

文章编号: 1001-4888(2016)04-0431-09

Q345 钢和 H62 黄铜声发射信号 及力学行为的关系研究^{*}

潘晓旭, 黄鹏飞, 苏飞

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 本文利用声发射装置采集了 Q345 钢和 H62 黄铜两种材料拉伸过程中的动态声信号。结果发现两种材料在线弹性阶段末端都会产生大量声发射信号, 但有明显屈服流动的 Q345 钢在硬化阶段的开始时段也会产生信号峰值。为了研究两种材料在拉伸变形过程中声发射的微观机制, 本文采用扫描电镜下原位拉伸实验方式观察了两种材料在不同拉应力下晶粒内部滑移线的产生和演变过程。在此基础上总结出了两种材料声发射信号与力学行为的关系, 指出应以第一次声发射信号的峰值对应的工作应力作为材料屈服应力及其合理性, 并按此标准给出 H62 黄铜的屈服应力为 193MPa。

关键词: 声发射信号; 塑性变形; 屈服强度; 位错滑移; 动态监测

中图分类号: O341

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-15-193

0 引言

声发射技术作为一种无损检测技术正在兴起, 其优点主要有: 动态实时、连续性和长期性、对原结构无影响、不受材料结构形状限制以及适于极端环境等^[1,2]。声发射装置收集的是材料内部由于局部突然间应力释放而产生的瞬态弹性波, 故而材料屈服或者断裂前局部缺陷会产生明显的声发射信号^[3]。许多学者已经对声发射在材料无损检测及微观损伤应用方面做出了积极探索。Han^[4]等发现 Q345 钢的声发射信号主要来源于位错的增殖和解钉。Vinogradov^[5]等在研究 Cu-Ge 合金时指出, 声发射源可能来自位错和孪生两种机制。Wadley^[6]等在铁素体钢冷却过程中的研究发现, 只有当铁素体微观结构尺寸超过 10 μ m 时, 塑性变形中声发射才能够被检测到。除此之外, 声发射源还可以来自腐蚀^[7,8]或者其他特殊机制^[9-11]。以上研究均对声发射发展起了推动作用, 但声发射技术仍然处在发展期, 声发射信号的相关机理及特征等仍有待于深入研究。

材料的屈服应力是一个重要的强度性能指标, 这一力学量的定义最初是基于有明显塑性流动现象的材料(如低碳钢), 而对于无此现象的材料往往是采用名义屈服应力^[12], 这种定义只是一种工程经验或者习惯, 实际上缺乏合理的科学依据。一般认为, 屈服现象在微观上是一种位错运动, 而已经有学者发现低碳钢材料在拉伸屈服时有声发射信号产生^[13,14], 这其中声发射信号的产生机理以及它可否作为材料屈服的判据, 并没有得到深入的研究。针对这一问题, 本文选用两种典型的工程材料(即 Q345 钢和 H62 黄铜, 前者有明显的塑性流动而后者没有), 研究它们在拉伸变形过程中声发射信号以及微观地貌的变化, 以期找出材料拉伸过程中的声发射信号规律及其微观机制, 特别是与塑性变形之间的关系。

^{*} 收稿日期: 2015-10-16; 修回日期: 2016-01-21

基金项目: 国家自然科学基金 11372024

通讯作者: 苏飞(1968—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 实验力学, 电子封装可靠性。Email: sufei@buaa.edu.cn

1 实验设备和方法

实验选取两种材料,即 Q345 钢和 H62 黄铜。每种材料分别制成两种尺寸的拉伸试件(每种材料,每种尺寸各 10 个,厚度均为 1.5mm),分别用于标准拉伸实验和扫描电镜下的原位拉伸实验,如图 1、图 2 所示(单位皆为 mm)。

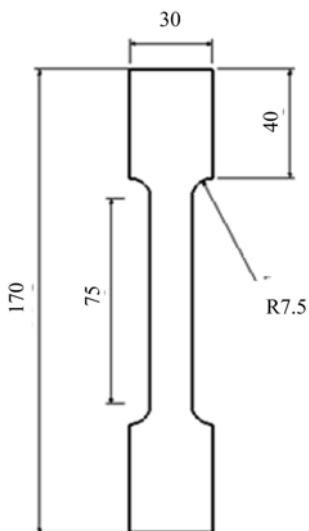


图 1 A 类试件尺寸

Fig. 1 Type A specimen configuration

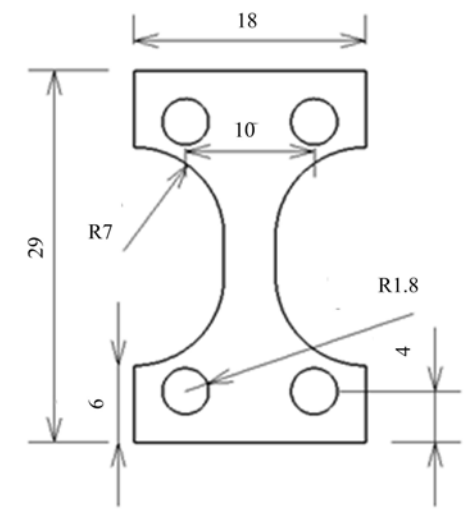


图 2 B 类试件尺寸

Fig. 2 Type B specimen configuration

A 类试件在微机控制 WDW100 拉伸试验机上进行拉伸实验(加载速度 1mm/min),同时利用美国物理声学公司 8 通道 PCI 2 声发射采集卡进行声发射在线监测,得到拉伸过程中拉伸曲线以及相应实时声发射信号。B 类试件表面抛光并做晶界腐蚀,然后置于 GATAN 公司 MICROTEST 动态拉伸试验台中,并在蔡司 EVO MA 15 扫描电镜下原位拉伸并动态观察晶粒的形貌变化,主要目的在于观察其微观结构在拉伸变形过程中的形态变化,探索材料的声发射信号和塑性变形发生的微观机理。

将两种实验结果进行关联,从中找出规律,做出判断,得到结论。

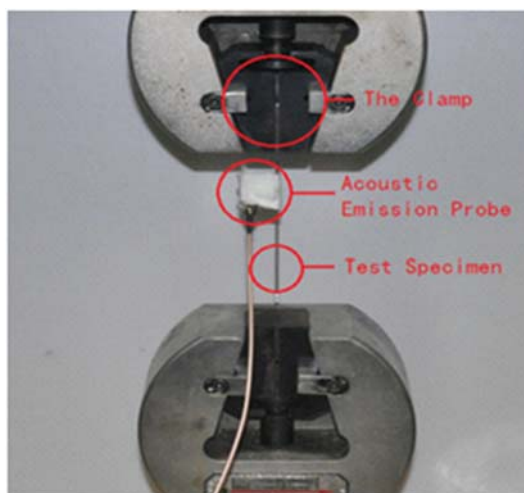


图 3 拉伸一声发射监测

Fig. 3 Tensile-acoustic emission monitoring

2 拉伸一声发射实验及结果

A 类试件的拉伸一声发射监测如图 3 所示,声发射统一设置参数:前置放大器增益 40dB,带通滤波 1kHz~3MHz, PDT, HDT, HLT 分别为 300 μ s, 600 μ s, 1000 μ s。采用 WSa SNAC66 探头(操作频率 100~1000kHz,谐振频率 125~650kHz)采集声发射信号。

2.1 噪声的排除

拉伸实验过程中,主要的噪声来自于外界噪声以及夹具和试验机噪声。为了排除噪声对真实信号的干扰,主要有两个途径:其一是调高声发射阈值,其二是识别噪声信号和有用信号。对第一种方法进行实验,我们发现即使阈值高达 48dB,噪声信号仍然不能消失,而此时有用信号也会大量被排除,因此通过调高阈值很难有效消除噪声。为此,我们采取第二种方法排除噪声。即对每个试验件首先采集不施加拉伸载荷的静态信号(此时信号为纯外界噪声以及系统白噪声),通过适当调高阈值可以消除这部分噪声(阈值高于 40dB,此部分噪声消除)。之后加载拉伸,采集开始拉伸(弹性阶段,根据现有理论,此阶段无声发射信号)阶段能量信号并与声发射能量信号明显增大阶段对比,发现两者有明显区别,如图 4。可以看出噪声波形每隔较长时间就有一个大脉冲,且频率十分分散,无明显峰值。这是通过大量的试件以及大量的数据点分析得到的,因此可以区分噪声信号。基于以上实验,将阈值定为 40dB,既能有效消除外界噪声和白噪声,也能尽量多地收集有用信息,同时通过波形和快速傅里叶分析排除噪声。

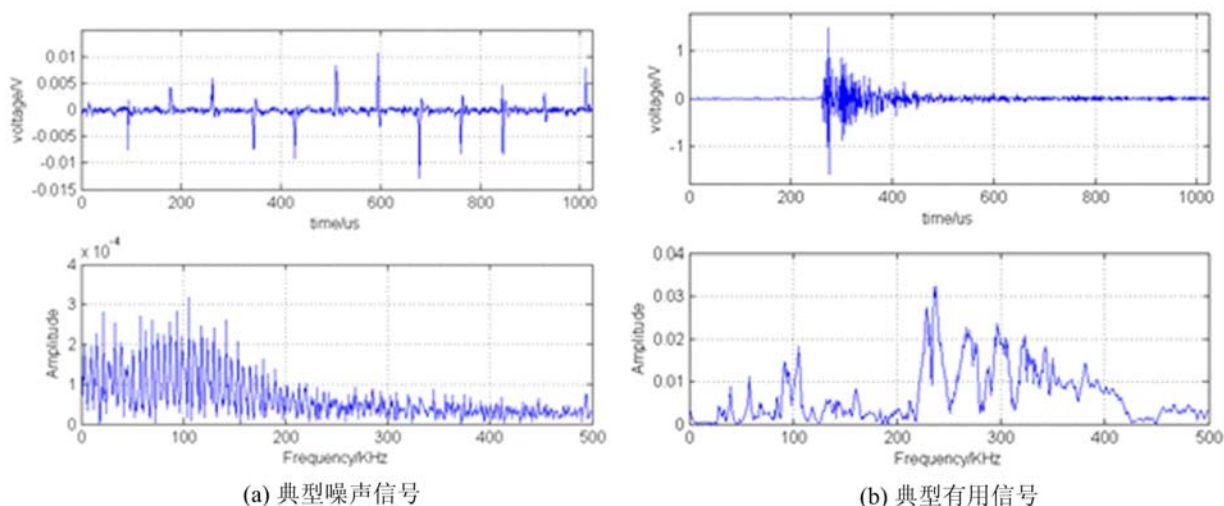


图4 噪声信号的识别

Fig. 4 Identification of noise signal

2.2 Q345 钢实验结果

典型实验结果如图 5 所示(阈值 40dB)。

可以看到,声发射能量信号图中,在屈服初始和硬化初始阶段能量信号迅速增大,且在屈服后期和硬化后期都出现了明显的衰减,最终与弹性阶段信号相近(可视为噪声)。说明拉伸初始,试件内部并没有声发射信号产生,随着材料进入屈服,开始产生大量声发射信号,并在屈服后段衰减;随着材料继续拉伸进入硬化阶段,声发射信号又开始大量释放,并缓慢衰减。分别取初始屈服点和初始硬化点附近的声发射振铃信号并进行 FFT 变换,得到图 6 所示的频谱结果。分析可知,这两处的声发射信号均为典型的突发型信号,且频率范围在 0~500kHz 之间非常分散。

2.3 H62 黄铜实验结果

典型实验结果如图 7 所示(阈值 40dB)。

黄铜的拉伸曲线没有明显的屈服阶段,但在拉伸过程中同样会产生非常明显的声发射信号。在拉伸曲线发生转折之前,声发射能量信号出现了明显增大,并且信号成拱形,能量信号在短时间内又迅速

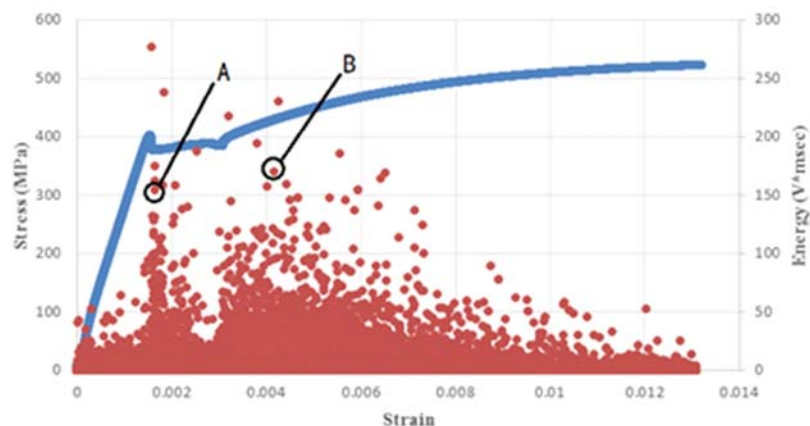


图 5 Q345 钢声发射信号图

Fig. 5 Acoustic emission signal of Q345 steel

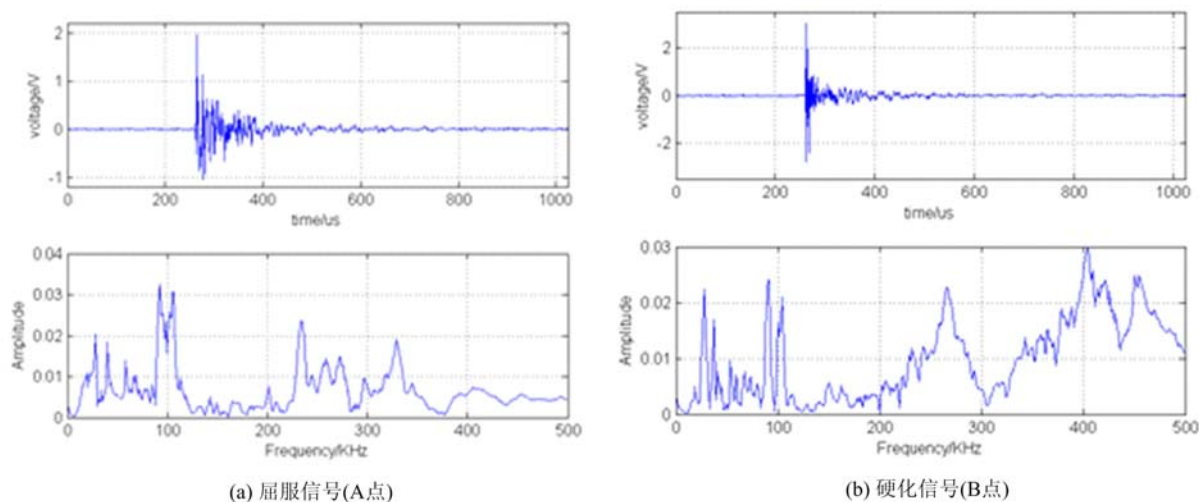


图 6 Q345 钢声发射信号波形及频谱图

Fig. 6 Signal waveform and spectrum of Q345 steel

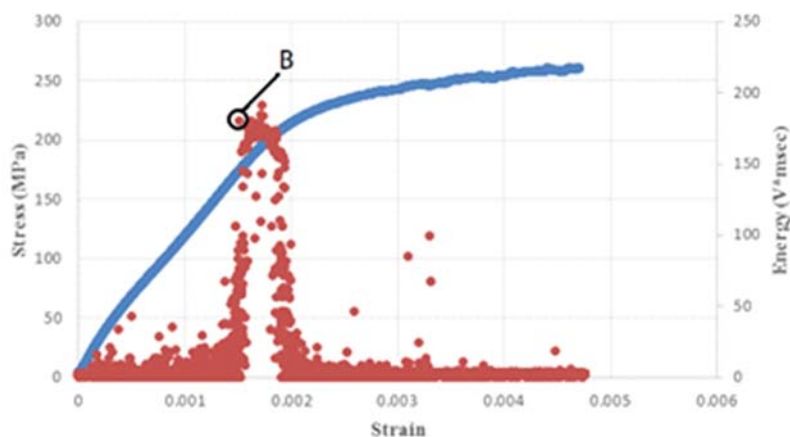


图 7 H62 黄铜拉伸过程中的声发射信号

Fig. 7 Acoustic emission signal of H62 brass alloy

衰减。有趣的是,在能量信号很大的阶段,原来的噪声信号消失不见被“屏蔽”掉了。为了说明声发射能量信号在何时发生明显突变增大,对新的试件贴应变片进行拉伸。在没有明显声发射能量信号增大时卸载至 0,发现没有残余应变;之后拉伸中在声发射信号刚开始突变大时卸载至 0,利用应变片检测到

了残余应变(约为 $662\mu\epsilon$)，证明此时已经发生了传统意义上的塑性变形，即在黄铜刚开始发生塑性变形时产生了明显的声发射能量信号。在信号的峰值点附近采集振铃信号并进行 FFT 分析，得到如图 8 所示的结果。可以看到信号是连续型声发射信号，且频率峰值集中在 $200\sim 300\text{kHz}$ 。

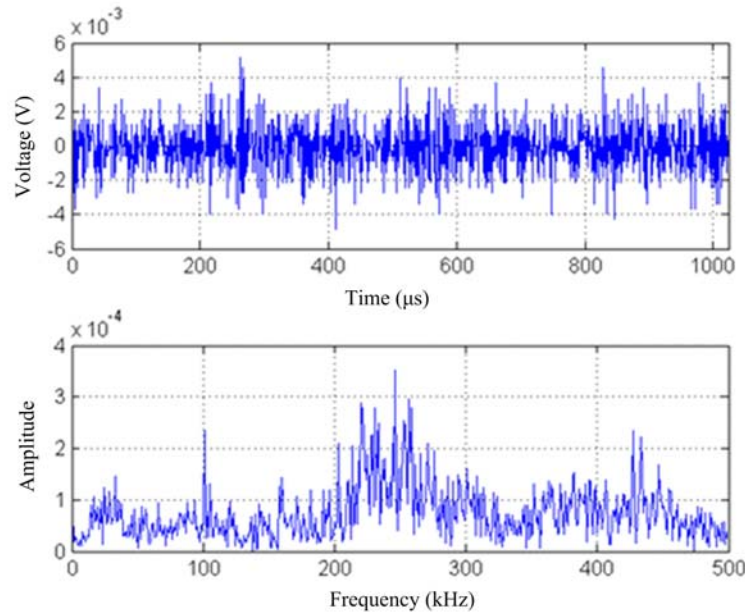


图 8 H62 黄铜信号波形及频谱图

Fig. 8 Signal waveform and spectrum of H62 brass alloy

3 原位拉伸实验及结果

试件在进行原位拉伸前进行了抛光和腐蚀处理，得到两种材料的晶粒结构如图 9 和图 10 所示，可以看出黄铜晶粒远大于 Q345 钢，且形状较为规则，晶界较为平直。

试件在拉伸台上的夹持方式如图 11 所示。

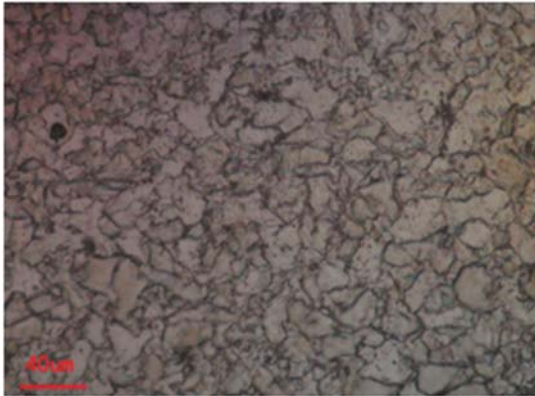


图 9 Q345 钢金相

Fig. 9 The metallurgical structure of Q345 steel

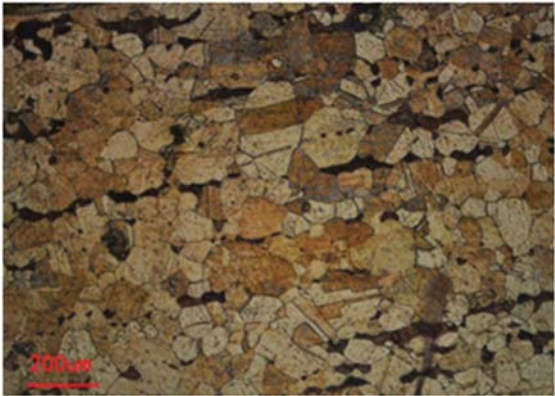


图 10 黄铜金相

Fig. 10 The metallurgical structure of H62 brass alloy

3.1 Q345 钢原位拉伸实验结果

拉伸变形过程中 Q345 晶粒的形态变化如图 12 所示。在 360MPa 以下，晶粒尺寸以及形态没有明显变化，而 400MPa 以后，晶粒内部出现大量滑移线/带，晶粒尺寸和方位都发生了较大变化，且当载荷完全卸载后，晶粒的残余变形十分明显。

3.2 H62 黄铜原位拉伸实验结果

不同载荷下黄铜晶粒的形态变化如图 13 所示。

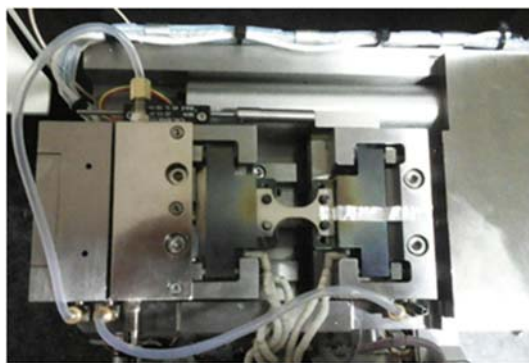


图 11 B 类试件夹持方式

Fig. 11 The fixation of type B

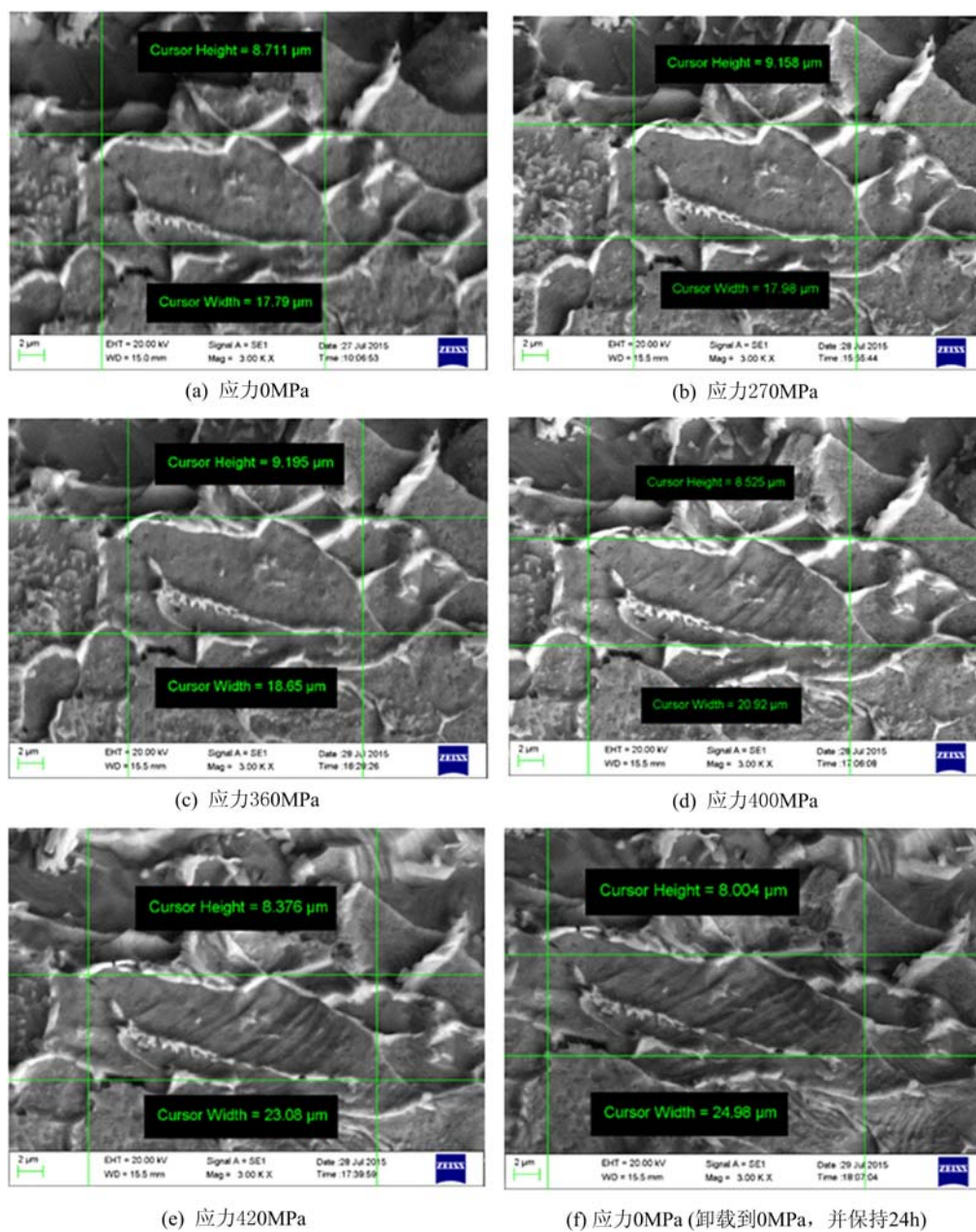


图 12 Q345 钢不同载荷下同一晶粒的形态变化

Fig. 12 The same grain under different loads of Q345 steel

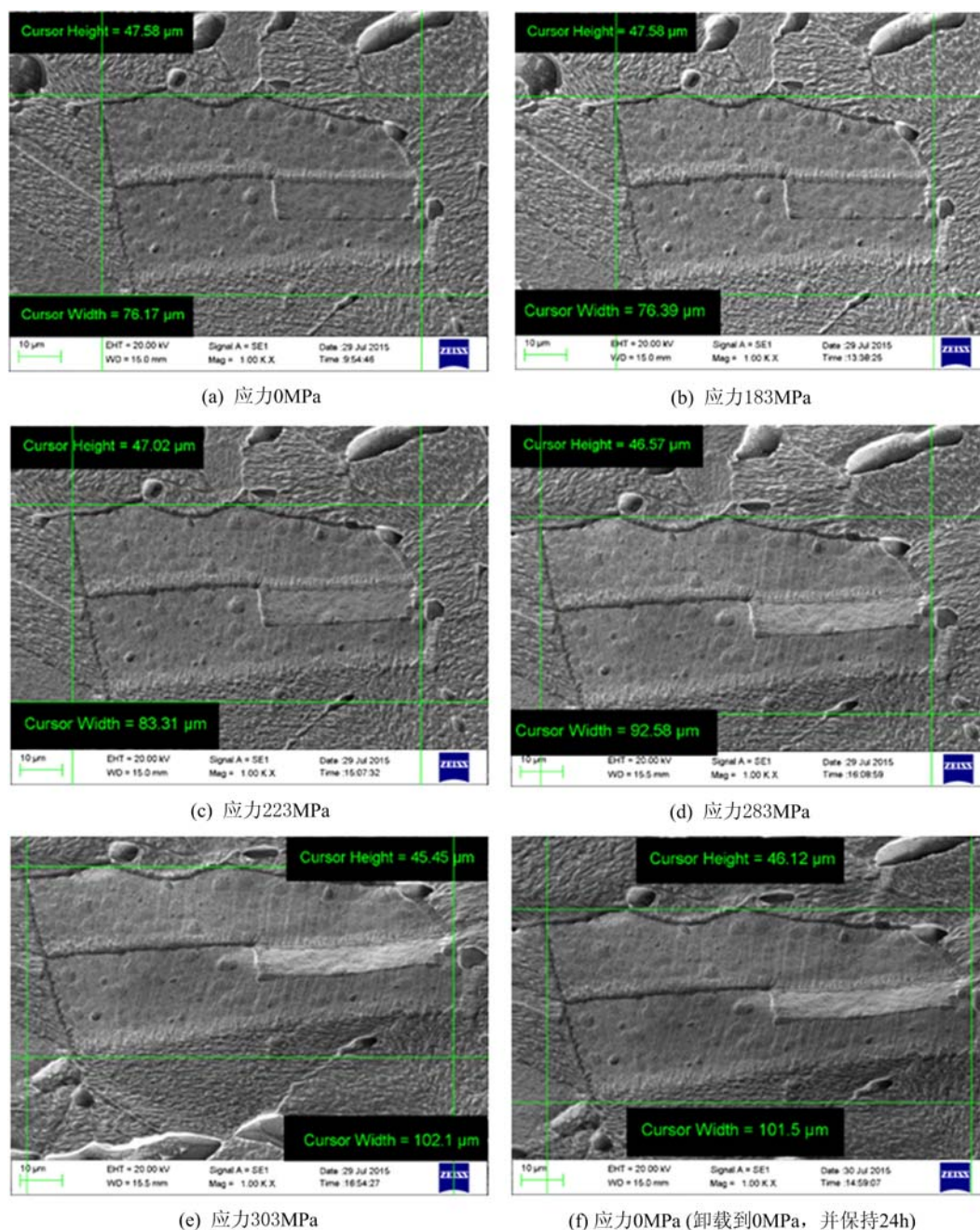


图13 H62 黄铜不同载荷下同一晶粒的形态变化

Fig. 13 The same grain under different loads of H62 brass alloy

与 Q345 的晶粒在拉伸过程中的形态变化类似,黄铜的晶粒在 183MPa 以下时,晶粒尺寸以及形态没有明显变化,而 223MPa 以后,晶粒内部出现大量滑移线/带,晶粒尺寸发生了较大变化,当载荷完全卸载后,晶粒的残余变形也十分明显。

4 讨论与解释

通过声发射实验结合电镜下的原位拉伸加载实验观察,可以发现:两种材料在拉伸过程中都出现了声发射信号,但特征不同。Q345 钢有两次明显的声发射能量信号,第一次出现在屈服刚发生时,另一次出现在强化阶段开始时。而 H62 黄铜只有一次明显的声发射能量信号,且该信号成“拱形”,在该信号发生时,低能量噪声信号被“屏蔽”消失不见。利用应变片结果可知,声发射能量信号明显变大时,H62 黄铜试件刚好产生塑性变形。

根据图 5 中的曲线可知, Q345 钢屈服强度为 375MPa, 且在该时刻产生了明显的声发射能量信号; 随后小试件电镜下原位拉伸显示, 当应力在 360~400MPa 之间时, 试件产生了明显的滑移线, 即发生了屈服。考虑到试件的尺寸效应(小试件的强度要普遍略大于大试件的强度), 可以验证, 在试件产生滑移线即屈服时, 相应声发射能量信号明显变大。同理, 对于 H62 黄铜试件, 电镜下小试件原位拉伸显示, 滑移线出现在 183~223MPa 之间, 证明此期间发生了塑性变形。而图 7 拉伸一声发射实验结果显示, 在应力为 193MPa 时, 声发射能量信号达到峰值, 再考虑到试件尺寸效应, 可以知道, 在 H62 黄铜产生塑性变形时, 声发射能量信号达到峰值(应变片的结果同样可以验证)。从而证明了利用声发射信息来判断无明显塑形流动材料的屈服应力是科学合理的: 即如果材料在拉伸过程中产生了明显的声发射能量信号, 那么证明该时刻恰好发生了塑性变形, 也即发生了屈服。并由此给出 H62 黄铜的屈服应力 193MPa(相应的名义屈服应力 240MPa), 显然以声发射信号的产生为屈服判据的结果偏于保守, 两者的相对误差约为 24.35%。

观察图 12 和图 13 中的原位拉伸过程发现, 滑移线/带只出现在晶粒内部, 终止于晶界, 且不同晶粒内的滑移线/带方向不尽相同, 同一晶粒内也有不同方向的滑移线/带。这是由于材料内部总存在着原始缺陷, 在承受外力时, 缺陷沿阻力小的方向扩展, 而晶界处由于原子排列不规则, 常温下晶界的存在会对位错滑移起阻碍作用, 因此滑移线/带只出现在晶粒内部而止于晶界。对于伴随滑移线产生的声发射能量信号, 可以推测大量同时发生的位错滑移在材料内部造成声波的传播, 当其能量足够大时被声发射传感器捕捉而成为声发射信号的来源。声发射信号这种来源, 可以用来解释图 6 与图 8 中两种材料频谱图的差别, 由于 Q345 钢晶粒细碎且数量多、晶界形状各异, 拉伸中滑移线在多个不同晶粒产生, 方向各异, 因此频率有多个峰值; 而 H62 黄铜的晶界平直整齐且晶粒较大, 相对于 Q345 钢, 滑移产生较少, 导致频率峰值带窄且集中。

通过图 5 和图 7 的对比可知, Q345 钢拉伸曲线有明显的屈服平台而 H62 黄铜则没有。除了碳原子的钉扎作用之外, 我们根据图 9 和图 10 中的金相图以及拉伸过程中的晶粒变化, 尝试给出另一种解释, 即: 塑性流动是晶粒内部滑移现象的宏观体现, 相对于晶界平直整齐晶粒较大的 H62 黄铜, Q345 材料的晶粒细碎且晶界形状各异, 沿拉力方向发生滑移的机会远大于黄铜, 因此才有明显塑性流动现象。

5 结 论

从上述实验结果分析与讨论, 可以得出以下结论:

(1) 无论对于有无明显塑形流动的金属材料, 都可以采用声发射办法监测其塑性变形的发生, 以声发射信号出现第一次峰值作为材料屈服的判据比较科学、合理。由此给出 H62 黄铜的屈服应力为 193MPa。

(2) 两种材料屈服时的声发射信号来自于晶粒内部的位错运动(滑移)。大量同时发生的位错在材料内部造成声波的传播, 当其能量足够大时被声发射传感器捕捉而成为声发射信号的来源。

(3) 两种材料发生塑性变形时, 晶粒被拉长且无法恢复, 即晶粒形状的改变是材料宏观塑性变形的重要微观机制。

(4) 塑性流动是晶粒内部滑移现象的宏观体现, 相对于 H62 黄铜, Q345 材料的晶粒细碎且数量多, 沿拉力方向发生滑移的机会远大于黄铜, 因此才有明显塑性流动现象。

(5) 晶粒细碎、晶界复杂的材料产生的声发射信号频率更加分散, 有多个频率峰值。

但有些问题通过上述实验结果仍然很难解释, 如 Q345 在强化开始阶段与屈服开始阶段的声发射信号在来源或者说微观机制上的异同, 以及 H62 声发射信号的特征与 Q345 明显不同(前者能量信号有一段无低能量噪声信号阶段), 这是否与其微观结构的不同有关, 两者之间存在怎样的联系?

以上问题的研究需要借助于更先进的研究手段, 例如透射电镜下的原位拉伸等, 我们将在后续的研究中逐步开展这些工作。

参考文献:

- [1] Hardy H R J. Acoustic emission microseismic activity[M]. Britain: Taylor and Francis, 2003.

- [2] Bill R C, Frederick J R, Felbeck D K. An acoustic emission study of plastic deformation in polycrystalline aluminium [J]. *Journal of Materials Science*, 1979, 14(1):25–32.
- [3] Tandon K N, Tangri K. Acoustic emissions during deformation of polycrystalline silicon-iron [J]. *Materials Science and Engineering*, 1975, 20:47–54.
- [4] Han Zhiyuan, Luo Hongyun, Wang Hongwei. Effects of strain rate and notch on acoustic emission during the tensile deformation of a discontinuous yielding material [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(13–14):4372–4380.
- [5] Vinogradov A, Merson D L, Patlan V, et al. Effect of solid solution hardening and stacking fault energy on plastic flow and acoustic emission in Cu-Ge alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, 341(1):57–73.
- [6] Wadley H N G, Scruby C B. Cooling rate effects on acoustic emission-microstructure relationships in ferritic steels [J]. *Journal of Materials Science*, 1991, 26(21):5777–5792.
- [7] Bolotin V V, Shipkov A A. Mechanical aspects of corrosion fatigue and stress corrosion cracking [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, 38(40):7297–7318.
- [8] Winkler S L, Flower H M. Stress corrosion cracking of cast 7XXX aluminium fibre reinforced composites [J]. *Corrosion science*, 2004, 46(4):903–915.
- [9] Hazeli K, Cuadra J, Vanniamparambil P A, et al. In situ identification of twin-related bands near yielding in a magnesium alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(1):83–86.
- [10] Bentahar M, El Guerjouma R. Monitoring progressive damage in polymer-based composite using nonlinear dynamics and acoustic emission [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(1):EL39.
- [11] Sause M G R, Gribov A, Unwin A R, et al. Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(1):17–23.
- [12] 单祖辉. 材料力学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2010:24–30 (SHAN Zuhui. *Mechanics of materials* (3rd ed)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010:24–30 (in Chinese))
- [13] Meysam Akbari, Mehdi Ahmadi. The application of acoustic emission technique to plastic deformation of low carbon steel [J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(1):795–801.
- [14] Merson E, Vinogradov A, Merson D L. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 645(1):460.

Study on the Relationship between Acoustic Emission Signals and Mechanical Behavior of Q345 Steel and H62 Brass Alloy

PAN Xiao-xu, HUANG Peng-fei, SU Fei

(School of Aeronautical and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, acoustic emission (AE) device was used to acquire the dynamic AE signals of Q345 steel and H62 brass alloy respectively during tensile deformation process. It is found that a large number of AE signals are generated at the end of linear elastic stage of both materials. But Q345 steel which has obvious yield flow presents another AE signal peak at the beginning of hardening stage. In order to study AE microscopic mechanism of both materials during tensile deformation, scanning electron microscope (SEM) was used for in-situ tensile experiment, the formation and evolution of crystal grain internal glide line under different tensile stresses was observed. Based on above results, relationship between acoustic emission signals and mechanical behavior of both materials was summarized. It is pointed that the working stress corresponding to the peak value of first AE signal should be taken reasonably as yield stress of the material. According to this standard, the yield stress of H62 brass alloy is 193MPa.

Keywords: acoustic emission signal; plastic deformation; yield strength; dislocation glide; dynamic monitoring