



温度影响下煤层顶板砂岩的 破坏机制及塑性特性

左建平^{①②*} 谢和平^{②③} 周宏伟^{①②} 彭苏萍^①

(① 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; ② 中国矿业大学岩石力学与分形研究所, 北京 100083; ③ 四川大学, 成都 610065)

摘要 通过扫描电镜(SEM)研究了煤层顶板砂岩拉伸断裂后的断口形貌图, 结合砂岩破坏的表面形貌图, 在细观和微观层次对砂岩的断裂机制进行了研究; 比较了受不同温度影响后的微观断口形貌差异, 特别是高温疲劳断口的出现, 证实了温度对砂岩破坏的微观断裂机制产生了影响, 即随着温度的升高, 砂岩的断裂机制由以局部脆性断裂机制为主向局部脆性和延性耦合断裂机制转变, 并观察到大量的塑性变形, 这是影响砂岩强度变化的根本原因, 并可能是微褶皱。

关键字 砂岩 温度-应力共同作用 断口形貌 塑性变形 扫描电镜 微褶皱

随着深部开采等重大工程的需求, 研究不同温度下煤层顶板岩石的破坏规律具有十分重要的意义. 岩石的破坏过程是个极为复杂的过程^[1-3], 受到其内部矿物成分和结构、微缺陷、外部载荷、温度等因素的共同影响. 而岩石断口是岩石在断裂过程中所形成的新表面, 它记录了岩石断裂时的不可逆变形, 以及裂纹的萌生、扩展直至断裂的信息, 因此研究岩石的断口对认识岩石断裂的性质及破坏规律具有一定的指导意义.

近30年来, 众多学者分别从宏观和微观的角度对岩石的断口进行了相应的研究. 国内李先炜等^[4]率先开展这方面的研究, 他们通过透射电镜和扫描电子显微镜观察研究了多种载荷条件下岩石的破坏断口, 并把岩石的断口分为拉断和剪断断口, 具体又把拉断断口分为十种花样, 把剪断断口分为八种花样, 这种分类也为近来的研究所证实^[5]. 谭以安^[6]、冯涛等^[7]对发生岩爆后的断口研究及李根生等^[8]对超高压水射流冲蚀切割岩石断口的研究同样表明岩石断裂的微观机制主要是在拉伸并兼有剪切作用下岩石的低应力脆性断裂, 并以解理断裂为主. 谢和平等^[9,10]对静载和动载下的岩石断口进行了电镜观察和光学显微镜分析, 把岩石的断裂分为沿晶、穿晶及两者耦合的断裂形式, 并认为产生这些断裂形式是由于受到局部高拉应力场作

收稿日期: 2006-12-29; 接受日期: 2007-06-19

煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(编号: 2007-08)、国家自然科学基金(批准号: 50674092, 50221402, 50579042, 50620130440, 50639100, 50490272)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2002CB412707)和教育部“新世纪优秀人才技术计划”(编号: NCET-04-0491)资助项目

* E-mail: zjp@cumt.edu.cn

用, 而岩石内存在的微裂纹、微孔隙、晶格缺陷、夹杂物等是导致局部高拉应力场的直接原因。朱珍德等^[11,12]对不同围压水压条件下大理岩断口形貌的研究得到了相似的微观断裂形式, 并探讨脆性岩石在高围压情况下转换为理想塑性体的微观断裂机理。上述研究主要是从微观角度出发的。Bahat^[13,14]对工程尺度上的地质断裂表面的研究认为, 通过断口形貌学的研究可以近似推测断裂的起源、断裂扩展的模式及方向, 甚至可以推测出古应力场的大小。而最近的很多研究表明, 岩石的断裂表面具有分形特征^[15~18]。而在不同尺度范围内, 有的材料具有多重分形特征^[19], 有的材料具有非线性的分形特征^[20]。

上述研究大多是对室温影响下的岩石断口的研究, 对经受不同温度影响后的断口研究较少。基于目前深部开采及核废料处置等重大工程的需要, 为加深对不同温度影响下岩石破坏行为的认识, 作者在对不同温度影响后煤层顶板砂岩的强度特性^[21]及热开裂^[22]特性进行了研究后, 本文对温度影响后的砂岩断口也进行了研究, 研究表明温度对煤层顶板砂岩的微细观断裂机制产生了重大的影响, 局部地方表明发生了很大的塑性变形, 这是其强度变化的微观表现。

1 试验介绍

砂岩试样取自平顶山煤业集团公司十矿-850 m水平的煤层顶板, 为细粉砂岩。经X衍射分析砂岩样品的主要成分: 石英约占 56.1%, 钾长石约占 17.4%, 方解石约占 1.2%, 白云石约占 1.9%, 菱铁矿约占 3.0%, 其他粘土矿物约占 20.4%。把岩样加工成骨头棒形状试件, 试件横截面尺寸为 2.5 mm×1.4 mm 的矩形, 标距长度为 20 mm。不同温度下的拉伸试验是在中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室岛津高温疲劳试验系统上完成的^[21], 该试验系统可实现升温 and 加载系统的同步操作。试验采用了先升温到试验温度, 然后恒温加载直至试件被拉断的试验流程。升温由加热电阻丝来实现, 温度的反馈及控制由热电偶来控制, 载荷由试验系统的全数字电液伺服加载系统来实现, 本试验采用的是拉伸载荷, 载荷方向如图 1 中箭头所示。试件夹具、加载装置、升温装置及试件形状如图 1 所示。试验得到不同温度下的强度特性, 即对于细观尺度的砂岩试件, 当温度从室温升到 150℃, 抗拉强度有所升高; 而温度由 150℃升高到 300℃, 抗拉强度又有所下降, 详细参阅文献^[21]。

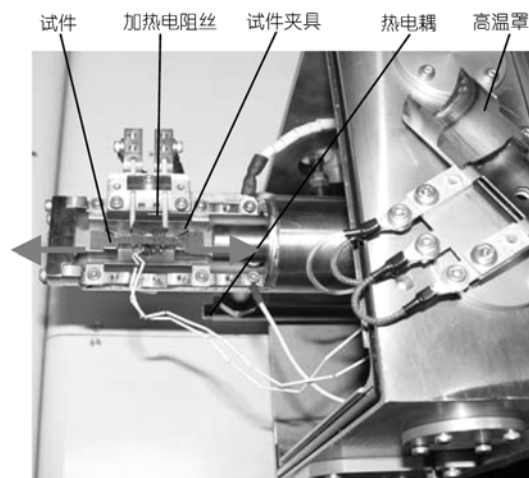


图 1 试验台及试件形状图

把拉伸断裂后的试件冷却到室温, 然后进行断口扫描电镜分析, 共 33 组断口, 分别是经过了室温、30、35、40、45、50、100、150、200、250 和 300℃ 影响后的断口, 每个温度点 3 组断口. 为了研究方便, 我们对试件进行了编号 A-B, 其中 A 代表试验温度, B 代表第几个试件, 例如 45℃-2 代表 45℃ 试验中的第 2 个试件. 由于岩石是非导电或弱导电材料, 在进行断口分析前, 用 KYKY SBC-12 离子溅射仪器对断口表面进行镀金处理, 镀金时间约为 90 s. 电镜分析是在中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室 JSM-5410LV 扫描电镜上完成的, 如图 2 所示.



图 2 JSM-5410LV 扫描电镜

2 砂岩断裂的微细观机制分类

金属断口分析中, 在微观的角度上按断裂路径把断裂分为穿晶、沿晶及相互耦合的断裂形式. 由于岩石的非均质性和各向异性等原因, 使得岩石的断裂并不像金属材料或者均质材料断裂那样具有一定的规律性. 岩石的破坏不仅与自身的矿物成分和结构相关, 与其内部微缺陷的分布和微裂纹的形核、产生、扩展和聚集等也是紧密相关的. X 衍射分析表明砂岩含有多种矿物成分, 而扫描电镜观察也表明试验采用的砂岩具有很强的非均质性, 大的矿物颗粒有 0.1~0.3 mm, 小的矿物颗粒, 如粘土矿物特别小, 如图 3(a). 根据作者大量的拉伸实验及断口观测, 砂岩的断裂大部分发生在粘土矿物胶结物处, 约占 50%~80%, 而发生在矿物颗粒处的断裂只占很少一部分, 如图 3 所示. 图 3(a)是砂岩试件表面形貌图, 图 3(b)为断口图.

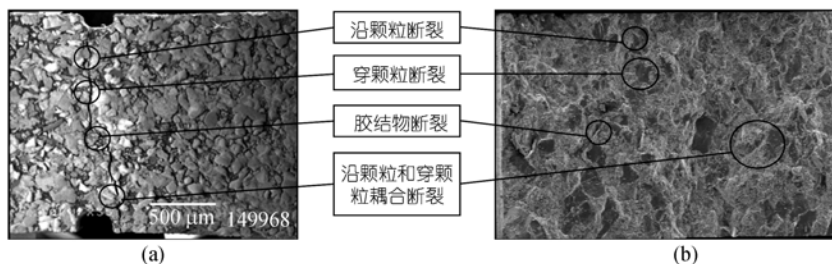


图 3 砂岩断裂微细观机制说明示意图

(a) 试件表面 SEM 图($\times 35$); (b) 试件断口 SEM 图($\times 35$)

根据砂岩的断裂路径以及矿物颗粒与矿物晶粒尺度的不同, 从现象学的角度我们在细观层次上, 把砂岩的断裂分为沿颗粒断裂、穿颗粒断裂、胶结物断裂、沿颗粒和穿颗粒耦合断裂.

其中穿颗粒断裂就是破断矿物颗粒的断裂; 沿颗粒断裂就是沿矿物颗粒边界的断裂, 根据砂岩矿物的胶结情况, 又可分为沿矿物颗粒与胶结物界面的沿颗粒断裂(矿物颗粒之间含有胶结物)、沿矿物颗粒与矿物颗粒之间的沿颗粒断裂(矿物颗粒之间不含胶结物)。在这些破断颗粒的断裂中, 再从更微小尺度上观测, 才可能真正观察到沿晶和穿晶断裂, 或者两者的耦合断裂。因此在微观层次上, 把穿颗粒断裂再分为沿晶断裂、穿晶断裂和两者耦合断裂, 这与文献[10]的分类是相似的。而沿颗粒断裂、胶结物断裂、沿颗粒和穿颗粒耦合断裂在微观层次上依然存在。

3 温度影响下砂岩的断口形貌及塑性特征

断口的微细观分析的任务就是观察分析断口的微观形貌, 进一步探讨裂纹形成和扩展的过程、机制和产生的原因。本节主要是比较受不同温度影响后砂岩微观断口形貌的差异, 并进行了相应的讨论。

3.1 不同温度影响下的解理断口

本文观察的断口都是拉伸载荷下产生的, 从大量观察到的断口来看, 主要是拉伸破坏及拉剪破坏, 纯剪切破坏很少。拉剪和拉伸破坏最常见的微观断裂方式是解理断裂。解理断裂是指晶体材料的局部地方因承受拉应力作用, 导致原子间结合键的断裂而造成的穿晶断裂, 通常沿一定的、严格的结晶平面断裂, 有时也可沿滑移面或孪晶界解理断裂, 结晶学平面也被称为解理面, 故其断口被称为解理断口。所以, 解理断裂指的是断裂过程的一种机理, 直观来说, 解理断裂就是指那些断裂前几乎没有发生塑性变形的断裂, 属于脆性断裂, 应该说这是一种很模糊的概念, 因为材料断裂后的断口, 无论是肉眼还是通过各种仪器, 微小的塑性变形是很难区分的。所以解理断裂并不是脆性断裂的同义语, 因为解理断裂也可伴随着大的塑性变形。从实验得到的大量 SEM 图中发现, 砂岩断口多是解理断裂。我们可以把岩石的解理断裂认为是发生在岩石内部最脆的矿物颗粒或矿物晶粒上的一种断裂形式, 也是由于矿物内部原子键的简单断裂而沿矿物结晶面直接断裂的结果, 通常发生在某个特定的结晶面上, 特别是岩石结晶的薄弱优势面上, 看不到明显的塑性变形。对比不同温度下的 SEM 图, 在温度低于 50℃ 时, 解理断口非常光滑, 如图 4(a)~(c); 当温度达到 100℃ 时, 解理断口开始发生变化, 变得较为粗糙, 如图 4(d); 而当温度高于 150℃ 后, 解理断口变得很粗糙, 解理面上很多刻痕, 局部区域呈现河流状、波浪状等不规则的形状, 这表明曾经发生过塑性变形, 这是温度影响的结果, 如图 4(e)~(h)。

从图 4 可清楚地看出, 砂岩在低温时的脆性断裂与高温时的脆性断裂有明显不同, 高温时的脆性断裂伴有少量的塑性机制在里面, 这种机制的转变一定程度上会直接导致砂岩强度及断裂特性的变化[21], 这是由于局部的塑性变形机制需要消耗更多的能量。或许有人认为以上的理由不够充分, 试验断口图片不能完全说明问题, 因为即便在室温或者较低温度下, 岩石的断口也可能出现局部塑性变形, 如文献[4,10]。下面我们通过“疲劳断口”来做进一步解释。

3.2 高温影响后的疲劳断口

通过局部疲劳断口来说明温度对砂岩断口微观机制的影响。这里的高温是指 150~300℃ 的温度, 相对地球物理的研究算低温, 但相对工程角度而言算高温。例如目前我国的煤矿深部开采最高温度已接近 50℃, 随着开采深度的增加, 温度还将增加, 而印度的某金矿在 3000 m

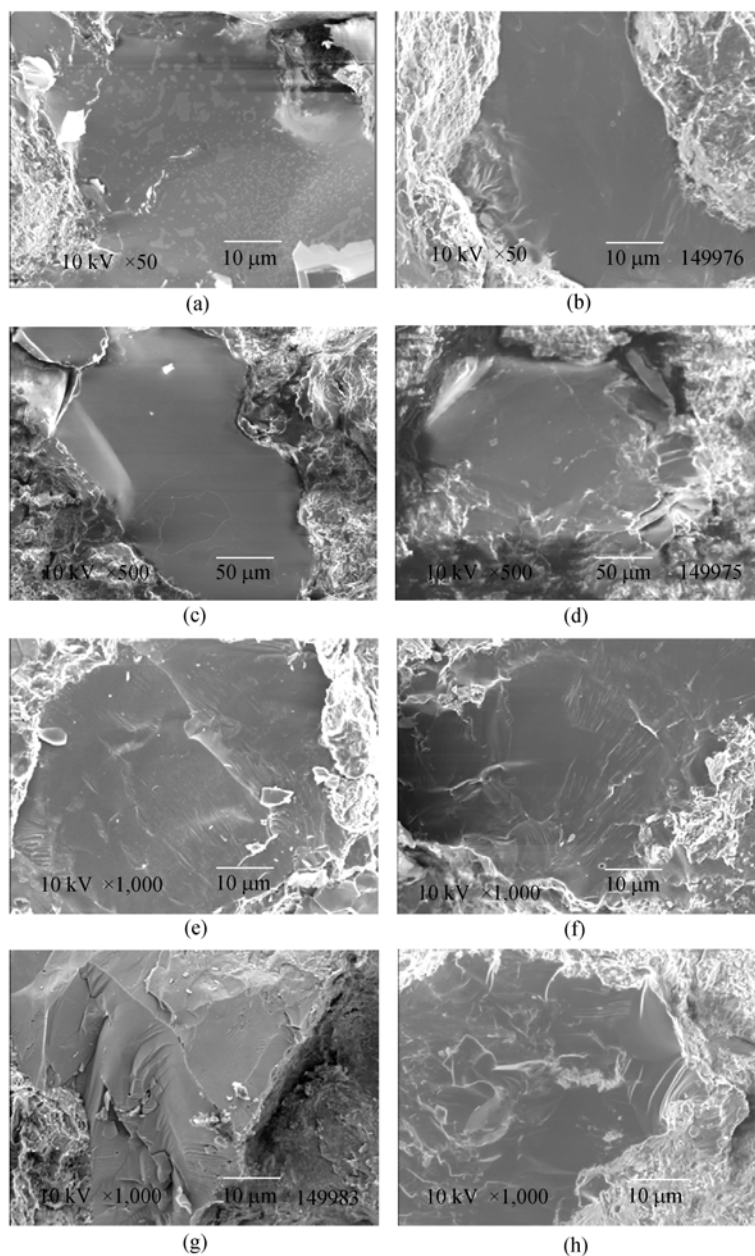


图 4 不同温度下的局部解理断口形貌

(a) 25℃解理断口(试件 25℃-2, ×1000); (b) 30℃解理断口(试件 30℃-1, ×1000); (c) 50℃解理断口(试件 50℃-1, ×500); (d) 100℃解理断口(试件 100℃-3, ×500); (e) 150℃解理断口(试件 150℃-1, ×500); (f) 200℃解理断口(试件 200℃-2, ×1000); (g) 250℃解理断口(试件 250℃-3, ×1000); (h) 300℃解理断口(试件 300℃-2, ×1000)

的深度地温已达到 70℃^[23]。另有预测表明,核废料处置过程中由于放射性元素衰变处置库周围围岩的最高温度将达到 200~300℃^[24]。另外就是有关“疲劳断口”的概念。在金属疲劳实验中,通常采取的是交变加载方式,这使金属材料内部微缺陷处于不断的拉压受力状态,疲劳次数通常为 $10^3 \sim 10^6$ 次甚至更高。而我们的实验并没有采取疲劳加载方式,而是采用了反复拉伸加

载-停载的加载方式^[21]。试验设备有载荷波动, 小的波动约为 1~2 N, 大的约为 5~10 N, 这主要与试验设备、试件加工精度及其与实验夹具的匹配程度等因素相关。另外疲劳断口的产生与矿物颗粒自身的结构、大小、形状不规则和排列方向的随机性等因素也是相关的。当砂岩受到载荷时, 各个矿物颗粒所承受的作用力各不相同; 当载荷进一步升高, 矿物颗粒产生变形并能在一定范围内相互协调, 产生自组织的合理优化结构。在新的矿物颗粒结构和载荷作用下, 各个矿物颗粒所承受的作用力会发生变化, 如一些矿物颗粒界面的应力会升高、承载骨架颗粒的应力也会升高, 而一些间隙物质的应力可能会降低, 或者有些矿物发生破坏后就失去承载能力, 甚至颗粒之间由于相互作用会导致一些颗粒发生旋转, 这会使局部的颗粒受到交变载荷作用。因此砂岩矿物颗粒的受力在微观上表现出不均匀和各向异性是必然的, 这也意味着局部的应力波动是岩石非均质性和各向异性的必然结果。因此尽管我们的实验不是严格意义上的疲劳实验, 但对局部颗粒而言可能会受到一种“准疲劳”或者“近似疲劳”载荷的作用, 这就导致一些矿物颗粒产生波纹状断口, 为了与传统的叫法一致, 仍把这些断口称为“疲劳断口”。

由于砂岩试件的厚度很小, 从断裂力学的角度分析, 在拉应力作用下, 砂岩内部微裂纹的尖端有可能处于张开型的平面应变状态。我们分析大量的断口形貌后发现, 当断裂面与载荷方向垂直时, 断裂面上有很多疲劳裂纹; 当断裂面是个斜面, 与载荷方向不垂直时, 断裂面上很少有疲劳裂纹, 此时砂岩发生了拉剪破坏。可见, 当拉伸载荷与断面相垂直时才可能产生疲劳裂纹, 而内部局部平面应变状态也是产生疲劳裂纹的一个必要条件。这不仅从宏观的角度, 即裂纹前端整个都处于平面应变状态, 而且还必须强调局部区域处于平面应变条件的应力状态。例如观察到的 SEM 图都是在试件中部有疲劳裂纹, 而在接近试件表面附近的断口却没有观察到, 其主要原因是靠近试件表面不能满足平面应变条件。当然并不是满足了张开型平面应变条件, 就一定会形成疲劳裂纹, 这还与其他因素有关, 如岩石矿物成分和矿物性质、组织结构、力学性能和温度等诸因素。这些因素与疲劳裂纹存在与否及其形态的关系是极复杂的, 很难以一般的规律加以说明, 诸因素中何者为主要因素何者为次要因素将来有待进一步的研究。

上述外部载荷的波动、矿物颗粒局部的应力波动和裂纹尖端局部平面应变状态是本文实验中产生疲劳裂纹的必要条件, 但并不是充分条件。全部实验的加载方式都相同, 而矿物颗粒局部的应力波动和内部局部平面应变状态也统计相似, 但在砂岩的断裂过程, 低温时形成疲劳裂纹较困难, 而高温时形成疲劳裂纹较容易。作者对比分析了大量的断口形貌 SEM 图发现, 温度低于 100℃ 实验的 21 个试件中, 仅仅试件 30℃-1 和 50℃-1 出现了局部疲劳裂纹, 而其他 19 个试件都没有发现疲劳裂纹, 断口的多数地方都如前文的解理断口, 非常的光滑平坦。即便在试件 50℃-1 的局部断口, 疲劳裂纹扩展的范围在放大倍数为 1500 倍的情况下也是相当小, 沿裂纹扩展方向约为 20 μm; 而试件 30℃-1 的疲劳断口甚至有点牵强, 如图 5(a)和图 5(b)。可以认为在低于 100℃ 温度范围内, 砂岩的微观断裂以局部脆性断裂机制为主。而在 150, 200, 250 和 300℃ 的试件中除了发现了比较光滑的解理断口, 还发现了大量的疲劳裂纹或者波纹状裂纹, 而且范围很大, 沿裂纹扩展方向延伸约为 80~120 μm 的范围, 这说明颗粒局部区域发生了较大的塑性变形, 如图 5(c)~(f)。而图 5(c)、图 5(e)和图 5(f)在一定程度上也说明, 在实验室中的拉伸载荷及温度共同作用下, 也能形成微细观的“显微褶皱”现象。因此我们推测在地球内部中, 褶皱现象不仅仅是挤压作用造成的, 也可能是受到拉伸载荷和温度长时间的共同影响而造成的。这个结论还有待进一步的研究。另外根据疲劳裂纹的扩展方向也可以大致判断出

裂纹的扩展方向,如图 5 中箭头所示;并且随着裂纹逐渐扩展,中性轴可能发生迁移,载荷可能发生交替变化,从而导致不同的扩展阶段裂纹的扩展方向可能不同,如图 5(c)~(f). 这说明矿物在破坏时曾经受到很复杂的应力状态,部分原因是由于温度的影响造成的.

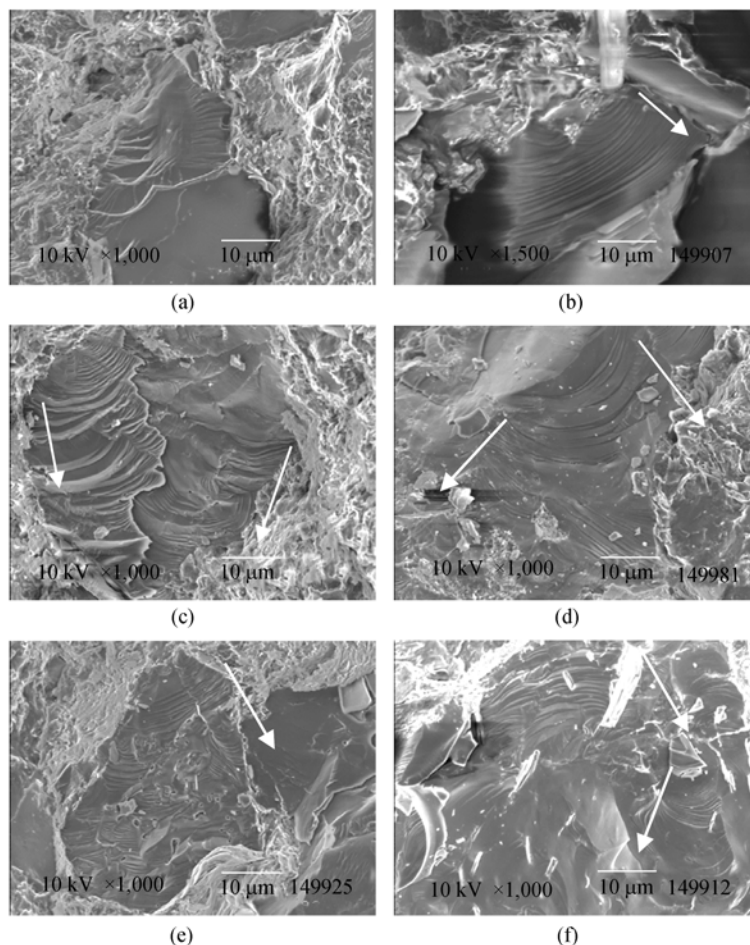


图 5 不同温度下的局部疲劳断口形貌图

(a) 30°C 疲劳断口(试件 30°C-1, $\times 1000$); (b) 50°C 疲劳断口(试件 50°C-1, $\times 1500$); (c) 150°C 疲劳断口(试件 150°C-1, $\times 750$); (d) 200°C 疲劳断口(试件 200°C-3, $\times 1000$); (e) 250°C 疲劳断口(试件 250°C-2, $\times 1000$); (f) 300°C 疲劳断口(试件 300°C-3, $\times 1000$)

3.3 温度影响后的塑性特征讨论

图 4 和 5 分别比较了不同温度影响后砂岩破坏的断口形貌图,可以看出不同温度下的断裂花样存在着差异. 温度低于 100°C 时,在拉应力作用下裂纹尖端的应力来不及向距离裂纹尖端较远的部位分布,迅速造成裂纹尖端前沿矿物的开裂;而温度高于 150°C 后,由于岩石矿物颗粒及粘土胶结物的热激活能较大,抵抗外界变形和协调变形的能力也增大,因此已形成的应力场有充分时间进行重分布,破坏可以发生在裂纹尖端前沿的薄弱环节(包括晶界和孔隙缺陷等). 这样的机制会导致高温拉伸断口上的断裂花样小而密,局部上比较粗糙;低温拉伸断口的断裂花样则较大,局部平坦. 这些形貌特点正是由岩石各种断裂模式所占比例的差异所导致的. 随着温度的升高,在脆性岩石向延性材料转变的过渡中,其断口微裂纹产状也发生了变

化, 断口形貌也发生了很大的变化, 我们可以把这个温度区段(150~300℃)认为是脆延过渡区, 在这个过渡区, 岩石的断口形貌比起常规形貌出现了很大的不确定性. 较高温度的解理断口表面比较粗糙, 表明发生过微小的塑性变形, 而且断口的形态更为多样和复杂, 这主要是受到温度影响后, 岩石内部矿物颗粒、晶体和原子热运动加剧, 当岩石受到外部载荷作用发生断裂时就有可能出现在更大范围的位置. 从统计意义上讲, 高温时矿物颗粒、晶体及原子的热运动比低温时的剧烈, 从而导致高温时的断口有些与低温时的断口相似, 有些又完全不一样, 并且高温的断裂形貌也更为多样, 更为复杂.

因此温度大于150℃之后产生很大的塑性变形并不是偶然的現象, 而是温度确实对砂岩破坏的微观机制产生了影响, 一方面是温度升高后, 矿物晶体内部的原子振动加剧, 热激活能力增强, 局部的塑性变形能力增加; 另一方面可能是由于温度影响了裂纹尖端的应力状态所致. 当然外部载荷的波动、矿物颗粒局部的应力波动和裂纹尖端局部平面应变状态的影响也是不容忽视的.

4 结论

本文分析了煤层顶板砂岩的拉伸断口形貌图, 得到了砂岩破坏的微细观断裂模式, 并比较了受不同温度影响后的微观断口形貌的差异, 得出的具体结论如下:

(i) 根据砂岩的断裂路径, 在细观层次上把砂岩的断裂分为沿颗粒断裂、穿颗粒断裂、胶结物断裂及沿颗粒和穿颗粒耦合断裂; 在微观层次上, 把穿颗粒断裂分为沿晶断裂、穿晶断裂和两者耦合断裂;

(ii) 实验对比分析了不同温度下砂岩的局部解理断口及局部疲劳断口, 证实温度对砂岩破坏的微观断裂机制产生了影响, 即随着温度的升高, 砂岩的断裂机制由以局部脆性断裂机制为主向局部脆性和延性耦合断裂机制转变, 并认为150~300℃是脆延过渡区的转变温度, 在这个过渡区, 砂岩的断口形貌更为复杂和多样, 这是由于温度升高后, 矿物晶体内部的原子振动加剧, 热激活导致局部的塑性变形能力增加; 并且温度影响了裂纹尖端的应力状态;

(iii) 研究了不同温度下的砂岩断裂的微细观机制, 对砂岩中的疲劳裂纹做了研究, 认为应力中的交变部分和裂纹尖端局部平面应变状态是形成疲劳裂纹的关键因素, 局部区域的塑性变形是疲劳裂纹形成的先决条件, 而温度影响则是形成疲劳裂纹一个重要的影响因素, 这也是温度影响砂岩强度变化的一种体现;

(iv) 通过大量的SEM图证实了温度-拉应力共同作用下砂岩中会产生疲劳裂纹, 这是微细观的“褶皱”现象, 这一定程度上说明微褶皱可能不仅仅是挤压作用造成的, 也可能是受到拉伸载荷和温度长时间的共同影响而造成的, 这个结论还有待进一步的研究.

参 考 文 献

- 1 陈颢, 黄庭芳. 岩石物理学. 北京: 北京大学出版社, 2001
- 2 Fineberg J, Marder M. Instability in dynamic fracture. *Phys Rep*, 1999, (313): 1—108[DOI]
- 3 刘彩平. 岩石动态裂纹扩展的不稳定性及其物理机制研究. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2005
- 4 李先炜, 兰勇瑞, 邹俊兴. 岩石断口分析. *中国矿业学院学报*, 1983, 1: 15—21
- 5 刘小明, 李焯芬. 岩石断口微观断裂机理分析与实验研究. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(6): 509—513
- 6 谭以安. 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程. *电子显微学报*, 1989, 8(2): 41—47
- 7 冯涛, 谢学斌, 潘长良, 等. 岩爆岩石断裂机理的电镜分析. *中南工业大学学报*, 1999, 30(2): 14—17
- 8 李根生, 廖华林. 超高压水射流冲蚀切割岩石断口微观断裂机理实验研究. *高压物理学报*, 2005, 19(4): 337—342

- 9 谢和平. 岩石材料的局部损伤拉破坏. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(2): 147—154
- 10 谢和平, 陈至达. 岩石断裂的微观机理分析. 煤炭学报, 1989, 2: 57—67
- 11 朱珍德, 张勇, 徐卫亚, 等. 高围压高水压条件下大理岩断口微观机理分析与试验研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 44—51
- 12 朱珍德, 张勇, 王春娟. 大理岩脆-延性转换的微观机理研究. 煤炭学报, 2005, 30(1): 31—35
- 13 Bahat D. Tectono-fractography. Berlin: Springer-Verlag, 1991
- 14 Bahat D, Frid V, Rabinovitch A, et al. Exploration via electromagnetic radiation and fractographic methods of fracture properties induced by compression in glass-ceramic. Int J Fracture, 2002, 116(2): 179—194[DOI]
- 15 Babadagli T, Develi K. On the application of methods used to calculate the fractal dimension of fracture surfaces. Fractals, 2001, 9(1): 105—128[DOI]
- 16 Xie H P. Fractals in Rock Mechanics. Rotterdam: A A Balkema Publishers, 1993
- 17 Zhou H W, Xie H P. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. Surf Rev Lett, 2003, 10(5): 751—762[DOI]
- 18 Zhou H W, Xie H P. Anisotropic characterization of rock fracture surfaces subjected to profile analysis. Phys Lett A, 2004, 325(5-6): 355—362[DOI]
- 19 Xie H P, Wang J A, Stein E. Direct fractal measurement and multifractal properties of fracture surface. Phys Lett A, 1998, 242: 41—50 [DOI]
- 20 Zuo J P, Wang X S. A novel fractal characteristic method on the surface morphology of polythiophene films with self-organized nanostructure. Physica E, 2005, 28(1): 7—13[DOI]
- 21 左建平. 温度-应力共同作用下砂岩破坏的细观机制与强度特征. 博士学位论文. 北京: 中国矿业大学, 2006
- 22 左建平, 谢和平, 周宏伟. 不同温度作用下砂岩热开裂的实验研究. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1150—1155
- 23 谢和平. 深部资源开采诱发的工程灾害与基础科学问题. 见: 谢和平, 彭苏萍, 何满潮, 编. 深部开采基础理论研究与工程实践. 北京: 科学出版社, 2006. 1—14
- 24 Hudson J A, Stephansson O, Andersson J, et al. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(1): 143—161[DOI]