

Jiangti Pengzhang Chongtian Cailiao

Xingneng Yanjiu Yu Yingyong

浆体膨胀充填材料 性能研究与应用

 石建新 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

Jiangti Pengzhang Chongtian Cailiao

Xingneng Yanjiu Yu Yingyong

浆体膨胀充填材料 性能研究与应用

● 石建新 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内容提要

本书主要介绍了浆体膨胀充填材料充填浆体流动性能、充填材料膨胀性能、充填体强度特征、充填体稳定性、充填体环境影响等方面的试验研究成果,并提出了相应的试验方法与技术指标。本书可供从事矿山充填工作的科研人员、在校研究生等阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

浆体膨胀充填材料性能研究与应用/石建新著. —

徐州:中国矿业大学出版社,2013.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2147 - 6

I. ①浆… II. ①石… III. ①膨胀水泥—充填材料—研究 IV. ①TD353 ②TQ172.74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 286190 号

书 名 浆体膨胀充填材料性能研究与应用

著 者 石建新

责任编辑 吴学兵 姜 华

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

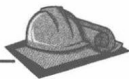
印 刷 江苏徐州新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 23 字数 482 千字

版次印次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

定 价 112.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



序

我国大约 95% 的煤炭产量来自垮落法管理顶板井中开采。这种开采方式引发的地表沉陷不断破坏着人类赖以生存的水土资源和生态环境。采用留设保护煤柱护巷和控制沉陷灾害的传统开采方法,所造成的煤炭资源损失超过 40%,而且易引发冲击地压、煤与瓦斯突出以及突水等重大事故。为此,我国广大现场工程技术人员和科技工作者,利用矿山压力和岩层运动控制理论的相关研究成果,在无煤柱充填开采技术方面取得了一系列的创造性成果,为贯彻“生产安全型、资源节约型和环境友好型”可持续发展方针做出重要的贡献。

实现无煤柱充填开采的关键,首先是要在继续深化工程理论研究的基础上,在充填技术(包括工艺、装备、特别是充填材料研究方面)上取得重大突破,走出高技术、高效益、低成本之路。

充填材料的来源是否充足和充填体的力学性能是否满足岩层控制的要求,是衡量一项充填采煤技术是否具备先进性和实用性的首要因素和重要标准。为此,山东省淄博市王庄煤矿联合多所高等院校研究开发的浆体膨胀充填材料,较好地克服了这些技术难题。

一是浆体膨胀充填材料的原料选择。选用粉煤灰、赤泥、尾矿等硅质工业废弃物和石灰、石膏、水泥等普通建筑用材作原料,来源较为广泛。特别是基料中的粉煤灰,是煤矿伴生的废弃物,具有相对充足而又可持续的来源。

二是浆体膨胀充填材料的性能研究。针对如何提高材料的“流动、早强、膨胀和稳定”四个特性进行研究。在山东省自主创新成果转化重大专项支持下,集中研究了浆体制送中的流动、固化过程中的膨胀和充填体的稳定、抗压、抗渗、抗热、环境影响等性能,取得了



大量试验数据和多项理论成果,从材料方面克服了充填工艺中的管路堵塞、接顶不足等难题,从微观上揭示了充填体能够长期控制岩层移动和避免地质环境损害的能力。同时,也为制定浆体膨胀充填材料的技术指标体系,提供了参考依据。

据著者介绍,以浆体膨胀材料为充填原料的充填技术,已先后在辽宁阜新矿业(集团)有限公司、陕西中能煤田有限公司、山东能源集团有限公司和山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司得到推广应用。其中,辽宁阜新矿业(集团)有限公司已采出工业广场压煤150万t以上。在埋深450 m、采高2.6 m的地质条件下,实际观测地面下沉量30~90 mm。不但取得了较明显的减沉效果,而且实现了煤炭资源的高回收率开采,从而产生了显著的生态效益和经济效益。实践证明,以浆体膨胀充填材料为原料的充填采煤技术在“三下”压煤区和生态脆弱区的大面积应用是可行的。

一个地方国有煤矿,选择和研究了这么一个大课题,并且能够做得非常细致和深入,实属难能可贵。尤其在充填材料及其充填体性能方面取得的研究成果,具有创新之处。看了这部专著,其内容汇聚了相关研究成果,有深度和实用经济价值。借此,也想推荐给从事矿山充填工程和材料研究的工程技术人员、在校本科生和研究生阅读与参考。

中国科学院院士

2013年8月



前 言

2010年8月,近80岁高龄的钱鸣高院士到我们王庄煤矿调研时,叮嘱我们:充填开采技术的关键内容主要有两个方面,一是充填材料的基本性质;二是充填体控制岩层移动变形的能力。研究工作的起始重点要放在研究充填材料的稳定性、多样性和适应性方面,这是充填开采技术中的关键之关键。希望我们:要联合材料方面的高等院校或研究机构进行深度研究,并形成控制岩层移动变形的充填技术体系。激励我们:假如将来你们能够把这些成果推广到鄂尔多斯等晋陕蒙宁地区,那对全国也是一件很好的事情。

三年过去了,我们在充填材料的研究与应用方面,联合山东理工大学、中国矿业大学、天地科技股份有限公司研究出了以粉煤灰、风积沙、尾矿、赤泥的一种或者几种为基料的浆体膨胀充填材料,并系统地揭示了充填体能够保持长期稳定的机理。

浆体膨胀充填材料由于具有良好的流动性、较高的早强性、适度的膨胀性和长期的稳定性等特点,很快在煤矿开采中得到了应用,获得了明显的生态效益和经济效益,并逐步向金属矿山、化工矿山推广应用。

浆体膨胀充填材料虽然在工艺技术上取得了重大突破,但在相关的理论体系、试验方法、检测指标方面还存在一定的疑问:如浆体膨胀充填材料浆体流动性方面,浆体黏度随水化时间变化情况,如何控制浆体的固化过程,浆体流动性能否在扰动状态下不发生改变等;浆体膨胀充填材料膨胀性方面,是如何控制膨胀率的大小的,达到多大的膨胀率能够获得最佳效果等;浆体膨胀充填材料稳定性方面,充填体碳化会不会改变充填体的性能与使用,抗水渗透和抗热能力如何等;浆体膨胀充填材料环境影响方面,会不会有重金属离



子析出影响矿井地下水等。

2012年,“高水膨胀材料充填减沉与保水开采技术”列入山东省自主创新成果转化重大专项。通过近两年的试验研究,从浆体膨胀充填材料原材料性质、浆体流动性能、充填材料膨胀性能、充填体强度特征、充填体稳定性能、环境影响等方面,系统性地从机理分析、相关行业指标、试验方法、试验指标等方面进行了阐述,寄希望于该项工作能够给人们对浆体膨胀充填材料的一些疑虑有一个相对满意的解答和交待。

本书第1章至第22章的试验,是在山东理工大学与淄博市王庄煤矿校企共建的“浆体膨胀充填材料实验室”进行的,由山东理工大学负责;第23章至第25章的试验由中国矿业大学负责。

当然,学无止境。在浆体膨胀充填材料性能与应用方面,肯定还会有不完善的地方,还有很多问题需进行更深入的研究。在此,也寄希望于关注充填采煤技术发展的领导、专家和同仁们,给予更多的指导、支持和合作。

王建设

2013年6月30日

常用符号说明

1. C 氧化钙(CaO)
2. S 二氧化硅(SiO_2)
3. A 三氧化二铝(Al_2O_3)
4. F 三氧化二铁(Fe_2O_3)
5. M 氧化镁(MgO)
6. H 水(H_2O)
7. $\bar{\text{C}}$ 二氧化碳(CO_2)
8. $\bar{\text{S}}$ 三氧化硫(SO_3)
9. C-S-H 水化硅酸钙(Calcium Silicate Hydrate)
10. C-A-H 水化铝酸钙(Calcium Aluminate Hydrate)
11. C-A-S-H 水化硅铝酸钙(Calcium Silicate Aluminate Hydrate)
12. AFt 钙矾石($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)
13. CH 氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
14. C_2S 硅酸二钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
15. C_3S 硅酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)
16. C_3A 铝酸三钙($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
17. C_4FA 铁铝酸四钙($4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)
18. XRD X 衍射分析
19. TG 差热分析
20. DT 热重分析
21. EDA 能谱分析
22. SEM 扫描电镜



目 录

绪论	1
第 1 章 原材料物化性能试验	3
1.1 概述	3
1.2 化学性质分析	3
1.3 各组分物理性能测试	4
1.4 结论	8
第 2 章 充填浆体黏度试验	9
2.1 概述	9
2.2 浆体黏度与测量	9
2.3 试验操作步骤及数据处理	13
2.4 结论	16
第 3 章 充填浆体流变试验	17
3.1 概述	17
3.2 浆体流变学研究简述	17
3.3 浆体膨胀充填材料流变参数的影响因素	20
3.4 浆体膨胀充填材料充填浆体流变试验	22
3.5 结论	52
第 4 章 充填浆体固化过程控制试验	54
4.1 固化过程控制的背景和意义	54
4.2 胶结充填体强度强化研究现状	55
4.3 浆体搅拌控制理论研究	55
4.4 浆体固化过程控制试验	59
4.5 数据分析	62
4.6 结论	69



第 5 章 充填浆体凝结试验	70
5.1 概述	70
5.2 浆体凝结机理分析	70
5.3 试验试样、参考标准及操作步骤	75
5.4 数据处理	76
5.5 结论	80
第 6 章 充填材料膨胀试验	82
6.1 概述	82
6.2 浆体膨胀充填材料膨胀机理分析	82
6.3 膨胀率测定方法	88
6.4 膨胀率测定试验	88
6.5 膨胀剂对充填体结构的影响	98
6.6 结论	100
第 7 章 充填浓度影响试验	101
7.1 概述	101
7.2 浓度对强度影响机理	101
7.3 试验试样及试验方法	103
7.4 试验结果与分析	103
7.5 结论	108
第 8 章 充填体养护方式试验	110
8.1 概述	110
8.2 养护方式影响强度机理分析	110
8.3 养护方式试验方法	112
8.4 试验结果及分析	114
8.5 不同养护方式结果对比分析	144
8.6 结论	145
第 9 章 充填体失水速率试验	146
9.1 概述	146
9.2 充填体含水与失水机理分析	146
9.3 充填体失水速率试验	148
9.4 试验结果与分析	150



9.5 结论	157
第 10 章 充填体尺寸效应试验	158
10.1 概述	158
10.2 尺寸效应	159
10.3 混凝土尺寸效应经典理论和研究方法	160
10.4 浆体膨胀充填材料与混凝土结构的特征对比	164
10.5 尺寸效应试件制作与试验	167
10.6 尺寸效应数据和分析	170
10.7 尺寸效应试验误差分析	174
10.8 结论	176
第 11 章 充填体强度试验	177
11.1 概述	177
11.2 强度机理研究	177
11.3 强度试验	183
11.4 结论	186
第 12 章 充填体压缩变形试验	187
12.1 概述	187
12.2 压缩变形研究简述	187
12.3 压缩变形试验	190
12.4 结论	194
第 13 章 充填体剪切变形试验	195
13.1 概述	195
13.2 剪切变形研究简述	195
13.3 剪切变形试验	197
13.4 结论	201
第 14 章 充填体声波传播试验	202
14.1 概述	202
14.2 固体材料声波传播理论	202
14.3 充填体波速研究现状	204
14.4 充填体声波传播试验	204



14.5	试验结果分析	209
14.6	加载过程声波波速变化试验	210
14.7	结论	212
第 15 章	充填体微观结构分析	213
15.1	概述	213
15.2	试验仪器和工作原理	213
15.3	不同养护龄期充填体试件微观结构	216
15.4	不同浆体浓度充填体试件微观结构	219
15.5	碳化对充填体微观结构的影响	223
15.6	结论	226
第 16 章	充填体抗水渗透试验	227
16.1	充填体抗水渗透的重要性	227
16.2	浆体膨胀充填材料渗透机理	227
16.3	影响浆体膨胀充填材料抗渗等级的因素	230
16.4	抗渗性能测试方法	231
16.5	浆体膨胀充填材料抗渗性能测试方法	232
16.6	试验结果	236
16.7	结论	236
第 17 章	充填体冻融试验	237
17.1	概述	237
17.2	浆体膨胀充填材料冻融机理分析	238
17.3	充填体抗冻性能指标的确定	240
17.4	充填体抗冻融性能的测定	242
17.5	结论	247
第 18 章	充填体抗热试验	248
18.1	概述	248
18.2	充填体抗热机理分析	248
18.3	试验方法	250
18.4	数据处理	251
18.5	结论	253



第 19 章 充填体抗氯离子扩散试验	254
19.1 概述	254
19.2 氯离子在混凝土中的传输机制和经典理论	254
19.3 充填体氯离子扩散性能试验方法	258
19.4 氯离子渗透系数对充填体稳定性的影响	264
19.5 结论	265
第 20 章 充填体动弹性模量试验	266
20.1 概述	266
20.2 机理分析	266
20.3 充填体动弹性模量试验	270
20.4 结论	271
第 21 章 充填体碳化试验	273
21.1 概述	273
21.2 浆体膨胀充填材料充填体碳化试验	274
21.3 碳化层自防护作用试验	295
21.4 碳化防护措施及效果试验	298
21.5 结论	301
第 22 章 充填体淋溶试验	303
22.1 概述	303
22.2 试验方法及原理	303
22.3 淋溶试验	305
22.4 试验结果与分析	310
22.5 结论	311
第 23 章 充填体强度增长与顶板压力作用关系的理论模型	312
23.1 长壁工作面充填体与顶板压力作用关系的力学模型	312
23.2 长壁浆体膨胀充填材料充填开采合理充填步距优选	316
23.3 结论	323
第 24 章 充填体对顶板下沉控制作用的影响因素研究	324
24.1 充填采煤减沉的适用性研究	324
24.2 埋深对充填开采顶板下沉控制作用的影响	331



24.3	采高对充填开采顶板下沉控制作用的影响·····	335
24.4	充填率对充填开采顶板下沉控制作用的影响·····	337
24.5	结论·····	339
第 25 章 浆体膨胀充填材料长壁充填开采实践 ·····		340
25.1	王庄煤矿长壁充填开采实践·····	340
25.2	埠村煤矿长壁充填开采实践·····	346
25.3	结论·····	349
参考文献·····		350



绪 论

在我国一次能源结构中,煤炭长期占有主导地位。目前煤炭所占一次能源的份额达到 70% 左右,将来即使研究开发出新的能源产品,估计在未来 50 年内,煤炭所占一次能源的份额还会保持在 40% 以上。我国高速发展的国民经济,拉动煤炭的开采强度不断加大,同时也出现了安全生产和生态环境两大无法回避的问题。

煤矿开采对生态环境的损害主要有:① 地下开采造成矿区地表塌陷对土地资源的破坏;② 人为疏干排水和采动形成的导水裂隙对地下水系或含水层的自然疏干;③ 矿井排出的煤层瓦斯等有害气体和煤矿矸石山的自燃所形成的废气。为此,我国著名采矿工程专家钱鸣高院士提出了“绿色开采”的理念——创新开采技术,防止生态破坏,坚持走“开发利用”与“维护生态”相协调的绿色开采之路,使煤炭行业最大限度地实现“低开采、高利用、少废弃”的可持续发展目标,真正建立起煤炭工业的绿色生态体系。以充填开采为重点内容的减沉与保水开采技术,是绿色开采技术体系中最重要核心技术之一。

煤矿充填开采已经有 100 多年的发展历史,波兰、德国、法国等国家的煤矿都曾应用充填采煤法进行过煤炭开采。充填采煤的目的,一是控制岩层移动与地表沉陷,减少开采对环境的破坏和影响;二是处理固体废弃物,消除废弃物排放带来的环境破坏。

充填开采在我国金属矿山应用已较为普遍,在有色金属矿山的应用率达到 75% 以上。随着煤炭价格的回升、资源量的减少以及环保意识的增强,煤矿充填开采在我国的应用也得到了逐步发展,目前已有 20 余家煤矿采用不同形式进行充填开采,出现了矸石、流沙、膏体、似膏体、高水等各具特色的充填方法与模式。特别是山东省,在充填开采技术方面已走在了全国的前列。尤其是淄博市王庄煤矿,根据煤炭矿山充填特点,利用浆体膨胀充填材料充填采煤技术,用于“三下”压煤的充填开采,在提高回采率、控制地表沉陷方面取得了良好的应用效果。

“三下”压煤一直是困扰煤炭行业的重大问题,老矿区所剩的资源大部分为“三下”压煤,而许多新矿区也面临不解决“三下”压煤难以合理布置的局面。同时,煤矿开采造成的生态环境破坏问题也日显突出,由此带来的工农业矛

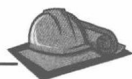


盾,既成为地方经济发展的难题,也成为制约煤矿发展的“瓶颈”。据不完全统计,我国目前“三下”压煤量达 110 亿 t,而村庄下压煤占建筑物下压煤的 60%,达到 52.21 亿 t。如果将浆体膨胀充填材料充填采煤技术进行推广,将村庄下压煤解放一半,就可供 100 个中型矿井生产 26 年。

淄博市王庄煤矿的浆体膨胀充填材料充填采煤技术,是利用自主发明具有一定膨胀性的充填材料和采取特有充采工艺的采煤技术,是目前煤矿充填开采的重要方式之一。它具有有效控制岩层移动、充填工艺相对简单、投资成本相对较低的特点。浆体膨胀充填材料充填采煤技术,一是解决了充填浆体自流输送的问题,充填浆体可以在 2 h 内通过管路无压自流,实现远距离输送;二是浆体膨胀充填材料充填体具有一定的膨胀性,解决了长期以来膏体、似膏体及矸石充填难以主动接顶的问题;三是浆体膨胀充填材料充填体 28 d 抗压强度达到 3 MPa 以上,能够有效地支撑顶板,减少上覆岩层移动破坏,从而有效保护含水层和地表建(构)筑物。

作为这项充填采煤技术核心内容之一的浆体膨胀充填材料,由粉煤灰、石膏、石灰、水泥熟料、添加剂等材料组成,在地表制备成质量浓度 40%~45% 的充填浆体,通过单条管道自流输送的方式充填到采场。该充填材料具有较高的固水性、良好的流动性、较快的胶凝性、适度的膨胀性、较好的抗压性等特点。

但是,对于浆体膨胀充填材料充填体内部微观结构,充填体的膨胀机理,充填体的强度特征,充填体的稳定性、长期性和耐久性,以及充填体对环境的影响等方面的研究,尚有欠缺,没有一套完整的试验数据和相关的检测方法 with 理论体系。为此,我们在浆体膨胀充填材料实验室内,进行了浆体膨胀充填材料充填浆体流动性能、充填浆体与充填体膨胀性能、充填体强度特征、充填体稳定性、充填体环境影响等方面的试验研究,并为将来浆体膨胀充填材料技术标准和相关指标的试验方法和检测体系的建立奠定基础。



第1章 原材料物化性能试验

1.1 概 述

浆体膨胀充填材料是以粉煤灰为基料,配以石灰、石膏、水泥、添加剂等辅料组成,各组分的物物化学性能会影响浆体膨胀充填体的性能。为了更好地了解和掌握浆体膨胀充填材料各组分的物理化学性能,并保证其良好的流动性、适度的膨胀性和较高的抗压强度,进行了原材料各组分的物理化学性能试验,主要检测了粉煤灰、石灰、石膏的化学成分,并对各组分的物理性能(密度、容重、含水率、孔隙率、物料细度等)进行了分析。

1.2 化学性质分析

化学成分和矿物成分分析,委托山东理工大学分析测试中心进行。根据分析检测中心的要求,物料采用缩分法取样,每个样品约100 g,然后送分析测试中心进行分析化验。分析的化学成分主要有K、Na、Ca、Fe、S等;分析的矿物成分有CaO、SiO₂、MgO、Fe₂O₃、Al₂O₃等。具体分析结果如表1-2-1~表1-2-4所示。

(1) 分析粉煤灰的化学成分:SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO的含量较高,其中SiO₂和Al₂O₃居多,分别达到了28.3%和20.2%。SiO₂是形成水化硅酸盐凝胶体的主要来源,一般SiO₂玻璃体含量越多,粉煤灰的活性就越大。另外,Al₂O₃、Fe₂O₃的含量较高,有利于激发粉煤灰的活性。

表 1-2-1 粉煤灰化学成分分析表

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
含量/%	28.3	20.2	2.03	1.5	0.46	0.35	0.89
成分	P ₂ O ₅	TiO ₂	CuO	B ₂ O ₃	SO ₃	C	ZnO
含量/%	0.145	0.568	0.004 1	1.92	0.325	11.7	0.005 2