

岩石动静态断裂面的微观特征^①

张宗贤 俞洁

(北京科技大学矿业研究所, 北京 100083)

摘 要 借助于扫描电镜和光学显微镜, 对经过静态与动态断裂试验后的辉长岩短棒试件进行了断裂面(断面)及其垂直剖面的观察与分析。结果发现: 静态断裂面与动态断裂面粗糙程度不同, 前者比后者平滑, 且前者的分维数也小于后者; 动态断裂面附近普遍存在宏观裂纹分叉现象, 而静态断裂情况下则基本没有分叉; 动态断裂面的垂直剖面上的损伤程度明显大于静态的, 且这种损伤程度随加载率增加而增加。根据以上实验考察, 最后讨论了岩石的动静态断裂机理。

关键词 岩石断裂 微观特征 断裂面 动态加载

利用扫描电镜等先进手段考察金属的断裂面(断口), 以便了解其力学性能和破坏机理, 进而研制出更好的新材料, 这是材料科学的一条重要途径。岩石材料与金属有相似的一面, 岩石的宏观破坏必然与其微观结构以及载荷等条件有内在联系。因此, 通过岩石断裂面微观特征的考察, 以了解其力学性质及破坏机理, 是一条必不可少的手段。近年来, 已有不少研究者考察过岩石断裂面的微观特征, 如文献[1—3]。但是, 以往的研究主要集中在断裂面上, 而很少考察断裂面的剖面上的微观特征, 这对于全面了解岩石断裂面的微观特征和断裂机理, 是一个必须逾越的障碍。基于这一点, 本文除了考察辉长岩短棒试件(动静态断裂韧度试验结果见[2])断裂面微观特点外, 着重考察了其断裂面的垂直剖面上损伤特征, 并结合相应的定量考察, 讨论了岩石断裂机理。

1 断裂面的微观特征

对于静态与动态(冲击)断裂试验后的辉长岩短棒试件, 我们进行了断口扫描观察, 结果表明, 静态断口普遍比动态断口平滑, 直观上看静态断口上沿晶断裂比动态多, 且沿晶断裂

面积也大一些, 如图1所示。动态断口则以穿晶断裂为多, 因而断口较为粗糙。在静态与动态断口上都存在沿晶—穿晶耦合断裂形式。此外, 我们还注意到, 在距离主裂纹尖端附近的断口上, 静态断口往往多表现为沿晶断裂或沿晶—穿晶耦合断裂, 而动态断口的相同位置则以穿晶断裂为主。通过对该批试件断裂面分维数的测算, 发现动态断裂面分维数均大于静态的, 且随加载率增加而增大(图1注中 D_F 为分维数)^[4]。这与实验观察吻合。

2 裂纹分叉特征

将不同加载率下断裂的辉长岩试件沿垂直于断裂面的平面切开磨平, 然后在扫描电镜的低放大倍数下观察。结果发现: 静态断裂的试件剖面上几乎看不到长度大于2 mm的宏观分叉裂纹, 但在动态试件的剖面上却普遍发现存在1条或更多的分叉裂纹。通过测量还发现, 加载率越高, 宏观分叉裂纹的总长度越大。图2是两个试件的剖面扫描照片。其中C04是静态断裂试件, 无宏观分叉裂纹。No. 35是动态断裂试件, 总共有3条分叉裂纹, 其总长度为18.9 mm。

^① 国家科委中奥国际合作项目A17及冶金部教育司基础理论项目 收稿日期: 1994—09—14; 修回日期: 1995—07—30

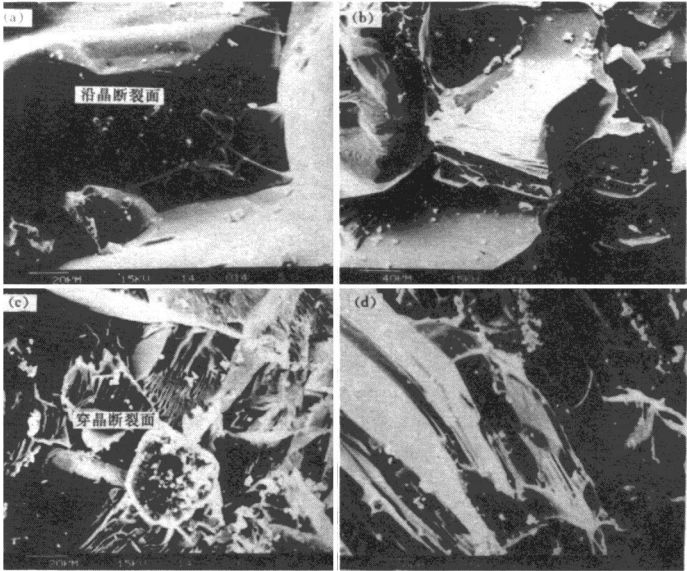


图 1 辉长岩静态与动态断口的扫描电镜照片

(a)、(b)—静态断裂试件 C01($K_{IC} = 3.425 \text{ MPa m}^{1/2}$, $D_F = 1.030$);
(c)、(d)—动态断裂试件 No. 35($K_{ID} = 32.642 \text{ MPa m}^{1/2}$, $D_F = 1.068$);
(a)、(c)—主裂纹尖端附近处的照片; (b)、(d)—距主裂纹尖端远处的照片

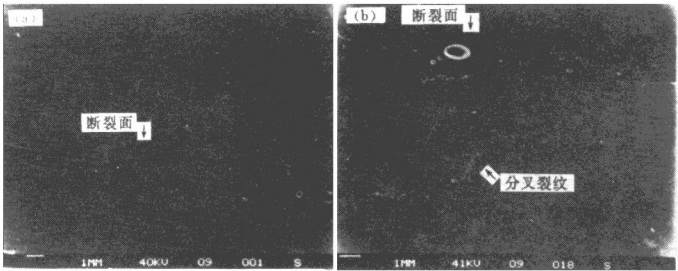


图 2 剖面裂纹分叉的扫描电镜照片

(a) —C04 试件; (b)—No. 35 试件

3 断裂面剖面上的损伤特点

为了更清楚地揭示岩石断裂的微观特征,我们对不同加载率下断裂的辉长岩试件的断裂面剖面在光学显微镜下进行了连续观察,从裂纹尖端开始连续拍摄了直线长度为 15 mm 的剖面照片。观察表明,静态断裂的剖面上几乎没有大的二次开裂或分叉现象,但动态的剖面上却普遍存在二次开裂或分叉,静态断裂面与剖面的交线比较平滑,而动态的普遍起伏较大。对 11 个辉长岩短棒试件(5 个静态、6 个动态试件)的观察还发现,所有试件的断裂面剖面上距裂纹尖端 2~5 mm 处都产生严重损伤,损伤的主要形式是产生了大量微裂纹并形成明显的碎裂区。不同的是,静态和动态试件的这一区域的损伤程度不同,静态的损伤区明显小于动态的,在静态试件的这一区域内几乎看不到较长较宽的裂纹,而动态试件则明显存在长而宽的裂纹,且损伤区也明显大于静态的。加载率越高,这种区别也越大。图 3 是三个不同加载率下断裂的试件剖面上距裂尖 2~5 mm 处的光学显微镜照片。其中(a)、(b)、(c)是静态断裂试件 C01 的剖面上距裂尖 2~5 mm 处的连续性照片。裂尖位于(a)的左方。(d)、(e)、(f)和(g)、(h)、(i)分别是动态试件 No. 07 和 No. 35 的剖面照片,各个试件的照片的位置与 C01 的相同。所有照片的放大倍数相同。C01 是静态断裂试件,加载率最小, No. 35 和 No. 07 是动态试件,其中 No. 35 的加载率最大。由图 3 可见,图 3(a)~(c)中只有少量微裂纹,没有宏观分叉裂纹。而图 3(d)~(f)和图 3(g)~(i)中除了微裂纹外,都有较大的分叉裂纹,如图 3(d)和(g)~(i)中所示。显然,图 3(g)~(i)中分叉或二次裂纹较长。即微裂纹及分叉裂纹或二次裂纹引起的损伤现象与加载率有关。对剖面上裂纹面积所占测量面积的百分比测算表明,动态剖面上各类裂纹(假设由受载产生)面积的百分比明显大于静态,且加载率越高,该百分比越大,即损伤越严重。

4 结论与讨论

由本文的实验观察和测量结果可以得出如下结论:

(1) 不论是静态还是动态断裂,断裂面附近都产生一定程度的损伤。在距离裂尖 2~5 mm 处都存在严重的微开裂损伤,这一位置可能是主裂纹失稳扩展的起始点。

(2) 动态断裂时,断裂面附近的损伤程度明显大于静态。这与我们测量的断裂面附近区域的损伤程度(剖面上各类裂纹面积占测量面积的百分比)随加载率增加而增加的结果一致。这表明动态断裂时要消耗更多的能量以产生比静态更多的开裂损伤。

(3) 在主裂纹失稳扩展的起始位置,静态断裂时虽有损伤产生,但这种损伤以微开裂为主,基本上没有大的向深部发展的分叉或二次裂纹。而动态断裂时对应位置上普遍有大的二次开裂(或宏观分叉裂纹),裂纹的长宽度也随加载率提高而增加。这也说明,随加载率提高,产生二次开裂或分叉裂纹也要消耗比静态更多的能量。

(4) 静态断裂面比动态断裂面平滑。

根据以上实验观察分析与结论,作者认为岩石断裂机理可初步描述为:

岩石(短棒试件)静态断裂时,主裂纹从开始加载到失稳扩展这一阶段,其长度是随载荷逐渐增加而稳定扩展的,当达到临界载荷时由于裂尖附近集聚了较大能量,因而使裂尖附近一定区域内的岩石中某些原始缺陷激活、长大并合并,从而形成微裂纹。由于载荷速度(即加载率)小,这些微裂纹在扩展过程中,其多数将逐渐向平行于主裂纹方向发展,从而有利于主裂纹扩展。因此,静态断裂时主要能量用于主裂纹的扩展。

动态断裂时,从开始加载到接近于失稳扩展这一阶段内,主裂纹长度也是随载荷增加稳定增长的。但由于加载率高,主裂纹尖端附近的一定区域内应力幅值和能量增长很快,所以

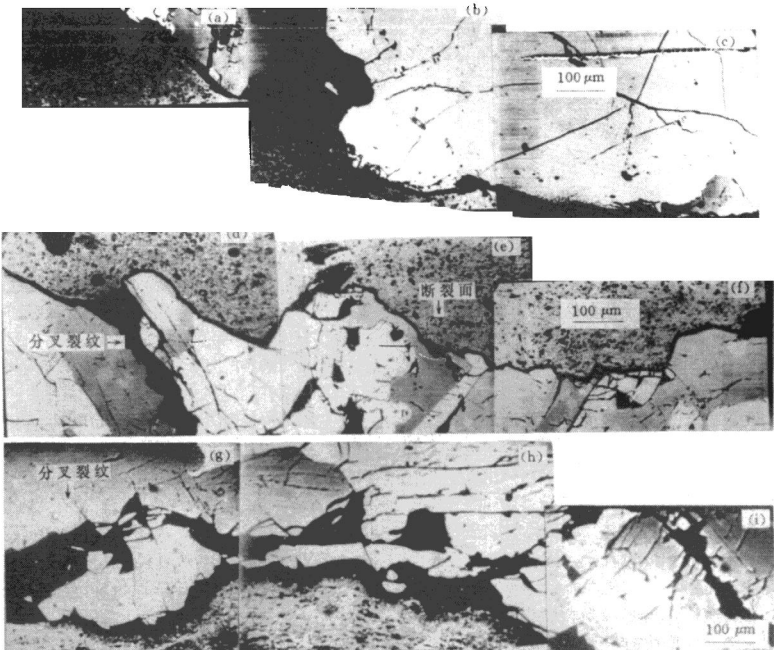


图 3 断裂面剖面上距裂尖 2~5 mm 处的损伤情况
每个试件的 3 张照片的排列：从左到右(如(a)→(c))距裂尖距离增大。
Col: 加载率 $\dot{K} = 1.90 \text{ MPam}^{1/2} \text{ s}^{-1}$; $K_{IC} = 3.425 \text{ MPam}^{1/2}$; $D_F = 1.030$
No. 07: $\dot{K} = 2.17 \times 10^5 \text{ MPam}^{1/2} \text{ s}^{-1}$; $K_{IC} = 11.293 \text{ MPam}^{1/2}$; $D_F = 1.037$
No. 35: $\dot{K} = 1.25 \times 10^6 \text{ MPam}^{1/2} \text{ s}^{-1}$; $K_{IC} = 32.642 \text{ MPam}^{1/2}$; $D_F = 1.068$

该区域将成为一个绝热区。该区域内温度会迅速升高，其中的某些原始缺陷被激活并演化成微裂纹(产生的微裂纹数量可能会多于静态断裂)。由于加载率高，所产生的微裂纹主要沿自己尖端所处的方向扩展，而来不及调整自己的扩展方向(如调整到与主裂纹平行方向)，其中一部分微裂纹会合并发展成分叉裂纹或二次裂纹。由于这些分叉裂纹及微裂纹的生成与扩展要消耗比静态更多的能量，从而使主裂纹扩展能量减少，即阻碍了主裂纹的扩展。因此，岩石的动态断裂韧度就大于静态断裂韧度，并

且随加载率提高断裂韧度也增大^[2]。

参考文献

1 谢和平. 中国矿业学院博士论文, 1987; 2.
2 Zhang Zongxian *et al.* Fracture and Damage of Concrete and Rock FDCR-2(ed) Rossmannith H P., Chapman and Hall, 1993; 418—425.
3 张宗贤, 喻 勇, 赵 清. 中国有色金属学报, 1994, 4 (2); 7—11.
4 张宗贤, 俞 洁. 有色金属(季刊), 1995, 47(2); 1—5.

(编辑 何学锋)