

Effects of Ausforming on Microstructure and Damping Capacity of Fe-Mn Alloy

Jin Teng¹, Ning Li¹, Wei Li¹, Yu-hua Wen¹, Shu-ke Huang²

¹School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan, China, 610065

²Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900

Email: tengjin_8888@163.com

Abstract: The effects of pre-deformation at different temperatures on microstructure and damping capacity of Fe-Mn alloy have been studied. The microstructure was observed using optical microscope and TEM. The damping capacity was measured using reversal torsion pendulum with free decay method. The results showed that when deformed at R.T., the damping capacity of Fe-Mn alloy increased with the increasing deformation, and reached the maximum at 4% deformation. The ausforming deteriorated the damping capacity of Fe-Mn alloy. And with the deformation increasing, the damping capacity of Fe-Mn alloy decreased constantly. The right amount of deformation is benefit to the damping capacity of Fe-Mn alloy due to the increasing of stacking faults when the deformation temperature is blow the A_s temperature. But when the deformation temperature is higher than A_f temperature, the formation of grid-like ϵ -martensite reduced the mobility of the damping sources of Fe-Mn alloy, and the damping capacity decreased significantly.

Keywords: ausforming; Fe-Mn damping alloy; damping capacity; ϵ -martensite; stacking fault

奥氏体预变形对 Fe-Mn 阻尼合金组织及性能的影响

滕劲¹, 李宁¹, 黎为¹, 文玉华¹, 黄姝珂²

¹四川大学制造科学与工程学院, 四川成都, 中国, 610065;

²中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川绵阳, 中国, 621900

Email: tengjin_8888@163.com

摘要: 研究了不同温度预变形对 Fe-Mn 阻尼合金组织和性能的影响。通过光学显微镜和透射电镜观察合金的微观组织, 倒扭摆测试合金的阻尼性能。结果表明, 室温变形时, 随着变形量的增加, 合金的阻尼性能逐渐增大, 变形量为 4% 达到最大; 300°C (奥氏体状态) 变形严重恶化合金的阻尼性能, 且随着变形量的增加, 阻尼性能持续降低。变形温度低于合金的 A_s 温度时, 适量的变形增加了合金的层错数量, 从而提高了其阻尼性能; 而变形温度超过 A_f 温度时, 由于交叉程度严重的网格状马氏体的形成, 降低了阻尼源的移动性, 减少了有效的阻尼源界面, 进而恶化合金阻尼性能。

关键词: 奥氏体预变形; Fe-Mn 阻尼合金; 阻尼性能; ϵ 马氏体; 层错

1 引言

阻尼合金是一类兼具优良机械性能与阻尼性能的结构功能一体化材料。采用阻尼合金代替传统结构材料制作成的振动源零部件, 有望从根本上达到减振降噪的目的。阻尼合金根据阻尼机制的不同可分为: 复相型 (灰铸铁、Zn-Al 等)、孪晶型 (Mn-Cu、Ni-Ti、Cu-Zn-Al 等)、铁磁型 (Fe-Cr、Fe-Al 等)、位错型 (Mg-Zr) 以及 Fe-Mn 合金。其中, 复相型合金阻尼

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (50901069); 教育部科学技术研究重点项目 (107093); 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金 (MSV-2009-11)

性能整体偏低; 位错型 Mg 合金强度极低; 孪晶型阻尼合金使用温度低, 一般在室温以下具有最好的阻尼性能; 而铁磁型阻尼合金则受磁场和应力影响很大。Fe-Mn 合金在几类阻尼合金中的强度最高 (抗拉强度大于 700MPa)、价格最低 (仅为 MnCu 合金的 1/4), 且使用温度高 (大于 300°C), 振动越强减振性能越好^[1-3]。正是由于这些特点使得 Fe-Mn 合金具有广阔的应用前景。

目前, 关于 Fe-Mn 合金的研究主要集中在阻尼机制^[4,5]上。韩国学者 Jee 等^[5]把 Fe-Mn 合金的高阻尼性能归结为合金中的四种界面 (ϵ 马氏体变体界面、 γ 奥氏体

内层错界面、ε马氏体内层错界面及ε/γ界面)的滑移摩擦引起。通过合金元素的加入^[6]、冷轧变形^[7,8]、冷热训练^[9]、热机械训练^[10]等方法可以改善上述阻尼源界面的数量和排列,提高合金的阻尼性能。在Fe-Mn-Si基形状记忆合金的研究中,奥氏体高温变形处理是一种有效提高形状记忆效应的方法,其原理在于:变形使得奥氏体基体中形成了大量细小的、有一定取向的层错和位错作为应力诱发马氏体的核心^[11]。而层错是Fe-Mn合金的主要阻尼源之一,所以通过奥氏体高温变形也有望改变合金内层错数量及分布,进而影响合金的阻尼性能。但目前并未见到相关的研究报道。另外,阻尼合金作为构件使用必须经过适当的成型工艺过程,如冷、热加工等。热锻、热轧等热加工过程因变形抗力低,利于零件成形,在材料成型过程中应用广泛,研究其对合金阻尼性能的影响也具有明显的工程意义。所以,本文考察了不同温度变形后Fe-Mn合金性能的改变,为Fe-Mn合金的工程应用提供基础数据。

2 实验材料及方法

实验合金以工业纯铁、电解锰为原料,在ZG-25A型真空感应电炉内熔炼,铸锭经过1150℃×24h均匀化处理,在1100℃热锻成φ15mm的圆棒,经3次旋锤成φ3.5mm的棒,最后冷拉成φ1mm的丝材,中间退火温度800℃。实验合金的化学成分为Fe-19.35Mn-0.015C(wt%)。合金相变点采用德国耐驰DSC204差示扫描量热仪进行测量,结果为:Ms=152℃,As=202℃,Af=214℃。

实验丝材经过1000℃×1h水冷处理后,在带环境箱的万能试验机上进行不同温度下的拉伸变形,变形速度2mm/min。阻尼性能测试采用JN-1型葛氏倒扭摆,自由衰减法,测试频率1Hz,丝材表面扭转应变振幅 γ_{max} 和对数衰减率 δ 的计算公式如下^[11]:

$$\gamma_{max(n)} = \frac{r}{l} \times \varphi_n \quad (1)$$

$$\delta = \ln\left(\frac{\gamma_{max(n)}}{\gamma_{max(n+1)}}\right) = \ln\left(\frac{\varphi_n}{\varphi_{n+1}}\right) \quad (2)$$

其中, φ_n 和 φ_{n+1} 分别为第n和n+1次振动时的振幅(角度);r为丝材半径(0.5mm);l为丝材标距(100mm)。

金相试样经10% HClO₄+90% CH₃COOH 电解抛光后,在1.2%的K₂S₂O₅水溶液中浸蚀,微观组织观察在OLYMPUS-CK40M显微镜进行。采用H-700H

型透射电子显微镜观察合金的层错等微观结构,双喷电解液为10% HClO₄+90%乙醇。

3 实验结果

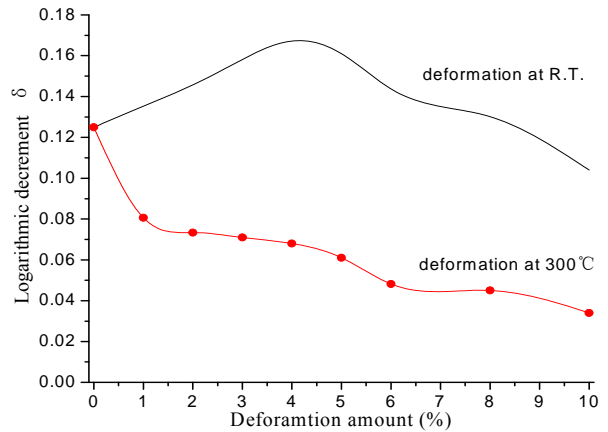


Fig. 1 Effect of deformation on damping capacity of Fe-Mn alloy
图1 不同温度下变形量对 Fe-Mn 合金阻尼性能的影响

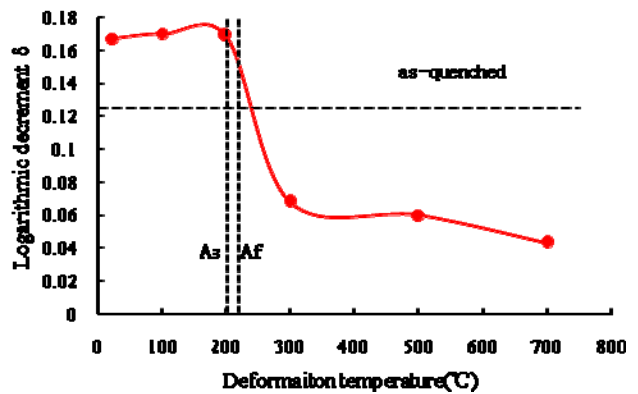


Fig. 2 Effect of deformation temperature on damping capacity of Fe-Mn alloy
图2 变形温度对 Fe-Mn 合金阻尼性能的影响 (变形量为4%)

图1是不同变形温度条件下,变形量对Fe-Mn合金阻尼性能的影响。从图可以看出,室温变形时,合金阻尼性能随着变形量的增加而增加,变形量为4%时达到最佳。随着变形量的进一步增加,合金阻尼性能反而降低。而变形温度为300℃时,即使小的变形都会严重恶化合金的阻尼性能,并且随着变形量的增加,合金阻尼性能呈现逐渐递减的趋势。

图2是变形温度对Fe-Mn合金阻尼性能的影响。从图中可以看出,当变形温度低于合金的As温度,4%的变形量都有利于合金的阻尼性能;当变形温度超过合金的Af温度,变形都使得合金阻尼性能降低,且随着变形温度的升高,合金的阻尼性能逐渐降低。

图3是Fe-Mn合金不同状态的金相照片,其中白色为ε马氏体。由于自协调作用,固溶态试样马氏体

片排列规则，呈三角形，如图中 (a) 所示。室温变形 4% 后，合金的马氏体形态无明显改变，只是有少量 α' 马氏体的出现在 ϵ 马氏体片中间。而室温变形 8% 后，合金中 ϵ 马氏体更加粗大，同时有大量的 α' 马氏体产生。当变形温度超过 A_f 温度后，合金中 ϵ 马氏体沿拉

伸方向呈网格状排列，马氏体之间相互交叉程度极为严重，且变形温度越高，变形量越大，这种交叉程度越严重。图 4 是 Fe-Mn 合金的 TEM 照片，可以看出，奥氏体预变形后，合金中层错数量明显增多。

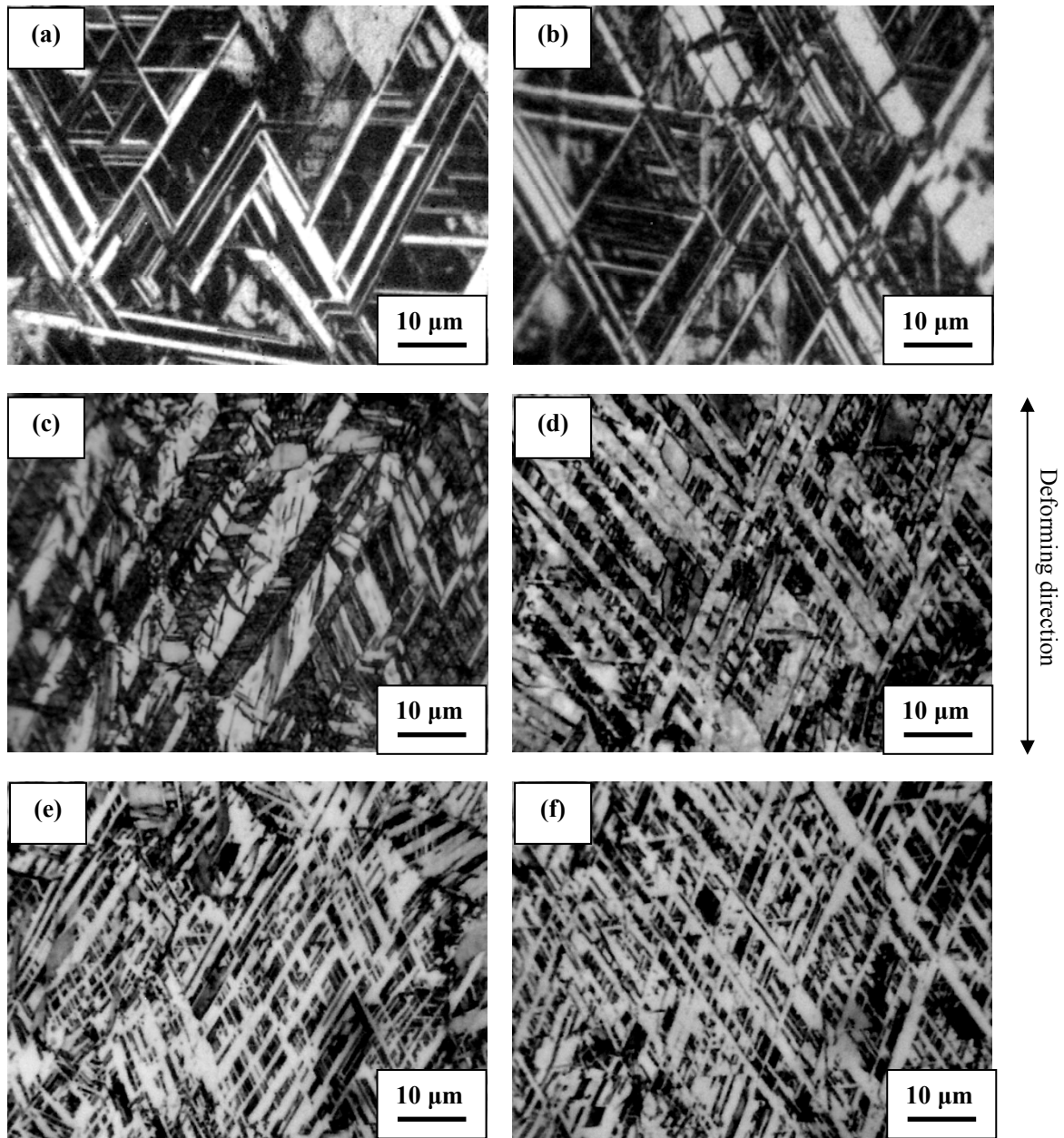


Fig. 3 Microstructure of Fe-Mn alloy: (a) as-quenched, 4%(b) and 8%(c) deformation at R.T., 4% deformation at 300°C(d) and 700°C(e), (f) 8% deformation at 300°C

图 3 Fe-Mn 合金的金相照片 (a) 固溶, (b) 室温变形 4%, (c) 室温变形 8%, (d) 300°C 变形 4%, (e) 700°C 变形 4%, (f) 300°C 变形 8%

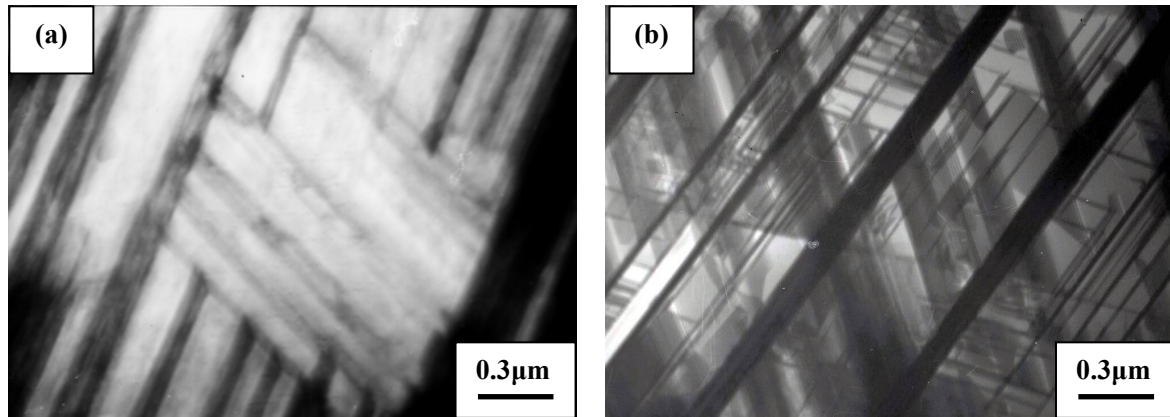


Fig. 4 TEM of Fe-Mn alloy: (a) as-quenched, (b) 4% tensile deformation at 300°C.

图 4 Fe-Mn 合金 TEM 照片 (a) 固溶态, (b) 300°C 变形 4%

4 分析讨论

Fe-Mn 合金的高阻尼性能被普遍认为与合金内的 ϵ 马氏体密切相关。韩国学者把阻尼源界面归结为以下四个部分^[5]: ϵ 马氏体变体界面、 γ 奥氏体内层错界面、 ϵ 马氏体内层错界面和 ϵ/γ 界面。影响合金阻尼性能的主要因素包括了上述阻尼源界面的数量以及形态分布。但是这种观点解释不了合金在高于 A_f 温度 (奥氏体状态) 仍具有良好得阻尼性能, 同时关于这些阻尼源界面的具体运动方式也不清楚。由于上述四种界面归根结底都属于层错界面, 因此, 黄姝珂^[4]等人研究认为, 在弹性应力作用下, Fe-Mn 合金内的层错及 Shockley 不全位错的脱钉运动是引起其高阻尼性能的本质。

室温下变形对 Fe-Mn 合金的影响主要表现为应力诱发层错、应力诱发 ϵ 马氏体、 ϵ 马氏体转变为 α' 马氏体以及全位错的滑移。在前期的研究中^[4], 我们发现这种 Fe-Mn 合金固溶处理后 ϵ 马氏体含量高达 93%, 所以在此认为变形对 ϵ 马氏体的含量影响不大。当变形量小于 4% 时, 应力诱发层错占主导作用, 最终导致合金阻尼性能的提高; 而当变形量超过 4% 后, 由于 α' 马氏体在 ϵ 马氏体中的大量形成 (如图 3c 所示) 以及全位错的滑移都会将层错分割成小段, 并阻碍其移动, 进而降低合金的阻尼性能 (图 1)。变形温度低于合金 A_s 温度, 由于并未发生 $\epsilon \rightarrow \gamma$ 相变, 合金状态与室温一致, 所以此时适量的变形都是有利于合金的阻尼性能 (如图 2)。

变形温度超过合金的 A_f 温度时, 由于处于全 γ 奥氏体状态, 变形会在合金内形成大量细密的、且具有一定取向的层错和位错作为 ϵ 马氏体形核的核心。与文献^[11]中 Fe-Mn-Si 基形状记忆合金奥氏体预变形

相比, 由于缺少了 Si 等元素对奥氏体基体的强化作用, 变形在 Fe-Mn 合金中产生的层错和位错沿拉伸呈现严重的交叉状, 以此形核就造成了网格状 ϵ 马氏体的形成 (图 3d 和 e)。虽然此时合金内部的层错数量与固溶态相比明显增加 (图 4), 但由于马氏体的交叉穿越, 层错的相互分割, 并形成网状结构, 互相形成强钉扎, 使得阻尼源界面更加难以发生运动, 明显降低了合金阻尼性能。随着奥氏体高温变形量的增大, 马氏体的交叉程度也就越严重 (图 3f), 合金的阻尼性能就越低。

5 结论

(1) 变形温度低于 Fe-Mn 合金的 A_s 温度时, 适量的变形 (4%) 增加了合金中层错数量, 提高合金的阻尼性能。但是当变形量过大 (超过 4%) 时, 由于 α' 马氏体及全位错的滑移阻碍了阻尼源界面的运动, 导致合金阻尼性能的逐渐降低。

(2) 奥氏体高温预变形后, 由于网格状 ϵ 马氏体的产生, 相互交叉并分割阻尼源界面, 形成强钉扎, 使得阻尼源界面难以移动, 阻尼性能大幅度降低。且变形量越大, 马氏体的交叉穿越程度越严重, 合金的阻尼性能越低。

(3) 根据上述实验结果, 建议 Fe-Mn 合金的成型工艺为低于合金 A_s 温度形变 4%, 如在奥氏体状态下加工后, 必须经过高温退火以消除网格状马氏体, 获得良好的阻尼性能。

6 致谢

感谢国家自然科学基金青年基金 (50901069); 教育部科学技术研究重点项目 (107093); 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金。

(MSV-2009-11) 对本文的支持。另外, 感谢中国核动力院、西南交通大学对本文性能测试及组织分析等工作的支持。

References (参考文献)

- [1] Baik S H, Kim J C, Han D W, et al. [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 438-440:1101-1105.
- [2] Baik S H. [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 198:241-252.
- [3] Huang S K, Li N, Wen Y H, et al. [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 455:225-230.
- [4] Huang S K, Wen Y H, Li N, et al. [J]. Materials Characterization, 2008, 59(6):681-687.
- [5] Jee K K, Jang W Y, Baik S H, et al. [J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 273-275:538-542.
- [6] Jun J H, Kong D K, Choi C S. [J]. Materials Research Bulletin, 1998,33(10):1419-1425.
- [7] Jun J H, Choi C S. [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30A:667-670.
- [8] Lee Y K, Baik S H, Kim J C, et al. [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003,355: 10-16.
- [9] Watanabe Y, Sato H, Nishino Y, et al. [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 521-522:376-379.
- [10] Watanabe Y, Sato H, Nishino Y, et al. [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 490:138-145.
- [11] Defa Wang, Daozhi Liu, Zhizhong Dong, et al. [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 315:174-179.