

岩石切削机理模型分析及实验研究

何录忠^{1,2}, 周 琴^{1,2}, 李斌斌^{1,2}, 杜焱森³

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)国土资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:切削机理模型是研究岩石钻进切削过程中的切削力以及切削热的基础。在分析岩石切削机理模型的基础上, 基于摩尔理论和裂纹扩展理论, 分析中硬岩石切削状态, 认为在中硬岩石切削过程中岩石存在着脆性切削和延展性切削 2 种方式, 在此基础上得到新的中硬岩石切削机理模型。以砂岩、大理岩和花岗岩为钻进对象, 开展微钻实验研究。结果表明: 切削过程为岩石在刀具的扭矩和推进力作用下发生破坏, 导致小岩屑、大切屑不断循环产生的过程, 小大切屑形成主要源于岩石挤压变形和裂纹生成扩展。实验结果与岩石切削机理表现出较好的一致性。

关键词: 岩石切削; 切削机理模型; 切屑; 实验研究

中图分类号: TE21; P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2014)09-0085-04

Analysis on Rock Cutting Mechanism Model and the Experimental Study/HE Lu-zhong^{1,2}, ZHOU Qin^{1,2}, LI Bin-bin^{1,2}, DU Yao-sen³ (1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory on Deep Geodrilling Technology of Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Cutting mechanism model is the foundation of analysis on rock drilling cutting force and cutting heat. The article reveals a new mechanism in medium hardness rock cutting model which based on a molar theory and the theory of crack propagation. The brittleness and ductility cutting exist in medium hardness rock cutting process. Take sandstone, marble and granite for drilling targets, micro-drilling experiments study is carried out. The results show that the rock cutting process means the rock damage taking place under the cutter torque and pushing force and resulting in small debris and large cuttings generated during continuous drilling cycle. Cuttings formation is mainly due to the extrusion deformation and crack generation expansion of rock. The experimental results and the rock cutting mechanism model display good consistency.

Key words: rock cutting; cutting mechanism model; cuttings; experimental study

1 概述

近几十年来,就岩石切削加工机理进行了不少研究,提出了若干岩石切削机理模型。1958年, I. Evans^[1]通过对煤岩的切削实验研究,首次提出了如图 1 所示的切削机理模型。他认为当应力超过材料压缩强度时,刀具压入,拉应力作用下产生圆弧形龟裂,切屑以裂纹线末端为中心回转断裂。Y. Nishimatsu(西松裕)^[2]对煤岩、砂岩、水泥切削过程的研究,提出了如图 2 所示的切削机理模型。该模型认为刀尖压入后刀尖周边的材料被压碎,刀尖再压入则是由剪应力作用向自由表面产生断裂裂纹扩展,随后残存材料凸出部分被刀具再次压碎,刀具通过切削区域并再次压入。D. V. Swenson 等^[3]采用高速摄影方法拍摄了 PDC 切削花岗岩、大理岩的过程,认为刀具与不平的岩石面接触时产生速度极快的粉屑;当刀具与岩石接触到一定程度时产生大块

切屑。其提出的切削机理模型如图 3 所示。藤霖^[4]通过对中硬岩切削过程研究,观察到了岩石核前面的微裂纹区,得出切削机理模型如图 4 所示。他认为当切削深度小于或等于刀尖圆弧半径时,切削过程为碾压作用机理;当切削深度大于刀尖圆弧半径时的切削过程为切削作用机理,刀尖切入产生压实核,压实核代替刀尖切削,沿切削合力方向及水平方向各产生一条裂纹,切削合力方向产生的裂纹扩展至一定长度后便停止扩展,水平裂纹扩展至一定长度后在剪切力的作用下扩展至自由表面。1988 年大连理工大学胡忠举^[4]通过对大理岩、辉绿岩等中硬岩的切削研究得出如图 5 的中硬岩石切削机理模型。他在模型中体现了刀具切削岩石中产生微裂纹最后发生到断裂裂纹的路径,并在切屑的产生过程伴随着压实核的出现,总结出岩石切削过程是切屑不断形成的循环过程。

收稿日期:2014-06-30

基金项目:月球钻探取样项目“单齿碎岩机理研究”(53200959613)

作者简介:何录忠(1989-),男(汉族),湖南郴州人,中国地质大学(北京)硕士研究生,机械工程专业,主要从事钻探机械设计与研究,北京市海淀区学院路 29 号, heluzhong@126.com。

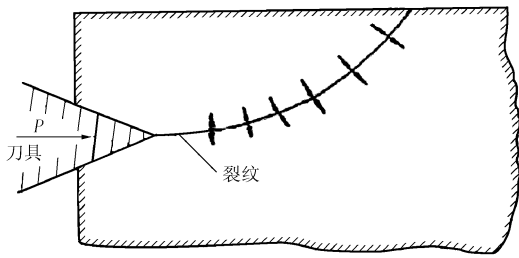


图1 I. Evans 切削机理模型

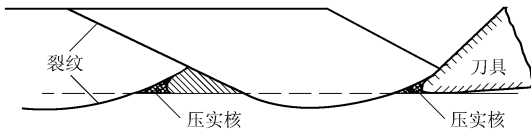


图2 西松裕切削机理模型

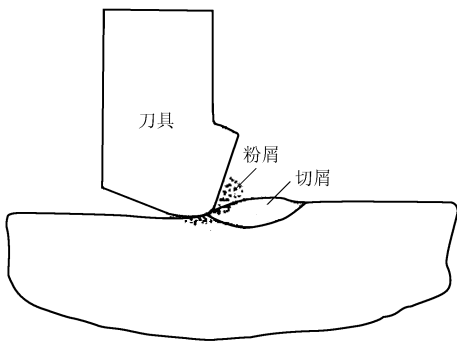


图3 D. V. Swenson 切削机理模型

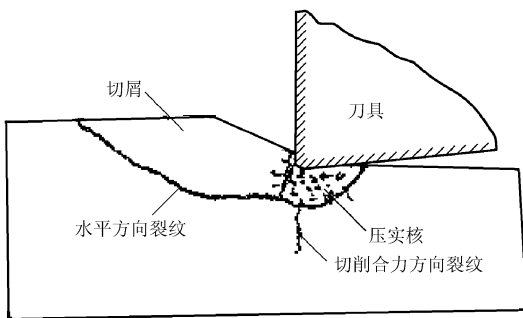


图4 藤霖切削机理模型

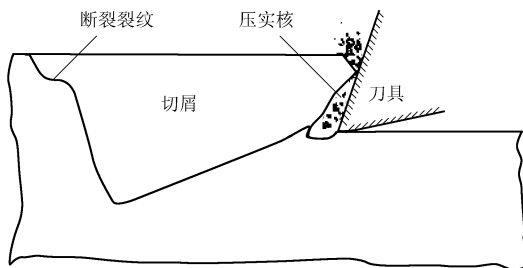


图5 胡忠举中硬岩切削机理模型

钻进切削过程切屑形成前的剪切压缩变形、断裂裂纹破碎的真实情况,提出了新的岩石钻进切削机理模型,并通过半孔微钻实验法对砂岩、大理岩、花岗岩进行实验,验证了岩石钻进切削机理的正确性。

2 岩石切削机理

由于岩石的本身的各向异性,非均质性,以及岩石本身的一些复杂的性质,岩石切削比普通的切削过程要复杂得多。在切削加工过程中,脆性材料的切削方式被分为2类:(1)延展性切削方式,由于材料的塑性变形,最后形成切屑;(2)脆性切削方式,由于断裂裂纹最后形成断裂面。在岩石切削过程中,也包括这2种方式。软岩切削过程切屑的形成主要是材料的塑性变形所致;硬岩切削过程主要是在断裂裂纹的作用下形成切屑。因此,中硬岩石切削时,在切屑形成过程中这2种方式均存在。

目前的岩石切削机理模型中,对于中硬岩的切削都只是考虑了脆性切削方式没有涉及到延展性切削,并且缺少相应的钻进切削实验的研究。文章以胡忠举提出的切削机理模型为基础综合考虑了切屑形成中的岩石挤压和延展滑移变形的影响,得出如图6所示的中硬岩切削机理模型:切削开始时,随着刀具的切入,在刀尖附近局部区域内形成大量的微裂纹产生细岩屑;在该区域另一部分材料因微裂纹的扩展发生破碎并被压实;刀具前端岩石内开始发生剪切挤压变形。刀具继续切入时,细岩屑进一步产生,岩石材料破碎压实也不断进行,直到达到一定程度形成压实核,剪切挤压变形也越来越大,岩石内部发生滑移变形,从OC面开始向OA面挤压变形。刀具进一步切入,压实核随刀具一起作用于加工材料,刀具与岩石达到全高接触,刀尖附近的微裂纹扩展形成在其附近内的一条断裂裂纹和剪切作用共同形成大切屑,压实核也将被破坏,或随切屑一起排出或掉入切削形成的凹坑中。当刀具继续前进时,在刀刃尖端再一次不断发生小体积剪切,崩落出小体积的细岩屑,经过不断地小体积岩屑产生后,刀具刃前与岩石接触的面积逐渐增大,直至又达到

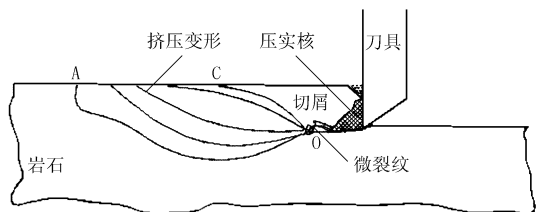


图6 岩石切削机理模型

虽然已经有不少学者在岩石切削机理上取得若干成果,但以上的各种岩石切削机理都未考虑岩石的延展性切削变形的影响,而且缺少钻进实验的研究。本文综合分析现有的切削机理模型,结合岩石

全高接触时,然后又发生一次大切屑。在中硬岩的整个旋转钻进切削过程中,岩石既发生着脆性切削又发生着延展性切削,两种方式的相互作用下致使岩石切削过程为小大切屑不断形成流出的循环过程。

综上所述,如图 7 所示,中硬岩切削过程实质可以归纳为:小岩屑大切屑不断交替产生的循环过程。

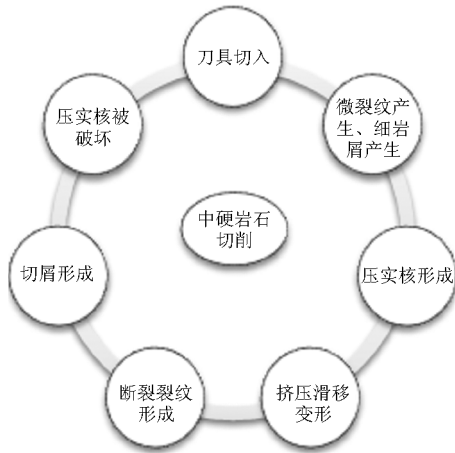


图 7 中硬岩石切削过程图示

3 岩石切削实验研究

3.1 实验条件

为验证钻进切削机理模型的正确性,设计了室内岩石半孔微钻实验。本研究采用的微钻实验台如图 8 所示,由三相异步电机提供旋转切削动力,液压回路提供钻进推力;实验台配备了压力传感器和扭矩传感器,以及数据采集系统,可以进行数据在线采集。实验钻头为八角硬质合金取心钻头 YG8,钻头外径 37.40 mm,内径为 16.30 mm。实验对象使用的是细粒砂岩、大理岩和花岗岩,通过实验测量其岩石力学性质可以得知其密度,抗压强度如表 1 所示。



图 8 微钻实验台

表 1 岩石力学性质

岩石类型	密度/(g·cm ⁻³)	抗压强度/MPa
细粒砂岩	2.567	39.75
大理岩	2.921	89.38
花岗岩	2.699	138.6

3.2 实验方法和步骤

如果钻头直接在岩石内部进行钻进切削,岩石切削过程的切屑状态将不能被观察,切屑也不能被得到及时收集。因此本研究设计了半孔钻进实验,在岩石的侧边缘钻孔,钻孔的半径为钻头的 2/3,这样在岩石钻进过程中就能清楚地观察到钻进切削的过程,切屑形成后也能及时地流出并被收集,具体的钻进切削位置如图 9 所示。实验前,首先把实验岩石钻进孔位和钻头的位置找准,再固定岩石,实验采用恒压、恒转速钻进,钻压为 800 N,转速为 100 r/min;钻进过程中用硬纸盒子来收集切屑,数据采集系统在线采集扭矩等数据。



图 9 钻进半孔图

3.3 实验结果与分析

对实验过程收集到的岩石切屑观测分析,及采集到的实时扭矩数据进行处理分析。

图 10 为实验过程得到的 3 种岩石的切屑图。从切屑图中可以很直观的看到 3 种岩石切削过程中有着共同的规律,均出现大量的细岩屑和大切屑,还有大量的岩粉,岩粉的出现是由于岩石钻进过程切屑在钻头作用下形成后没有得到及时排除受到钻头钻杆的再次磨损从而形成大量的岩粉。岩屑照片从直观上直接证实中硬岩切削过程为小大切屑不断形成流出的循环过程机理的正确性。

图 11 分别为实验钻进过程砂岩、大理岩和花岗岩扭矩数据图。从图中不难看出,3 种岩石在钻进实验中的扭矩数据也有着相同的规律,即在钻进

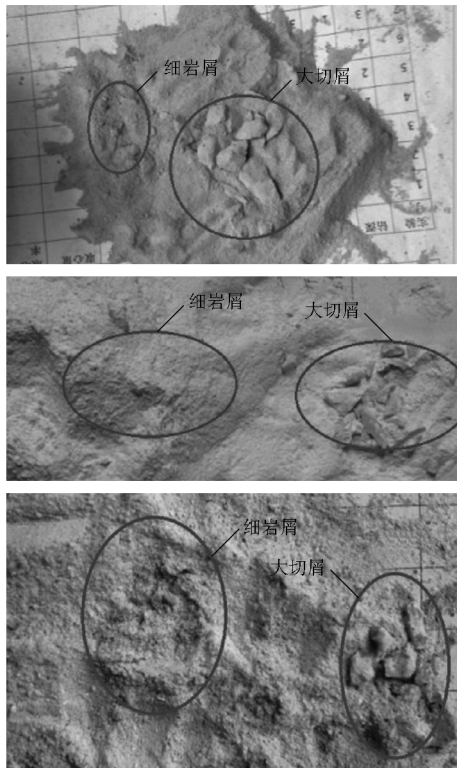


图10 实验岩石切屑图

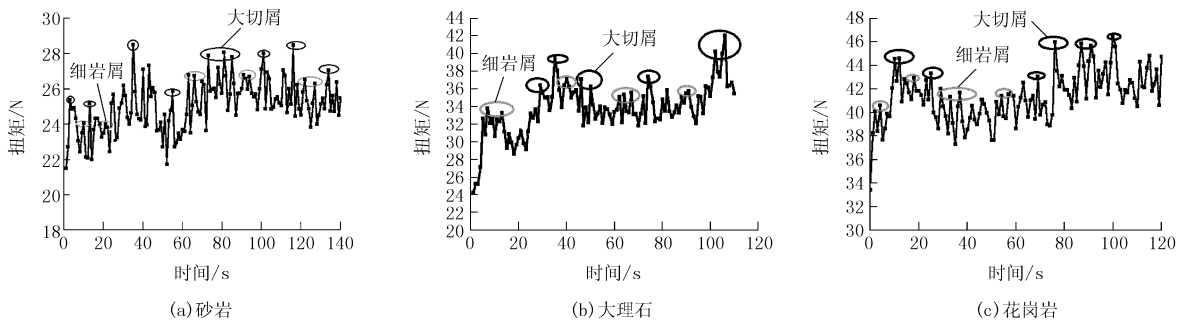


图11 岩石钻进实验扭矩图

过程中的扭矩图均呈现出不断循环上下波动规律,规律呈现出数次小波动后的一次大波动的规律。岩石在钻进切削时,随着岩屑的产生脱落,切削力会呈现着上下震动变化规律,实验扭矩数据的规律是岩石钻进切削力的间接体现。这种扭矩变化规律现象正好是岩石切削机理的一个间接体现,而力的变化正好是切削过程小大切屑产生的表现,正好与中硬岩切削在延展性和脆性切削共同作用形成对应,延展性切削时切削力会出现小波动,而脆性断裂时切削力突然增大形成大切屑。这就证实了中硬岩石钻进过程是在延展性切削和脆性切削共同作用下不断产生小大切屑的循环过程。

4 结论

(1) 岩石钻进切削是一个多因素的复杂过程,其切削机理模型的研究是研究岩石钻进切削过程中的切削力以及切削热的基础。

(2) 本文就中硬岩钻进切削过程提出新的切削机理模型,模型表明岩石钻进过程在脆性切削和延展性切削共同作用下进行,切削机理为小大切屑不断循环产生的过程。

(3) 设计半孔钻进实验,该实验方法可以为岩石钻进实验研究提供新的思路。实验从切屑形态上直接验证了机理模型的正确性;通过分析实验过程中的扭矩数据,从扭矩图中间接地证实了中硬岩切削机理的合理性。

参考文献:

- [1] Evans I. The force required to cut coal with blunt wedges[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 1-12.
- [2] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting[J]. International

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972, 9(2): 261-270.

- [3] Swenson D V, Wesenberg D L, Jones A K. Analytical and experimental investigations of rock cutting using polycrystalline diamond compact drag cutters[Z]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1981.
- [4] 胡忠举. 岩石切削机理研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 1988.
- [5] 王成勇, 刘培德, 胡荣生. 花岗岩切削破碎过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(2): 185-196.
- [6] 张祖培, 刘宝昌. 碎岩工程学[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [7] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.