

# TIG 同质焊接 Fe-Cr-Mo 阻尼钢板的 阻尼性能及力学性能研究

罗明亮, 李 宁, 颜家振, 陈康为, 石浩江, 孙 启, 周 楞

(四川大学 机械工程学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:**对锻造 Fe-11Cr-2.5Mo-1Ni-0.1Zr 阻尼钢板进行钨极氩弧同质焊接。从焊后钢板上取样,在真空环境下进行 900℃保温 1h 随炉冷却热处理。通过 TA Q800 动态机械分析仪研究了合金在不同预应力下的阻尼性能。结果表明:随着施加的预应力的增大,合金的阻尼性能降低,但下降的幅度不大。用万能试验机和冲击试验机研究焊接合金的力学性能,发现焊后合金具有良好的力学性能,且焊缝的强度高于母材。通过扫描电镜观察到了冲击试样的断口上存在大量冲击过程中因塑性变形而形成的纤维组织和韧窝组织,它们有效地吸收了冲击功,阻止了裂纹的扩展,合金的断裂方式为韧性断裂。

**关键词:**阻尼钢;同质焊接;阻尼性能;力学性能

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20201481

**中图分类号:** TG406

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3814(2022)07-0124-04

## Investigation on Damping Capacity and Mechanical Properties of TIG Homogeneous Welded Fe-Cr-Mo Damping Steel Plate

LUO Mingliang, LI Ning, YAN Jiazhen, CHEN Kangwei, SHI Haojiang, SUN Qi, ZHOU Luo

(School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The forged Fe-11Cr-2.5Mo-1Ni-0.1Zr damping steel plate was welded by TIG homogeneous welding. Take samples from the welded steel plate and conduct heat treatment of heat preservation at 900℃ for 1 h then cooling with furnace in vacuum environment. The damping capacity of the alloy under different prestress were studied by TA Q800 dynamic mechanical analyzer. The results show that with the increase of prestress value, the damping property of the alloy decreases, but the decreasing amplitude is small. The mechanical properties of the alloy were studied by universal testing machine and impact testing machine. It is found that the alloy has good mechanical properties after welding, and the strength of the weld is higher than that of the base metal. Through scanning electron microscope, it is observed that due to plastic deformation, there are a lot of fiber structures and dimple structures formed in the impact process on the fracture surface of the impact specimen, which effectively absorbs the impact energy and prevents the spread of cracks. The fracture mode of the alloy is ductile fracture.

**Key words:** damping steel; homogeneous welding; damping capacity; mechanical property

不必要的振动降低了各类传感器、各种光电和机电设备的效率,而用阻尼材料制作的各种隔音和减振装置可以降低各类设备在运行时的噪音和振动水平<sup>[1-2]</sup>。铁铬基阻尼合金因具有较高的阻尼性能、优良的力学性能和优异的耐腐蚀性能而受到研究者的广泛关注<sup>[3]</sup>。Fe-Cr 基合金的内耗机理有宏观涡流

内耗、微观涡流内耗、磁机械滞后内耗三种,但在低振动频率下,研究表明宏观涡流内耗和微观涡流内耗作用之和的阻尼效果远低于磁机械滞后内耗<sup>[4]</sup>。

铁磁性合金具有特殊的磁畴结构,在外界周期性应力的作用下,通过 90°磁畴壁的不可逆移动,把机械振动动能转换成热能或其他形式的能量耗散掉<sup>[5-6]</sup>。用这类阻尼材料制造的各种机械结构零部件在实际工程应用时必然会遇到焊接问题。张治安等<sup>[7]</sup>研究了 Fe-Cr-Al-Si 阻尼合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的钨极氩弧焊连接,但 1Cr18Ni9Ti 不锈钢本身不具备阻尼性能,所以焊后合金的抗振降噪效果在一定程度上会消减。石浩江等<sup>[8]</sup>研究了 Ag-Cu 钎料与

收稿日期:2020-06-17

作者简介:罗明亮(1994-),男,四川会理人,硕士研究生,主要研究方向:阻尼合金;电话:18428323501;E-mail:617640520@qq.com

通讯作者:李宁(1957-),男,博士生导师,四川成都人,主要研究方向:金属材料、特种焊接材料及方法;电话:13808211547;  
E-mail:lining@scu.edu.cn



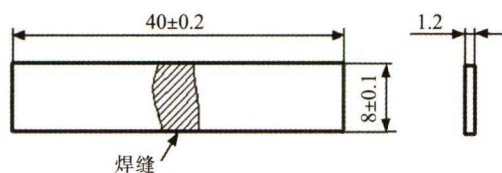


图3 阻尼实验试样尺寸(mm)

Fig.3 Sizes of damping experiment sample(mm)

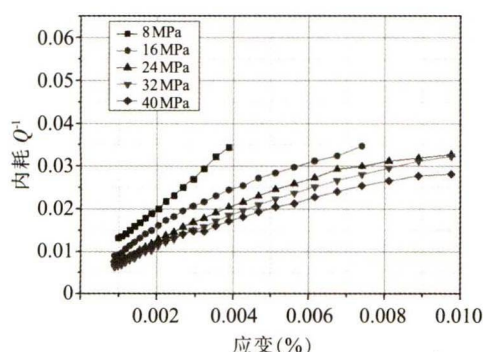


图4 不同预应力下焊接试样的内耗值

Fig.4 Internal friction value  $Q^{-1}$  of welding specimen under different prestresses

慢增大。当应变幅值为  $0.6 \times 10^{-4}$  时,合金在 16、24、32、40 MPa 预应力下  $Q^{-1}$  值依次为 0.031、0.027、0.025、0.023。预应力从 16 MPa 增加到 24 MPa,内耗值  $Q^{-1}$  为 16 MPa 时的 87%。随着预应力的进一步增大,内耗  $Q^{-1}$  下降的幅度也逐渐放缓,当应力从 24 MPa 增加到 32 MPa,  $Q^{-1}$  值的降幅仅为 7.4%。当应力增加到 40 MPa,此时  $Q^{-1}$  值为 16 MPa 时的 74.2%,保持了不错的阻尼性能。造成阻尼性能下降主要是由于合金在应力作用下依靠  $90^\circ$  磁畴壁做不可逆移动,产生内耗,随着应力的增加,参与移动的磁畴数量也增加,同时  $90^\circ$  磁畴会顺着应力方向转变为  $180^\circ$  磁畴<sup>[10]</sup>。而研究表明, $180^\circ$  畴壁对合金的阻尼性能基本没有贡献<sup>[11]</sup>,所以在相同应变振幅下,合金所受到的应力越大,转变为  $180^\circ$  磁畴的数量越多,合金的阻尼性能越低。

## 2.2 力学性能分析

合金接头常温力学性能的测定在 RGM-4300 万能试验机与 JB-300 冲击试验机上进行,结果见表

表3 合金焊接接头的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of the alloy welding joint

| 试样编号                  | 1    | 2    | 3    | 平均值  |
|-----------------------|------|------|------|------|
| $R_{p0.2}/\text{MPa}$ | 266  | 269  | 267  | 267  |
| $R_m/\text{MPa}$      | 396  | 398  | 399  | 398  |
| 伸长率(%)                | 39.8 | 40.1 | 39.2 | 39.7 |
| 冲击功/J                 | 241  | 230  | 238  | 236  |

3。由表3可以看出,阻尼合金在焊接后具有良好的力学性能,且试验结果稳定,波动范围小,拉伸试样的断口均不在焊接处,证明焊缝的强度高于母材的,焊后合金的屈服强度为 267 MPa,抗拉强度为 398 MPa,在保持高强度的同时还具有良好的延展性,伸长率为 39.7%。

焊接前通过金相显微镜观察合金组织,并未发现马氏体,但焊接后焊缝在空气中快速冷却,形成了很多马氏体,经过  $900^\circ\text{C}$  热处理后,其性能得到了极大的改善,有很高的强度。焊接前后金相组织见图5。

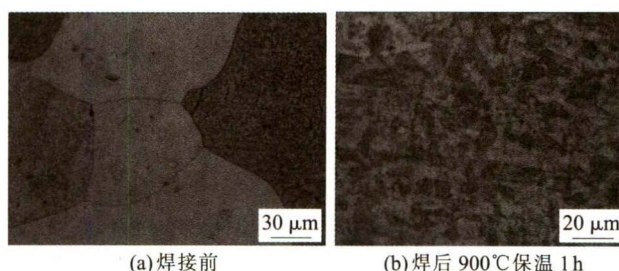


图5 焊接前后金相组织

Fig.5 Microstructure before and after welding

由表3还可知,焊后合金具有良好的冲击性能,这跟添加了微量的 Zr 元素有很大的关系。Zr 属于铁素体形成元素,能够稳定 Fe-Cr-Mo 基合金中的铁素体相,同时 Zr 元素也是典型的弥散强化相元素,在合金中形成的细小弥散相与铁素体基体形成共格钉扎弥散分布在枝晶上,能够有效地钉扎晶界的移动,阻碍铁素体枝晶的长大,细化铁素体枝晶<sup>[12]</sup>,同时抑制合金在热处理过程中晶粒的长大从而实现细晶强化作用。通过扫描电镜对冲击试样的断口形貌进行了观察,如图6所示。合金的断裂方式为韧性断裂,在断口上看到了大量在冲击过程中因塑性变形而形成的纤维组织和韧窝组织,它们能有效地吸收冲击功,因此焊后合金具有良好的冲击性能。



图6 合金冲击断口 SEM 图

Fig.6 SEM image of impact fracture of the alloy

### 3 结论

(1) 锻造 Fe-11Cr-2.5Mo-1Ni-0.1Zr 阻尼合金在焊后具有良好的阻尼性能, 并且在三点弯曲模式下随着所施加的预应力的增大, 其内耗值的衰减幅度减小。在  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  应变振幅范围内, 当施加的预应力一定时, 合金内耗值  $Q^{-1}$  随应变幅值的增加而缓慢增大。

(2) 采用 TIG 同质焊接阻尼合金钢板, 焊后合金兼备良好的拉伸性能和冲击性能, 在冲击断口上观察到了大量因塑性变形形成的纤维组织和韧窝组织, 有效地吸收了冲击功。

#### 参考文献:

- [1] Claudia Tomozei, Valentin Nedeff, Gabriel Lazar. Actual stage of industrial noise reduction [J]. Journal of Engineering Studies & Research, 2011, 17(4):89-95.
- [2] Bies D A, Hansen C H, Kelsall T. Engineering noise control [M]. Fifth Edition. CRC Press, 2017.
- [3] Hu X F, Li X Y, Zhang B, et al. Magnetic domain structure and damping capacity of Fe-13Cr-2.5Mo alloy [J]. Materials Science & Engineering B, 2010, 171(1/3):40-44.
- [4] Coronel V F, Beshers D N. Magnetomechanical damping in iron[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(4):2006.
- [5] Xu Yonggang, Ning L, Wen Y H. Effect of domain variations on damping capacity of Fe-16Cr-2.5Mo alloy solution annealed at 1373 K and 1473 K [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2011, 323(6):819-821.
- [6] Smith G W, Birchak J R. Internal stress distribution theory of magnetomechanical hysteresis - an extension to include effects of magnetic field and applied stress [J]. Journal of Applied Physics, 1969, 40(13):5174-5178.
- [7] 张治安, 高升吉, 胥永刚, 等. Fe-Cr-2Al-Si 阻尼合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的钨极氩弧焊接 [J]. 焊接学报, 2001(3): 63-66.
- [8] 石浩江, 颜家振, 李宁, 等. Ag-Cu 钎料真空钎焊 FeCrMo/MnCu 阻尼合金钎焊接头的组织及性能研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(13):50-53.
- [9] 宗秋丽, 孙宏, 汪海燕, 等. GB/T 229-2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法简介 [J]. 理化检验 (物理分册), 2010(3): 49-51.
- [10] Mou Xiaoxiao, Li Ning, Jan, Tia zhen. Investigation of constant prestress in effecting damping capacity of Fe-15Cr-2.5Mo-1.0Ni casting ferromagnetic alloy[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2015:650:92-96.
- [11] Xu Yonggang, Li Ning, Wen Yuhua, et al. On energy-dissipation characteristics of Fe-13Cr-2.5Mo damping alloy[C]// IEEE. Proceedings of 2011 World Congress on Engineering and Technology. IEEE Beijing Section, 2011:415-419.
- [12] 张文和, 赵鲁生. Ti 和 Zr 对铸铁的影响及其它 [C]//2015 中国铸造活动周论文集. 中国机械工程学会, 2015:158-161. 
- [6] 贾文鹏, 林鑫, 谭华, 等. TC4 钛合金空心叶片激光快速成形过程温度场数值模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(7): 1193-1199.
- [7] 唐琪, 陈静青, 陈鹏, 等. 基于有限元的激光增材过程熔化热积累模拟[J]. 焊接学报, 2019, 40(7):100-104.
- [8] 刘奇扬. 同轴送粉式激光增材制造沉积形貌的模拟研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [9] Dai K, Shaw L. Thermal and mechanical finite element modeling of laser forming from metal and ceramic powders[J]. Acta Mater, 2004, 52(1): 69.
- [10] 胡艳娇, 张钰, 李敏, 等. 激光增材制造钛合金温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22):66-69.
- [11] 刘光, 张啸寒, 贾利, 等. 等离子喷涂 Mo/8YSZ 功能梯度热障涂层结构优化与热力耦合模拟计算 [J]. 表面技术, 2020, 49(3):213-223.
- [12] 张啸寒, 刘光, 赵健, 等. 7A04 铝合金表面等离子喷涂多道 Mo 涂层温度场数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(5):33-39.
- [13] 庞铭, 张啸寒, 谭雯丹, 等. 不同试样厚度对激光熔凝强化 RuT300 温度场影响规律的研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(8): 104-108.
- [14] 谭雯丹, 庞铭, 江国业, 等. 高强度柴油机气门座激光相变硬化温度场的数值模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 389-397.
- [15] 庞铭, 张啸寒, 刘光. 喷枪扫描速度对等离子喷涂 Mo/8YSZ 梯度热障涂层温度场的影响规律研究[J]. 表面技术, 2019, 48(9):193-203.
- [16] 高爱兵, 胡夏夏, 骆芳. 多道送粉式激光熔覆温度场的有限元分析[J]. 浙江工业大学学报, 2011, 39(1):67-70.
- [17] 张哲, 韩彬, 王勇, 等. 工件形状对激光相变硬化温度场和应力场的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(8):51-57.
- [18] 庞铭, 谭雯丹. 基于光束离散的激光相变硬化蠕墨铸铁温度场数值模拟 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 158-164.
- [19] 胡红伟, 丁雪萍, 段宣明, 等. AlSi10Mg 铝合金选区激光熔化热行为的数值研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20):53-57.
- [20] 吴迪. 合金钢激光熔化沉积成形温度场和应力场有限元分析 [D]. 北京:北京交通大学, 2019. 

(上接第 123 页)