文章编号:1001-4888(2020)02-259-08

Q235钢细观损伤声发射源动态观测实验研究*

张颖[1], 李越[2], 周俊鹏[3], 陈小龙[2]
(1.常州大学, 常州 213164; 2.东北石油大学, 大庆 163318; 3.大庆油田工程建设有限公司, 大庆 163318)

摘要: 金属材料细观损伤过程伴随有瞬态应力波的释放,利用声发射检测技术可采集到应力波的信息,但由于缺少直观可视的手段,利用声发射信息定量评价金属材料的细观损伤存在困难。本文将SEMtester1000原位拉伸试验机、MZ1000正置显微镜和PCI-2型声发射检测系统相结合,搭建了声发射源动态观测实验系统。以Q235钢可视化原位拉伸实验为例,获取了晶体的滑移和夹杂物的断裂两种典型声发射源图像及对应的声发射信号。通过对不同声发射源信号的分析可知,滑移是一个持续的过程,复杂的滑移活动会产生多类型的声发射信号。夹杂物断裂是瞬态过程,产生典型的突发型声发射信号,能量较滑移信号更高。依据声发射源动态观察结果及图像分析,建立了基于声发射机制的Q235钢细观损伤模型。

关键词: 声发射源; 动态观测; 图像分析; 细观损伤
中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A DOI: 10.7520/1001-4888-18-169

0 引言

金属材料按宏观状态可视为各向同性,但其细观状态实际是由基体、杂质相、二相粒子等共同组成的非均一体。在外加载荷作用下,杂质相等微观几何不连续处由于应力集中等综合作用,会逐渐演化产生损伤,形成声发射源,释放应力波[1]。通过对声发射信号的分析,确定材料损伤状态,一直是声发射领域的研究热点[2-4]。

目前,国内外学者通过实验的方法对不同材料损伤过程的声发射信号特征和声发射源进行研究,并取得了一定的进展[5-7]。上述研究工作,主要通过对获取声发射信号数据的分析、计算、反演声发射源的特性,这种通过测取快速释放的瞬态声信号并以此推演材料内部局部损伤变化过程的难度是极大的。现有的声发射理论认为,位错、滑移、夹杂物的断裂、裂纹的萌生等均为典型的声发射源[8],但对上述典型声发射源无法实现直接观测,因此在利用声发射信息对损伤状态进行描述时,尚缺乏有力的直观实验观测结果进行佐证。

针对上述问题,本文建立了原位拉伸过程声发射源动态观测实验系统,通过对Q235钢试件原位拉伸实验,将声发射监测与试件细观组织损伤可视化观测相结合,获取细观损伤过程的声发射源图像和声发射信号,得到典型声发射源信号的声频特征。在此基础上,结合细观损伤理论,构建了基于声发射机制的金属材料细观损伤模型。

1 声发射源动态观测系统及测试实验

1.1 实验系统组成

依据声发射原理,为了实现损伤过程声发射源动态观测,实验系统由加载部分、观察部分和声发射

* **收稿日期:** 2018-07-22; **修回日期:** 2018-09-25
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(E2018015)资助
通讯作者: 张颖(1972—),男,博士,教授,研究方向:过程设备安全检测及完整性评价。Email: aezy163@163.com

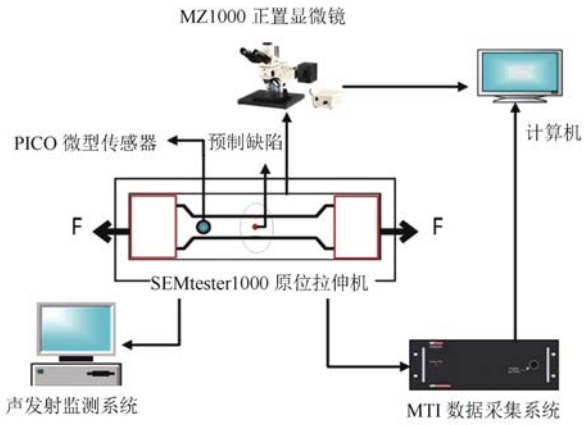


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system

测试部分三部分组成,如图 1。

加载部分选用 SEMtester1000 原位拉伸机,该拉伸机能够实现非常低的拉伸速率 0.01mm/min,与光学显微镜搭配可以实时观察试件损伤过程声发射源的动态演化。拉伸机试验台尺寸为 173mm × 120mm × 49mm,可以放置于显微镜置物台上,配有 MTI 数据采集系统,用于设定系统参数,测试和分析数据。

观测部分选择 MZ1000 正置显微镜,同时搭载型号为 DIG300 的数字摄像头。摄像头能够录制拉伸实验全过程材料组织形态变化的视频,不需要中断实验来采集图像,保证了实验过程的完整性和连续性,同时能够保证采集图像的实验条件的一致性。该显微镜配有放大倍数为 10×的目镜和放大倍数分别为 10×、50×、100×的物镜。

声发射测试部分选择 PCI-2 型二通道声发射检测系统。声发射检测系统配有 2/4/6-AST 前置放大器,选用中心频率 250kHz 的 PICO 微型传感器,频率范围为 200kHz~750kHz,大小为 5mm×4mm,尺寸较小,适用于小型试件的监测。声发射信号采集系统参数设置如表 1 所示。

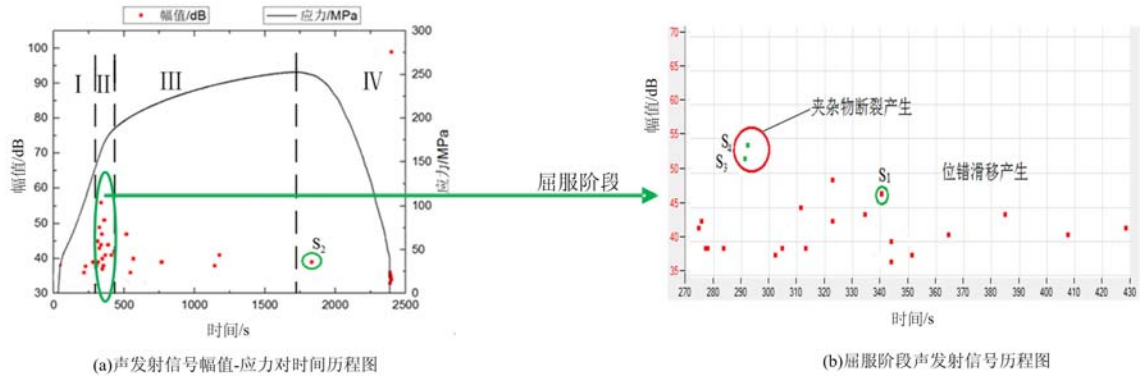
表 1 声发射采集系统参数设置

Tab. 1 Parameters of acoustic emission acquisition system

门槛值 /dB	采样率 /MSPS	采样长度 /k	增益 /dB	峰值定义 时间/μs	撞击定义 时间/μs	闭锁定义 时间/μs
33	1	2	40	300	600	600

1.2 实验方案

实验试件材质为 Q235 钢,厚度为 0.5mm,长 50mm。为了能够利用显微镜对声发射源进行捕捉,实验前对试件进行表面处理并预制 φ0.1mm 的缺陷。拉伸机以 0.1mm/min 的速率进行单轴拉伸直至试件完全断裂,选择放大倍数为 10×50,通过数字摄像头的图像采集系统对图像、视频信息实时保存,同时使用声发射监测系统对拉伸过程进行监测。实验完毕后,以采集到声发射事件的时间为依据,对视频及图像信息进行选择和分析。



(a)声发射信号幅值-应力对时间历程图 (b)屈服阶段声发射信号历程图

图 2 声发射信号历程图

Fig. 2 Correlation diagram of acoustic emission signal amplitude

1.3 实验结果

依据上述实验方案进行实验,采集拉伸过程试件的载荷位移数据和声发射数据,获取试件拉伸过程声发射信号幅值—应力对时间历程图如图 2 所示,依据加载曲线将加载过程分为四个阶段:0~274s 为

弹性阶段，275s～429s 为屈服阶段，430s～1736s 为强化阶段，1737s～2198s 为缩颈阶段。

2　原位拉伸过程两种典型声发射源图像获取与分析

2.1　声发射源图像获取与识别方法

为了获取原位拉伸过程损伤源的图像并对其中的声发射源进行识别，利用 MATLAB 软件，对采集到的原始图像进行预处理，改善图像的质量，降低噪声的干扰，并利用计算机将处理后的图像划分为不同的区域，针对各区域再分别进行不同时刻图像的分析比较，发现其特征变化。声发射源动态观察和识别流程如图 3 所示。

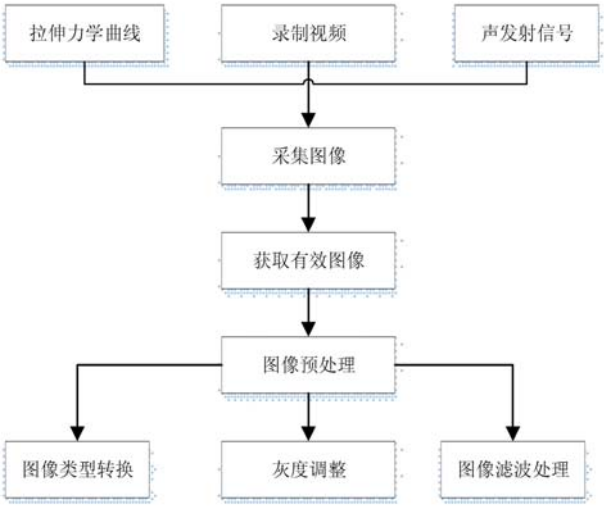


图 3　声发射源动态观察与识别流程图

Fig. 3　Flow diagram of acoustic emission source image acquisition and analysis

2.2　典型声发射源图像分析

按 2.1 所述方法对实验过程采集的声发射源动态观测视频进行处理，并结合声发射信号历程图(图 2)对声发射信号产生时刻获取的观测图像进行声发射源识别分析。通过分析，获取了两种类型的声发射源：滑移位错和夹杂物断裂。

(1) 滑移位错损伤声发射源图像分析

0s 时刻，获取的试件表面图像如图 4(a)所示。试件受载后，当试件仍处于弹性阶段时并未观察到材料表面出现明显的变化。进入屈服阶段后，能够观察到材料表面开始出现了滑移线，如图 4(b)。Q235 钢属于多晶体材料，其变形通过沿着滑移面逐渐运动而实现[9]。滑移在晶体表面形成显微台阶，通过显微镜可观察到一些细线即滑移线。随着加载的继续进行，试件表面出现数量更多的滑移线，如图 4(c)和(d)所示。

(2) 夹杂物断裂损伤声发射源图像分析

根据图 2 可知，第 291s 产生了两个高幅值的声发射信号，因此采集该时刻的图像进行分析。为了使图像的细节信息更加明确，利用 MATLAB 软件对图像进行灰度变换和滤波处理，比较发现，观察区域中的局部显微组织发生了明显变化，如图 5 所示。屈服阶段内，观察 291s 时的图像发现，晶体内夹杂物发生了断裂，如图 5(c)所示。截取了相同区域 291s 之前的图像，进行对比发现：在初始的一段时间内，图中夹杂物状态始终保持完整，当到达 291s 时，在一定载荷作用下夹杂物突然发生断裂。同时，该时刻获取了两个幅值较高的突发型声发射信号，故判断该夹杂物的断裂为捕捉到的另一种典型声发射源。

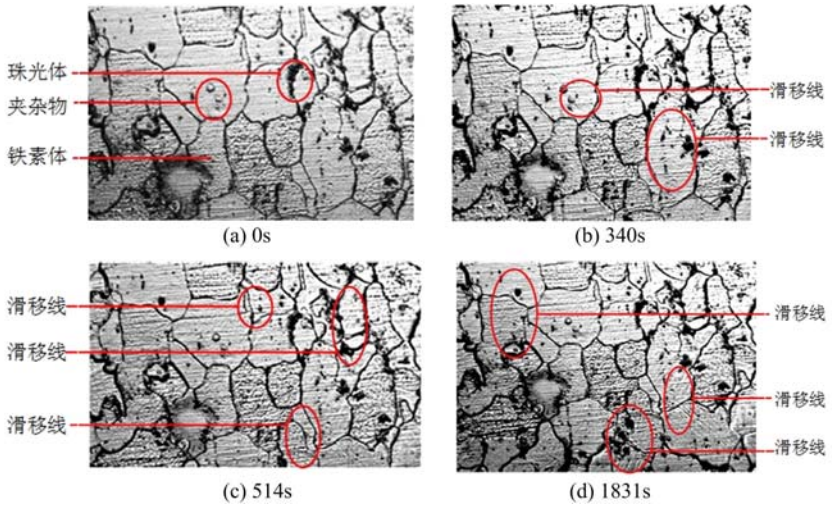


图 4 滑移声发射源

Fig. 4 Slip acoustic emission source

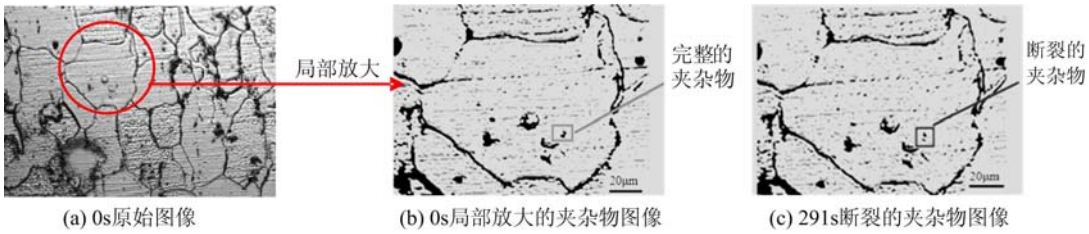


图 5 夹杂物断裂损伤声发射源图像

Fig. 5 Inclusions rupture acoustic emission source

3 Q235 钢损伤过程声发射源信号分析

3.1 位错滑移声发射源信号特征分析

由 2.2 图像分析结果可知,滑移是一个持续的细观损伤过程,其运动形式较为复杂。在材料拉伸变形直至断裂的过程中,位错滑移运动一直在进行,包括:滑移,位错的增殖,杂质、晶界的相互作用等,多样、复杂的损伤过程就伴随产生了不同类型声发射信号。

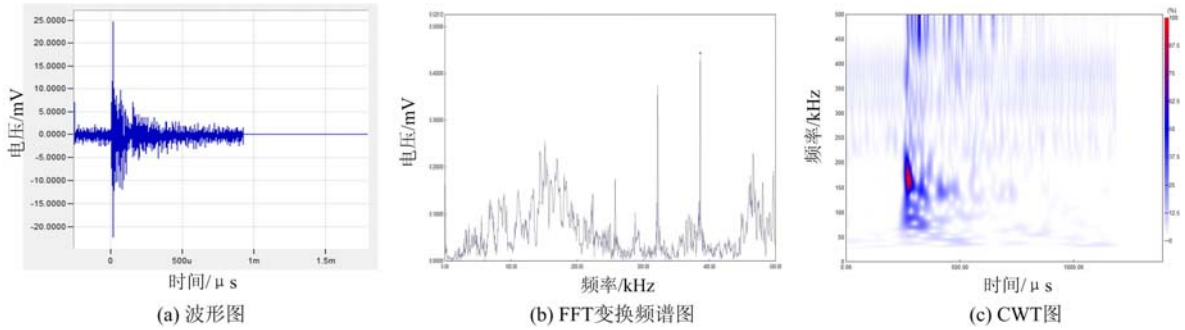


图 6 340s 滑移产生的突发型信号 S_1

Fig. 6 Signal S_1 from slip acoustic emission source at 340s

如图 4(b)所示,第 340s 时观察到了滑移线的出现,该滑移运动伴随产生了一个典型的突发性信号 S_1,其时域、频域、时频特征如图 6 所示。信号上升时间很短而持续时间很长,振铃计数 38 次,幅值 47dB,中心频率为 248kHz。获取的 CWT 图图像清晰,时频分布特征明显。信号高能量状态持续很短的时间后迅速衰减。

如图 4(d)所示,在 1831s 观察到大量的滑移线,该时刻产生了连续型信号 S_2,其时域、频域、时频特征如图 7 所示,该信号幅值 40dB,振铃计数 2 次,平均频率 111kHz,中心频率 210kHz。获取的 CWT

图图像比较混乱，时域特征不明显。

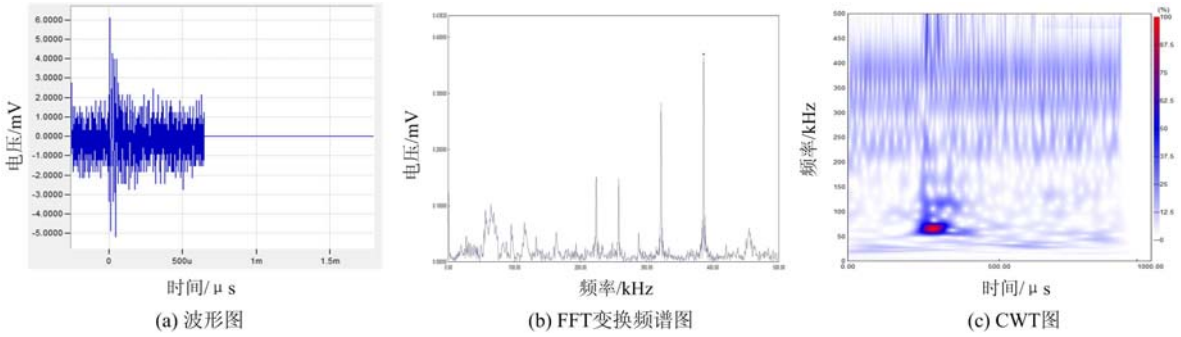


图 7　1831s 滑移产生的连续型信号 S_2

Fig. 7　Signal S_2 from slip acoustic emission source at 1831s

采用上述分析方法，对其他由滑移产生的声发射信号进行分析，其统计结果如表 2 所示。由表 2 可知，位错滑移运动开始于屈服阶段，并在该阶段随载荷增加而逐渐加剧，材料内释放大量的应变能，产生大量的声发射信号，该阶段产生的主要是高幅值、高能量的突发型信号；进入强化阶段后，材料内部的位错滑移运动变得更为复杂，产生一系列低幅值连续型信号。

表 2　位错滑移声发射源信号特征统计

Tab. 2　Parameters of acoustic emission signals from slip

信号类型	信号个数	产生时刻	幅值/dB	振铃计数	中心频率/kHz
突发型	9	7 个产生于屈服阶段， 2 个发生在强化阶段	41～49	14～38	244～286
连续型	11	6 个产生于屈服阶段， 5 个发生于强化阶段	36～44	2～11	208～263

3.2　夹杂物断裂声发射源信号特征分析

通过 3.1 分析可知，屈服阶段材料内部发生剧烈的滑移位错运动，材料发生形变过程中，当材料内部夹杂物的位向阻碍了拉伸过程试件材料的形变时，夹杂物周围材料不能协调变形，291s 时引发夹杂物断裂。夹杂物断裂是一个极短暂的过程，快速释放大量应变能，产生 2 个相似的高幅值的突发型声发射信号 S_3、S_4，其时频特征如图 8 和图 9 所示，其特征参数如表 3 所示。

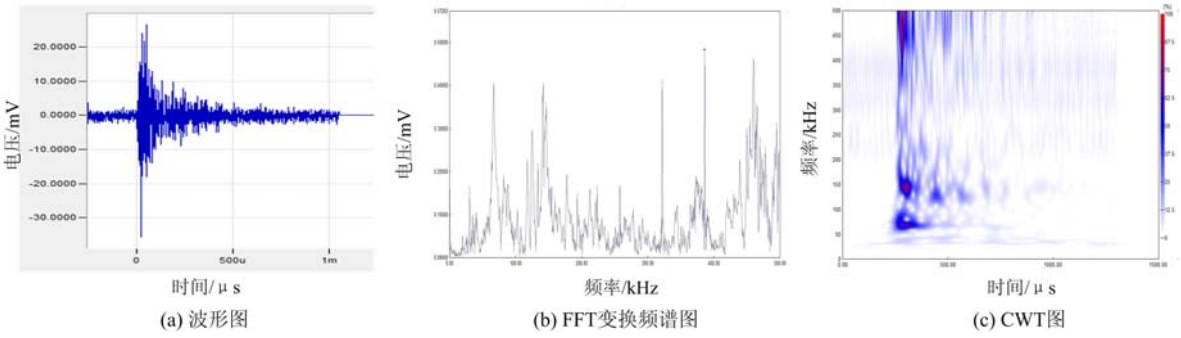


图 8　夹杂物断裂声发射信号 S_3

Fig. 8　Signal from fracture of inclusions S_3

表 3　声发射信号 S_3、S_4 特征参数

Tab. 3　Acoustic emission signal characteristic parameters of S_3、S_4

信号	产生时刻/s	幅值/dB	上升时间/μs	持续时间/μs	振铃计数	中心频率/kHz	峰值频率/kHz
S_3	291	52	25	452	69	271	459
S_4	291	54	26	625	78	272	459

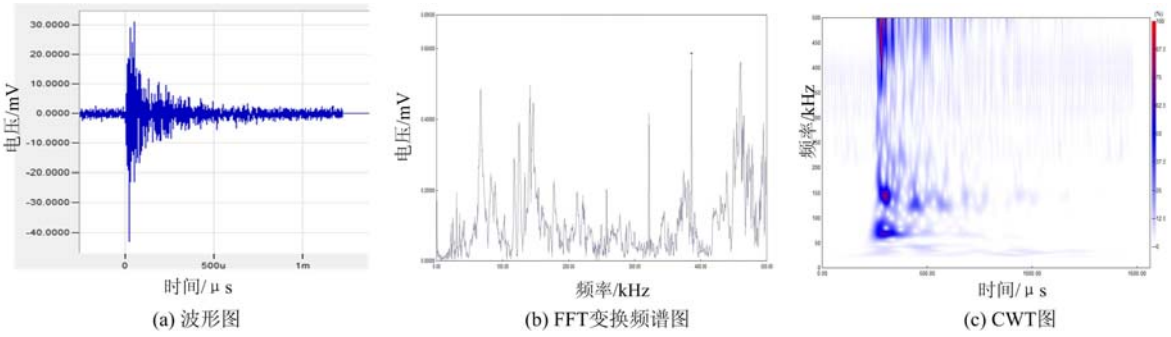


图 9 夹杂物断裂声发射信号 S_4

Fig. 9 Signal from fracture of inclusions S_4

4 基于声发射源动态观测的 Q235 钢细观损伤机制

通过 Q235 钢细观损伤过程的声发射源进行动态观测，对获取的声发射信号和声发射源图像进行分析，结合细观损伤理论，建立如图 10 所示的模型来描述 Q235 钢拉伸过程的细观损伤机制。

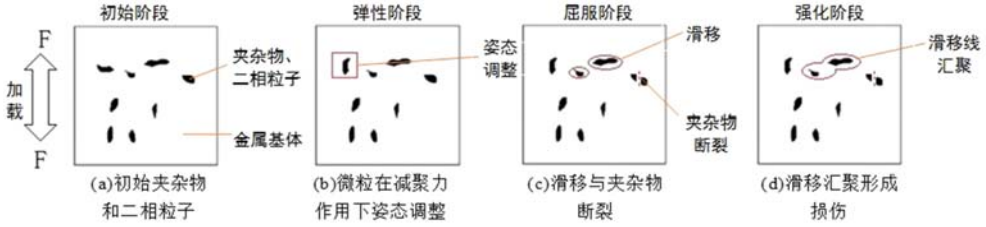


图 10 基于声发射源动态观测结果的 Q235 钢细观损伤模型

Fig. 10 Mesoscopic damage model of Q235 steel based on acoustic emission sources dynamic observation

金属材料初始状态如图 10(a)所示，材料内部往往存在二相粒子和夹杂物等非均质物质，由于这些内部微观组织的不均匀与薄弱区域的存在，当材料承受载荷时，在这些几何不连续处就会出现应力集中，造成不稳定的应力分布。继续施加载荷，材料损伤程度增大，经历如图 10(a)～(d)所示的过程。不同损伤阶段材料内部损伤机制不同，伴随产生不同特征的声发射信号。弹性阶段，如图 10(b)，材料在外加载荷作用下，不会发生损伤，但部分夹杂物等微粒在载荷作用下会进行相应的姿态调整，因此该阶段会产生数量极少的微弱的声发射信号。这些信号能量不高，活性很低，当实验参数灵敏度较低时，不易测得。屈服阶段，如图 10(c)，材料内部出现多种类型的损伤模式，如：位错滑移，微粒与基体脱离，发生微孔洞的形核和夹杂物断裂等，因此该阶段声发射现象最为活跃，产生的声发射信号数量最多，并且信号的活性很强，能量和幅值较高，且信号类型丰富。位错滑移是一个连续的过程，并且运动形式较为复杂，会产生突发型信号和连续型信号。而夹杂物断裂是一个瞬态过程，瞬间释放较高的能量，产生高幅值的突发型信号。进入强化阶段后，如图 10(d)，材料内部损伤演化形式主要为滑移汇聚，形成宏观的损伤。强化阶段前期，产生的声发射信号活性较强，信号比较密集，但是幅值较低。强化阶段后期，声发射信号数量明显减少，信号活性也处于较低水平。

这一细观损伤模型，仅是根据本次声发射源动态观测实验，定性地揭示塑性材料细观损伤过程，在此基础上，仍需进行大量实验验证，以实现利用声发射信息对细观损伤状态的量化评价。

5 结论

(1) 利用声发射监测系统、原位拉伸试验台和光学显微镜等仪器搭建了声发射源动态观测实验系统，实现了材料加载过程声发射监测和声发射源光学可视化观察的同步进行。改变了以往通过声发射数据反演声发射源的方式，通过直接观察声发射源图像，实现了材料细观损伤状态与声发射信号的一一对应。

（2）借助光学显微镜和数字摄像头，捕捉到拉伸过程内部损伤演化的图像数据，获取了两种典型声发射源：夹杂物断裂和滑移。对两种声发射源产生信号的特征进行了比较，分析结果得出，滑移产生的声发射源类型复杂，包含突发型、连续型；夹杂物断裂产生的声发射信号幅值更高、能量更大，是典型的突发型声发射信号。

（3）以声发射源动态观测实验分析结果为基础，建立了基于声发射信息的 Q235 钢细观损伤机制，利用声发射测试结果，对 Q235 钢不同加载阶段的细观损伤机理进行了分析。

参考文献：

[1] 潘晓旭，黄鹏飞，苏飞. Q345 钢和 H62 黄铜声发射信号及力学行为的关系研究[J]. 实验力学，2016，31(4)：431－439（PAN Xiaoxu，HUANG Pengfei，SU Fei. Relationship between acoustic emission signals and mechanical behavior of Q345 steel and H62 brass[J]. Journal of Experimental Mechanics，2016，31(4)：431－439（in Chinese））

[2] 王晓军，肖伟晶，陈辰，等. 基于声发射参量的不同深度灰岩塑性破坏识别研究[J]. 实验力学，2017，32(1)：107－112（WANG Xiaojun，XIAO Weijing，CHEN Chen，et al. Study on plastic damage identification of limestone with different depths based on acoustic emission parameters[J]. Journal of Experimental Mechanics，2017，32(1)：107－112（in Chinese））

[3] 钱骥，孙利民，蒋永. 高强钢丝断裂声发射试验研究[J]. 振动与冲击，2014，33(4)：54－59（QIAN Ji，SUN Limin，JIANG Yong. Experimental study on acoustic emission of high strength steel wire[J]. Vibration and Shock，2014，33(4)：54－59（in Chinese））

[4] 杨永杰，王德超，郭明福，等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(1)：98－104（YANG Yongjie，WANG Dechao，GUO Mingfu，et al. Study on rock damage characteristics based on triaxial compression acoustic emission test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(1)：98－104（in Chinese））

[5] 龙小江，李秋锋，何才厚，等. 不同拉伸速率下钢材损伤的声发射监测评价[J]. 振动与冲击，2017，36(7)：219－225（LONG Xiaojiang，LI Qiufeng，HE Caihou，et al. Study on acoustic emission monitoring of steel damage under different tensile rates[J]. Vibration and Shock，2017，36(7)：219－225（in Chinese））

[6] 李冬如，丁鹏，卢超. 基于 SVM 的碳纤维/环氧复合材料声发射源识别[J]. 无损检测，2014，36(6)：6－9（LI Dongru，DING Peng，LU Chao. Identification of acoustic emission sources of carbon fiber/epoxy composites based on SVM[J]. Nondestructive Testing，2014，36(6)：6－9（in Chinese））

[7] Droubi M G，Faisal N H，Orr F，et al. Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints[J]. Journal of Constructional Steel Research，2017，134：8－37.

[8] 纪洪广，刘翔宇，曾鹏，等. 高强混凝土单轴压缩声发射频率特征试验研究[J]. 应用声学，2016，35(3)：248－254（JI Hongguang，LIU Xiangyu，ZENG Peng，et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of high-strength concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Applied Acoustics，2016，35(3)：248－254（in Chinese））

[9] 张一辉，张文斌，许飞云，等. Q235B 钢板拉伸损伤实验的声发射特性[J]. 振动与冲击，2015，34(15)：156－161（ZHANG Yihui，ZHANG Wenbin，XU Feiyun，et al. Acoustic emission characteristics of Q235B steel plates tensile damage tests[J]. Journal of Vibration and Shock，2015，34(15)：156－161（in Chinese））

Experimental study on dynamic observation of acoustic emission source for mesoscopic damage of Q235 steel

ZHANG Ying[1], LI Yue[2], ZHOU Jun-peng[3], CHEN Xiao-long[2]

(1. Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 3. Daqing Oilfield Engineering Construction Co. Ltd, Daqing 163318, China)

Abstract: The mesoscopic damage process of metal materials is accompanied with the release of transient stress waves, which can be collected by acoustic emission testing technology. However, due to the lack of directly visual means, it is difficult to evaluate the mesoscopic damage of metal materials quantitatively by acoustic emission information. In this work, the SEMtester1000 in-situ tensile testing machine, MZ1000 microscope and PCI-2 acoustic emission detection system are combined to build up an experimental system for acoustic source dynamic observation. Taking the Q235 steel as an example, two typical acoustic emission sources including the slip of the crystals and the fracture of the inclusions are obtained, and the corresponding acoustic emission information is collected. The experimental results show that the slip of the crystals is a continuous process, and the complex slip activity produces multiple types of acoustic emission signals. The fracture of the inclusions is a transient process, which produces typical sudden acoustic emission signals. The comparison between the two sources reveals that the signal energy generated by the fracture of the inclusions is higher. Based on the results of acoustic emission signal analysis and image analysis, a model is established to describe the mesoscopic damage mechanism of the tensile process of Q235 steel.

Keywords: acoustic emission source; dynamic observation; image analysis; mesoscopic damage