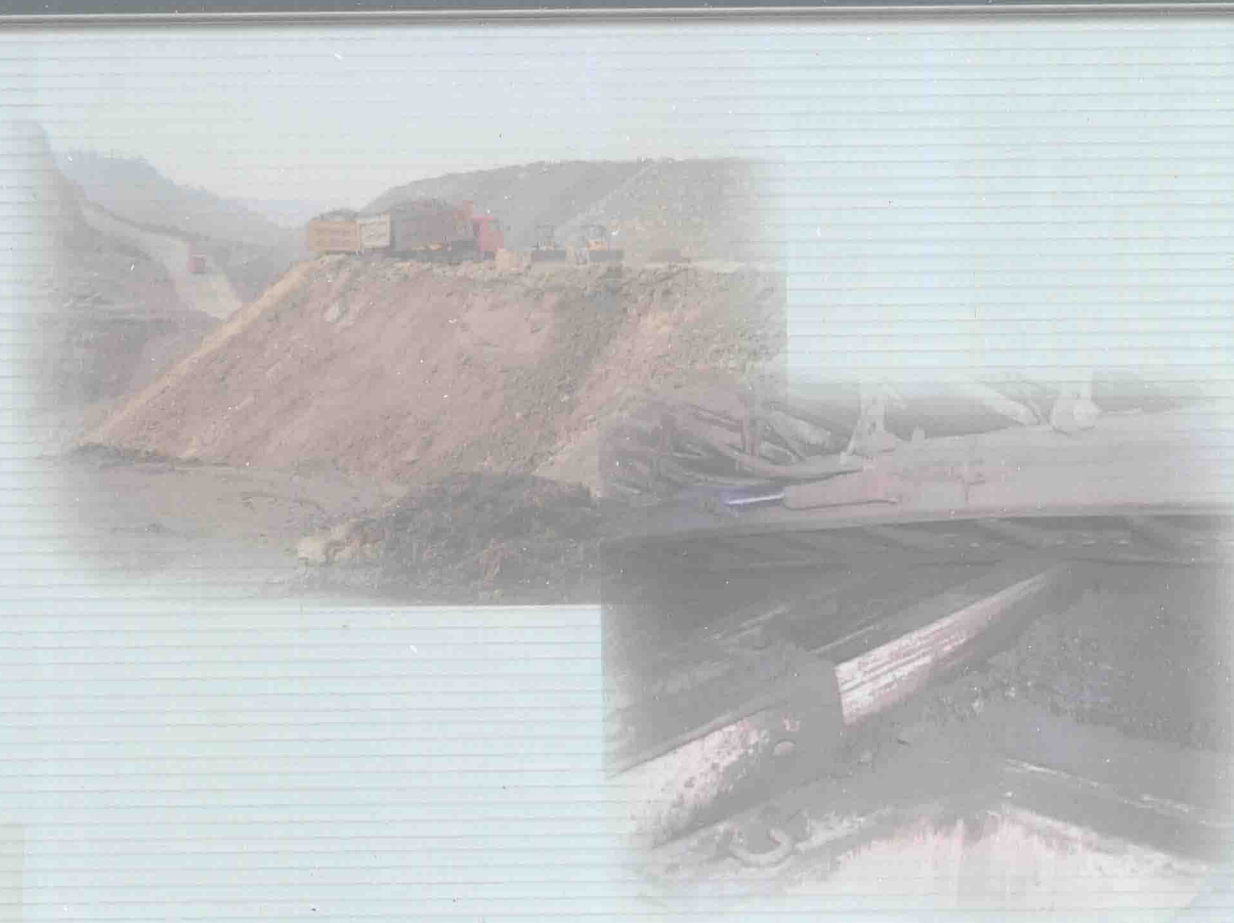


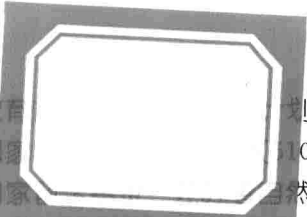
露天矿渣地下综合机械化 充填采煤及沿空留巷技术

马占国 张帆 龚鹏 查剑锋 赵国贞 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



教育部人文社会科学项目(NCET-08-0837) 国家自然科学基金重点项目(50834005)
国家自然科学基金项目(4074163) 国家自然科学基金青年基金项目(41104011)
国家自然科学基金项目(BK2009092)
江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师计划 中央高校基本科研业务费专项资金
深部岩土力学与地下工程国家重点实验室专项基金
中国矿业大学青年科技基金(2010QNB25)
江苏省研究生培养创新工程(CXZZ12_0923)

露天矿渣地下综合机械化 充填采煤及沿空留巷技术

马占国 张 帆 龚 鹏 查剑锋 赵国贞 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书针对露天矿渣地下综合机械化充填采煤及沿空留巷中的关键难题,综合运用理论分析、物理试验、数值计算等手段,系统地研究了充填料压实特性、露天矿渣充填采煤技术和充填工作面沿空留巷技术。主要包括:不同水、石灰、矿渣配比混合料的压实特性分析,不同粒径级配的矿渣混合料压实特性研究,露天矿渣综合机械化充填采煤方案优化设计,露天矿渣综合机械化充填采煤工艺和设备选型配套,露天矿渣充填采煤对建筑物的影响预测,露天矿渣充填采煤沿空留巷围岩变形机理研究,充填采煤沿空留巷工艺设计等。

本书可供从事采矿工程、矿山测量、环境工程、地质工程、矿山安全以及岩石力学与工程等专业的科技工作者、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

露天矿渣地下综合机械化充填采煤及沿空留巷技术/
马占国等著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1720 - 2

I. ①露… II. ①马… III. ①综合机械化掘进—矿渣—充填法—采煤方法 IV. ①TD823.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 275948 号

书 名 露天矿渣地下综合机械化充填采煤及沿空留巷技术
著 者 马占国 张 帆 龚 鹏 查剑锋 赵国贞
责任编辑 王美柱
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 15.5 字数 387 千字
版次印次 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷
定 价 78.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

世界经济发展对煤炭需求总量不断增加,2010年世界煤炭产量53.3亿吨标准煤,比2005年增加9.5亿吨标准煤,其中我国占增量的74.7%;2010年世界煤炭消费量50.8亿吨标准煤,比2005年增加7.8亿吨标准煤,其中我国占增量的91%。在未来相当长时期内,我国以煤为主的能源结构不会改变。随着国民经济继续保持平稳较快发展、工业化和城镇化进程加快,煤炭消费量还将持续增加。2011年,我国原煤产量达到35.2亿吨,《煤炭工业发展“十二五”规划》提出,到2015年生产能力达41亿吨/年,新建煤矿以大型现代化煤矿为主,优先建设大型露天煤矿,生产开发规模要与生态环境承载力和水资源条件相适应。

煤炭资源开采导致了严重的塌陷破坏和生态环境问题,矿渣煤矸石露天排放和地表塌陷破坏是煤炭生产环境问题的主要根源,是影响矿区经济发展和社会安定的重要因素。据不完全统计,平均每开采万吨煤地表塌陷0.2公顷,露天矿每开采万吨煤要挖损土地约0.1公顷,外排土场压占土地为挖损土地量的1.5~2.0倍,露天矿正常生产时每采万吨煤排土场平均压占0.16公顷土地。据此推算,我国煤炭地下开采历年塌陷土地总量72.01万公顷,露天开采挖损与压占土地总量在4.5万公顷左右。据调查,我国由于采矿破坏的森林面积累计为106万公顷,破坏草地面积达26.3万公顷,全国累计占用土地总量约586万公顷,破坏土地约157万公顷,且每年仍以4万公顷的速度递增;随着煤炭开采强度和延深速度的不断加大,矿区地下水位大面积下降,使缺水矿区供水更为紧张,国有重点矿区中,缺水矿区占71%,其中严重缺水矿区占40%。另外,矿渣煤矸石的露天堆积还造成粉尘飘散、有毒气体排放、淋溶污染、气体爆炸等问题。如何统筹解决煤炭资源开发与环境保护的尖锐矛盾,实现煤炭资源的绿色开采,是矿区社会可持续发展刻不容缓的关键问题和世界性难题。

实施矿渣煤矸石充填井工矿开采区及沿空留巷技术,既可以减少露天矿渣的排放占地,又可以减小井工矿开采的沉陷量、提高矿井资源回收率,还可以实现挖深垫浅、提高环境治理效果,将露天矿与井工矿的开采和环境治理相结合,实施协调开采、保水开采、低害开采,是进行煤矿绿色开采的理想途径和关键技术之一。为此,本书把露天矿废弃物利用与煤矿塌陷区预防治理结合起来开展研究,针对露天矿渣地下综合机械化充填开采中的关键难题,综合运用理论分析、物理试验、数值计算等手段,系统地研究了露天矿渣地下综合机械化充填开采及沿空留巷的相关理论和技术。主要内容包括:不同水、石灰、矿渣配比混合料的压实特性分析,不同粒径级配的矿渣混合料压实特性,露天矿渣地下综合机械化充填开采方案设计及优化,露天矿渣地下综合机械化充填采煤工艺和设备选型配套,露天矿渣地下综合机械化充填开采对地表的影响预测,露天矿渣充填开采沿空留巷围岩变形机理研究,充填采煤沿空留巷工艺设计等。

本书研究过程中,得到了中国矿业大学郭广礼教授、茅献彪教授、王连国教授、张吉雄教授、柏建彪教授、赵鹏高工、关祥慧高工、李强老师、李志坚工程师等老师的指导和帮助;黄志敏、孙凯、潘银光、朱发浩、兰天、耿敏敏等研究生参加了部分章节的写作工作;范金泉、陆昭

旭、张国伟、李凯、李明、王坤、蒋众喜、吴斌等人参加了本书的有关试验、数据处理、插图绘制和文字校对等工作。

本项研究得到了众多煤矿企业的大力支持和有关领导的无私帮助,在此表示衷心的感谢。

感谢书中引用文献的作者。本书参阅文献较多,如有遗漏敬请谅解,在此一并表示感谢。

本研究还得到如下资助:教育部新世纪优秀人才计划(NCET-08-0837)、国家自然科学基金重点项目(50834005)、国家自然科学基金项目(51074163)、国家自然科学基金青年基金项目(41104011)、国家留学基金、江苏省自然科学基金项目(BK2009092)、江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师计划、中央高校基本科研业务费专项资金、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室专项基金、中国矿业大学青年科技基金(2010QNB25)、江苏省研究生培养创新工程(CXZZ12_0923)。

露天矿渣地下综合机械化充填采煤及沿空留巷技术研究涉及众多学科理论,有许多理论和实践问题仍有待于深入探讨和揭示,书中如有不妥之处,敬请广大同行专家和读者多加批评指正。

著 者

2012年8月

目 录

第一编 矿渣充填料压实特性

第一章 矿渣充填料压实试验设计.....	3
第一节 试样制备.....	3
第二节 试验系统和仪器.....	3
第三节 试验方案设计.....	4
第二章 矿渣压实特性.....	6
第一节 矿渣载荷—位移曲线.....	6
第二节 矿渣应力—应变曲线.....	8
第三节 矿渣应力—压实度曲线	11
第四节 矿渣应力—变形模量曲线	14
第五节 矿渣载荷—刚度系数曲线	17
第三章 石灰矿渣混合料压实特性	20
第一节 石灰矿渣混合料压实特性	20
第二节 石灰矿渣混合料压陷特性	46
第三节 石灰矿渣混合料分级压实特性	52
第四章 水石灰矿渣混合料压实特性	61
第一节 水石灰矿渣混合料载荷—位移曲线	61
第二节 水石灰矿渣混合料压实应力—应变曲线	67
第三节 水石灰矿渣混合料压实应力—压实度曲线	74
第四节 水石灰矿渣混合料压实应力—变形模量曲线	81
第五节 水石灰矿渣混合料压实应力—刚度系数曲线	88
第五章 级配矿渣混合料压实特性	95
第一节 粒径级配矿渣混合料压实特性	95
第二节 连续级配矿渣混合料压实特性.....	103
第三节 含 15%石灰的级配矿渣混合料压实特性	114

第二编 露天矿渣综合机械化充填采煤设计

第六章 试验区概况及地表建(构)筑物设防标准	123
第一节 自然地理情况.....	123
第二节 试验区煤矿地质采矿条件.....	123
第三节 试验区上方建(构)筑物情况.....	125
第四节 试验区上方建(构)筑物采动安全设防标准.....	126
第七章 露天矿渣综采充填方法和工艺	128
第一节 建筑物下压煤开采技术.....	128
第二节 矿渣充填采煤条件.....	129
第三节 矿渣综采充填方法.....	130
第四节 矿渣综采充填工艺.....	131
第八章 露天矿渣充填采煤地表建(构)筑物变形分析	133
第一节 矿渣充填采煤沉陷控制机理.....	133
第二节 矿渣充填采煤地表沉陷预计方法.....	134
第三节 矿渣充填采煤方案设计.....	135
第四节 矿渣充填采煤沉陷计算方法和参数.....	139
第五节 矿渣充填采煤地表建筑物影响预测分析.....	140
第六节 露天矿渣充填开采方案确定.....	170
第九章 露天矿渣综合机械化充填采煤设备配套选型	181
第一节 机械设备配套选型的基本要求.....	181
第二节 综合机械化矿渣充填采煤成套技术主要设备选型.....	182
第三节 矿渣充填采煤设备布置.....	204
第四节 矿渣充填采煤设备配套电路图.....	205
第十章 矿渣充填采煤效益及安全措施	207
第一节 效益分析.....	207
第二节 安全措施.....	207

第三编 露天矿渣综合机械化充填采煤沿空留巷技术

第十一章 废渣充填采煤沿空留巷力学分析	211
第一节 废渣水平推力.....	211
第二节 废渣流变特性分析.....	213
第三节 留设巷道顶板变形分析.....	215

第四节	混凝土墙所受侧压力分析·····	216
第五节	混凝土墙水平变形分析·····	217
第六节	混凝土墙力学稳定性分析·····	218
第十二章	露天矿渣充填采煤沿空留巷工艺·····	222
第一节	方案Ⅰ废渣充填沿空留巷施工工艺·····	222
第二节	方案Ⅱ废渣充填沿空留巷施工工艺·····	223
第十三章	露天矿渣充填采煤沿空留巷设备选型·····	225
第一节	方案Ⅰ矿渣充填采煤沿空留巷设备选型·····	225
第二节	方案Ⅱ矿渣充填采煤沿空留巷设备选型·····	228
第三节	矿渣充填采煤沿空留巷方案优化·····	230
第四节	矿渣充填采煤沿空留巷安全措施·····	230
参考文献 ·····		232

第一编

矿渣充填料压实特性

第一章 矿渣充填料压实试验设计

第一节 试样制备

为研究不同强度、不同配比的矿渣在压实过程中的特性,有选择地采集原生矿渣(直径小于 50 mm)、石灰。试验前确定试样配比方案,试验时按等质量配比用天平称取对应质量的石灰、矿渣,将石灰和矿渣在橡胶垫上混合均匀。需添加水用量筒、烧杯量取相应体积的水,搅拌均匀后,放入实验桶中将试样表面刮平。

第二节 试验系统和仪器

在测定矿渣单轴压缩特性的试验中,主要试验设备为 CSS—55000 电子万能试验机,如图 1-1 所示。其最大试验力 500 kN,横梁加载速度范围:0.002 5~250 mm/min,加载位移速度精度:优于 $\pm 0.5\%$ (空载、检测距离大于 20 mm)。其他设备包括烧杯、量筒、天平、压实仪等。破碎岩体压实仪的装配高度 260 mm,缸筒外径 260 mm,内径 220 mm,材料为普通 45# 钢进行全淬火处理,缸筒通过下部法兰和底座用螺栓连接。压头设计为凸台形,以适应试验机上端的加载平台。

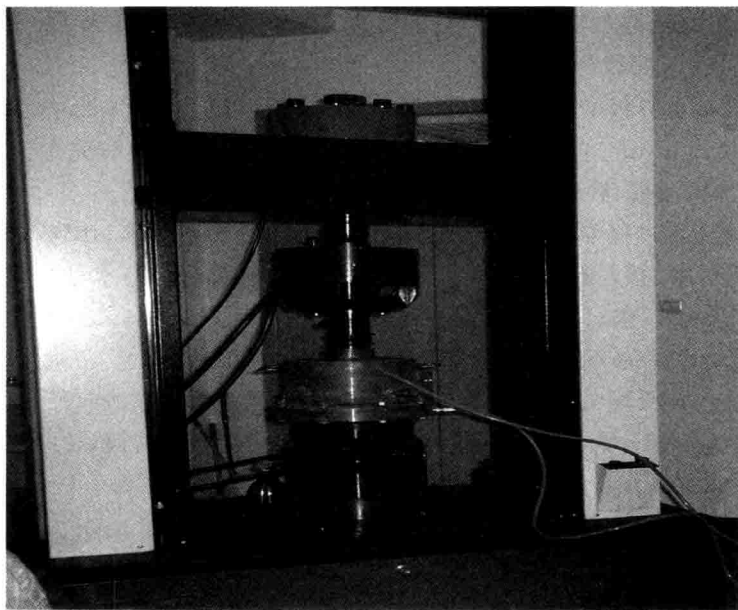


图 1-1 CSS—55000 电子万能试验机

第三节 试验方案设计

本次试验根据水灰比的不同,设计了多种试验方案,每种配比制备 3 组试样。

鉴于矿渣在实际应用中存在着一个十分重要的级配问题,所以需要研究矿渣粒径对其物理力学性质的影响。为此,先将岩样在捣碎桶中破碎后拼装变形仪,并装入待测破碎岩样。为统一起见,每次试验加入容器的配料均为统一体积的定量值,每次轻微晃动至密实,并将装配好的破碎岩体承压变形仪安装至测试系统试验台。然后,采用载荷加载方式,给定一个小的初始载荷,调整测试系统的压头与变形仪活塞上表面接触后停止加载。再采用载荷加载方式并设置最大轴向压力为 120 MPa,加载至工况载荷后停止加载。数据采集在 Multipurpose Testware 793.60 界面上通过设置相应选项并生成文件获得,采集的主要数据有时间、轴向载荷、轴向位移、轴向应力、轴向应变和变形模量等。最后,将试验机卸载提升压头,拆卸变形仪并清理破碎岩石。之后重新装配,准备下一组试验,测试结果取平均值,测定每组试样的力学性质,研究矿渣石灰混合料不同配比下的力学性质变化规律。

以下是具体实验设计方案:

① 单一原生矿渣压缩至工况载荷分别为 0.5 MPa, 0.75 MPa, 1 MPa, 1.5 MPa, 2 MPa, 2.5 MPa, 3 MPa, 3.5 MPa, 4 MPa, 4.5 MPa, 5 MPa, 5.5 MPa, 6 MPa。

② 原生矿渣加 8%、10%、15%、20%、30% 石灰配比情况下压缩至工况载荷对应分别为 0.5 MPa, 1 MPa, 1.5 MPa, 2 MPa, 2.5 MPa, 3 MPa, 3.5 MPa, 4 MPa, 4.5 MPa, 5 MPa, 5.5 MPa, 6 MPa。

③ 模拟推压装置推实充填料效果。模拟试验时石灰与混合料的质量比分别为 10%、20% 和 30%,采用内径为 220 mm 的圆柱形试验筒装混合料,用直径为 130 mm 的活塞对混合料进行加载压实,工况载荷为 6 MPa。

④ 模拟推压装置分级加载推实充填料效果。采用内径为 220 mm 的圆柱形实验筒装混合料,用直径为 130 mm 的活塞对混合料进行加载压实。试验时先用大桶大活塞加压 0~1 MPa 后取出大活塞,然后再用小活塞加压 0~6 MPa。

⑤ 模拟矿渣充填过程中矿渣结合石灰固结特性。分为:5%水、10%石灰配比;5%水、20%石灰配比;5%水、30%石灰配比;10%水、10%石灰配比;10%水、20%石灰配比;10%水、30%石灰配比;18%水、10%石灰配比;18%水、20%石灰配比;18%水、30%石灰配比。各种配比压缩最大载荷为 2 MPa、3.5 MPa 和 6 MPa。

⑥ 原生矿渣粒径级配试验:对原生矿渣进行筛分,控制最大矿渣粒径 25 mm;在此粒径范围内根据粒径大小划分为 6 组分别进行筛分,得到原生矿渣不同粒径的质量百分含量即原生矿渣级配。根据现场调查,把原生矿渣分为 5 个粒径级别,见表 1-1。

表 1-1 原生矿渣粒径分级

粒径大小/mm	<25	<20	<15	<10	<5
粒径分级	一级	二级	三级	四级	五级

对原生矿渣级配进行压缩试验,试验方案为分别控制最大粒径为 25 mm,20 mm,15 mm,10 mm,5 mm 的 5 组原生矿渣级配压缩试验。最大载荷为 6 MPa。

⑦ 根据原生矿渣级配划分的粒径范围,利用泰波理论对 $n=0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9$ 进行连续级配矿渣压缩试验,方案见表 1-2。

表 1-2 中各个数据为粒径范围内的质量百分含量。对最优方案进行粒径级配分析,找出影响矿渣抗压特性的关键影响粒径组。

表 1-2 连续级配矿渣压缩试验方案

n 值 粒径范围/mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
25~20	4	6	9	11	13	14	16	18
20~15	5	8	10	12	14	16	17	19
15~10	7	10	12	14	16	17	18	19
10~5	11	14	17	19	20	20	21	20
<5	73	62	52	44	37	33	28	24

⑧ 对第⑦步试验方案中选出的优选级配加 15% 石灰进行压缩试验。工况载荷为 6 MPa。

试验数据采集测试过程为,提供位移加载到工况载荷,记录加载过程。在试验中,主要采集的数据为载荷、位移,同时对单轴压缩试验过程中试样的压缩特征进行拍照记录。试验后对单轴压缩试验中采集的试验数据和图像资料进行分析,主要是载荷—位移,进而导出其他力学参量。

第二章 矿渣压实特性

矿渣内存在大量空隙,因此在承载的初始阶段,其体积不断缩小;当压缩到一定程度后,体积基本趋于稳定。这一压实过程反映了矿渣作为一种多孔隙的非连续介质所具有的弹性、塑性和黏性的变形特点。

第一节 矿渣载荷—位移曲线

通过对不同应力水平下的载荷—位移测试结果进行回归分析,得出回归方程,见表 2-1。

表 2-1 矿渣的载荷与位移关系

应力水平/MPa	回 归 方 程	相关系数 R
0.5	$S = -43.076\ 52 + 16.844\ 59 \ln(F + 12.802\ 28)$	0.999 5
0.75	$S = -19.414\ 08 + 10.327\ 45 \ln(F + 6.102)$	0.998 7
1.0	$S = -64.759\ 54 + 20.987\ 42 \ln(F + 20.857\ 95)$	0.998 8
1.5	$S = -44.952\ 79 + 15.767\ 25 \ln(F + 16.011\ 03)$	0.997 9
2.0	$S = -24.091\ 01 + 12.512\ 01 \ln(F + 3.319\ 05)$	0.999 8
2.5	$S = -39.675\ 2 + 16.145\ 74 \ln(F + 12.214\ 4)$	0.996 8
3.0	$S = -23.901\ 12 + 13.304\ 14 \ln(F + 6.215\ 9)$	0.999 6
3.5	$S = -13.440\ 35 + 11.634\ 18 \ln(F + 3.551\ 91)$	0.999 5
4.0	$S = -4.221\ 8 + 10.708\ 18 \ln(F + 1.453\ 54)$	0.999 9
4.5	$S = -6.806\ 91 + 11.776\ 19 \ln(F + 1.688\ 03)$	0.999 7
5.0	$S = -12.964\ 27 + 13.052\ 75 \ln(F + 2.750\ 1)$	0.999 7
5.5	$S = -13.717\ 74 + 13.254\ 77 \ln(F + 2.682\ 8)$	0.999 9
6.0	$S = -4.262\ 83 + 11.442\ 38 \ln(F + 1.604\ 22)$	0.998 5

各应力水平下矿渣的载荷与位移之间都呈对数关系,即 $S = a + b \ln(F + c)$ 。其中, S 为矿渣轴向位移; F 为轴向载荷; a 、 b 、 c 为回归系数。应力水平不同,系数 a 、 b 、 c 也不同。从表 2-1 可以看出,不同应力水平下矿渣的载荷—位移曲线的相关系数均在 0.99 以上。

图 2-1 为不同应力水平下矿渣载荷—位移曲线。

从表 2-1 和图 2-1 可以看出:

① 不同应力水平下的矿渣载荷—位移曲线,在加载初期,矿渣结构的抵抗力较小,载荷较小时位移变化率很大;随着载荷增加,矿渣结构的抵抗力逐渐增大,位移的增长率逐渐变小,破碎岩体被逐渐压密,变形增长率减小。

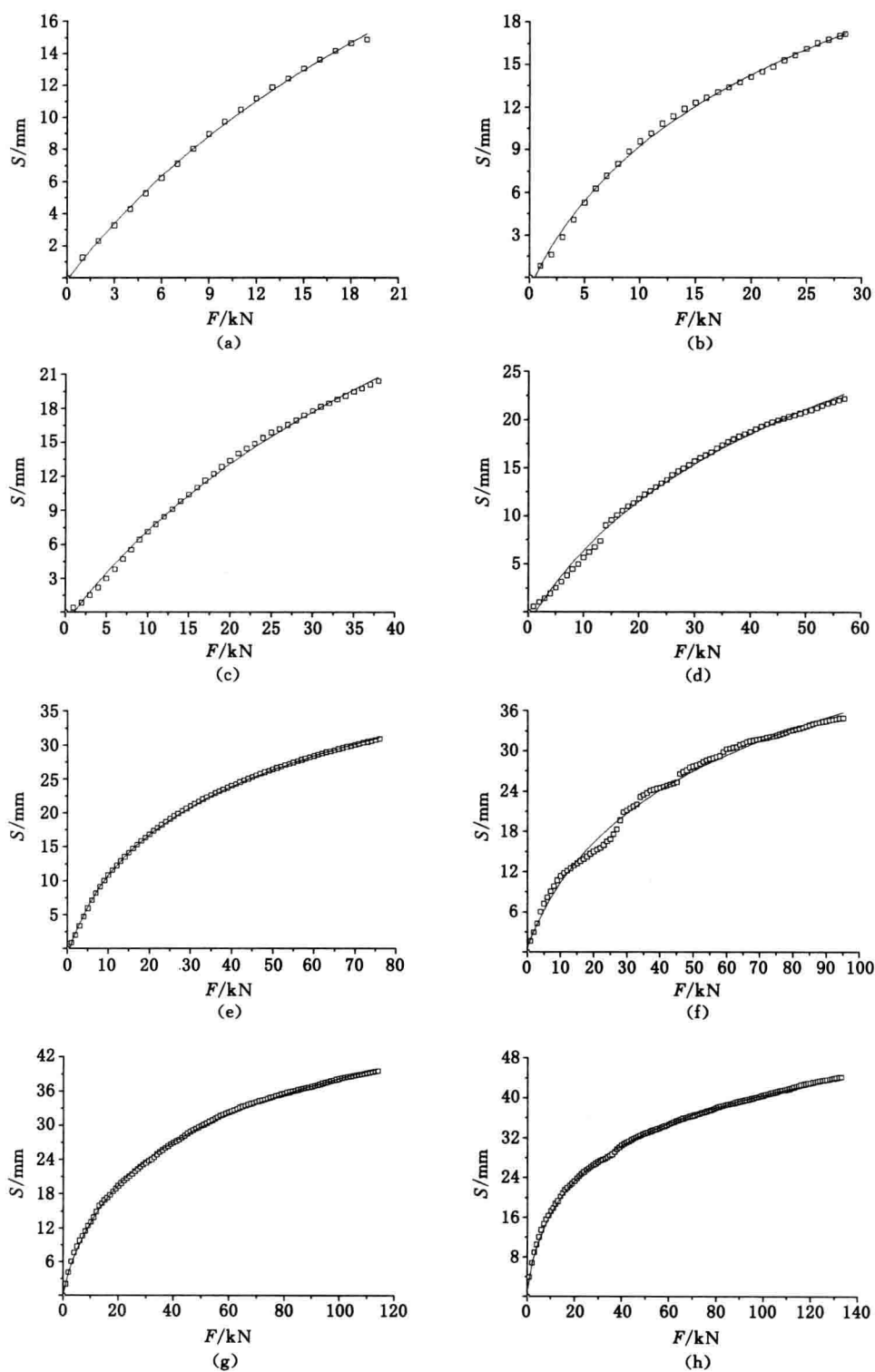
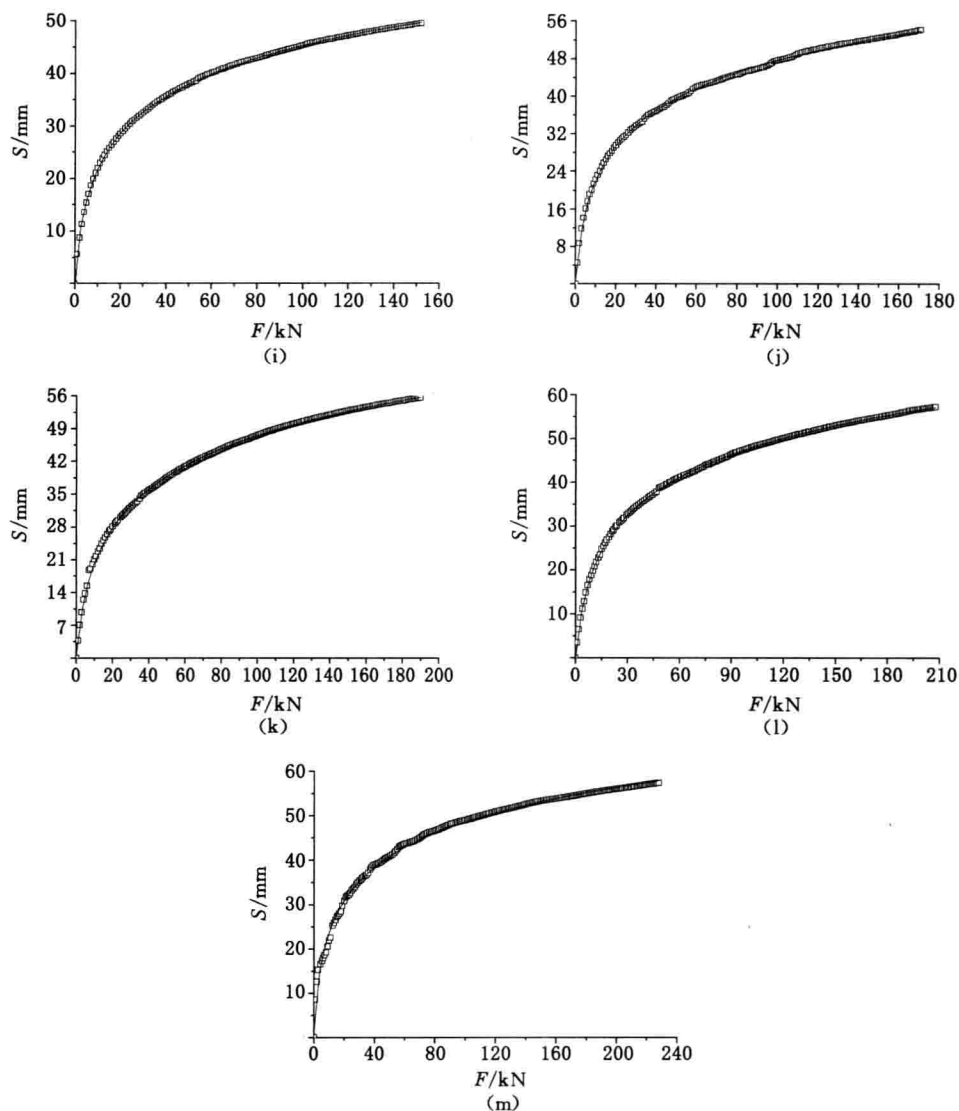


图 2-1 矿渣载荷—位移关系曲线



续图 2-1 矿渣载荷—位移关系曲线

(a) 0.5 MPa; (b) 0.75 MPa; (c) 1.0 MPa; (d) 1.5 MPa; (e) 2.0 MPa; (f) 2.5 MPa;
(g) 3.0 MPa; (h) 3.5 MPa; (i) 4.0 MPa; (j) 4.5 MPa; (k) 5.0 MPa; (l) 5.5 MPa; (m) 6.0 MPa

② 压实曲线和拟合关系表明,矿渣混合料在压实过程中,轴向载荷与其轴向压缩位移之间呈对数关系,即 $S=a+b\ln(F+c)$ 。

第二节 矿渣应力—应变曲线

通过对不同应力水平下矿渣的应力应变测试结果进行回归分析,得出回归方程,见表 2-2。

表 2-2 矿渣的应力与应变关系

应力水平/MPa	回 归 方 程	相关系数 R
0.5	$\epsilon=0.110\ 32+0.102\ 09\ln(\sigma+0.336\ 78)$	0.999 5
0.75	$\epsilon=0.110\ 04+0.062\ 59\ln(\sigma+0.160\ 52)$	0.998 7
1.0	$\epsilon=0.070\ 25+0.127\ 2\ln(\sigma+0.548\ 7)$	0.998 8
1.5	$\epsilon=0.075\ 2+0.095\ 56\ln(\sigma+0.421\ 2)$	0.997 9
2.0	$\epsilon=0.129\ 86+0.075\ 83\ln(\sigma+0.166\ 23)$	0.999 8
2.5	$\epsilon=0.115\ 53+0.097\ 85\ln(\sigma+0.321\ 32)$	0.996 8
3.0	$\epsilon=0.148\ 48+0.080\ 63\ln(\sigma+0.163\ 52)$	0.999 6
3.5	$\epsilon=0.175\ 05+0.070\ 51\ln(\sigma+0.093\ 44)$	0.999 5
4.0	$\epsilon=0.210\ 51+0.064\ 9\ln(\sigma+0.038\ 24)$	0.999 9
4.5	$\epsilon=0.218\ 39+0.071\ 37\ln(\sigma+0.044\ 41)$	0.999 7
5.0	$\epsilon=0.209\ 22+0.079\ 11\ln(\sigma+0.072\ 35)$	0.999 7
5.5	$\epsilon=0.209\ 1+0.080\ 33\ln(\sigma+0.070\ 58)$	0.999 9
6.0	$\epsilon=0.226\ 45+0.069\ 35\ln(\sigma+0.042\ 2)$	0.998 5

各应力水平下矿渣的应力与应变之间都呈对数关系,即 $\epsilon=a+b\ln(\sigma+c)$ 。其中, ϵ 为矿渣轴向应变; σ 为轴向压应力; a 、 b 、 c 为回归系数。应力水平不同,系数 a 、 b 、 c 也不同。从表 2-2 可以看出,矿渣的应力与应变相关性很好,相关系数均在 0.99 以上。

图 2-2 为不同应力水平下矿渣应力—应变关系曲线。

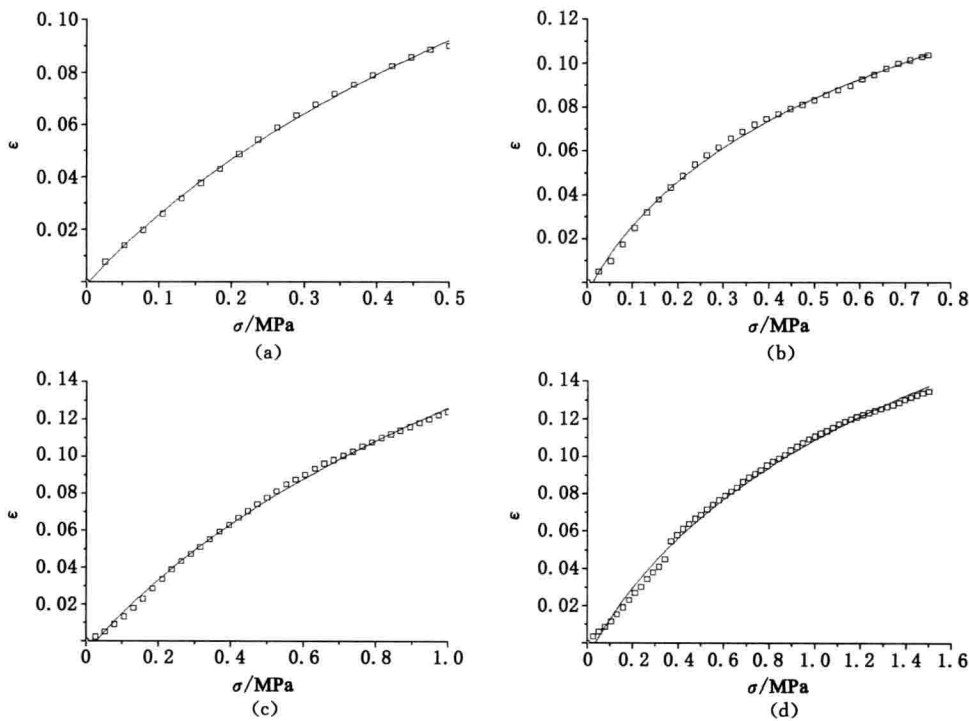


图 2-2 矿渣应力—应变关系曲线