

doi:10.13301/j.cnki.ct.2016.10.003

微波照射下岩石损伤的数值模拟研究*

戴 俊, 潘艳宾

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘 要:以黄铁矿和方解石组成的岩石颗粒为研究对象, 利用离散元方法建立简单二相矿物平面模型, 为更好地表现微波照射下微裂纹的萌生和发展规律, 模型采用平行黏结模型, 考虑了影响微波照射效果的主要因素: 功率密度、照射时长、矿物颗粒大小及形状, 分析了在微波照射下吸波矿物晶体边界破坏过程及破坏规律。

关键词:微波照射; 矿物颗粒; 功率密度; 离散元

中图分类号: TD313 文献标志码: A 文章编号: 1008-8725(2016)10-0005-03

Numerical Simulation Research of Rock Damage under Microwave Irradiation

DAI Jun, PAN Yan-bin

(School of Architectural and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The rock particles composed of pyrite are research objects, simple two-phase minerals plane model is established by using the UDEC (discrete element method). In order to explain the appearance and development of micro-cracks under microwave irradiation, bonded type is set parallel-boned in the model. The influence effect of microwave power density, irradiation time, mineral particle size and shape etc. are considered.

Key words: microwave irradiation; mineral particle; power density; discrete element

0 引言

微波技术在辅助机械破碎岩石方面发挥了强大的优势, 主要是利用岩石中不同矿物晶体与周边脉石具有不同的热膨胀系数而引起的热应力集中, 微波加热后使得矿物边界发生微破裂, 进而有助于岩石的破碎。本文基于 PFC^{2D} 离散元软件, 建立简单二相平面矿物模型, 对微波照射下岩石内部吸波矿物晶体边界微裂纹的萌生、发展规律进行分析研究, 并考虑到微波功率密度、微波照射时间、吸波矿物晶体含量、晶体大小及形状等因素, 探究微波照射下岩石

细观损伤演化基本规律。

1 计算模型

岩石中大多都含有多种不同的矿物成分, 对微波敏感的矿物散布于微波不敏感的矿物基质中, 在微波作用下, 微波敏感矿物作为“热点”吸收微波, 产生热量, 并通过热传导将热量传递其边界矿物, 由于不同矿物具有不同的微波吸收率和热膨胀系数, 从而产生热应力, 出现微裂纹, 造成热损伤。针对这类岩石结构, 可以建立简化的二相平面矿物模型, 选择对微波敏感的黄铁矿(FeS₂)和不吸波的方解石, 并将 2 种矿物的宏观力学参数汇总于表 1 中。

* 国家自然科学基金(51174159)

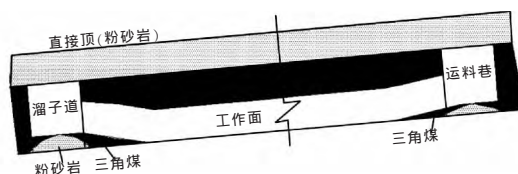


图 4 巷道卧至煤层直接底

5 结语

沿顶掘进摸底回采随采随卧的采煤工艺是综合考虑了巷道服务时间、支护成本、资源采出率等因素总结出来的一种解决巷道底鼓的方案, 虽然无法在根本上解决巷道底鼓问题, 但是据该矿的工程实践显示, 这种支护方案取得了良好的支护效果, 并且相对于摸底掘进提高了巷道稳定性和煤炭回收率, 因此不失为一种处理底鼓的新观点。

参考文献:

- [1] 王殿录, 梅甫定, 郑赤登. 大淑村矿东翼大巷变形机理与治理措施研究[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(3): 31-34.
- [2] 符斌让. 峰峰矿区大淑村矿水文地质条件探析[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(2): 32-33, 38.
- [3] 王卫军, 侯朝炯. 沿空巷道底鼓力学原理及控制技术的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 69-74.
- [4] 王树忠, 周保精. 高瓦斯松软厚煤层沿顶掘巷开采技术[J]. 能源技术与管理, 2008(5): 4-6.
- [5] 柏建彪, 李文峰, 王襄禹, 等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 1-5.

作者简介: 郝长胜(1963-), 内蒙古包头人, 教授, 硕士研究生导师, 现任内蒙古科技大学矿业与煤炭学院院长, 研究方向: 矿业系统工程、计算机应用技术, 电子信箱: HSH19890929@163.com.

责任编辑: 王秀丽 收稿日期: 2015-12-28

表1 矿物的宏观力学性质

矿物	密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	体积模量 k/GPa	剪切模量 G/GPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	抗拉强度 σ_t/MPa
方解石	2 712	73.3	32.0	83.8	0.31	12
黄铁矿	5 018	142.7	125.7	292	0.16	12

模型总尺寸设定为 20 mm×40 mm,颗粒半径在现有微波照射试验的材料颗粒范围内,模型中最小的颗粒半径设定为 0.1 mm,颗粒粒径比率(R_{\max}/R_{\min})设定为 1.66,该合成材料由 10%的吸波矿物黄铁矿和 90%的透波基质方解石组成,最终该黏结模型由 12 092 颗粒组成,根据 2 种矿物宏观力学特性,材料选取合适的细观参数如表 2、表 3 所示。

表2 二相模型细观参数

方解石			黄铁矿		
$\rho_{\text{ball}}=3\ 228.6\ \text{kg/m}^3$	$\bar{\lambda}=1$		$\rho_{\text{ball}}=5\ 969\ \text{kg/m}^3$	$\bar{\lambda}=1$	
$E_c=66\ \text{GPa}$	$\bar{E}_c=66\ \text{GPa}$		$E_c=230\ \text{GPa}$	$\bar{E}_c=230\ \text{GPa}$	
$R_{\min}=0.1\ \text{mm}$	$(\bar{k}_d/\bar{k}_s)=2.5$		$R_{\min}=0.1\ \text{mm}$	$(\bar{k}_d/\bar{k}_s)=2.5$	
$R_{\max}/R_{\min}=1.66$	$\bar{\sigma}_c=\bar{\tau}_c=(\text{mean}\pm\text{std.ev.})$		$R_{\max}/R_{\min}=1.66$	$\bar{\sigma}_c=\bar{\tau}_c=(\text{mean}\pm\text{std.ev.})$	
$(k_d/k_s=2.5)$	$=(49\pm10)\ \text{MPa}$		$(k_d/k_s=2.5)$	$=(49\pm10)\ \text{MPa}$	
$\mu=0.5$			$\mu=0.5$		

注: ρ_{ball} 颗粒密度, E_c 颗粒-颗粒接触模量, k_d/k_s 颗粒刚度比, $\bar{\lambda}$ 平行黏结半径乘子, \bar{E}_c 平行黏结弹性模量, \bar{k}_d/\bar{k}_s 平行黏结刚度比, μ 颗粒摩擦系数, $\bar{\sigma}_c$ 平行黏结法向强度均值, $\bar{\tau}_c$ 平行黏结切向强度均值, R_{\max} 、 R_{\min} 颗粒最大、最小半径。

黄铁矿和方解石不同温度下的参数如表 3~表 5 所示。

表3 矿物比热容 $J/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$

矿物类型	温度/ $^\circ\text{C}$		
	25	227	727
方解石	819	1 051	1 238
黄铁矿	517	600	684

表4 矿物热传导系数 $W/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

矿物类型	温度/ $^\circ\text{C}$		
	0	100	227
方解石	4.02	3.01	2.55
黄铁矿	37.90	20.50	17.00

表5 矿物的热膨胀系数 $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$

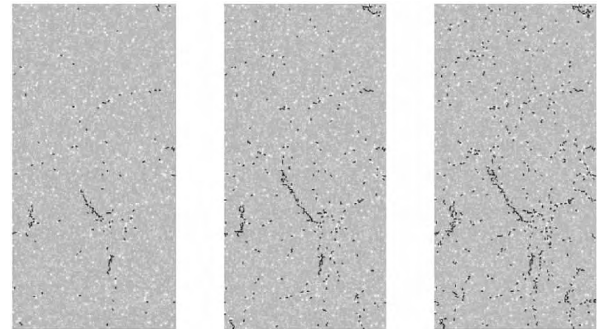
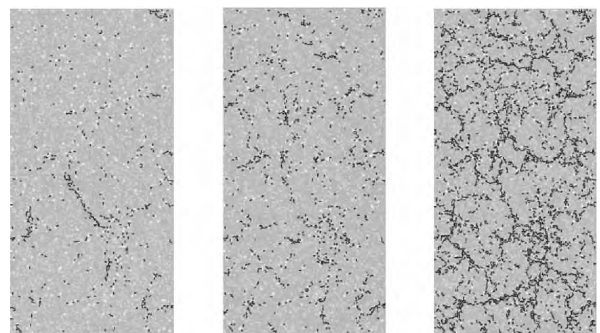
矿物类型	温度/ $^\circ\text{C}$			
	100	200	400	600
方解石	1.31	1.58	2.01	2.40
黄铁矿	2.73	2.93	3.39	—

2 计算结果及分析

2.1 照射参数对照射效果的影响

对黄铁矿-方解石二相矿物模型进行微波照射,照射功率密度分别采用 $P_d=1\times 10^9\ \text{W/m}^3$ 和 $P_d=1\times 10^{11}\ \text{W/m}^3$,由于 2 种矿物不同微波吸收率和热膨胀系数,微波加热过程中,材料内部产生不均匀热应力(热失配应力),模型定义当热应力超过颗粒间平行黏结法向强度或切向强度时,即产生微裂纹,造成岩石损伤。

由图 1 和图 2 可以看出,在一定微波功率密度条件下,较短的照射时间产生少量的微裂纹,微裂纹首先出现在 2 种矿物的交界处,此处的热应力首先超过颗粒间平行黏结强度,并且随着微波照射时间的增加,微裂纹数量逐渐增加,但是在特定功率密度作用下,照射时间的改变只有在一定范围内对微波照射效果影响较大,超出这个范围,微波照射效果改善不明显,可根据所选功率密度选择最优的微波照射时间,有利于能量的节约。

图1 不同照射时间下裂纹发展情况($P_d=1\times 10^9\ \text{W/m}^3$)图2 不同照射时间下裂纹发展情况($P_d=1\times 10^{11}\ \text{W/m}^3$)

对比分析图 1、图 2 可以看出,在较高功率密度 $P_d=1\times 10^{11}\ \text{W/m}^3$ 作用下,在较短照射时间(0.5 ms)内,颗粒间迅速发生破裂,开始出现微裂纹,相同的能量输出条件下,改变微波功率密度能更有效地改善微波照射效果。

2.2 矿物晶体颗粒大小、形状对照射效果的影响

从图 3、图 4 中 2 种颗粒形状微裂纹的发展情况可以看出,微波作用下,材料内部主要发生法向破坏,破坏主要发生在矿物晶体边界黏结薄弱处,微波照射下,矿物晶体边界形成放射状裂纹,并逐渐沿放射线发展、贯通,对比分析 2 种晶体形状下裂纹的发展情况可以看出,在矿物晶体“尖端”部分最初产生微裂纹,是因为“尖端”处,材料温度差越大,热应力越大,首先达到颗粒接触黏结的强度。结果表明颗粒形状越不规则,表面曲率变化越快,越容易形成热应力集中,产生微裂纹所需吸收能量越小。

doi:10.13301/j.cnki.ct.2016.10.004

基于FLAC^{3D}的巷道挑顶地段巷道加固研究

王文才¹, 梁博帅¹, 穆殿瑞², 张培¹

(1. 内蒙古科技大学 矿业研究院, 内蒙古 包头 014010; 2. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 以西山煤电集团西曲矿北三下组煤集中运煤巷的掘进为工程背景, 运用FLAC^{3D}进行数值模拟, 计算分析巷道在挑顶不同阶段巷道围岩的应力分布和塑性变形情况, 从而提出巷道挑顶地段巷道支护的加固方案。

关键词: 数值模拟; 塑性变形; 巷道加固

中图分类号: TD32 文献标志码: A 文章编号: 1008-8725(2016)10-0007-03

Research on Roadway Reinforcement of Ripping Part Based on FLAC^{3D}

WANG Wen-cai¹, LIANG Bo-shuai¹, MU Dian-rui², ZHANG Pei¹

(1. School of Mining, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Taking the tunneling of concentrated coal roadway in north No3 mining area of Xiqu coal mine of Xishan coal electricity group as the background, using FLAC^{3D} numerical simulation to calculate and analyse the stress distribution and plastic deformation of surrounding rock of the roadway at the different stages during the ripping, and then puts forward the roadway reinforcement scheme of the roof ripping part.

Key words: numerical simulation; plastic deformation; roadway reinforcement

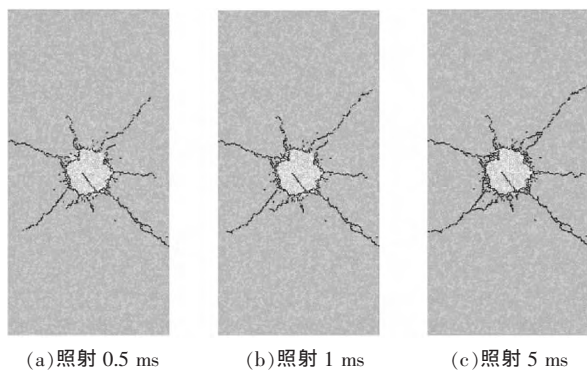


图3 圆形矿物颗粒裂纹发展情况($P_d=1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$)

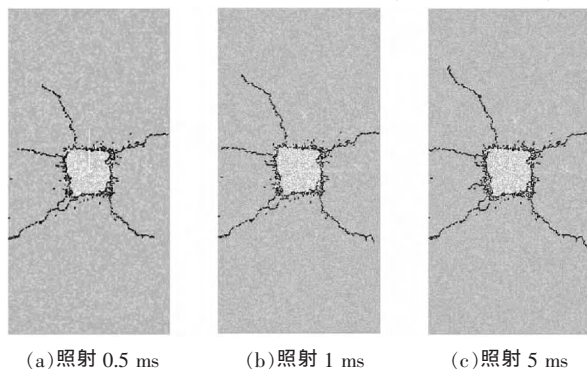


图4 方形矿物颗粒裂纹发展情况($P_d=1 \times 10^{11} \text{ W/m}^3$)

3 结语

本文以黄铁矿和方解石组成的矿石为研究对象, 建立简化二相平面模型, 研究吸波矿物的“热点”效应, 分析了微波照射参数、矿物晶体大小和形状对微波解离矿物效果的影响, 得出以下结论:

(1) 对微波照射效果以及微裂纹类型影响最大

的因素是微波功率密度, 增大微波功率密度能更有效地加大岩石材料的损伤程度。

(2) 在特定的微波功率密度条件下, 照射时间只在一个很小的范围内对岩石材料损伤有较大的影响, 针对一定功率密度, 可以优化微波照射时间, 节约能量输出。

(3) 吸波矿物晶体在微波作用下形成“热点”, 产生热应力, 该吸波矿物颗粒尺寸越大, 在相同微波照射条件下, 材料微裂纹出现和发展越快, 岩石损伤程度越大。

(4) 在微波作用下, 吸波矿物晶体“尖端”部位易形成热应力集中, 该部位最先出现微裂纹, 即矿物晶体形状越不规则, 其边界产生微裂纹所需能量阈值越低。

参考文献:

- [1] 段碧林, 曾令可, 刘平安, 等. 微波辅助加热技术的应用及现状[J]. 陶瓷, 2005(12):11-15.
- [2] 崔礼生, 韩跃新. 微波技术在选矿中的应用[J]. 金属矿山, 2006(4):29-32.
- [3] 李文成, 杜雪鹏. 微波辅助破岩新技术在非煤矿矿的应用[J]. 铜业工程, 2010(4):1-4.
- [4] 张强. 岩石破碎技术发展趋势[J]. 有色矿山, 1996(6):20-22.
- [5] 戴俊, 秦立科. 微波照射下岩石损伤微观模拟分析[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(6):652-655.
- [6] 戴俊, 孟振, 吴丙权. 微波照射对岩石强度的影响研究[J]. 有色金属:选矿部分, 2014(3):54-57.

作者简介: 戴俊(1964-), 贵州安顺人, 教授、博士, 主要研究方向: 岩石破碎、爆破工程, 电子信箱: 1060968244@qq.com.

责任编辑: 王秀丽 收稿日期: 2016-01-05