤矿井下人员精确定位方法](#)

[智慧矿山建设架构体系及其关键技术](#)

[矿山工程信息物理系统研究及挑战](#)

[智能化无人开采系列关键技术之——综采智能化工作面调斜控制技术研究](#)



移动扫码阅读

王玉超.环保型煤炭防冻剂的开发及其应用研究[J].煤炭科学技术,2020,48(8):224-228. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.08.028

WANG Yuchao. Development and application research of environmental-friendly coal antifreeze[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 224-228. doi:10.13199/j.cnki.est.2020.08.028

## 环保型煤炭防冻剂的开发及其应用研究

王玉超<sup>1,2,3</sup>

(1.煤炭科学技术研究院有限公司 矿用油品分院,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;  
3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

**摘要:**氯元素是煤中常见的有害元素之一,在燃烧过程中主要转化为HCl腐蚀设备、酸化空气、危及动植物健康。传统氯化钙防冻剂由于其氯含量高(约64%),会导致煤中氯含量成倍增加,使煤炭在后续应用中产生较大危害,同时也超出了出口煤对氯含量的限制。为了促进煤炭资源的清洁化利用,采用非氯有机和无机复合降凝剂,同时添加金属复合缓蚀剂,首次研制了一种防冻性能优越、缓蚀性高的环保型煤炭防冻剂,其冰点可达-53℃,缓蚀性能优异,钢、铝、铜3种金属的腐蚀速率分别为0.03、0.04、0.03 mm/a,氯含量极低,仅为 $86 \times 10^{-6}$ 。经有机元素分析,环保型煤炭防冻剂所含有机元素主要为C、H、O三种元素,其含量合计达74.83%,在煤炭使用过程中可以充分燃烧,降低了防冻剂对煤炭后续使用的影响。将该防冻剂与传统氯化钙防冻剂进行了工业性试验对比研究,结果表明,喷洒氯化钙防冻剂使3组列车煤中氯含量平均增加了10倍左右,而喷洒环保型煤炭防冻剂对煤中氯含量几乎无影响,其氯含量变化均在测试方法规定的再现性临界差范围之内。环保型煤炭防冻剂的防冻等其他性能同样优于氯化钙防冻剂,满足铁路煤炭运输防冻使用要求。

**关键词:**煤炭防冻剂;煤炭运输;低氯清洁利用;环保

中图分类号:TB69 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2020)08-0224-05

## Development and application research of environmental-friendly coal antifreeze

WANG Yuchao<sup>1,2,3</sup>

(1. Mine Oil Products Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of High Efficient Mining and Clean Utilization of Coal Resources, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Chlorine is one of the most harmful elements in coal. In the combustion process, it is mainly converted into HCl to corrode equipment and acidify air, endangering the health of animals and plants. Due to its high chlorine content (64%), traditional calcium chloride antifreeze will lead to a double or even ten of times increase in chlorine content in coal. The introduction of a large amount of chlorine makes the coal more harmful in subsequent applications, and exceeds the restrictions on coal chlorine content of exports. In order to promote the clean utilization of the whole process of coal, in this paper, a non-chlorine organic and inorganic composite pour point depressant and a metal composite corrosion inhibitor are added to develop an environmentally friendly coal antifreeze with excellent antifreeze performance and high corrosion inhibition. Its freezing point can reach -53℃, and the corrosion inhibition performance is excellent. The corrosion rates of steel, aluminum and copper are 0.03 mm/a, 0.04 mm/a and 0.03 mm/a respectively, and the chlorine content is extremely low, only  $86 \times 10^{-6}$ . According to the analysis of organic elements, the environment-friendly antifreeze coal contained mainly organic elements C, H, O three elements, which total content of 74.83%. It can be fully burned during the use of coal, reducing the impact of antifreeze on the subsequent use of coal. The antifreeze and the traditional calcium chloride antifreeze are compared in an industrial test. The results show that the spraying of calcium chloride antifreeze increase the chlorine content of the three groups of trains by an average of about 10 times, while the spraying of environmentally friendly coal antifreeze has almost no effect on the chlorine content in coal. The change of chlorine content is within the reproducibility criticality range specified by the test method. Other properties such as antifreeze of environmentally

收稿日期:2020-02-22;责任编辑:赵瑞

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业基金青年科技基金资助项目(2017QN003)

作者简介:王玉超(1979—),男,山东德州人,副研究员。Tel:010-84261695, E-mail:250238885@qq.com

friendly coal antifreeze are also superior to calcium chloride antifreeze, which meets the antifreeze use of railway coal transportation and provides a new way for the low chlorine clean utilization of coal.

**Key words:** coal antifreeze; coal transportation; low chlorine clean utilization; environmental protection

## 0 引言

煤炭是我国重要的一次能源,为经济社会发展提供了源源不断的动力。然而,由于煤中含有N、S、Cl等有害元素,在煤炭利用过程中产生了诸多的环境问题,近50年来,经过科研人员的不断努力,燃煤脱硫脱硝技术取得了长足的进步,能够实现对SO<sub>2</sub>及NO<sub>x</sub>的合理控制<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着全民环保意识的逐渐增强,煤中氯的污染逐渐受到了国内外的关注,如日本对进口煤中的氯含量要求为小于0.02%,韩国对煤质的要求为氯含量不大于0.025%<sup>[3]</sup>。据研究报道,煤中氯在燃烧过程中大部分以HCl的形式释放出来,腐蚀锅炉及管道设备,构成巨大的安全隐患,同时污染大气<sup>[4-5]</sup>。

煤中氯的主要来源有2个方面,一方面是煤中固有氯,但据统计我国大部分煤中氯含量较低,大部分属于特低氯煤<sup>[6]</sup>;另一方面是为了防止冬季煤炭铁路外运过程中的冻煤问题,提高列车周转效率,增强铁路运输能力而添加的氯化钙防冻剂所致<sup>[7]</sup>,且引入氯元素含量较大。以神东煤炭集团的现行喷洒工艺为例,氯化钙防冻剂对煤炭氯含量的贡献量约为0.02%。由于氯离子半径小,活性高,增加了对列车及喷洒设备的腐蚀,特别是对燃煤锅炉的腐蚀<sup>[8-9]</sup>,其转化为酸性气体HCl排放,进入大气中,危害人类健康及加速其他金属腐蚀<sup>[10-12]</sup>,同时由于氯含量超标也影响了煤炭的出口。此外,由于氯化钙防冻剂稀释液的黏度较小,附着力低,在防止车厢侧壁煤炭冻结的效率不佳<sup>[13]</sup>。研究人员对国内外文献进行了调研,尚未见有关于无氯环保型煤炭防冻剂的报道。

综上所述,设计、开发无氯低冰点(-53℃)、黏度适宜且具有良好防腐蚀性的环保型煤炭防冻剂(简称环保型防冻剂,下同)显得尤为重要,以期减少设备腐蚀,保护大气环境,同时提高煤炭资源的附加值。为了探究环保型防冻剂与氯化钙防冻剂的性能差异,通过工业性试验对其防冻性能及对煤质的影响进行了研究对比,特别是对煤中氯含量的影响。

## 1 防冻剂制备及性能评价

### 1.1 作用原理

根据防冻剂的降凝原理<sup>[14-15]</sup>,破坏液体内部有

序的水分子排列结构。依据相关研究报道,从化学键的角度,可以通过离子键形成水合离子<sup>[16-17]</sup>以及分子间氢键<sup>[18]</sup>实现对水分子有序排列结构的破坏。因此,笔者主要选择非氯无机、有机复合降凝剂实现协同降凝防冻,具体以甲酸、醋酸等通过离子键形成水合离子,破坏液体内部水分子的排列结构;以多元醇、有机胺等有机小分子主要通过含有孤电子对的N、O杂原子与水分子形成分子间氢键,破坏液体内部水分子的有序结构。

### 1.2 试验仪器及条件

试验仪器:BSY-188A自动发动机冷却液冰点测定仪,elementar vario EL cube有机元素分析仪(测定C、H、O、N及S元素),德国斯派克分析仪器公司SPECTRO ARCOS电感耦合等离子体发射光谱仪(测定P元素)。缓释性参照JB/T 7901—2001《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》对缓释性的要求进行测试;所开发环保型防冻剂的综合性能参照TB/T 3208—2008《散装颗粒货物运输用防冻液技术条件》对其进行性能评价;车厢冻煤量由天津港神华煤码头清车中心统计并提供;装车前煤质检测由神华神东煤炭集团公司煤质中心检测,到港煤质检测委托煤科(天津)煤炭检测有限公司检测。

### 1.3 配方设计

1)基础防冻组分的筛选复配。根据课题组前期对降凝剂的研究基础<sup>[19]</sup>,发现通过单一降凝剂达到设计任务要求非常困难,且成本较高,因此,对目标降凝剂进行了复配增效研究,由表1可以发现:第6组和第8组冰点小于-50℃,满足设计要求,由于有机胺单价较高,同时含有煤中有害元素N,综合考

表1 降凝剂筛选复配试验

Table 1 Screening compounding experiment of pour point depressant

序号	质量分数/%					冰点/℃
	醋酸盐	甲酸盐	多元醇	有机胺	水	
1	13	20	17	0	50	-47
2	13	18	19	0	50	-43
3	13	25	12	0	50	-46
4	14	21	15	0	50	-44
5	17	18	15	0	50	-49
6	17	15	15	3	50	-53
7	12	18	15	5	50	-47
8	14	18	13	10	45	-59

虑,选择第6组作为最优配方组成,并作为有序研究的基础配方。

2)缓蚀剂的筛选复配。缓释性主要参照机械行业标准JB/T 7901进行金属全浸试验,选择富含杂原子的苯并三唑类与二元羧酸盐作为缓蚀剂,通过其富含孤电子对的杂原子与金属的配位作用,在金属表面形成吸附膜实现缓蚀防锈。通过挂片试验评价,由表2可知,第9组苯并三唑类与二元羧酸盐质量比1:3作为复合缓蚀剂,兼顾有色黑色金属防锈,其最优添加量为0.4%。

表2 不同缓蚀剂筛选复配的腐蚀速率

Table 2 Corrosion rate of different inhibitor compound screening

序号	缓蚀剂质量分数/%		缓蚀剂添加量/%	腐蚀速率/(mm·a <sup>-1</sup> )		
	苯并三唑类	二元羧酸盐		钢	铝	铜
1	0	100	0.2	0.12	0.08	0.23
2	0	100	0.6	0.04	0.05	0.19
3	100	0	0.2	0.15	0.24	0.05
4	100	0	0.6	0.14	0.19	0.04
5	50	50	0.2	0.07	0.09	0.06
6	50	50	0.4	0.05	0.07	0.05
7	50	50	0.6	0.04	0.06	0.04
8	25	75	0.2	0.05	0.07	0.04
9	25	75	0.4	0.03	0.04	0.03
10	25	75	0.6	0.02	0.04	0.03
11	75	25	0.2	0.06	0.10	0.06
12	75	25	0.4	0.04	0.08	0.03
13	75	25	0.6	0.04	0.06	0.03

3)产品的配方设计和性能评价。根据冬季煤炭铁路运输对产品的需求,在降凝剂、缓蚀剂的基础上,考虑产品喷洒过程中的挂壁性能,以及在低温下需要保持良好的稳定性。根据课题组前期对高分子增稠稳定剂的研究<sup>[20]</sup>,经筛选评价,选择添加0.1%富含羟基且呈网状结构的改性瓜尔胶作为体系增稠稳定剂。综上,环保型防冻剂配方具体为醋酸盐17%,甲酸盐15%,多元醇15%,有机胺3%,复合缓蚀剂0.4%,增稠稳定剂0.1%,水49.5%。所开发配方按TB/T 3208—2008《散装颗粒货物运输用防冻液技术条件》对其进行了性能评价,各项指标均满足标准要求。除此之外,其氯含量极低,仅为86×10<sup>-6</sup>。

#### 1.4 有机元素分析

为了控制环保型防冻剂对煤质影响最小最优化,防止额外引入N、S、P等有机有害元素,对环保

型防冻剂进行了元素分析,结果见表3。环保型防冻剂不含元素P和S,其含有C、H、O、N等有机元素,主要为C、H、O三种元素,共计74.83%,N元素含量相对较少,且煤中N元素含量相对较多,因此,环保型防冻剂对煤中N元素的贡献量相当少,可以推测环保型防冻剂对煤质影响非常有限且可控。

表3 环保型防冻剂的有机元素分析

Table 3 Analysis of organic elements of environmental-friendly antifreeze

测试项目	测试结果	测试项目	测试结果
w(C)/%	10.29	w(N)/%	3.26
w(H)/%	7.56	w(P)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	N.D.(<5)
w(O)/%	56.98	w(S)/(mg·kg <sup>-1</sup> )	N.D.(<5)

注:此环保型防冻剂不含49.5%的水;N.D.表示未检出(小于方法检出限值)。

## 2 工业性试验

为检验环保型防冻液工业性应用情况,在神东煤炭集团石圪台煤矿分选中心装车站进行了工业性对比试验。试验周期为2018年1月15—31日,车型选择易冻车的C80铝合金车壁圆底列车,试验总共进行3组,每组2列,其中1列为喷洒环保型防冻液,另1列为喷洒氯化钙防冻液,每组试验列车同时喷洒防冻液,同时发往天津港神华煤码头。

### 2.1 防冻性能

根据列车到港卸车情况对比,由表4可知,第1组环保型防冻液与氯化钙防冻液防冻效果基本相同,车厢侧壁与车厢底部无冻煤残留。而第2组2辆列车的车厢迎风侧壁和后壁均有冻煤残留,

表4 不同车次其冻煤量

Table 4 Amount of frozen coal in different trains

试验次序/煤种	车次	防冻剂类型	喷洒总量/m <sup>3</sup>	撒粉量/t	冻煤量/t
第1组/神混4800	8752	环保型防冻剂	9.3	0	0
	8160	氯化钙防冻剂	9.3	0	0
第2组/神混5000	8222	环保型防冻剂	9.5	0	150
	8342	氯化钙防冻剂	9.5	1.9	160
第3组/神混5000	8270	环保型防冻剂	9.6	0	50
	8690	氯化钙防冻剂	9.6	2.7	70

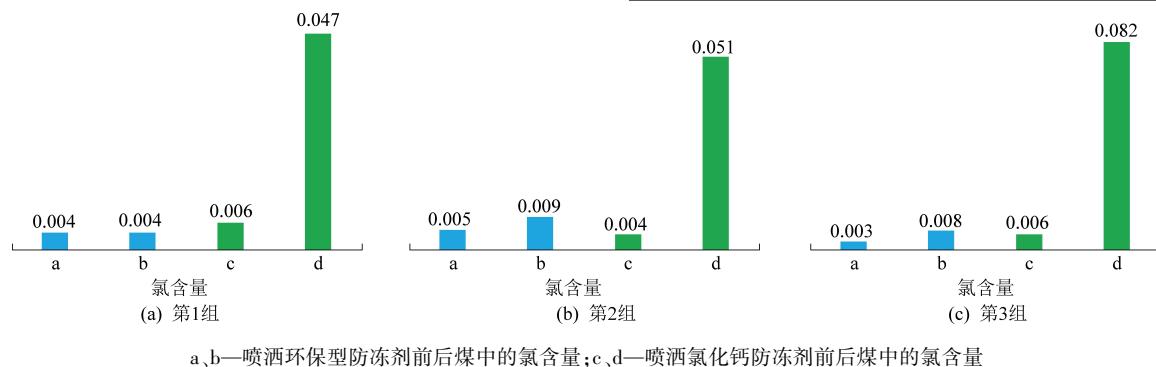
原因为装车前车厢中残留了许多未清理的冻煤,另外,车厢底部有大量的积雪,对防冻液进行了稀释,导致冻煤量增加。第3组试验车厢侧壁无冻煤残留情况,而车厢底部及车厢角落处有少量冻煤残留。第2、3组列车车厢冻煤量较第1组试验较多,主要原因为装车前车厢内冻煤、积雪及天气变冷等因素。另外,第2、3组喷洒氯化钙防冻剂的列车除喷洒防冻液外,车厢底部进行了固态撒粉,而喷洒环保型防冻剂的列车未进行固态撒粉,但到港后环保型防冻剂的列车冻煤量略少于氯化钙防冻剂的车辆,故充分说明环保型防冻剂防冻性能优于氯化钙防冻剂。

## 2.2 对煤质的影响

根据相关国标煤元素含量测定方法,对到港煤与装车前的煤进行煤质检测,结果见表5。由表5可知,由于防冻剂的使用,使到港煤全水分和灰分略有增加,挥发分略微降低,全硫分基本不变,因此,除煤中氯含量的变化,其他煤质指标均合理可控。

## 2.3 煤中氯含量分析

根据GB/T 3558—2014《煤中氯的测定方法》规定,氯元素的再现性临界差为0.02%,由图1可知,添加环保型防冻剂的3组试验,在装车前与到港后煤中氯的测定结果基本一致,测量结果均在测定方法所规定的再现性范围之内,说明该防冻剂对煤中氯元素的含量没有影响。而使用氯化钙防冻剂的3组试验,与装车前煤中氯的测定结果相比,到港后煤中氯的测定结果均有明显的提高,是喷洒环保型防冻剂的数倍甚至数10倍,并且均大幅超过了出口煤对煤中氯含量的规定限值0.02%。



a、b—喷洒环保型防冻剂前后煤中的氯含量;c、d—喷洒氯化钙防冻剂前后煤中的氯含量

图1 添加不同环保型防冻剂的煤氯含量变化分析

Fig.1 Chlorine content change analysis of coal added with different environmental-friendly antifreezes

## 3 结论

1)根据煤炭运输行业的实际需求及防冻剂设计原理,选择非氯有机和无机降凝剂,搭配复合缓蚀

表5 喷洒防冻剂前后的煤质检测结果

Table 5 Coal detection results before and after spraying antifreeze

试验次序/ 煤种	车次	防冻剂 类型	全水 分 M <sub>w</sub> /%	灰分 A <sub>d</sub> /%	挥发 分/%	w(S) <sub>t,d</sub> / %
第1组/ 神混 4800	8751	喷洒防 冻剂前	18.6	16.58	30.05	0.44
	8752	环保型 防冻剂	18.6	17.34	29.62	0.44
	8159	喷洒防 冻剂前	18.2	16.87	29.81	0.41
	8160	氯化钙 防冻剂	18.7	16.23	29.56	0.39
第2组/ 神混 5000	8221	喷洒防 冻剂前	17.6	13.98	31.76	0.44
	8222	环保型 防冻剂	18.2	15.60	30.85	0.47
	8341	喷洒防 冻剂前	17.6	15.03	30.82	0.44
	8342	氯化钙 防冻剂	18.6	15.02	31.08	0.39
第3组/ 神混 5000	8269	喷洒防 冻剂前	19.2	13.57	31.79	0.41
	8270	环保型 防冻剂	18.8	14.00	31.56	0.41
	8689	喷洒防 冻剂前	19.5	12.49	31.60	0.39
	8690	氯化钙 防冻剂	19.0	14.00	30.86	0.41

剂及增稠剂,经过实验室筛选优化,设计开发出了环保型防冻剂,其氯含量仅为 $86 \times 10^{-6}$ ,冰点可达-53℃,其他性能满足铁路行业标准TB/T 3208—2008。

2)配方中引入增稠剂,增强了环保型防冻剂在

车厢上的附着力,提高了其防冻效果,通过工业性试用验证表明:列车喷洒环保型防冻剂到港后的冻煤量低于喷洒传统氯化钙,可有效满足煤炭运输的防冻需求。

3)对环保型防冻剂元素分析,其成分主要为C、H、O,达74.83%,未引入其他有害元素;通过对到港煤质分析,表明喷洒环保型防冻剂对煤中氯含量几乎无影响,可以有效实现煤炭的低氯清洁运输。

#### 参考文献(References):

[1] 魏淑娟,王爽,周然.我国烧结烟气脱硫现状及脱硝技术研究[J].环境工程,2014,32(2):95-97.  
WEI Shujuan, WANG Shuang, ZHOU Ran. Research on present situation of desulfurization and denitrification technology for sintering flue gas [J]. Environmental Engineering, 2014, 32 (2) : 95-97.

[2] 沙乖凤.燃煤烟气脱硫脱硝技术研究进展[J].化学研究,2013(3):315-321.  
SHA Guafeng. Research progress of technology for desulfurization and denitrification of fire-coal flue gas [J]. Chemical Research, 2013(3) :315-321.

[3] 王向荣.煤中氯的赋存形态及控制方法[J].科技情报开发与经济,2007(4):165-166.  
WANG Xiangrong. The occurrence mode of and control methods for the chlorine in coal [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007(4) :165-166.

[4] 郭华楼,胡宾生,贵永亮.煤粉中的氯在高炉冶炼过程中的行为[J].中国冶金,2010,20(11):12-15.  
GUO Hualou, HU Binsheng, GUI Yongliang. Behavior on blast furnace smelting process of chlorine in coal [J]. China Metallurgy, 2010,20(11):12-15.

[5] 邓双,张辰,刘宇,等.基于实测的燃煤电厂氯排放特征[J].环境科学研究,2014,27(2):225-231.  
DENG Shuang, ZHANG Chen, LIU Yu, et al. A full-scale field study on chlorine emission of pulverized coal-fired power plants in China [J]. Reserrch of Environmental Science, 2014,27(2):127-133.

[6] 姜英.我国煤中氯的分布及其分级标准[J].煤质技术,1998(5):6-9.  
JIANG Ying. Distribution of chlorine in coal and its grading standards in China [J]. Coal Quality Technology, 1998(5) :6-9.

[7] 阎建峰.大秦线冬季煤炭运输冻车原因分析及对策[J].铁道货运,2017,(3):55-58.  
YAN Jianfeng. Analysis on reasons of vehicle freezing during coal transportation on Datong-Qinhuangdao Line in winter and its countermeasures [J]. Freight Loading and Unloading, 2017, (3) :55-58.

[8] 黄秋伟,简璐,李国亮,等.油套钢管在氯化钙溶液中腐蚀及缓蚀性能研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2016,38(6):158-163.  
HUANG Qiuwei, JIAN Lu, LI Guoliang, et al. Corrosion and inhibi-

tion performance study of oil casing steel in calcium chloride solution [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016,38 (6) :158-163.

[9] 刘波,魏小兰,王维龙,等. In625合金和316L不锈钢在NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>熔盐中的腐蚀机理[J].化工学报,2017,68(8):3202-3210.  
LIU Bo, WEI Xiaolan, WANG Weilong, et al. Corrosion behavior of In625 alloy and 316L stainless steel in NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub> ternary eutectic molten salt [J]. CIESC Journal, 2017, 68 (8) : 3202-3210.

[10] SWAINE. Trace Elements in Coal [M]. Sydney: Butterworths, 1990:99-100.

[11] 李琦.燃煤过程中氯化氢控制机理研究[D].杭州:浙江大学,2003.

[12] 王树轩,李宁,李波.氯盐型融雪剂碳钢腐蚀性的测定新方法[J].盐业与化工,2012,41(1):19-23.  
WANG Shuxuan, LI Ning, LI Bo, et al. Determination for chloride salt-type of deicing salt carbon steel causticity [J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2012,41(1) :19-23.

[13] 周兴业,高蓬辉,程博,等.冬季煤炭防冻剂防冻特性研究[J].节能技术,2017,35(2):120-127.  
ZHOU Xingye, GAO Penghui, CHENG Bo, et al. Study on anti-freeze characteristic of coal anti-freeze in winter [J]. Energy Conservation Technology, 2017,35 (2) :120-127.

[14] 王振,李化建,黄法礼,等.铁路工程混凝土防冻剂研究现状与问题探讨[J].铁道建筑,2018,58(8):142-146.  
WANG Zhen, LI Huajian, HUANG Fal, et al. Research status and problem discussion of concrete antifreeze admixture in railway engineering [J]. Railway Engineering, 2018,58(8) :142-146.

[15] 孙小彬.防冻剂对混凝土性能影响研究及配比优化[D].阜新:辽宁工程技术大学,2014:4-8.

[16] PENG Jinbo, CAO Duanyun, HE Zhili. The effect of hydration number on the interfacial transport of sodium ions [J]. Nature, 2018:701-705.

[17] 马旭村.水合离子的微观结构和输运动力学研究新进展[J].科学通报,2018,63(21):12-14.  
MA Xucun. New progress in the study of microstructure and transport mechanics of hydrated ions [J]. Chinese Science Bulletin, 2018,63 (21) :12-14.

[18] SUN Zhaoru, PAN Ding, XU Limei, et al. Role of proton ordering in adsorption preference of polar molecule on ice surface [J]. PNAS, 2012,109(33) :13177-13181.

[19] 王玉超,杭智军,叶雷.新型环保煤炭防冻剂的开发与工业性试验[J].煤炭与化工,2018,41(11):123-126,129.  
WANG Yuchao, HANG Zhijun, YE Lei. Development and industrial test of new environmental protection coal antifreeze [J]. Coal and Chemical Industry, 2018,41(11) :123-126,129.

[20] 孔令坡,夏卓飞.复合型铁路煤炭运输抑尘剂的研制及应用[J].煤矿机械,2019,40(8):150-151.  
KONG Lingpo, XIA Zhuofei. Development and application of complex dust suppressant in coal railway transportation [J]. Coal Mine Machinery, 2019,40(8) :150-151.