

北京市优秀人才培养资助 (编号: 2014754154700G203)

北京市西城区优秀人才培养资助 (编号: 20140070)

国家自然科学基金资助 (编号: 51174107)

Theory and Anti Detonation Numerical Simulation
of the Coupling Protection
of Underground Space Structure

地下空间结构

耦合防护理论与抗爆震数值模拟

吕祥锋 潘一山 李显峰 冯春·著



科学出版社

北京市优秀人才培养资助（编号：2014754154700G203）

北京市西城区优秀人才培养资助（编号：20140070）

国家自然科学基金资助（编号：51174107）

地下空间结构耦合防护理论与 抗爆震数值模拟

吕祥锋 潘一山
李显峰 冯 春 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结作者近年来在地下空间结构耦合防护理论及抗爆震防控方面的研究成果,并结合国内外相关方面的研究成果,对爆震载荷条件下地下生存空间结构安全防护理论、试验及防护方法等作较系统和全面的论述。书中详细介绍地下空间结构安全防护的发展水平,建立刚-柔耦合防护吸能模型,提出刚-柔-刚耦合防护方法,研发混凝土外衬抗爆震结构,给出地下生存空间结构抗爆震控制对策。研究成果将为地下生存空间安全防护提供重要的科学依据。

本书可供土木建筑工程、岩土工程、地下工程与隧道等专业的科研、设计和施工人员,以及高等院校相关专业的教师、研究生、本科生等参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下空间结构耦合防护理论与抗爆震数值模拟/吕祥锋等著. —北京:科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-045167-5

I. ①地… II. ①吕… III. ①地下工程-空间结构-防爆-研究②地下工程-空间结构-防震设计-研究 IV. ①TU92②TY352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 142572 号

责任编辑:罗 莉/责任校对:陈 靖
责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 6 3/4

字数: 140 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

地下空间开发规模和建设难度不断加大,尤其城市地下工程运营期还涉及抗爆和地震安全等防护技术难题。由于地下空间相对封闭狭小,目前未对地下工程抗爆设计炸药当量给予相关设防标准,对地下工程设施安防及承载结构物抗爆等级也未做具体规定,一旦发生爆炸事件,极易造成人员伤亡,同时对设施和承载结构物造成损坏,易造成次生灾害,造成严重社会影响。地下空间结构安全防护引起了岩土工程相关科研人员和技术人员的广泛关注。笔者自2009年攻读博士学位开始,就一直从事地下空间安全防护相关的研究工作,2012年、2013年在中国科学院力学研究所从事博士后研究工作,主要完成了地下空间结构抗爆震数值模拟。在完成国家“973计划”项目和国家自然科学基金项目研究基础上,依托北京市优秀人才培养资助和北京市西城区优秀人才培养资助项目,研究了闭孔泡沫金属材料力学吸能性能及压缩破裂形貌,开展了动载荷条件下地下工程结构体变形稳定数值仿真,以及地下空间用抗爆震锚固技术装置研发,建立刚-柔-刚(R-F-R)支护体系,设计了分级抗爆防护结构方案,应用于岩土工程抗爆震控制。

地下空间结构在运营过程中受各种因素制约,在反恐形势愈加严峻的环境下,地下空间结构抗爆安全显得尤为重要。地下空间结构吸能抗爆无论在理论,还是数值模拟、防护技术方面都是非常复杂的课题。本书总结课题组在地下空间结构安全防护方面的研究成果,重点阐述刚-柔耦合防护力学模型和R-F-R防护结构抗爆震理论以及数值计算方法,结合工程实例资料,归纳总结数值模拟研究成果。

本书的出版得到辽宁工程技术大学章梦涛教授、王来贵教授、梁冰教授、张永利教授的悉心指导,部分研究内容得到课题组和实验室各位老师 and 师兄、师弟、师妹的大力支持帮助。在研究过程中,东北大学姚广春教授以及穆永亮博士的指导,使得笔者对多孔金属材料的研究更深入;多孔金属材料动态力学特性及吸能机理方面的研究工作,得到了华南理工大学汤立群教授的指导,在实验方面得到了杨宝博士的帮助;低能爆炸作用吸能防护的试验研究受益于北京理工大学马少鹏教授和南京航空航天大学薛彩军教授指导;地下空间结构抗爆震数值模拟,得到了中国科学院力学研究所李世海研究员、刘晓宇副研究员的指导;工程地质资

料分析相关方面，得到了义马跃进煤矿刘军总工程师、韩荣军所长、张国华科长和上官峰工程师的支持。在本书成稿过程中，得到了西南石油大学刘建军教授、中国科学院武汉岩土力学研究所薛强研究员、北京市市政工程研究院杨东波教授级高级工程师、王贯明教授级高级工程师、叶英研究员、崔丽教授级高级工程师、李东海教授级高级工程师、贺美德高级工程师的帮助。在此，对他们表示诚挚的感谢。

感谢科学出版社的编辑，他们的细致工作使得本书得以顺利出版。限于水平，书中难免有不当之处，请读者批评指正。

目 录

第 1 章 地下空间结构安全防护研究现状	1
1.1 结构防护抗爆震理论研究现状	1
1.2 结构防护抗爆震试验研究现状	2
1.3 爆炸应力波作用防护结构数值模拟研究现状	3
1.4 地下空间工程耦合防护技术研究现状	4
第 2 章 刚-柔耦合防护力学模型	6
2.1 柔性让位吸能原理	6
2.2 R-F-R 防护结构力学模型	7
2.3 R-F-R 结构应力波传播与转移特征	9
2.4 R-F-R 结构模型力学机理	11
2.5 R-F-R 结构能量耗散机理	17
第 3 章 R-F-R 防护结构抗爆震理论	20
3.1 R-F-R 理论模型	20
3.2 控制方程	21
3.3 应力波在 R-F-R 结构中传播分析	23
3.4 R-F-R 结构衰减应力波实例计算	28
3.5 R-F-R 防护结构抗爆震分析	30
第 4 章 多孔金属材料动态力学特性研究	31
4.1 多孔金属材料动态压缩破坏规律	31
4.1.1 动态压缩破坏形貌分析	31
4.1.2 动态压缩形变吸能分析	32
4.2 高速应力波作用多孔金属材料力学性能分析	34
4.2.1 破坏过程研究	34
4.2.2 吸能性能分析	36

4.3	多孔金属材料吸能性能影响参数研究	37
4.4	考虑几何尺寸影响的动态吸能性能研究	40
4.5	高速应力波作用耦合防护吸能分析	41
第5章	刚-柔耦合防护方法及结构设计	46
5.1	刚-柔耦合防护结构吸能原理	46
5.2	刚-柔耦合防护结构设计依据	46
5.3	结构初撑力理论分析	47
5.4	刚-柔耦合防护结构让位吸能分析	52
5.4.1	实验条件	52
5.4.2	缓冲效果分析	53
第6章	低能爆炸作用下耦合防护结构与围岩破裂规律	58
6.1	爆炸应力波作用下地下围岩动态破裂过程	58
6.2	爆炸载荷条件下锚杆防护结构与围岩变形规律	60
6.3	低能爆炸作用下耦合防护结构与围岩抗爆分析	63
6.4	爆炸载荷条件下防护结构与围岩相互作用数值模拟	65
6.4.1	计算模型及边界条件	65
6.4.2	U型钢防护结构围岩抗爆震数值分析	67
6.4.3	R-F-R防护结构围岩抗爆震数值模拟	70
6.4.4	混凝土结构抗爆抗震性能及防护形式优化仿真	73
6.4.5	地下空间抗爆震效应计算结果分析	82
第7章	地下生存空间结构抗爆震控制对策研究	83
7.1	弱化外部爆震载荷	83
7.2	合理设置柔性层	83
7.2.1	柔性层结构选择	84
7.2.2	复合结构增设位置	84
7.2.3	设置时机和地点确定	84
7.3	增大刚性防护强度	85
7.4	刚-柔耦合防护抗爆震能力分析	85
7.4.1	锚杆防护结构抗爆震能力分析	87
7.4.2	锚杆+U型钢防护抗爆震分析	89

7.4.3 刚-柔耦合防护结构抗爆震分析.....	91
第 8 章 主要研究结论及展望	94
8.1 主要研究结论	94
8.2 展望	95
参考文献	97

第 1 章 地下空间结构安全防护研究现状

1.1 结构防护抗爆震理论研究现状

结构防护是灾害控制^[1-4]的前提,灾害控制是结构防护的根本目的,防护理论必须以灾害的探测信息为依据,应考虑影响地下防护工程的各种因素。对于地下工程防护^[5-7]的研究,至今已有百年历史了,地下工程防护的研究与岩土力学的发展是分不开的。防护工程解决的问题就是如何使支护体能够满足上部载荷和人为环境的要求,因此,工程防护理论的发展也离不开地压理论和岩石力学理论的发展。

20 世纪 60 年代,奥地利工程师 L. V. Rabcewicz 利用岩体自身起到支撑作用的原理,将岩体和防护结构作为系统整体,提出了新的隧道支护方法,简称新奥法 (new ausrtrian tunnelling method, NATM)。

20 世纪 60 年代期间,日本山地宏和樱井春辅认为岩体应变与防护结构^[8-10]有直接关系,可通过改变防护结构数量或形式来控制围岩应变,提出了防护结构的应变控制理论。

20 世纪 70 年代, M. D. Salamou 认为岩体和防护结构共同承受两者协调变形的能量,利用防护结构协调岩体和防护结构的能量吸收大小,提出了防护结构的能量理论。

我国开展防护结构设计理论^[11, 12]方面的研究始于 1958 年,比国外晚约 30 年,20 世纪 80 年代以来取得了较好的发展。于学馥^[13]认为岩体的破坏是由于上部载荷作用大于岩体的破坏强度而产生岩体破碎失稳,导致岩体应力重新分布,合理的轴比使得结构最稳定,因此提出了轴变理论。系统开挖控制理论认为是开挖过程中的动载荷使得岩体失稳,但岩体具有自调平衡能力。郑雨天、朱浮声^[14]认为对于岩体的防护应该采取一定的原则,即“先柔后刚、先挖后让、柔让适度、稳定支护”,提出了联合防护理论。钱七虎^[15]指出深地下防护工程洞室的围岩应力大,洞室开挖导致应力释放,围岩产生较大的变形,并根据“相互作用”理论,提出应采用“以柔克刚”的方法,达到最佳的支护效果和最低的支护费用。孙

钧^[16]认为联合防护理论不能承受上部大的载荷作用,在较大载荷作用过程中,不但要柔护,主要还在于支撑。董方庭等^[17]认为坚硬的岩体松动圈接近于零,岩体越软,松动圈越大,越不易支护,提出了围岩松动圈理论。何满潮等^[3]认为岩体和防护结构的破坏大都是由于岩体和防护结构在强度、刚度和结构方面作用的不协调作用产生的,缺少两结构系统的相互协调耦合作用,提出了关键部位耦合组合防护理论。窦林名等^[18]从能量守恒定律出发,提出“强结构”应具备主动高强度与让压的双强功能^[8,9]。

1.2 结构防护抗爆震试验研究现状

相似模拟试验研究在地下工程抗爆研究中具有重要地位,是研究抗爆机理和破坏^[19,20]位置及再现过程的重要手段。目前地下工程抗爆相似材料模拟试验中存在着许多问题有待于进一步研究,主要体现在:①地下工程抗爆机理还不够清晰;②模拟动力灾害发生过程的材料配比需要进一步完善;③相似模拟试验条件受实际限制,试验结果往往有局限性。以上方面的研究已成为地下工程安全防护和抗爆研究中的热点。

国内外在岩爆的认识方面存在一些差异,W. Burgert 和 M. Lippman^[21]在煤岩岩爆平移模型方面进行了研究,提出岩爆是结构面平移造成的,对其发生过程给出了解释。I. Vardoulakis^[22]提出了岩爆是结构面的一种不稳定现象。A. M. Linkov^[2]则认为地压冲击与岩石体的不稳定存在着一定的联系,并开展了相关的研究工作。在岩爆的发生和演化规律认识方面,我国学者则利用相似材料模拟试验的方法,试图在实验室模拟其发生,进而更客观地研究破坏规律。潘一山、章梦涛、王来贵等^[23]研制出了模拟岩爆的系列脆性破坏材料,可应用于不同模拟比例、不同类型和不同震级的岩爆模拟试验,提出了模拟岩爆的新的相似系数 E/λ ,并对断层岩爆进行了相似材料模拟试验^[24,25],解释了只有达到一定的深度才可能发生岩爆,证实了岩爆发生的间歇性。张晓春、杨挺青和缪协兴^[11]采用相似材料和煤质材料模拟煤矿冲击矿压发生的过程和现象,揭示了煤壁局部突然失稳形成片帮型冲击矿压的机制,并指出地下空间附近压应力集中区内裂纹平行壁面扩展、贯通,形成层裂板结构,在一定压力下发生压曲破坏。郭文奇、张拥军和安里千等^[26]利用单轴加载系统和红外热成像技术,对煤岩变形过程中的红外辐射变化进行了探测试验研究,通过煤岩表面的温度变化,预测岩爆的发生。李长洪、蔡美峰和乔兰等^[27]对煤矿冲击性灾害类型进行实验研究,从而获得了不同岩性特征及受力状态

下岩石破坏的不同表现模式。姜耀东等对岩爆形成过程中的能量耗散特征进行了研究,初步建立了基于非平衡态热力学的岩爆失稳判别方法,探求了孕育、发生过程中能量耗散的细观特征。

1.3 爆炸应力波作用防护结构数值模拟研究现状

利用数值计算的方法研究岩爆发生和破坏过程,更直观形象地观测其演化过程,可弥补试验条件受限以及在实验室无法达到的外界环境条件,因此,数值计算应用到岩爆模拟中具有重要的意义。国内外在数值计算方面也开展了一些研究工作,国外对此研究略早一些,N. G. W. Cook 在 1963 年就对岩爆基本机理进行了研究,随后在 1965 年和 1966 年又提出了把岩爆作为某一节点稳定性的问题,归结为研究岩石体力学特性问题。J. P. G. Pretorius 和 F. H. Deist 分别使用统计学方法和非线性连续统一体的方法来研究岩爆和解释岩爆和破坏区域化问题。A. T. Bieniawski 等也研究了岩爆问题,并认为岩爆的发生是破碎岩块体的失稳问题。我国对岩爆数值计算方面的研究开始于 20 世纪 80 年代,章梦涛^[28]等于 1987 年提出了地压失稳理论,并通过数值计算的方法对岩爆发生过程进行了研究,给出了失稳准则,揭示了发生机理。梁冰、章梦涛^[29]根据失稳理论的能量准则,对开采中采区岩爆发生过程进行了数值模拟,有效地预测了采区灾害。张永利、邵英楼和潘一山等首先进行了相似材料模型试验研究,完整地模拟了开采和冲击发生过程,并通过对顶板下沉量的分析,揭示了岩爆发生的必然性,同时利用有限元数值计算方法对岩爆发生过程进行了验证。王述红、刘建新和唐春安等^[30]应用岩石破裂过程分析系统(rock failure process analysis system, RFPA)软件对厚煤层开采过程周围应力场分布进行了数值计算,再现了煤层开采过程中应力场的演化过程。齐庆新、陈尚本和王怀新等^[31]全面论述了冲击地压、岩爆、矿震之间的关系,并对其进行了数值模拟研究,指出了三者之间的异同。唐巨鹏、李英杰和潘一山等^[32]则基于 ANSYS 有限元分析软件,对辽宁阜新五龙矿深部岩爆进行了数值模拟研究,得到了阜新五龙矿属于煤体压缩型失稳破坏,同时伴有火成岩墙侵入影响的结论。徐学峰、窦林名和刘军等^[33]在顶板岩层特性对煤体冲击影响,以及煤矿地下空间底板冲击矿压发生的原因及控制研究方面进行了数值分析,得到了煤层上方岩层的悬顶长度、岩层厚度和强度对冲击矿压的危险性均有影响,和地下空间开挖后底板煤层的水平应力升高和垂直应力降低的规律。李金奎、熊振华和刘东生等^[34]开展了钻孔卸压防治地下空间冲击发生的数值模拟研究,分析

了不同钻孔深度的卸压效果,得到了岩爆应力集中区钻孔卸压的数值结果,对实际工程具有一定的指导作用。

1.4 地下空间工程耦合防护技术研究现状

近些年来,随着深井采矿、深埋隧道和硐室等人类活动的不断深入,地应力呈非线性增加,地质环境更加复杂多变,动力灾害发生^[30]频次和破坏程度也愈加强烈,给人民生命、财产和生产安全带来严重的威胁,对防护结构强度和稳定性方面的要求也越来越高。

波兰对深埋地下工程防护的做法是:首先根据工作面开采条件提前预计冲击强度,选择合适的支架来对付冲击;发生强冲击时地下空间主要显现为底鼓和两帮挤出,原因是两帮和底板防护太弱,冲击发生时支架要稳定,不能倾斜;在底板加设防底鼓的横梁或环形支架;在冲击更严重的情况下采用双层支架,两层支架之间充填矸石;U形支架设计特殊的联结器,联结力强且收缩量要大;网子要封包严密,加锚杆增加稳定性,即采取支架与锚网联合支护的方法,地下空间中间加设顶柱,柱子穿木靴缓冲,支架沿地下空间走向整体联结起来增加支护强度;对于底板岩爆,采取对底板松动破坏或注水的方法。

南非西部深水平金矿采深4km,这是目前人类深入地壳内作业达到的最大深度,著名岩爆问题专家之一Dave Ortlepp对岩爆问题进行了近40年的潜心研究,特别是对岩爆条件下的支护研究很有建树,发表了大量文章和研究报告,其最核心的思想是:支护系统不仅要像常规地下空间支护一样提供一定程度的静抗力,同时还要具有适当的屈服和让压特性,吸收围岩体突然破坏过程中释放的动能。

我国在地下工程防护方面开展了大量的研究工作,随着人类活动不断向地下发展,在不同的深度和阶段,对工程防护的研究也呈现出不同的阶段。王明洋、周泽平和钱七虎^[35]指出深部地下空间所处地质环境以冲击型的动力灾害为主,理想的支护要求支护体应具有较高的初始刚度,在大变形条件下支护系统具有较好的承载性能和良好的柔性,深部工程支护应建立在能量分析基础上,而不是简单以应力和强度作为准则,并指出了预应力自由锚索加固技术、屈服锚杆加固技术以及喷锚网联合加固技术会在深部地下工程支护中起到作用。鞠文君等^[36]介绍了高强度锚杆技术,对锚杆参数进行了修正。康红普、王金华等^[7]介绍了锚杆成套技术,说明了锚杆防护在一定条件下的有效性。戴俊、钱七虎^[37]指出深部地下工程防护应采用“有控制的变形”,重点解决防护材料和方法技术问题。缪

协兴^[38]研究了爆炸应力波对深埋地下空间的作用,并提出了对地下空间结构进行衬砌,增设减震层,同时对地下空间顶部和侧帮进行支架防护,以减轻动力灾害破坏程度。

综上所述,随着地下工程开挖深度的不断增加,地应力将进一步增大,地质条件和作业环境恶化,地下工程动力或爆炸等灾害性破坏程度更加严重,造成围岩及防护体破坏、坍塌,给人民生命和生产安全带来极大威胁。目前,国内外在地下空间结构防护方面开展了许多研究,取得了较好的研究成果,依据原设计理论和施工经验,形成了以锚杆、U型钢、喷射混凝土和棚-索协同支护等为主的支护方式,但以上支护手段已不能完全适用于现有地下工程及地下生存空间结构防护,冲击动力或爆炸等灾害,往往造成周围岩层及防护体失稳破坏。要解决目前地下工程安全防护问题,必须加强研究冲击动力或爆炸等灾害条件下防护新方法和技术,为地下生存空间工程围岩体安全防护设计和应用提供科学依据。

第2章 刚-柔耦合防护力学模型

2.1 柔性让位吸能原理

R-F-R 支护体主要通过柔性让位缓冲材料的压缩变形^[39-41]和破坏吸收大量冲击能, 剩余部分能量主要由刚性支护体承担, 因此, 可大幅度增强支护体系的耗能能力。柔性让位缓冲材料具有良好的吸能、减震、阻尼^[42-47]功能, 主要依靠基体材料的弹性变形来吸收弹性能, 这部分弹性能相对较少, 且材料变形属于弹性变形; 当柔性让位缓冲材料继续被压缩变形, 基体材料发生屈服变形, 依靠材料较大的压缩变形空间吸收大部分能量; 最后, 材料破坏后在外力作用下继续发生变形, 破坏变形^[48-51]主要是碎片的破坏消耗能量以及碎片间空隙的压缩密实吸收能量, 另外能量的吸收也包括碎片在压缩密实过程中的摩擦力^[52-57]消耗。图 2.1 为缓冲材料能量吸收机制示意图。

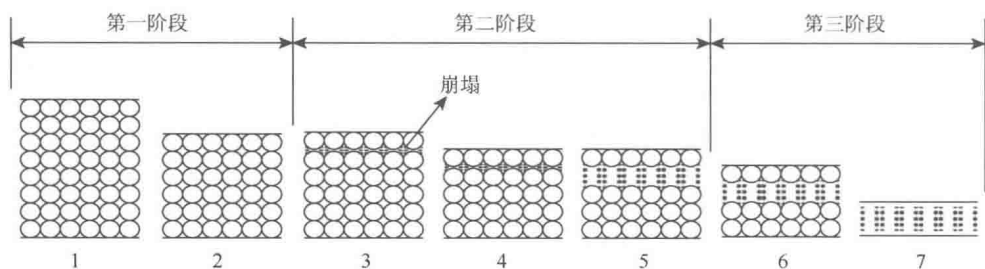


图 2.1 柔性让位缓冲材料吸能机制示意图^[58]

1. 初始状态; 2. 弹性变形; 3. 开始破碎; 4. 继续变形; 5. 部分破碎; 6. 继续破碎; 7. 完全破碎

当动态载荷作用在柔性让位缓冲材料上时, 冲击力做功, 材料吸收能量主要依靠孔洞屈曲、屈服或压坏而产生的崩塌。吸收的大量能量主要消耗于塑性功、脆性功或以孔壁断裂、碎片间的摩擦、热量等形式耗散。材料的吸能量大小可用吸能能力 C 表示^[59], 吸能材料压缩应力-应变关系^[60]如图 2.2 所示。

$$C = \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon \quad (2.1)$$

式中, ε_{\max} 为材料压缩变形的最大应变值; σ 和 ε 分别表示压缩过程中的应力和应变值。

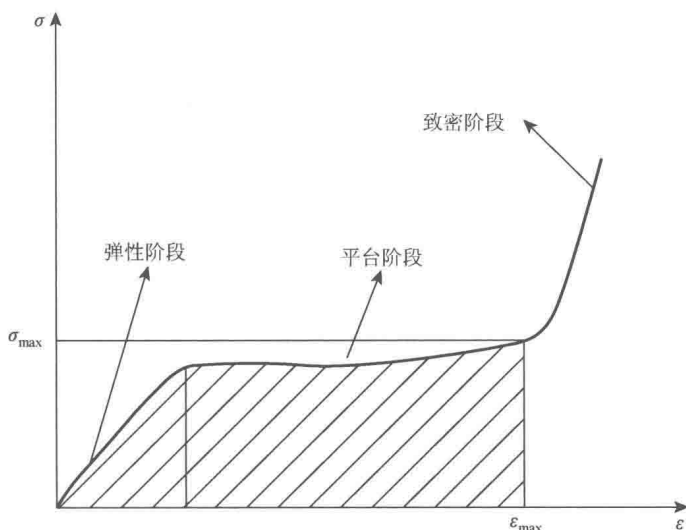


图 2.2 柔性缓冲材料压缩应力-应变曲线

2.2 R-F-R 防护结构力学模型

岩爆发生后, 应力波迅速向四周传播, 在岩体传播过程中消耗一部分能量^[12, 61]。为提高吸能支护体系的安全性, 冲击吸能支护计算中, 可忽略不计传播过程中能量损耗。地下工程埋深为 D , 地下空间 (半径为 r) 对于整个地层是相对小结构, 应力波传至地下空间围岩处, 可以认为同时作用在地下空间围岩及其支护体上。假设岩爆释放能量为 E , 围岩破坏耗能为 E_1 , 让位缓冲材料吸收能量^[62, 63]为 E_2 , 支架承担剩余能为 E_3 , 可建立 R-F-R 支护结构力学模型, 如图 2.3 所示。

应力波^[64-66]传至围岩体时, 会对围岩产生一定的破坏作用, 若围岩体承载能力小于冲击力作用将发生破坏。同时, 应力波作用于具有良好缓冲和吸能特性的柔性让位材料, 可大幅度降低冲击能^[67-70], 减弱冲击载荷作用。假设应力波在岩爆发生时释放能量为 E , 在围岩体传播中耗能为 E_1 , 柔性让位缓冲材料吸收能量为 E_2 , 则作用于刚性支护体上的剩余冲击能为 $E_3 = E - E_1 - E_2$ 。若 $E_3 > 0$, 则剩余冲击能作用在刚性支护体上, 此时, 钢结构承担冲击能大幅度降低; 若 $E_3 = 0$, 岩爆

释放能量全部用于围岩体中传播耗能和柔性缓冲材料吸收；若 $E_3 < 0$ ，说明让位缓冲材料足以充分吸收岩爆释放能量，吸能材料也未完全变形。

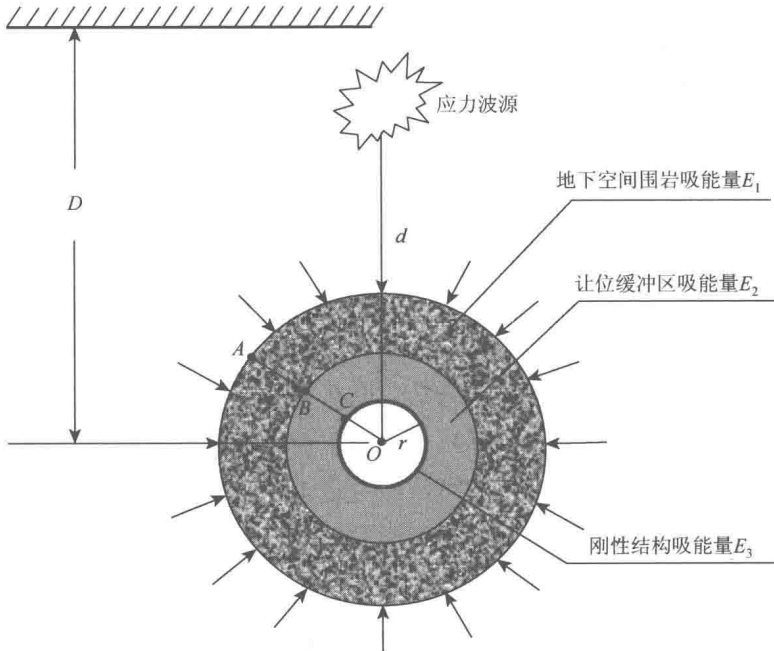


图 2.3 R-F-R 支护结构力学模型

从能量角度分析 R-F-R 支护体的耗能机理可知，岩爆释放总能量为 E ，忽略应力波传播至地下空间围岩过程中所消耗的能量，地下空间围岩体中传播消耗能量为 E_1 ，柔性让位缓冲材料压缩变形吸收能量为 E_2 ，钢结构承担剩余能 E_3 。无柔性材料的刚支护体中，冲击释放总能量由应力波传播过程中耗能和钢结构承担，用 $E_1 + E_3$ 表示。增强围岩体强度和加固支架提高承载能力是有限的，岩爆发生时往往造成地下空间围岩垮塌。在支护体中增设柔性缓冲材料，最大限度提高 E_2 值，可有效降低冲击能量，同时对围岩和钢结构体起到保护作用。也即 R-F-R 支护结构能量吸收须满足以下条件：

$$\begin{cases} E \leq E_1 + E_2 + E_3 \\ E_2 \gg E_1 + E_3 \end{cases} \quad (2.2)$$

刚-柔耦合吸能支护是指地下空间围岩-柔性缓冲材料-钢结构支护体系，其中耦合关系主要体现在：

(1) 柔性缓冲材料吸收大量应变能, 有效降低冲击载荷, 与围岩存在耦合作用;

(2) 柔性缓冲材料属于弱刚度材料, 起到有利的缓冲载荷作用, 与钢结构之间存在耦合作用;

(3) 柔性缓冲材料设置于地下空间, 围岩与钢结构之间形成 R-F-R 支护体, 与围岩和钢结构两者之间存在耦合关系。

2.3 R-F-R 结构应力波传播与转移特征

应力波在两种不同支护体中的耗散过程不同。无柔性吸能材料支护体中, 应力波首先在岩体中传播至围岩, 经过围岩 (图 2.4 中 AB 段) 时应力波有所削弱后直接作用在刚性支护体上。由于地下空间围岩和钢结构均为刚性体, 应力波作用在钢结构 (如图 2.4 中 B 点处) 后沿反射波返回, 同时应力波继续重复作用, 直至冲击能量全部耗散。此时, 应力波在岩体传播过程中消耗较小, 作用在刚性支护中的冲击力较大, 极易造成支护的破坏和垮塌。若采用 R-F-R 支护结构, 设置柔性吸能材料后, 应力波首先在岩体中传播, 传播中消耗部分能量后传至地下空间围岩体结构上 (如图 2.5 中 A 点处), 应力波首先在地下空间围岩体中传播 (如图 2.5 中 AB 段), 由于在地下空间围岩和钢结构之间设置了柔性材料, 应力波在 BC 段中大幅度削弱, 后作用于刚性支护。此过程中, 由于让位缓冲层的存在, 应力波能量消耗较大。剩余弱小应力波穿过柔性材料传至钢结构体, 此时, 应力波已经大幅度削弱, 再通过让位缓冲层 (如图 2.5 中 BC 段) 作用在钢结构上 (如图 2.5 中 C 点处) 后沿反射波返回。柔性吸能材料具有良好的缓冲和吸能特性, 因此穿过柔性材料层后的应力波较弱, 经过有限次的反射后能量基本耗散完毕, 同时也保护了地下空间结构和刚性支护体。

无柔性吸能材料保护层时, 应力波沿 AB 段传播, 此时冲击作用基本全部作用在刚性支护体上, 然后沿 BA 反射; 设置柔性材料让位缓冲层后, 应力波传播路径发生了改变, 首先沿 AB 段入射, 在地下空间围岩体中传播后在 BC 段削弱。由于柔性材料的存在, 此阶段反复作用, 应力波消耗较大。剩余弱应力波沿 BC 传播后作用在刚性支护体上, 然后沿 CB 段反射, 应力波传播路径为 $(AB+BC+CB+BA)$ 。刚性支护体及 R-F-R 支护体应力波传播示意分别如图 2.4 和图 2.5 所示。