

环境温度及外磁场对 Fe-13Cr-2.5Mo 合金阻尼性能的影响

Effects of Ambient Temperature and Magnetic Field on Damping Capacity of Fe-13Cr-2.5Mo Damping Alloy

胥永刚^{1,3}, 李 宁¹, 于学勇¹, 沈保罗², 邱绍宇³, 邹 红³

(1 四川大学材料成型系, 成都 610065; 2 四川大学金属材料系, 成都 610065;

3 中国核动力研究设计院, 成都 610041)

XU Yong-gang^{1,3}, LI Ning¹,

YU Xue-yong¹, SHEN Bao-luo², QIU Shao-yu³, ZOU Hong³

(1 Institute of Manufacturing Science and Engineering,

Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2 Institute of Material Science and Engineering,

Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3 Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

摘要: 在环境温度和外磁场变化的条件下用改进的倒扭摆内耗仪分析了 Fe-13Cr-2.5Mo 合金的阻尼性能, 用扫描电子显微镜分析了阻尼合金的组织结构。结果表明, 合金的阻尼值包括铁磁部分和非铁磁部分。前者在室温条件下占整个阻尼的 80% ~ 90%, 后者占 10% ~ 20%。当环境温度从 23 升高到 550 , 阻尼性能逐渐下降到原来的 60% ~ 70%。比较 900 水冷处理的试样, 1100 炉冷试样的阻尼峰值对应的扭转应变较低, 这表明其因外界噪声产生阻尼的能力较强。组织中晶粒的大小, 析出物的产生及快速冷却过程中产生的微观残余应力是 900 水冷试样扭转应变较高的主要原因。

关键词: Fe-13Cr-2.5Mo 阻尼合金; 环境温度; 磁场; 阻尼性能

中图分类号: TG135.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2005) 04-0018-03

Abstract: The damping capacity of Fe-13Cr-2.5Mo alloy at varying ambient temperatures and alternate-current magnetic field were measured with improved reversal torsion machine. The microstructure was observed with scanning electronic microscope. The results showed that the damping value resulted from both ferromagnetic and un-ferromagnetic parts. The former contributed to about 80% ~ 90% and the latter 10% ~ 20% at 23 . As the ambient temperature increased from 23 to 550 , the damping capacity decreased slowly to 60% ~ 70% of that at 23 finally. Compared with the specimen water-cooled at 900 , the damping-maximum torsion strain of the furnace-cooled at 1100 was much lower, which meant that its damping reaction to the environmental noise was more intensive. The grain size, carbide precipitation and microscopic residual stress were the main reason that the damping-maximum torsion strain amplitude was higher when the alloy was heated at 900 for 2h and water-cooled.

Key words: Fe-13Cr-2.5Mo damping alloy; ambient temperature; magnetic field; damping capacity

在环境污染因素中, 噪音的危害往往是潜在的, 已经引起人们的重视^[1]。在噪声控制技术中, 对噪声源的控制是一种积极有效的手段, 因此人们期望利用阻尼材料来加强对噪声源的控制。研究表明^[2~8], Fe-Cr 系阻尼合金是一种高阻尼材料, 其阻尼源主要是磁畴的不可逆移动。这类合金相对于其他阻尼合金 (例如复相型、孪晶型和位错型阻尼合金) 来说, 具有良

好的力学性能、易于加工、耐腐蚀性好等优点, 可应用于建筑机械、舰船及纺织机械等许多方面。更重要的是由于合金具有较高居里温度 (> 700), 因此在较高环境温度下合金仍旧能够保持较高的阻尼性能。目前对 Fe-Cr 基阻尼合金的高温阻尼性能已有了初步的认识, 但就高温阻尼行为及其影响因素方面的研究很少, 本工作借助环境温度和外界磁场的变化, 分

析了 Fe-13Cr-2.5Mo 合金阻尼的基本构成及特点, 并从热处理工艺和微观组织等方面加以解释。

1 实验材料和方法

采用 ZG-25 型真空感应电炉熔炼制得 Fe-13Cr-2.5Mo 合金。合金化学成分 (质量分数/%) 为 C 0.015, Cr 12.98, Mo 2.49, S+P < 0.05, 其余为 Fe。在经过高温扩散退火处理以后, 将合金铸锭开坯锻造造成 $\phi 5\text{mm}$ 的棒材, 最后经过悬锤冷拉成 $\phi 1\text{mm}$ 的丝材。将长度为 120mm 的合金丝材分别置于两支石英管中抽真空。把放 1[#] 试样的石英管置于 900 热处理炉中保温 2h 后水冷, 2[#] 试样的石英管在 1100 下保温 2h 后炉冷。

合金的高温阻尼检测在经过改进的国产 JN-1 型真空倒扭摆仪上进行, 如图 1 所示。实验中绕线电阻中可通入交流电流, 以产生相对稳定的温度环境和磁场。交流电流的电压为 45V。当温度达到设定值时断电并测试该环境温度下丝材的自由衰减曲线。再在该温度附近测试交流磁场作用下的自由衰减曲线。

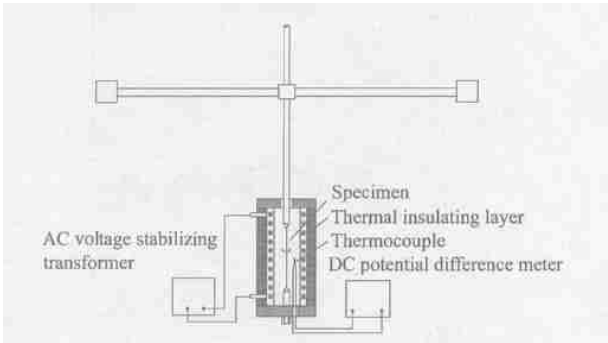


图 1 阻尼性能检测装置
Fig. 1 Device for damping capacity testing

合金显微分析试样采用 4g 苦味酸、100mL 乙醇和 20mL 盐酸配置的溶液浸蚀而成。微观组织分析在日本的 JSM-5900LV 型扫描电镜上进行。

2 实验结果及分析

2.1 合金的微观组织

图 2 为扫描电镜下 Fe-13Cr-2.5Mo 合金的微观组织。2[#] 试样的组织晶粒尺寸比 1[#] 的晶粒尺寸大。但 1[#] 试样的微观组织中晶界和晶内都有少量第二相析出, 图中 A 区和 B 区析出物通过能谱分析, 其化学成分如表 1 所示。析出物 C, Cr 及 Mo 等含量都明显高于基体, 可以初步断定为 900 保温期间析出的碳化物, 但在图 1b 中却没有发现析出物的产生, 碳化物得到完全固溶。

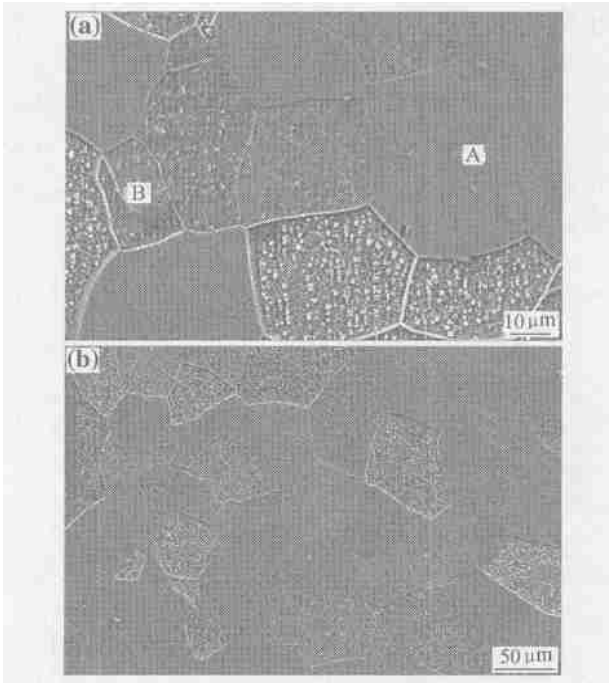


图 2 Fe-13Cr-2.5Mo 合金的微观组织
(a) 1[#] 试样; (b) 2[#] 试样
Fig. 2 SEM photographs of Fe-13Cr-2.5Mo alloy
(a) 1[#] specimen; (b) 2[#] specimen

表 1 析出物的化学成分 (质量分数/%)
Table 1 Chemical composition of precipitation
(mass fraction/%)

Composition		C	Mo	Cr	Fe
900 × 2h water-cooled	A zone	20.66	7.71	42.22	29.25
	B zone	14.77	7.88	39.44	32.47

2.2 变温条件下的阻尼衰减曲线

图 3 为环境温度对合金对数衰减率曲线的影响图。由图 3 可知, 热处理状态不同阻尼曲线也呈现出不同的特征。经过 1100 炉冷处理后, 合金阻尼峰的位置比 900 水冷处理后的靠左。图 4 是阻尼峰对应的扭转应变幅值随环境温度的变化曲线图。

通常情况下, 噪声在组织中传递时产生的应变很小, 如果阻尼峰值对应的扭转应变越小, 则磁畴发生不可逆移动越容易, 参与移动的磁畴的数量也越多, 降噪效果越好。由图 4 可知, 2[#] 试样的最大扭转应变明显比 1[#] 试样的低, 说明虽然整个衰减过程中二者阻尼峰值相当, 但对噪声来说, 1100 处理后组织的降噪效果应比 900 好。造成阻尼峰值位置改变有三个方面的原因。一是晶界的影响。900 水冷处理的组织晶粒相对 1100 炉冷的小, 且不均匀, 能量起伏较大的晶界阻碍了磁畴的移动; 二是析出物的影响。晶界和晶内析出物会降低畴壁能, 对畴壁的移动有较强的

钉扎作用,影响了阻尼的提高;三是热处理工艺的影响。水冷过程中,组织局部区域的微观残余内应力形成较高能垒,对畴界移动产生钉扎作用,使畴界移动比较困难。在随后的升温过程中,环境温度的升高使晶界相对滑动的黏滞系数降低,该扭转应变值也持续下降。

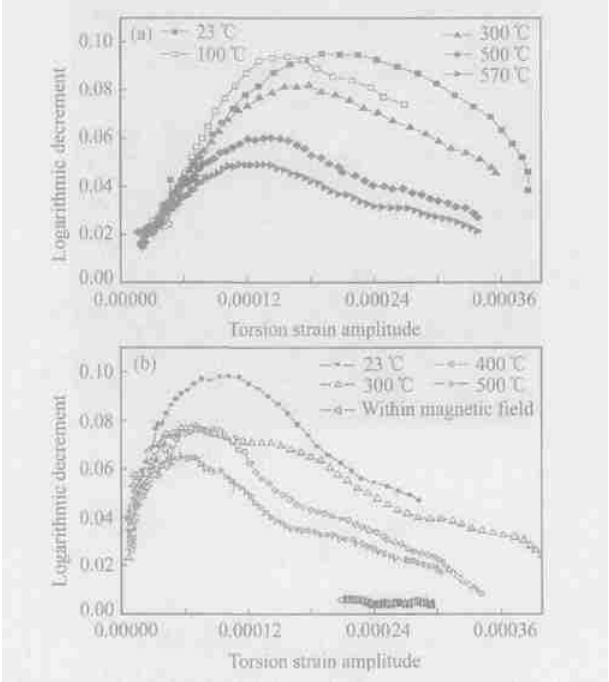


图 3 环境温度对 Fe-13Cr-2.5Mo 合金的对数衰减率-应变曲线的影响 (a) 1[#] 试样; (b) 2[#] 试样

Fig. 3 Effect of ambient temperature on logarithmic decrement of Fe-13Cr-2.5Mo alloy (a) 1[#] specimen; (b) 2[#] specimen

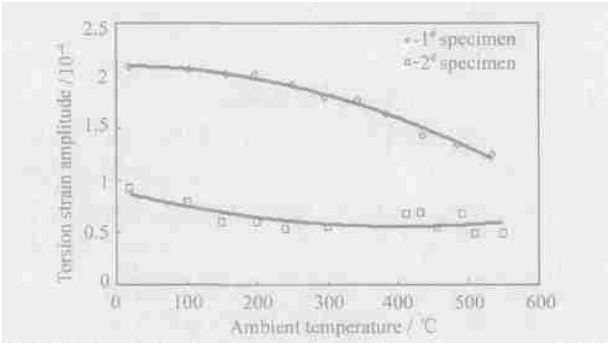


图 4 环境温度对扭转应变曲线的影响

Fig. 4 Effect of ambient temperatures on the damping-maximum torsion strain amplitude

2.3 加热温度和外磁场对合金阻尼的影响

图 5 是不同环境温度下 Fe-13Cr-2.5Mo 合金阻尼的基本构成图。上部数据点的拟合直线代表无外磁场作用时,对数衰减率曲线峰值随环境温度升高而得到的衰减曲线。下部数据点的拟合直线代表在交变磁场下合金对数衰减率曲线峰值随环境温度升高而得

到的衰减曲线。由图 5 可知,合金阻尼受到了外界磁场和环境温度两个因素的影响。首先,外界交变磁场对阻尼有较大的影响。在交变磁场作用下,阻尼急剧降低,仅仅只剩下非磁性阻尼部分。造成这种状态的原因主要是交变磁场使合金迅速达到磁饱和,磁畴难以产生不可逆移动,从而使铁磁性阻尼被“过滤”掉。铁磁部分在整个阻尼中占 80% ~ 90%,而非铁磁部分占 10% ~ 20%,这部分阻尼与材料本身的结构有关,例如晶粒的大小,析出物的多少及组织应力大小和分布等因素。其次,环境温度对阻尼也有较大的影响。合金的阻尼随环境温度的升高而几乎呈线性缓慢降低。材料被加热的温度越高,原子的间距越大,电子能量越高,自旋磁矩的有序排列就会被打乱,铁磁性逐渐降低^[9]。因此铁磁性阻尼随环境温度的升高而逐渐下降。另外非铁磁部分也在一定程度上受到了温度的影响,例如 900 °C 状态下,但是比较铁磁性部分这种影响要小得多。

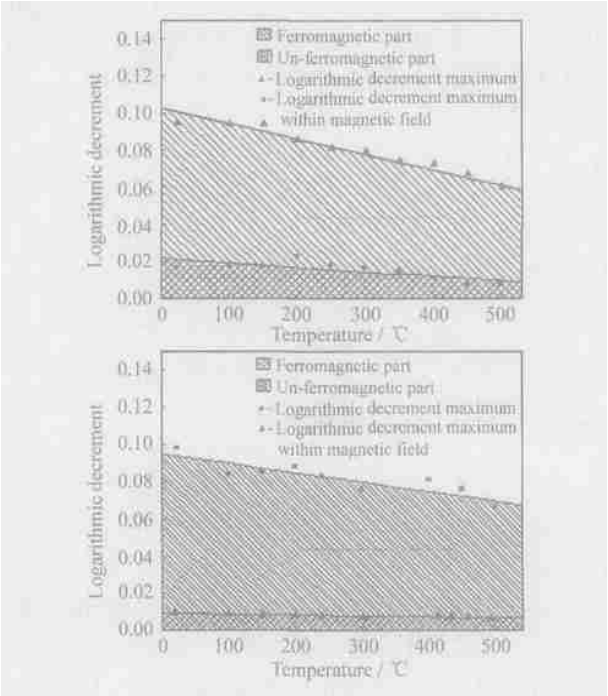


图 5 环境温度和交流磁场对对数衰减率峰值的影响 (a) 1[#] 试样; (b) 2[#] 试样

Fig. 5 Effects of ambient temperature and alternate-current magnetic field on logarithmic decrement (a) 1[#] specimen; (b) 2[#] specimen

3 结论

(1) Fe-13Cr-2.5Mo 合金的阻尼源由铁磁部分和非铁磁部分构成,常温下前者占 80% ~ 90%,后者占 10% ~ 20%。

(下转第 45 页)

表 1 GH4169 合金不同温度下 Chaboche 本构方程参数

Table 1 Parameters of Chaboche model for GH4169 alloy at different temperatures

$T /$	E / MPa	K / MPa	n	k / MPa	b	Q / MPa	a_1 / MPa	c_1	m_1	a_2 / MPa	c_2	m_2
400	217377	3996	3.60	560	4.39	- 175.8	325	12	0.257	223	54	14.28
550	184251	4091	4.10	343	4.54	- 249.0	571	4	0.0026	718	17	2.76
650	172724	2642	5.90	241	6.00	- 283.9	130	56	1.351	826	7	2.22
730	155809	11632	2.09	559	6.96	- 283.3	1952	2.5	427.7	140	36	0.096

本构理论，能够很好地描述材料的各种复杂力学现象，这是经典弹塑性理论所无法实现的，而且即使同时针对单调拉伸、循环软化和平均应力松弛这三种力学现象进行建模，粘塑性本构理论也能够很好地模拟材料实验曲线，从而更进一步体现了它所具有的优势。其次，借助非线性优化算法对粘塑性本构方程进行参数识别是切实可行的，可以成功地得到 GH4169 合金的 Chaboche 粘塑性理论本构方程参数。

3 结论

对 GH4169 合金在高温下进行了单调拉伸、对称循环及非对称循环的实验和数值模拟研究。在不同温度下，材料均表现出了明显的循环软化和平均应力松弛特性，采用带 Ohno/Wang 修正的 Chaboche 粘塑性理论本构方程，对其表现出的复杂力学现象进行了本构建模，并通过 Levenberg-Marquadt 非线性优化算法识别了本构方程参数，最后通过嵌入子程序的方法对 GH4169 合金的实验现象进行了数值模拟，并与实验数据取得了较好的一致性。

参考文献

[1] SURESH S. 材料的疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 160-162.

[2] 王仁, 熊祝华, 黄文彬. 塑性力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1982. 134-140.

[3] CHABOCHE J L. Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1989, 5: 247-302.

[4] 李海燕. 正交各向异性粘塑性损伤统一本构方程的研究与应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.

[5] 石多奇. 热端部件材料先进粘塑性本构理论与高温多轴疲劳理论研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.

[6] 李海燕, 聂景旭. 粘塑性损伤统一本构模型中材料常数的一种确定方法[J]. 航空动力学报, 2003, 18 (3): 388-393.

[7] 宋迎东, 王舸, 高德平. 一种弹-粘塑性本构模型材料常数的估计方法[J]. 固体力学学报, 2000, 21 (2): 152-156.

[8] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 382-383.

收稿日期: 2004-09-07; 修订日期: 2005-01-05
作者简介: 魏洪亮 (1978-), 男, 博士生, 主要从事发动机结构强度

研究, 联系地址: 北京航空航天大学 10-22# (100083)。

* * * * *

(上接第 20 页)

(2) 随着环境温度从 23 升高到 550 , Fe-13Cr-2.5Mo 合金的铁磁性逐渐降低, 其阻尼逐渐降低到原来的 60% ~ 70%。在外磁场作用下, 磁性阻尼基本消失, 非磁性阻尼保持下来。

(3) 晶粒的大小, 析出物及水冷过程中产生的微观残余应力是 900 水冷处理的合金阻尼峰对应的扭转应变较高的主要原因。1100 炉冷的试样峰值应变较小, 其因外界噪声产生高阻尼的能力较强。

参考文献

[1] 罗兵辉, 柏振海, 谢佑卿. 高阻尼金属的发展及应用 [J]. 材料导报, 1997, 11 (5): 23-26.

[2] 李沛勇, 戴圣龙, 刘大博, 等. 材料阻尼及阻尼合金的研究现状 [J]. 材料工程, 1999, (8): 44-48.

[3] AZCOITIA C, KARIMI A. Soft magnetic materials for optimized vibration control [J]. Materials Science Forum, 2001, 373-376 (7): 765-768.

[4] PULINO SAGRADID. Damping capacity of Fe-Cr-X high-damping alloys and its dependence on magnetic domain structure [J]. Scripta Materialia, 1998, 39 (2): 131-138.

[5] PULINO SAGRADI D, SAGRADIM. Noise and vibration damping of Fe-Cr-X alloys [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2001, 23 (2): 115-122.

[6] 夏茂森, 蒋善玉. 铁基减振合金 00Cr25Al5 减振性能研究 [J]. 山东冶金, 1996, 18 (1): 33-37.

[7] 毕殿清. 铁基阻尼合金的阻尼特性与磁性 [J]. 钢铁研究学报, 1994, 6 (3): 37-40.

[8] 刘效东, 吴宝榕. 铁基阻尼合金中磁畴运动的动态观察 [J]. 钢铁研究学报, 1993, 5 (1): 45-48.

[9] 钟文定. 铁磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

基金项目: 核燃料及材料国防重点实验室基金资助项目 (51481040203SC0102)。
收稿日期: 2004-07-21; 修订日期: 2005-01-10
作者简介: 胥永刚 (1969-), 男, 副教授, 博士, 从事焊接材料、阻尼材料、形状记忆合金等领域的研究, 联系地址: 四川大学材料成型系 (610065)。