



普通高等教育“十二五”规划教材
中国矿业大学（北京）研究生教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI
ZHONGGUO KUANGYE DAXUE (BEIJING) YANJIUSHENG JIAOCAI

矿山充填理论与技术

黄玉诚 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材
中国矿业大学（北京）研究生教材

矿山充填理论与技术

黄玉诚 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

本书共分6章,内容主要包括:充填材料及其主要性质,充填料浆输送性能的主要参数、固液两相流的管流特性及充填料浆管道输送的水力计算,似膏体和膏体的管输特征,尾砂胶结充填、全尾砂高浓度胶结充填、膏体泵送胶结充填及高水速凝尾砂胶结充填等金属矿山充填技术,似膏体(泵送或自流)充填采煤、膏体充填采煤、高水充填采煤及固体(矸石)充填采煤等煤矿充填开采技术。

本书为硕士研究生教材,适合采矿工程、资源开发与规划、矿业工程等专业的师生使用,也可供从事采矿科研、矿山设计以及现场生产等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山充填理论与技术/黄玉诚编著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 3

普通高等教育“十二五”规划教材. 中国矿业大学(北京)研究生教材

ISBN 978-7-5024-6509-4

I. ①矿… II. ①黄… III. ①矿山充填—研究生—教材
IV. ①TD853. 34

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第024081号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 张耀辉 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6509-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2014年3月第1版, 2014年3月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 14印张; 339千字; 216页

30.00元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街46号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

近年来,随着资源的日益匮乏和环境保护意识的深入人心,充填采矿法成为矿山绿色开采的一个重要发展方向,在矿产开采中应用越来越广泛,充填采矿理论与技术的研究和应用也备受关注。

“充填采矿理论”课程是采矿工程和矿业工程专业硕士研究生的重要专业课,长期以来课程的教学一直没有较为系统的适用教材,一般都是以某些专著为基础选择某些篇目、章节讲授或自编讲义进行教学。近年来,从某个侧面研究充填采矿的专著不断出版,但系统讲述充填采矿理论和技术的教材仍很少,特别是包含煤矿充填开采最新成果的教材目前市场上尚未见到。为此,本着该课程系统施教与研究生学习的需要,特编写了这本《矿山充填理论与技术》教材。

本书是结合作者多年的充填采矿教学和科研实践成果并参照教学大纲而编写的,主要阐述了充填采矿技术概要及发展、充填材料及其主要性质、充填流体力学理论基础、似膏体和膏体的管输特征、金属矿山充填技术和煤矿充填开采技术等内容。书中不但详细讲述了矿山充填的一些基本理论和传统的充填技术,还重点介绍了矿山充填的新成果和新技术,特别是近年来煤矿充填开采的新技术及发展方向。通过本教材的学习,学生可以了解和掌握充填采矿的发展动态、基本理论和矿山充填技术工艺,为日后在充填采矿方面的进一步学习、研究和实践打下必要的专业基础。

本书获中央高校基本科研业务费项目资助和中国矿业大学(北京)研究生教材及学术专著出版基金资助;在编写过程中,引用了许多专家、学者和矿山工程技术人员的研究成果,作者的研究生董羽、段仲捷、邵磊昌、王凯、王云峰、宋楷等提供了各种帮助,谨在此一并表示感谢!

由于水平所限,书中不足之处,诚请读者批评指正。

作 者

2013 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 矿山充填技术概要及其发展	1
1.2 矿山充填技术的种类及其特点	5
1.2.1 金属矿山充填技术	5
1.2.2 煤矿充填开采技术	13
1.3 矿山充填技术研究发展的基点和观念	13
2 充填材料及其主要性质	15
2.1 充填材料的种类及来源	15
2.1.1 胶凝材料	15
2.1.2 活性混合材料	17
2.1.3 惰性材料	17
2.1.4 水	18
2.1.5 改性材料	19
2.2 充填材料的物理性质	20
2.2.1 密度	20
2.2.2 孔隙率	20
2.2.3 沉缩率	21
2.2.4 含水率	21
2.2.5 粒径及粒级组成	21
2.2.6 比表面积	24
2.2.7 渗透性	25
2.3 水泥及活性混合材料的化学性质	28
2.3.1 硅酸盐水泥的凝结硬化	29
2.3.2 影响水泥水化与凝结硬化的因素	32
2.3.3 硅酸盐水泥的主要技术性质	34
2.3.4 混合材料	37
2.4 高水材料的力学性能及化学性质	39
2.4.1 高水材料的物理力学特性	39
2.4.2 高水材料的水化硬化机理	43
2.4.3 高水材料的稳定性能	45

3 充填流体力学基础	50
3.1 充填料浆的主要参数	50
3.1.1 密度	50
3.1.2 体积浓度和质量浓度	50
3.1.3 黏性	51
3.2 水力学基础	52
3.2.1 水静力学基础	52
3.2.2 水动力学基础	53
3.2.3 液流状态和雷诺数	55
3.2.4 液流压力损失	56
3.3 固液两相流的伯努利方程	58
3.4 悬液的流型	59
3.4.1 牛顿体	59
3.4.2 非牛顿体	60
3.5 固液两相流的管流特性	62
3.5.1 均质固液两相流的管流特性	62
3.5.2 非均质固液两相流的管流特性	66
3.5.3 非均质-均质复合两相流的管流特性	72
3.6 充填料浆管道输送的水力计算	76
3.6.1 充填料浆管道输送摩阻损失计算的经验公式	76
3.6.2 充填料浆管道输送的临界流速经验公式	78
3.6.3 充填倍线	79
3.6.4 充填料浆管输中的不稳定流	79
4 似膏体和膏体的管输特征	84
4.1 似膏体的流变特性	84
4.1.1 概述	84
4.1.2 似膏体料浆的流变模型	84
4.1.3 似膏体料浆的流变特性实验	87
4.2 似膏体的管输模型	89
4.2.1 似膏体充填料管输阻力系数	89
4.2.2 似膏体充填料管输模型	89
4.3 似膏体料浆管输特征的数值模拟	91
4.3.1 水平直管段似膏体流动特征的数值模拟	91
4.3.2 弯管段似膏体流动特征的数值模拟	95
4.4 膏体输送破管和堵管机理的分析	98
4.4.1 膏体自流输送不满管流的产生	99
4.4.2 膏体料浆运动过程的射流效应和相变	101

4.4.3 料浆相变过程中的破坏作用	102
5 金属矿山充填技术	106
5.1 尾砂胶结充填	106
5.1.1 尾砂分级脱泥	107
5.1.2 砂仓	112
5.1.3 水泥的贮存	121
5.1.4 充填料浆制备	123
5.1.5 充填料浆管道输送	127
5.1.6 采场充填工作	136
5.1.7 尾砂胶结充填的评价	137
5.2 全尾砂高浓度胶结充填	138
5.2.1 工艺特点及充填机理	139
5.2.2 充填料及充填系统	139
5.2.3 对充填料(体)的质量评价	141
5.3 膏体泵送胶结充填	142
5.3.1 膏体充填的概念和特点	142
5.3.2 膏体充填料的级配及强度特征	144
5.3.3 全尾砂膏体流变特性	145
5.3.4 膏体充填料的可泵性	146
5.3.5 膏体泵送充填系统	147
5.4 高水速凝尾砂胶结充填	148
5.4.1 概述	148
5.4.2 招远金矿玲珑分矿的试验	150
5.4.3 焦家金矿的实践	153
5.4.4 鸡冠嘴金矿的试验	163
5.4.5 招远金矿灵山分矿的应用	168
5.4.6 武山铜矿的试验	170
5.5 国外矿山充填技术	173
5.5.1 加拿大矿山充填技术	173
5.5.2 南非矿山充填技术	175
5.5.3 澳大利亚矿山充填技术	177
5.5.4 德国矿山充填技术	182
5.5.5 美国矿山充填技术	184
5.5.6 俄罗斯矿山充填技术	185
6 煤矿充填开采技术	188
6.1 似膏体泵送充填采煤技术	188
6.1.1 应用实例概况	188

6.1.2	充填材料的组成与配比	188
6.1.3	充填系统与工艺	189
6.1.4	工作面充填采煤	190
6.1.5	充填开采对上覆水体的影响分析	192
6.1.6	地表沉陷实测	193
6.2	似膏体自流充填采煤技术	196
6.2.1	应用实例概况	196
6.2.2	充填材料的组成与配比	196
6.2.3	充填系统与工艺	196
6.2.4	工作面充填采煤	197
6.2.5	地表沉陷实测	199
6.3	膏体充填采煤技术	199
6.3.1	概况	199
6.3.2	充填材料的组成与配比	200
6.3.3	充填工艺系统	200
6.3.4	充填采煤工艺	202
6.3.5	工作面布置	203
6.4	高水充填采煤技术	203
6.4.1	高水材料概况	203
6.4.2	充填系统与工艺	203
6.4.3	充填开采方法	206
6.5	固体(矸石)充填采煤技术	207
6.5.1	固体(矸石)采煤系统概况	207
6.5.2	地面充填材料制备与输送系统	208
6.5.3	固体物料垂直输送系统	209
6.5.4	工作面充填系统	211
参考文献		214

1 绪 论

1.1 矿山充填技术概要及其发展

按照充填材料和输送方式,通常可将矿山充填分为干式充填、水力充填和胶结充填三种类型。

(1) 干式充填。它是将采集的块石、砂石、土壤、工业废渣等惰性材料,按规定的粒度组成进行破碎、筛分和混合,形成干式充填材料,用人力、重力或机械设备运送到待充填采空区,形成可压缩的松散充填体。

(2) 水力充填。它是以水为输送介质,利用自然压头或泵压,从制备站沿管道或与管道相连接的钻孔,将山砂、河砂、破碎砂、尾砂、碎矸石或水淬炉渣等水力充填材料输送和充填到采空区。充填时,使充填体脱水,并通过排水设施将水排出。水力充填的基本设备(施)包括分级脱泥设备、砂仓、砂浆制备设施、输送管道、采场脱水设施以及井下排水和排泥设施。管道水力输送和充填管道是水力充填最重要的工艺和设施。砂浆在管道中流动的阻力,靠砂浆柱自然压头或砂浆泵产生管道输送压力去克服。选择输送管道直径时,需要先按充填能力、砂浆的浓度和性态算出砂浆的临界流速、合理流速和水力坡度等。

(3) 胶结充填。它是将采集和加工的细砂等惰性材料掺入适量的胶凝材料,加水混合搅拌制备成胶结充填料浆,再沿钻孔、管、槽等向采空区输送和堆放,然后使浆体在采空区中脱去多余的水(或不脱水),形成具有一定强度和整体性的充填体;或者将采集和加工好的砾石、块石、碎矸石等惰性材料,按照配比掺入适量的胶凝材料和细粒级(或不加细粒级)惰性材料,加水混合形成低强度混凝土;或者将地面制备成的水泥砂浆或净浆,与砾石、块石、碎矸石等分别送入井下,将砾石、块石、碎矸石等惰性材料先放入采空区,然后采用压注、自淋、喷洒等方式,将砂浆或净浆包裹在砾石、块石等的表面,胶结形成具有自立性和较高强度的充填体。

20世纪40年代末50年代初,国外开始采用选厂分级尾砂进行水力充填。当采用分级尾砂水力充填时,其突出的问题是将分级脱泥后的细粒级尾砂送至尾矿库会带来一系列的问题,同时还会带来充填用尾砂供应不足的问题;若采用全尾砂水力充填工艺,则会出现充填中存在着过量的 $-20\mu\text{m}$ 的细泥。这种细泥浆在采场内留在充填分层的表面,就会使回采工作难以继续进行,而且也无法形成稳固的能够自立的帮壁。进入20世纪60年代后,加拿大、澳大利亚、德国、美国、苏联、中国等国家,围绕着新型充填材料及其特性,以多相流流体力学及充填流变学为基础的浆体输送理论的研究取得了新的进展,并研制出充填料浆新的制备、输送设备,加上无轨采矿设备的应用,使胶结充填工艺取得了巨大的进步,使充填采矿法的面目为之一新。胶结充填工艺适用于高品位富矿、矿岩不稳固

的厚大矿体、深矿井及大面积区域性地压支护体系和“三下”（水体、道路、建构筑物下）及自然发火倾向矿床的开采，已经成为干式、水力充填工艺根本无法取代的充填工艺。

1962 年加拿大弗鲁德（Frood）矿尾砂胶结充填工艺投入工业应用，在这之后，尾砂胶结充填技术在加拿大萨德伯里（Sudbery）地区的格瑞登（Creighton）矿、列瓦克（Levack）矿、汤普森（Thompson）矿、米瑞（Murray）矿、斯托比（Stobie）矿、加尔森（Garson）矿等矿山普遍应用开来，使得分层充填采矿和矿柱回采工作大为改善，使原用的水力充填采矿法大大地提高了机械化程度，形成了一种新的具有较高效率的采矿方法。以后又在美国犹他州的马夫劳韦尔（Mayflower）矿和南达科他州的霍姆斯特克（Homstake）矿、希拉克（Helca）采矿公司幸运星期五（Lucky Friday）矿试验成功了在尾砂充填层上用配比为波特兰水泥：尾砂 = 1 : 7 的砂浆铺面，平均厚度 0.15m，这就为分层充填采矿法提供了一个具有一定强度的分层平整表面。向水力充填料浆中添加胶凝材料在节省大量开支、改进品位控制以及提高采矿方法回采效果和适应性等诸多方面，都显示出了明显的优越性。

1964 年，我国凡口铅锌矿首先开始进行低浓度尾砂胶结充填的试验，随后全国数十个矿山陆续采用尾砂胶结充填技术，都取得了显著的技术经济效果。然而，在一个相当长的时期内，人们对胶结充填料浆浓度这样一个十分重要的工作参数还缺乏认识，在生产实际中使用的料浆真实质量浓度一般为 60% ~ 68%，因而尾砂胶结充填也就暴露出了一些新的问题。采用这种低浓度尾砂胶结充填，在采场脱水过程中，由于料浆出现离析，就难免会从采场渗滤出的废水中带走部分水泥和细粒级物料，污染作业环境，增加水泥流失，降低充填体强度，提高采矿成本，更为严重的是水泥随矿石进入选厂，也给选矿带来不良影响。

到了 20 世纪 70 年代，针对低浓度尾砂胶结充填所存在的问题，人们才开始重视料浆浓度这个至关重要的问题，并着手研究和探索高浓度料浆的优越性及实现料浆高浓度的有效途径。不少矿山采取措施将料浆真实质量浓度提高到 70% 以上，即所谓高浓度或浓砂浆胶结充填。与此同时，还研究了利用不分级脱泥（-20 ~ -37 μm ）的细粒级物料的全尾砂作惰性充填材料的胶结充填工艺。按照提高浓度和利用全尾砂的要求，就需要解决全尾砂料浆的浓密、过滤、强力活化搅拌、料浆管道输送、采场脱水及充填体强度等一系列复杂的技术问题。中国、德国、南非、美国、加拿大、哈萨克斯坦、奥地利等国，采用不同的工艺，先后实现了全尾砂高浓度胶结充填。

上述变革的思路总是围绕着提高料浆浓度这个重心，以解决低浓度尾砂胶结充填由于采场脱水所引发的一系列问题，如井下废水环境污染问题、充填体强度问题等。然而另一种思路却是：20 世纪 80 年代末，中国矿业大学（北京）孙恒虎教授提出在低浓度料浆条件下，改用高水材料作胶凝材料，利用稍加改动的低浓度尾砂胶结充填制备和输送系统，将高水固结充填料浆送入井下，使采场充填多余的水速凝固结起来，从而也解决了充填废水问题。20 世纪 90 年代初，国内不少金属矿山成功地应用了高水速凝尾砂胶结充填工艺，但后因高水速凝材料较贵，充填成本较高，限制了该胶结充填工艺在更广泛领域中的推广应用。

少数国家和矿山在全尾砂高浓度胶结充填试验研究的同时，又进一步改进惰性充填材

料的组成和级配,同时进一步提高料浆浓度,于是产生并发展了以德国普鲁塞格金属公司(Preussage AG Metall)为代表的全尾砂膏体泵送胶结充填工艺。这种工艺可提供在低水泥耗量下的高强度充填体,且充填材料选用范围广,既可以采用全尾砂或分级尾砂,也可以添加不同比例的30mm以下的碎石、戈壁集料、天然砂或炉渣以及粉煤灰、煤泥等工业废料,其充填理论、流变特性、膏体材料制备、泵送工艺、充填体强度等均有其鲜明的特点。

开发和应用全尾砂高浓度胶结充填工艺和全尾砂膏体泵送胶结充填工艺是为了实现:(1)最大限度地减少水泥消耗量,以降低充填成本;(2)提高充填体强度,改善充填体质量,更有效地发挥其支撑功能;(3)实现“三无”矿山设想,改善环境条件;(4)解决尾砂供小于求之矛盾。全尾砂和高浓度使胶结充填工艺发生了飞跃性的变化,使胶结充填迈入了一个新的阶段,是当代胶结充填技术进步的重要标志之一。

全尾砂膏体胶结充填虽然有其鲜明的技术特点,并具有料浆浓度高、水泥用量少、充填成本较低、充填体强度高突出优点,但由于其工艺技术复杂、管理技术水平要求高、一次性基建投资大等主要问题的存在,因而自20世纪70年代末开展该项试验研究以来,我国仅建成了金川镍矿和铜绿山铜铁矿两个膏体泵送充填系统。

在细砂胶结充填技术迅速发展的同时,自20世纪70年代以来,澳大利亚、苏联等国家,在用空场法采完的采空区内,先倒入块石充填,再向块石中压注水泥净浆或水泥砂浆,形成块(碎)石胶结充填体;或者在块(碎)石倒入采空区的同时,将用管路输送的水泥砂浆也注入采空区自淋混合;也有在待充填采空区的上口处,用电耙、铲运机或带折返板的溜槽混合拌制;而后充填进采空区的胶结充填工艺。在形成的块(碎)石胶结充填体固结后,再进行矿柱或周围采场回采。块石胶结充填在国内外进行了大量的试验研究工作,其成功的范例当推澳大利亚的芒特艾萨(Mount Isa)矿。1973年,该矿便在1100铜矿体开始应用块石胶结充填。生产实践表明,在相同水泥添量的条件下,与其他胶结充填工艺相比较,这种充填工艺所形成的胶结充填体,能够达到更大的强度,可以起到人工矿柱的作用,其强度和稳定性都比细砂胶结充填要好,能够保证第二步回采时的安全。由于节约了水泥,使充填成本降低了30%~50%。该工艺还可以明显地收到矿石贫化小、生产能力大、废石提运少,并能缓解地表废石堆对环境污染的效果。块石胶结充填可以看成是干式充填和细砂胶结充填工艺的结合,是当代胶结充填工艺的发展方向之一。

从胶结充填技术的发展不难看出,当代胶结充填正是围绕着“软性”胶结充填料充填和“刚性”胶结充填料充填的试验研究而展开的。“软性”、“刚性”的划分,主要是指胶结充填料中惰性材料的种类及其组成不同。所谓“软性”胶结充填料,就是细砂胶结充填料,例如取其配比为尾砂:水泥:粉煤灰:水=10:0.5:1.0:2.3;所谓“刚性”胶结充填料,就是块石胶结充填料,例如加入-25mm的碎石后,其配比为碎石:尾砂:水泥:粉煤灰:水=5:0.4:0.6:0.6:0.8。“软性”和“刚性”胶结充填料不仅在物理力学特性上有所不同,而且在制备和输送工艺上也有所不同。这两类胶结充填,按照掺入惰性材料的不同进行区分的方法,已开始引起矿业学术界的重视。表1-1列出了两种类型充填料的物理力学性能比较。由表可以看出,块石胶结充填料的强度和黏结力较尾砂胶结充填料增加了数倍,而弹性模量竟增加了数十倍之多;单位胶结充填料中水泥用量的增加并不多,当获得的强度相等时,显然块石胶结充填可以节省更多的水泥。

表 1-1 两类胶结充填料的物理力学性能比较

灰砂比	1 : 5			1 : 10			1 : 20		
胶结充填料类型	A	B	B 较 A 增加/%	A	B	B 较 A 增加/%	A	B	B 较 A 增加/%
水泥量 /kg · m ⁻³	288	352	20	156.6	195	21.6	81.6	102	26
水灰比 (质量比)	1.47	0.72	-50	2.72	1.22	-55	5.24	2.21	-57
抗压强度/MPa	4.36	13.18	200	0.798	5.796	626	0.476	2.377	399
抗拉强度/MPa	0.66	1.98	200	0.160	0.984	526	—	0.411	—
黏结力/MPa	0.84	2.55	202	0.180	1.197	576	—	0.495	—
静弹性模量 /MPa	181.2	9206.3	4098	54.1	3906.2	7120	—	1470.5	—

注：A—惰性材料是尾砂；B—惰性材料由粗粒大理岩（含 60%）和尾砂（含 40%）混合组成。

纵观胶结充填的沿革及发展，可将当代胶结充填技术的基本内容及特点归纳如下：

(1) 细砂胶结充填及粗砾胶结充填所用新型胶凝材料和活性混合材料的开发研制与应用；充填材料主要物理力学性质及测试方法、胶凝固结机理，充填材料（包括各种添加材料）对充填料浆流变特性、管输特性以及充填体强度的影响等。

(2) 在原来低浓度尾砂胶结充填、低强度粗惰性材料混凝土充填以及高浓度细砂胶结充填的基础上，开发出以全尾砂为主体的全尾砂高浓度胶结充填、全尾砂膏体胶结充填、高水速凝尾砂胶结充填和块（碎）石胶结充填。

(3) 对充填料的采集加工、贮存、制浆、输送、充填、脱水及排泥等工艺进行合理配置；采用立式砂仓（半球底、锥形底）流态化卸料技术、锥形仓底单管重力放砂技术以及虹吸放砂技术，保证了供料的连续性和放砂浓度；利用立式水泥仓散装水泥风力吹送入库，将砂浆和水泥定量向搅拌桶供料，实现了充填制备系统的自动化。

(4) 全尾砂地面脱水工艺流程及设施的配置，制备膏体的深浓密机系统，高速高剪力胶体活化搅拌机及搅拌机理，确定和控制影响浆体流变特性的所有物理参数，如温度、溶解的固体含量、悬浮体的真实质量浓度、粒度分布、絮凝剂浓度、pH 值和矿物成分等；切变速率（1/s）与剪切应力（kPa）关系的流变特性量测等，以及井下充填料分配系统的优化。

(5) 充填料浆的物理力学参数，固体颗粒的运行阻力，沉降及悬浮机理，固液两相流的伯努利方程、流型及管流特征，管流阻力特性及阻力损失计算，浆体管输的水力计算及管输中的不稳定流等。

(6) 胶结块石、胶结碎石和含水泥量高的胶结细砂等形成的胶结充填体，用于支护采场围岩时其物理力学性质（如刚度、体积压缩率等）及胶结充填体与胶凝材料的性质、养护特性、制备方式、输送条件的关系等。

总之，胶结充填技术的发展，已将地下开采技术推向高新技术领域，使地下采矿方法获得新的技术突破。当代胶结充填工艺将可以更好地满足保护资源、保护环境、提高效率

益、保证矿山可持续发展的要求。胶结充填在 21 世纪的矿业发展中必将有着更加广泛的应用前景。

1.2 矿山充填技术的种类及其特点

1.2.1 金属矿山充填技术

由于目前尚无统一的胶结充填分类方法和命名,为便于选择和研究胶结充填技术,本书将以简单明了和实用的原则为基础,结合当前胶结充填的动向和发展趋势,以惰性材料粒径和料浆浓度为分类主线,以胶凝材料及其添加方式、料浆流态、制备工艺等为辅线作如图 1-1 所示分类。

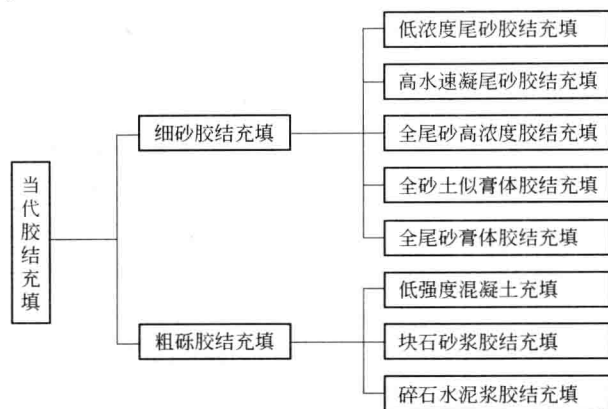


图 1-1 金属矿山胶结充填分类

细砂胶结充填系指用山砂、河砂、尾砂等砂粒作惰性材料的胶结充填,因细砂胶结充填料兼有胶结强度和适于管道输送的双重特点,即集水力充填的管道输送特性和混凝土充填的胶结特性于一体,特别是用尾砂作惰性材料的胶结充填,因其加工成本低、来源丰富、充分利用工业废弃物、环保效益突出等明显优势,因而很快取代了其他惰性材料,在国内外获得了广泛地应用。

粗砾胶结充填系指在充填材料中除掺入适量的胶凝材料外,在惰性材料中还含有一定量的砾石、碎石、卵石、块石等粗粒级的物料,它所形成的充填体,比细砂胶结充填的胶结体具有更高的强度,在充填物料的制备和输送方式上均有别于细砂胶结充填。最初粗砾胶结充填为低强度混凝土充填,即充填料按照建筑混凝土的基本原理和配合要求制备而成。这种低强度混凝土充填因输送困难,对物料级配的要求高,故一直未能获得大规模推广应用。近年来,国内外对块(碎)石胶结充填进行了大量的试验研究,使之成为胶结充填技术发展的方向之一。

1.2.1.1 低浓度尾砂胶结充填

低浓度尾砂胶结充填是指用水泥作胶凝材料、分级尾砂作惰性材料所配制的胶结料浆,其真实质量浓度控制在 60%~70%。这一胶结充填技术是在尾砂水力充填的基础上发展起来的。使用尾砂水力充填,较之干式充填已经取得了高效率的矿房回采,但在回采

过程中所引起的二次贫化和损失却不可避免,并且还给矿块的二步骤回采带来困难。按照回采对充填体强度的不同要求,可在尾砂水力充填料中添加不同量的水泥,使灰砂比达到 $(1:20 \sim 1:30) \sim (1:5 \sim 1:10)$,从而实现分层采矿时高回收低贫损的回采及矿块二步骤回采的安全高质量作业。但需指出的是,由于尾砂胶结充填不用粗砾的惰性材料,因此在与低强度混凝土胶结充填体强度要求相同的情况下,尾砂胶结充填的水泥用量要高得多。然而尾砂胶结充填以其能够大量利用工业废料、制备输送工艺简单、基建投资较少等突出优点,使得其自20世纪60年代问世以来,一直受到金属矿山的青睐。

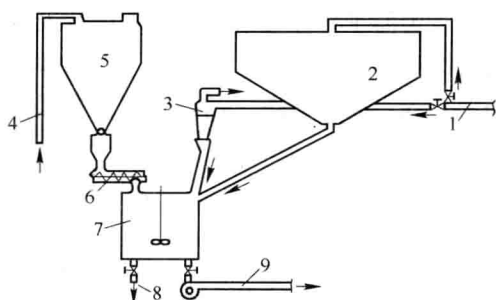


图 1-2 低浓度尾砂胶结充填制备站
主要配置示意图

- 1—输送尾砂管道; 2—尾砂仓; 3—水力旋流器; 4—
用风力送水泥管道; 5—水泥仓; 6—螺旋喂料机;
7—螺旋桨搅拌桶; 8—用自然压头输送浆体的
管道; 9—用泵压输送浆体的管道

低浓度尾砂胶结充填制备站主要配置如图 1-2 所示。将采集和加工好的尾砂用泵送至尾砂仓中,也可以用车辆或带式输送机输送到干式砂仓中。湿式立式砂仓用重力和高压风水喷嘴造浆,经放砂管放至搅拌桶中;湿式卧式砂仓用电耙和螺旋输送机向搅拌桶中送料;干式砂仓用给料机向搅拌桶中供料。水泥用散装罐车通过压气装置吹入水泥仓,用螺旋喂料机或叶轮给料机经计量装置送入搅拌桶中,同时向搅拌桶中定量给水,以控制充填料浆的浓度。低浓度尾砂胶结充填工艺系统中的脱水和废水处理所用的设备、设施和构筑物等,均与水力充填的大致相同。

低浓度尾砂胶结充填料浆的输送距离可达 2500~3000m,充填能力为 $100 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

影响低浓度尾砂胶结充填体强度的主要因素有水泥添量和料浆浓度。在养护时间相同的情况下,充填体的强度随水泥添量的增加而增加;在水泥添量一样的条件下,充填体强度随养护时间的增长而增大,其变化可参见图 1-3。料浆的浓度对充填体强度的影响较大,浓度较低时,会产生严重的水泥离析,使充填体强度大为下降。浓度、水泥添量与充填体强度的关系如图 1-4 所示。

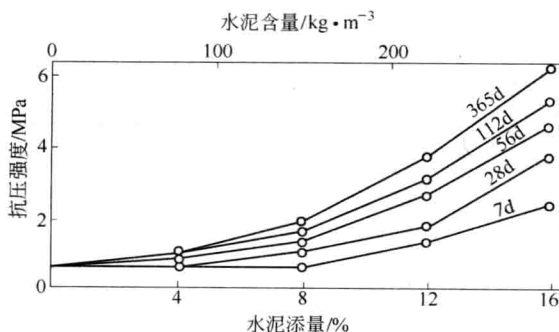


图 1-3 水泥添量、养护时间与充填体强度的关系

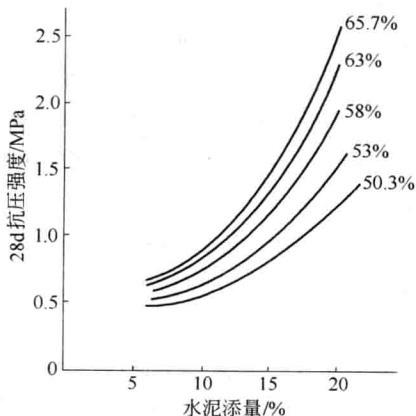


图 1-4 水泥添量、料浆浓度与
充填体强度的关系

1.2.1.2 高水速凝尾砂胶结充填

高水速凝尾砂胶结充填的实质是将低浓度尾砂胶结充填中的水泥胶凝材料用高水材料取代，高水材料甲、乙料分别与全尾砂或分级尾砂等惰性材料加水混合成低浓度充填料浆，用钻孔、管道输送至井下，两种料浆在进入充填采空区前混合，不用脱水便可迅速凝结为具有一定强度的胶结充填体。该工艺的主要特点是：(1) 高水速凝尾砂胶结充填料浆是由甲、乙两种粉料分别与全尾砂或分级尾砂制成两种充填料浆沿两条管道输送至井下。(2) 甲、乙充填料浆真实质量浓度一般控制在 $60\% \sim 70\%$ ，在井下经混合器混合后进入充填采空区，无须脱水便可迅速凝结为固态充填体。根据生产的要求，混合后的充填料浆，其凝结时间的快慢是可调的。(3) 高水材料可将高水固比（体积水固比 $6.7:1 \sim 9:1$ ，质量水固比 $2.2:1 \sim 2.5:1$ ）的浆液迅速凝结为固态结晶体。利用高水材料的物化特性，细砂胶结充填和粗砾胶结充填所用的惰性材料该工艺均可应用。(4) 高水材料具有良好的悬浮性能，充填料浆中的尾砂沉降缓慢，因而料浆的流动性得到改善，有利于实现长距离管道输送。(5) 甲、乙料浆在管道中分别存放的时间较长，不至于凝结，系统重新启动以后仍可正常进行管道输送。(6) 高水材料具有快凝早强的特性和良好的流动性能，因而有利于实现充填接顶，有利于作业循环周期的缩短。(7) 高水速凝尾砂胶结充填工艺可以充分地利用各种充填采矿方法的采准布置、回采方式、采掘设备以及原有的料浆制备、输送系统，因而技改工作简便易行，投入较少。

高水材料由甲、乙两种粉料组成，需分别造浆，独立进行管道输送，其可泵性较好，长时间存放后不凝结，仍能重新启动，因而国内大多数矿山都按双管道输送制备系统进行设计和建设，如图 1-5 所示。高水速凝尾砂胶结充填采用双浆制备输送系统有利于保证系统运行可靠，有利于设备正常作业，有利于确保充填质量，但却增加了一套管道系统和高水材料仓。为改善系统，降低投资和经营费用，国内也生产了控制较长初凝时间的单浆高水材料，并建立了单浆高水材料的制备输送系统。

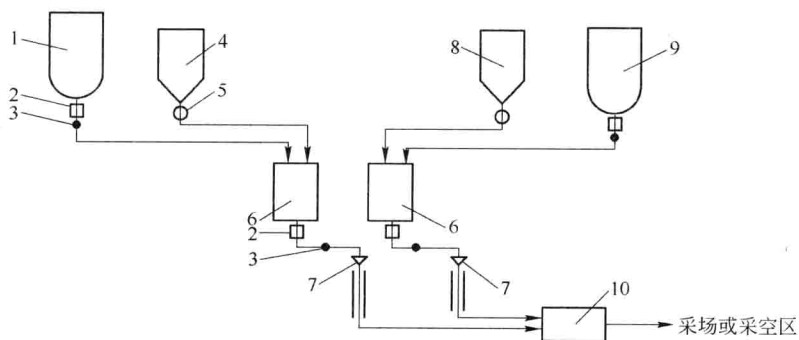


图 1-5 高水速凝尾砂胶结充填工艺流程图

1—1号尾砂仓；2—浓度计；3—流量计；4—甲料仓；5—定量给料器；
6—搅拌桶；7—隔筛；8—乙料仓；9—2号尾砂仓；10—混合器

1.2.1.3 全尾砂高浓度胶结充填

全尾砂高浓度胶结充填工艺的特点是以全尾砂作惰性充填材料，通过活化搅拌，将充填料浆制备成高浓度料浆的充填工艺。这里所指的高浓度是：胶结充填料浆的流态特性从

一般两相流的非均质牛顿流体, 转变为似均质非牛顿流体的流态浓度, 这个流态特性发生转变时的界限值浓度称为临界流态浓度, 高浓度就是指大于临界流态的浓度。高浓度料浆具有屈服应力, 属非牛顿流体。料浆中细粒级含量显著增加, 且均匀分布于水中, 起着载体作用, 在层流甚至静止状态下, 固液较难产生分离。一般地说, 对全尾砂而言, 真实质量浓度在 (68% ~ 70%) ~ 75% 为高浓度充填料浆。

全尾砂高浓度胶结充填中的全尾砂和水泥等固体物料组成的混合料浆属于一种具有触变性质的标准分散系, 由于细粒级物料含量大, 其表面积大大增加, 只有在强力搅拌的作用下, 才能使混合料浆中固体分散体系被“稀释”而变得具有流动性, 并使胶结微粒分布均匀。因此活化搅拌技术是制备出高质量的全尾砂高浓度胶结充填料浆的一项关键技术, 20 世纪 80 年代, 苏联列宁诺戈尔斯克多金属公司采用强力活化搅拌技术, 使充填料浆的均匀化、流动性得到提高, 胶凝材料的活性被更为充分地利用, 活化搅拌的料浆真实质量浓度可达到 83%; 活化搅拌后充填料试块 14d、28d 和 90d 的无侧限抗压强度分别增加了 30%、40% 和 35%。另外, 为广泛地应用全尾砂和提高充填料浆的浓度, 研究开发全尾砂的脱水技术是全尾砂高浓度胶结充填需要解决的另一项关键技术。目前全尾砂地面制备站普遍采用的是浓密过滤两段脱水流程, 但其能耗大、投资多, 工艺流程仍较复杂, 因而有待于进一步的研究。

1.2.1.4 全尾砂膏体胶结充填

全尾砂膏体胶结充填的特点是料浆呈稳定的粥状膏体, 直至成牙膏状的稠料。料浆像塑性结构体一样在管道中作整体运动, 其中的固体颗粒一般不发生沉淀, 层间也不出现交流, 而呈柱塞状的运动状态。柱塞断面的核心部分的速度和浓度基本没有变化, 只是润滑层的速度有一定的变化。细粒物料像一个圆环, 分布在管壁周围形成润滑层, 起到“润滑”作用。膏体料浆的塑性黏度和屈服切应力均较大。全尾砂膏体胶结充填料浆真实质量浓度一般为 76% ~ 82%, 添加粗粒惰性材料后的膏体充填料浆真实质量浓度可达 81% ~ 88%。一般情况下, 可泵性较好的全尾砂膏体胶结充填料浆的坍落度为 10 ~ 15cm, 全尾砂与碎石相混合的膏体胶结充填料浆的坍落度为 15 ~ 20cm。

全尾砂膏体胶结充填的关键技术主要包括:

(1) 膏体胶结充填料的脱水浓缩技术。由于从选厂送来的全尾砂浆浓度很低, 无论采用哪种膏体充填系统, 都需将选厂全尾砂浆脱水浓缩。膏体要求水的含量恰到好处, 膏体胶结充填料卸入采空区时要像牙膏一样无多余的重力水渗出。由于膏体中的固体物料必须有一定量的微细粒 ($-20\mu\text{m}$), 因而给脱水浓缩技术带来更大的困难。一般情况下, 选厂尾砂需经两级脱水浓缩, 第一级为旋流器 (一段旋流或多段旋流); 第二级为浓密机或过滤机, 如圆盘过滤机、带式过滤机、鼓式浓密机、振动浓密机等。但现有的脱水浓缩技术还存在着工艺较复杂、投资较大的问题, 因而国内外仍在继续致力于这方面的研究。

(2) 膏体胶结充填制备系统中的水泥添加技术。为防止膏体胶结充填料浆的重新液化, 其中均添加有 3% ~ 5% 的水泥作为胶凝材料。如果水泥添加方式不当, 则会导致充填质量的下降和管道输送的困难。因此, 合理配置水泥添加方式就成为膏体胶结充填的另一技术难题。

目前膏体胶结充填制备系统中的水泥添加方式, 归纳起来有以下四种: 1) 一段搅拌

系统干水泥添加方式,即碎石、尾砂、水泥三种物料一起加水进行活化搅拌制备成膏体;2)两段搅拌系统干水泥添加方式,即经浓密后的全尾砂经一段搅拌制备成膏体,再送至二段活化搅拌机与干水泥加水活化搅拌制备成膏体;3)两段搅拌系统水泥浆地面添加方式,即经浓密过滤后的膏状全尾砂浆,用皮带送入地面活化搅拌机,水泥加水经一段搅拌与碎石一起进入地面活化搅拌机制备成膏体;4)两段搅拌系统水泥浆井下添加方式,即浓缩后尾砂浆与粉煤灰、碎石加水制成膏状混合浆送入井下,水泥加水一段搅拌成浆单独泵送至井下,在井下尾砂膏体和水泥浆一同进入双轴螺旋输送机搅拌混合送入采空区充填。

根据国内外现有全尾砂膏体胶结充填技术的成功经验,可以认为:1)水泥添加地点以靠近充填地点为宜;2)添加水泥浆比添加干水泥的效果要好。

除此之外,膏体的泵压或重力输送技术、管道输送系统的监控技术等,在全尾砂膏体胶结充填技术中也是相当重要的。

1.2.1.5 低强度混凝土胶结充填

低强度混凝土胶结充填是指用100号(原国家建筑材料标准中称水泥标号)以下的混凝土作胶结充填料。对于低强度的混凝土而言,砂浆强度小于加入粗粒惰性材料后的混凝土强度。在砂浆中加入粗粒惰性材料后,1m³粗粒惰性材料可取代0.4~0.5m³砂浆,而粗粒惰性材料的成本仅为砂浆的1/10~1/3。只要输送系统可靠,采用低强度混凝土胶结充填在经济上往往是合理的。

混凝土胶结充填料是由胶凝材料(常用硅酸盐水泥)、粗粒惰性材料(碎石、水淬渣、戈壁集料等)、细粒惰性材料(河砂、+37μm尾砂等)以及水混合制备而成。胶凝材料常用42.5强度等级的硅酸盐水泥,1m³混凝土的水泥用量约150~350kg(凡口为240kg/m³,金川为200kg/m³),水泥费用占充填成本的40%或更多;粗粒惰性材料的最大粒径小于输送管道内径的1/3,当长距离自流输送时,以更小一些的粒级为有利。粗粒惰性材料抗压强度至少应为胶结充填体设计强度值的2倍以上;细粒惰性材料可以改善混凝土的输送性能,胶结充填用的细粒惰性材料的粒径要求,可以比建筑业的要求降低些。低强度混凝土胶结充填体的水泥含量和水灰比是影响充填体强度及输送性能的主要因素。水泥用量较大,是由于按照输送要求,在高水灰比的前提下,只有较大的水泥用量才能保证混凝土的强度、和易性和防止过度离析。水灰比小则流动性能差,但在水泥添量相同的情况下,混凝土胶结充填体可以达到较高的强度。管道输送混凝土,在水泥含量一定时,从料浆流动性出发有个最佳水灰比,能使其坍落度满足输送要求。在有粗粒惰性材料的情况下,加大水灰比反而会使流动性变差。因此,在确定水泥含量及水灰比时,应综合考虑输送方式和充填体强度两者的要求。

混凝土胶结充填的充填料浆制备方式可分为集中制备和半分离制备两种。在集中制备系统中,混凝土胶结充填料浆在地表搅拌站用间歇式或连续式搅拌系统制备好,然后向井下输送;在半分离制备系统中,地表制备站将制备好的水泥浆通过重力自流或用砂泵经管道输送到井下制备站,再与砂和碎石搅拌成混凝土胶结充填材料。用半分离制备方式可以避免或减少长距离输送胶结充填材料所带来的堵管等事故。制备好的混凝土可以采用沿管路、明槽、井巷或钻孔进行重力自流输送,也可以用抛掷充填车运送、浇注机(压气罐)输送,还可用电耙、矿车、汽车、带式输送机等输送。