

岩石宏观裂纹分叉的加载率效应*

张宗贤 俞洁

北京科技大学矿业研究所, 北京 100083

摘要 利用扫描电镜和光学显微镜, 对静态和冲击(应力波)加载条件下断裂的辉长岩试件进行了剖面观察与分析. 结果发现, 静态加载时断裂面的剖面上几乎看不到宏观裂纹分叉现象; 但在动态加载时, 普遍发现剖面上有宏观裂纹分叉现象. 随着加载率提高, 分叉裂纹数量及其总长度也随之增加. 基于以上实验结果, 初步讨论了岩石动态断裂机理.

关键词 辉长岩, 冲击断裂, 岩石破坏机理, 岩石+裂纹, 动态+断裂 / 动态断裂

中图分类号 TD313.3, TD315.1

Effect of Loading Rates on Macro-Crack Bifurcation of Rock*

Zhang Zongxian Yu Jie

Mining Research Institute, USTB, Beijing 100083, PRC

ABSTRACT The longitudinal sections of the fractured surfaces of the gabbro specimens failed by static or dynamic load are observed and analysed with SEM and optical microscope. The results show that macro-crack bifurcation is hardly found on any section for static loading, but obvious macro-crack bifurcations are found for dynamic loading. And it shows that the number and the total length of the bifurcation cracks for a specimen increase with (dynamic) loading rates. Based on the experimental results, finally, the dynamic fracture mechanism of rock is discussed.

KEY WORDS gabbro, impact fracture, failure mechanism of rock, crack + fracture, kinetic state + fracture / dynamic fracture

研究表明^[1], 裂纹分叉是材料受载过程中常见的1种非稳定现象, 岩石类脆性材料更易发生分叉现象; 裂纹分叉与断口形态和断裂表面的粗糙度紧密相关, 裂纹分叉明显增大材料断口的不规则性. Smith^[2]从理论上研究了宏观裂纹分叉的非规则性对脆性材料断裂韧度的影响, 结果发现分叉使断裂韧度值增加. 谢和平等^[1]应用分形几何建立了裂纹分叉的分形模型, 从几何角度研究了裂纹分叉使断裂韧度提高的物理力学现象. Smith和谢和平等研究的结果都表明, 宏观裂纹分叉使断裂韧度提高.

在工程实际中, 岩石材料往往是在不同加载率特别是在较高加载率下破裂的. 因

1994-01-25 收稿 第一作者 男 35岁 副教授

* 中国和奥地利国际合作项目; 国家科委资助项目

此, 在了解裂纹分叉与断裂韧度关系的基础上进一步探讨裂纹分叉与加载率的关系, 对于仅仅通过断裂破坏后岩石材料或结构物的裂纹分叉现象的考察来了解岩石或结构物的受力条件及破坏原因, 特别是对于探讨岩石动态断裂机理, 以便提高工程中岩石破碎的效率和效益, 都有积极意义。

1 不同加载率条件下岩石的宏观裂纹分叉

为了考察宏观裂纹分叉与加载率的关系, 选用经过静态和动态加载 (加载率 $\dot{K} = 10^{-1} \sim 10^6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$) 断裂后的辉长岩短圆柱棒试件作为研究对象。静态断裂和动态断裂试验分别是在 MTS 810 材料试验机和霍普金森冲击试验装置上进行的, 见文献[3]。

首先, 将断裂后的岩石试件沿垂直于断裂面 (断口) 的平面切开, 见图 1 所示, 然后对切开的剖面进行磨平和抛光。为了防止断裂面及其附近的岩石材料在试件加工过程受到损伤而引起断裂面形貌变化, 在试件切开之前先用 914 胶在断裂面上粘一块胶木板以保护断裂面。试件加工好后, 在扫描电镜和光学显微镜上观察剖面上的宏观裂纹分叉情况, 并对宏观裂纹的数量和长度进行了近似测量 (测量范围为整个试件的剖面)。实验观察结果普遍发现, 静态断裂的辉长岩试件剖面上基本上看不到大于 1 ~ 2 mm 长的宏观裂纹分叉现象 (如图 2 a), 但动态断裂的辉长岩试件剖面上都发现有大的宏观裂

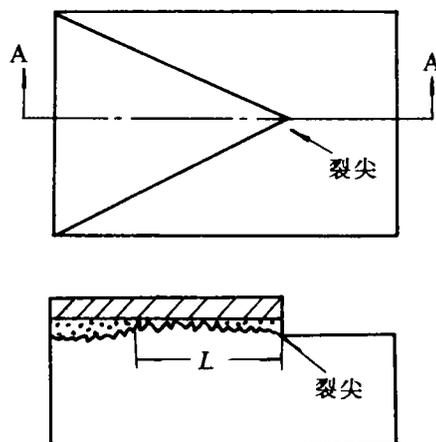


图 1 岩石短棒试件及其剖面

纹分叉 (如图 2 b-图 2 d)。而且在动态断裂的情况下, 对于大多数试件而言, 加载率越高, 分叉裂纹的数量和总长度都随之增加, 见表 1。此外还发现, 动态断裂的试件的裂纹尖端附近基本上都有分叉裂纹出现, 并且其与断裂面的夹角较大, 见图 2 所示。

表 1 宏观裂纹分叉的数量与总长度

试件号	加载率 / $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$	断裂韧度 / $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	宏观裂纹分叉数量	分叉裂纹总长度 / mm
C04	1.66×10^0	3.33	0	0
No.12	1.88×10^5	7.90	1	2.0
No.07	2.17×10^5	11.29	1	7.5
No.23	1.06×10^6	24.41	2	11.5
No.24	8.61×10^5	23.23	3	13.9
No.35	1.25×10^6	32.64	3	18.9

在光学显微镜下观察到与图 2 类似的情况, 并且对断裂面附近的宏观裂纹和微观裂纹所占面积进行了测量, 发现单位测量面积内两种裂纹所占面积的百分比随加载率增加

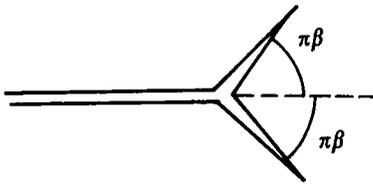


图3 裂纹分叉模型

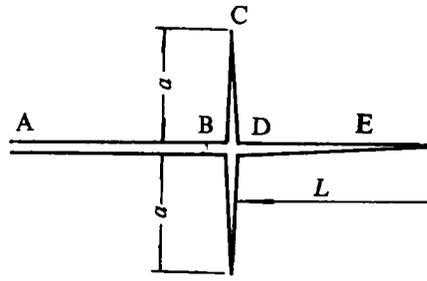


图4 裂纹分叉模型

对于图4的裂纹分叉模型亦有类似结果，即 K_C 和 K_E 均小于 K_A 。如果欲使分叉裂纹在 C、E 处分别或一起扩展，必须附加它们在其裂尖处的应力强度。即类似地，分叉使断裂韧度增大了。

由图2可见，岩石断裂时的裂纹分叉形式很接近于图3和图4的分叉模型。因此，式(1)、(2)适用于岩石断裂时的分叉现象。

根据以上分析知，裂纹分叉使得岩石断裂韧度增加，而裂纹分叉是岩石受高速加载（应力波加载）时的普遍表现。因此，与没有产生裂纹分叉现象的情况相比，裂纹分叉的出现既增大了岩石的断裂韧度，又反映了岩石断裂时所经受的加载率较高。这与实验观察结果一致。

3 岩石动态断裂机理分析

与静态断裂相比，在动态（冲击）加载时由于加载速率高，主裂纹尖端附近应力集中速度快，且由于岩石传热导热能力差，因此，在裂尖附近很快形成一个绝热区。该区内应力、能量高度集中，从而使其中一些原始缺陷（微裂纹等）激活并演化、扩展，随着载荷的继续增加，少数微裂纹合并成宏观裂纹（分叉）。加载率越高，这种现象越严重，因而裂纹分叉越明显。裂纹分叉要消耗能量。由于分叉使主裂纹尖端的应力和能量集中程度降低，因此主裂纹扩展难度增加，即断裂韧度提高。

4 结论

宏观裂纹分叉是动态断裂的典型特征。即在动态断裂时普遍存在宏观裂纹的分叉现象，而在静态断裂时几乎看不到这种现象。同时还发现，加载率越高，宏观裂纹分叉的数量及其度长度也随之增大。

致谢：本工作属于中国奥地利国际合作研究项目 A17，受国家科委与冶金部科技司资助。有关实验是在北京科技大学新金属材料国家重点实验室完成的。

参 考 文 献

- 1 谢和平，陈至达．岩石类材料裂纹分叉非规则性几何的分形效应．力学学报，1989，21(5): 613～618

(下转 142 页)

硬度大大提高. 这一点可从 X 射线衍射分析结果看出. ② 基质中的 MoS_2 形成转移膜, 避免基质与对偶件直接接触. 各种镀层的摩擦系数如图 6 所示.

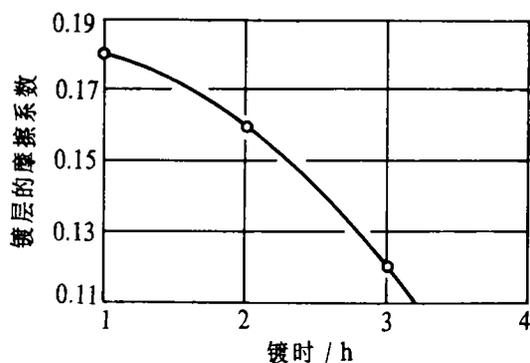


图5 镀层的摩擦系数与镀时的关系

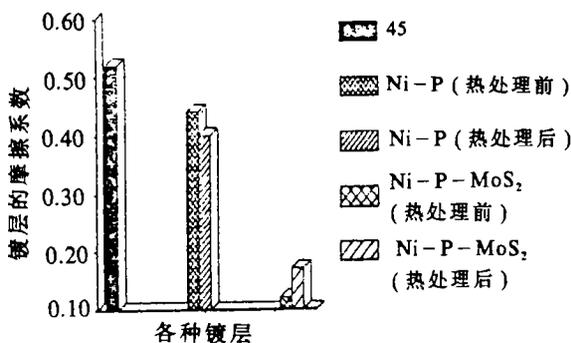


图6 各种镀层的摩擦系数

3 结论

(1) Ni-P-MoS₂ 复合镀层具有优异的减摩性及很高的抗胶合能力. 对于 45 号钢, 摩擦系数由平均 0.5 降到 0.1, 抗胶合载荷由原来的 196 N 提高到 1 764 N, 相应的摩擦时间由原来的 3 min 提高到 7 min.

(2) 经过热处理的 Ni-P-MoS₂ 镀层, 其摩擦系数略有增加, 提高到 0.14, 但其抗胶合载荷提高到 1 960 N, 相应的摩擦时间为 19 min, 比 45 号钢分别提高了 10 倍和 6.3 倍.

(3) MoS₂ 颗粒的浓度及镀时对镀层的减摩性有很大影响, 摩擦系数随浓度及镀时的增加而下降.

(4) 表面活性剂对镀层质量有很大影响, 以采用阳离子型表面活性剂最为理想.

参 考 文 献

- 1 Vest C E, Bazzarre D F. Co-Deposited Nickel-Molybdenum Disulfide. Metal Finishing, 1967, 65(11): 52 ~ 58
- 2 表面处理工艺手册编委会. 表面处理工艺手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1991. 144 ~ 154

(上接 115 页)

- 2 Smith E. The Effect of Crack Font Irregularity on the Fracture Toughness of Brittle Materials. Arch Mech, 1986, 38(1 ~ 2): 185 ~ 190
- 3 Zhang Zongxian, Yu Yong, Zhao Qing. Influences of Loading Rates on the Fracture Toughness of Rock. In: Rossmanith H P eds. Fracture and Damage of Concrete and Rock. London: Chapman & Hall, 1993. 418 ~ 425