

鞍钢 17Mn 阻尼钢 4 ~ 100 mm 板的研制

刘璇^{1,2}, 赵刚^{1,2}, 李大航^{1,2}, 周洪庆^{1,2}, 张友鹏^{1,2}, 朱义轩², 吴宇新²

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

摘要 鞍钢研制的 17Mn 阻尼钢(/% : 0.02C, 0.08Si, 17.53Mn, 0.014P, 0.002S, 0.005Als) 4 ~ 100 mm 板, 其屈服强度 311 ~ 407 MPa, 15 ~ 100 mm 板 -20 °C V 型缺口冲击吸收能量 113 ~ 144 J, 焊接后焊接接头抗拉强度 651 ~ 654 MPa, 焊接后 -20 °C V 型缺口冲击吸收能量 66 ~ 84 J。17Mn 阻尼钢组织为残余奥氏体和 ϵ 马氏体, 使用动态机械热分析仪检测其阻尼性能。在 30 °C, 50 Hz 双悬臂应变扫描条件下, 不同厚度阻尼钢阻尼值均大于 0.02; 在 100 Hz 下测试不同厚度阻尼钢阻尼值均大于 0.05, 阻尼值高于传统的低合金结构钢 Q235、Q345 (0.008 和 0.010 ~ 0.013)。

关键词 17Mn 阻尼钢 显微组织 阻尼性能

Research and Development of 17Mn Damping Steel 4 ~ 100 mm Plate at Ansteel

LIU Xuan^{1,2}, ZHAO Gang^{1,2}, LI Dahang^{1,2}, ZHOU Hongqing^{1,2},
ZHANG Youpeng^{1,2}, ZHU Yixuan², WU Yuxin²

(1. State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, Anshan 114009;
2. Ansteel Iron & Steel Group Research Institute, Anshan 114009)

Abstract 4 ~ 100 mm 17Mn plate damping steel plate (/% : 0.02C, 0.08Si, 17.53Mn, 0.014P, 0.002S, 0.005Als) was developed and produced by Ansteel, with properties of yield strength 311 ~ 407 MPa, 15 ~ 100 mm plate -20 °C V-notch impact energy 113 ~ 144 J, the tensile strength of welded joint 651 ~ 654 MPa, and -20 °C V-notch impact energy 66 ~ 84 J after welding. The microstructure of the 17Mn damping steel is residual austenite and ϵ martensite, and its damping property is tested using a dynamic mechanical thermal analyzer. Under the condition of double cantilever strain scanning at 30 °C and 50 Hz, the damping values of the different thickness damping steels are greater than 0.02. At 100 Hz, the damping values of damping steels of different thicknesses are all greater than 0.05, and the damping values are higher than those of traditional low-alloy structural steels Q235 and Q345 (0.008 and 0.010 ~ 0.013).

Material Index 17Mn Damping Steel Plate, Microstructure, Damping Capacity

近年来,船舶噪音问题备受关注,船舶噪音不仅影响船员的健康、乘客的乘坐体验,严重情况下会影响船舶的使用寿命,国际海事组织海上安全委员会第 91 次通过《船上噪音等级规则》,为保护船员免受噪音伤害,该规则对船舶降噪提出更高要求。多数国内企业缺少在船舶设计阶段对声学考虑,只能在船舶建成后期通过消声或隔音进行弥补,这样不仅影响降噪效果而且增加成本。此外,21 世纪是机械设备发展日趋高速化、大功率化及高精确化的时代。机械设备(如鼓风机、电机、机床、泵等)在运转过程中产生的机械振动和噪声几乎无法避免,这不仅恶化了人机工作环境,而且会造成仪器、仪表失灵和机械部件的结构疲劳,无形中增加了企业的维修和保养成本,影响了机械的使用寿命,严重时可能引发灾难性后果。

因此,在船舶噪声控制、机械设备减振降噪等领域,迫切的希望阻尼材料替代传统的结构材料。根

据阻尼机制的不同,阻尼合金主要分为铁磁型(Fe-Cr、Fe-Al 等)、孪晶型(Mn-Cu、Ni-Ti、Cu-Zn-Al 等)、复相型(灰铸铁、Zn-Al)、位错型(Mg-Zr)以及 Fe-Mn 阻尼钢^[1-5]。与其他阻尼合金相比,Fe-Mn 阻尼钢具有强度高(>700 MPa)、价格便宜(约为 Mn-Cu 合金的 1/4),阻尼性能随着应变振幅的增大而增加等优点^[6-8]。

鞍钢作为国内首家生产 17Mn 阻尼钢的钢铁企业,已成功研制生产 4 ~ 100 mm 17Mn 阻尼钢板,在保证钢板具有高于低合金结构钢 Q235 的强度、韧性的同时,具有较高的阻尼性及焊接性能,本文重点介绍该钢的研制和生产实践。

1 17Mn 阻尼钢的研制

1.1 成分和工艺设计

结合韩国的 Baik Seung-han 对 Fe-Mn 钢的研究,在 Mn 含量为 17% 时,阻尼性能最好^[6-7],结合前

期实验室结果进行成分设计,采用低碳高锰、低硫磷的成分设计。炼钢过程采用低硫铁水,采用双联法转炉冶炼能更好控制 C、P 含量,经 LF、RH 精炼脱气,浇铸成断面 230 mm × 1 650 mm 连铸坯,连铸坯枝晶低倍检验中心偏析、中心疏松 0.5 级,成分满足设计要求。热轧在 4300 线、2500 线完成,热处理在 4300 线完成,轧制与热处理制度的合理配合,钢板各项性能稳定。

生产工艺流程:铁水预处理-转炉前半钢冶炼-钢水扒渣-转炉后半钢冶炼- RH- LF- 连铸- 板坯缓

冷- 板坯加热- 轧制- 热处理- 性能检验。

1.2 研制标准设计

结合实验室研究设计 17Mn 阻尼钢成分及性能要求如表 1、表 2。

表 1 鞍钢生产 17Mn 阻尼钢的成分/%

Table 1 Composition of 17Mn damping steel produced by Ansteel/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Als	O
预设范围	≤0.02	≤0.10	17~18	≤0.02	≤0.005	≤0.10	-
实测值	0.02	0.08	17.53	0.014	0.002	0.005	0.0045

表 2 鞍钢生产 17Mn 阻尼钢性能要求

Table 2 Performance requirements of 17Mn damping steel produced by Ansteel

钢板厚度/ mm	屈服强度 (R_{el})/MPa	抗拉强度 (R_m)/MPa	断后延伸率 (A)/%	断面收缩率 (Z)/%	-20℃冲击吸收能 量(KV ₂)/J	阻尼值 (50 Hz, 30℃)
4~100	≥235	≥500	≥15	≥15	≥40	≥0.02

1.3 冶炼、热处理工艺控制

鞍钢炼钢一分厂板坯连铸生产阻尼钢工艺流程为:100 t 转炉前半钢冶炼- 钢水扒渣- 100 t 转炉后半钢冶炼- 100 t RH- 100 t LF- 连铸- 板坯缓冷。炼钢过程采用低硫铁水,采用双联法转炉冶炼能更好控制 C、P 含量,转炉前半钢出钢 P ≤ 0.010%, 出钢温度 1 430℃,扒渣要求罐内无残渣,转炉后半钢连续洗炉 ≥ 3 次,洗炉过程中不允许溅渣,后半钢要求 C ≤ 0.03%、P ≤ 0.015%, 出钢温度 1 630℃, 出钢前进行炉内合金化。RH 进行吹氧强制脱碳、脱气,根据 C 含量值及时调整吹氧量,要求控制 C ≤ 0.02%。LF 脱硫、微调成分,按要求控制成分,控制温度 1 525℃,采用氩气保护浇铸成断面 230 mm × 1 650 mm 连铸坯,起步拉速 0.3 m/min,自动升速至 1.1 m/min。

热轧在 4300 线、2500 线完成,热处理在 4300 线完成,加热温度在 1 150~1 250℃,钢板终轧温度 ≥ 950℃,热处理采用淬火制度,温度 930℃ 保温总时间按 2.5 min/mm 控制,轧制与热处理制度的合理配合,钢板各项性能稳定,主要成品(厚 × 宽 × 长)规格(mm)为 4 × 1 500 × 8 000、8 × 1500 × 8 000、15 × 2 000 × 10 000、20 × 2 000 × 15 000、40 × 2 000 × 10 000、60 × 2 500 × 6 000、100 × 2 500 × 6 000。

2 17Mn 阻尼钢的性能结果

2.1 机械性能

对淬火后阻尼钢进行拉伸、冲击、冷弯、焊接性能检验。钢板厚度 < 10 mm 使用矩形横截面拉伸比例

试样,执行 GB/T 228.1-2010 且不进行冲击性能测试;钢板厚度 ≥ 10 mm 使用圆形横截面拉伸比例试样,执行 GB/T 228.1-2010,冲击执行 GB/T 229-2020,使用夏比 V 型缺口 10 mm × 10 mm × 55 mm 标准试样测试,冷弯执行 GB/T 232-2010 进行 180° 弯曲试验,弯心直径 D = 4a, b = 35 mm,弯曲试验结果均合格,拉伸、冲击具体结果见表 3。

冲击、拉伸均为横向取样,4~20 mm 钢板屈服强度 > 335 MPa,抗拉强度 > 659 MPa,其屈强比在 0.4~0.6,40~100 mm 钢板受厚度影响强度降低但屈服强度仍维持在 300 MPa 以上,抗拉强度 > 614 MPa,其屈强比在 0.4~0.52。钢板头部、尾部强度结果相差不大,薄规格板拉伸的延伸率均大于 14%,厚规格圆拉伸延伸率、断面收缩率均 > 18%。

钢板头尾冲击波动不大,-20℃ 冲击吸收能量均大于 110 J,满足预期指标 -20℃ ≥ 40 J,17Mn 阻尼钢特殊的 ε-M 相(其亚结构为高密度层错),淬火过程中残余奥氏体的含量将影响钢板的韧性。

17Mn 阻尼钢应用方向主要在船舶及机械设备上,不可避免的要进行焊接,因此,对其焊接性能进行评价。17Mn 阻尼钢 C_{eq} 为 2.94,碳当量较高,17Mn 阻尼钢 P_{cm} 为 0.89,其冷裂纹敏感指数较高,与其配合的焊接工艺需要合理可行。采用手工电弧焊对 20 mm 厚钢样未预热焊接,焊接热输入为 10~15 kJ/cm,电流 160 A,开 V 型坡口,对焊接接头的强度及热影响区的冲击进行检验,具体见表 4、表 5。

由表 5 可见,焊接后焊接接头抗拉强度仍保持在较高水平,焊接后 -20℃ 冲击仍保持 ≥ 40 J,说明

表 3 930 °C 淬火后 17Mn 阻尼钢力学性能

Table 3 Mechanical properties of 17Mn damping steel plate quenched at 930 °C

规格/mm	钢板取样位置	$R_{p0.2}/MPa$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	-20°C 冲击吸收能量(KV ₂)/J		
4	头	407	742	15	-	厚度 < 10 mm 不进行冲击测试		
4	尾	402	758	14	-			
8	头	378	696	14	-			
8	尾	388	659	15	-			
15	头	355	777	20	20	144	113	126
15	尾	337	764	19	23	135	131	115
20	头	335	743	22	20	137	140	126
20	尾	358	747	18	22	113	126	117
40	头	314	699	19	18	117	123	125
40	尾	321	701	21	19	130	118	116
60	头	328	663	18	20	119	132	115
60	尾	333	685	20	21	132	129	120
100	头	311	614	20	19	118	122	123
100	尾	318	620	19	19	115	132	124

注:15~100 mm 钢板在头、尾的厚度 1/4 处取样

表 4 17Mn 阻尼钢焊接接头性能

Table 4 Welded joint properties of 17Mn damping steel plate

规格/mm	试样状态	断裂位置	R_m/MPa
20	未焊接	钢本体	715
	焊接	焊材	654
	焊接	焊材	651

表 5 17Mn 阻尼钢焊接热影响区冲击性能

Table 5 Impact properties of welding heat - affected zone of 17Mn damping steel plate

规格/mm	取样位置	-20 °C 冲击(KV ₂)/J		
20	焊前钢板表面	128	119	137
	焊接后焊缝	84	82	80
	焊接后熔合线	75	76	69
	焊接后热影响区	73	77	66

其可焊,焊接前预热及配套焊材的开发将进一步提升焊接后性能。

$$C_{eq} = W_C + W_{Mn}/6 + W_{(Cr+Mo+V)}/5 + W_{(Ni+Cu)}/15 \quad (1)$$

$$P_{cm} = W_C + W_{Si}/30 + W_{(Mn+Cu+Cr)}/20 + W_{Ni}/60 + W_{Mo}/15 + W_V/10 + 5W_B \quad (2)$$

2.2 微观组织

图 1 是淬火后 17Mn 阻尼钢透射显微组织,试样的组织为残余奥氏体和 ϵ 马氏体, ϵ 马氏体呈极薄的片状,厚度在 100~300 μm 。利用 XPert PRO X 射线衍射仪定性分析 17Mn 阻尼钢相组成,分析其由 86% ϵ 马氏体、14% 奥氏体组成。韩国学者把 Fe-Mn 钢的阻尼源归结为以下四种界面^[9]: ϵ 马氏体变体界面、 ϵ 马氏体和 γ 奥氏体中层错界面以及 γ/ϵ 相界面,其中 ϵ 马氏体是最主要的阻尼源。由于不同的淬火制度会影响 ϵ 马氏体数量及 ϵ 马氏体片层状态,因此



图 1 鞍钢 17Mn 阻尼钢 930 °C 淬火组织

Fig. 1 Microstructure of 17Mn damping steel quenched at 930 °C produced by Ansteel

选择合适的淬火工艺至关重要。

2.3 17Mn 阻尼钢的阻尼结果

使用动态机械热分析仪 DMA TA Q800 对 4、8、15、20、40、60、100 mm 厚钢板加工 1.5 mm × 8 mm × 60 mm 的试样在 30 °C, 50、100 Hz 双悬臂应变扫描条件下进行阻尼性能测试,图 2 为阻尼钢厚度-损耗正切曲线。损耗正切 $\tan\Phi$ 是表征阻尼性能的一个参数, $\tan\Phi$ 越大,材料阻尼性能越好。从图 2 中可以看出,在 50 Hz 下测试不同厚度阻尼钢阻尼值均大于 0.02,最大值为 0.024,满足预期指标;在 100 Hz 下测试不同厚度阻尼钢阻尼值均大于 0.05,最大值为 0.056,从 50 Hz 到 100 Hz 随测试频率增加,阻尼值增加。对 14 mm Q235、Q345 钢进行测试, Q235 在 50 Hz 下测试最大阻尼值为 0.008,在 100 Hz 下测试最大阻尼值为 0.010, Q345 在 50 Hz 下测试最大阻尼值为 0.010,在 100 Hz 下测试最大阻尼值为 0.013,可见,17Mn 阻尼钢的阻尼性能优于传统的低合金结构钢。

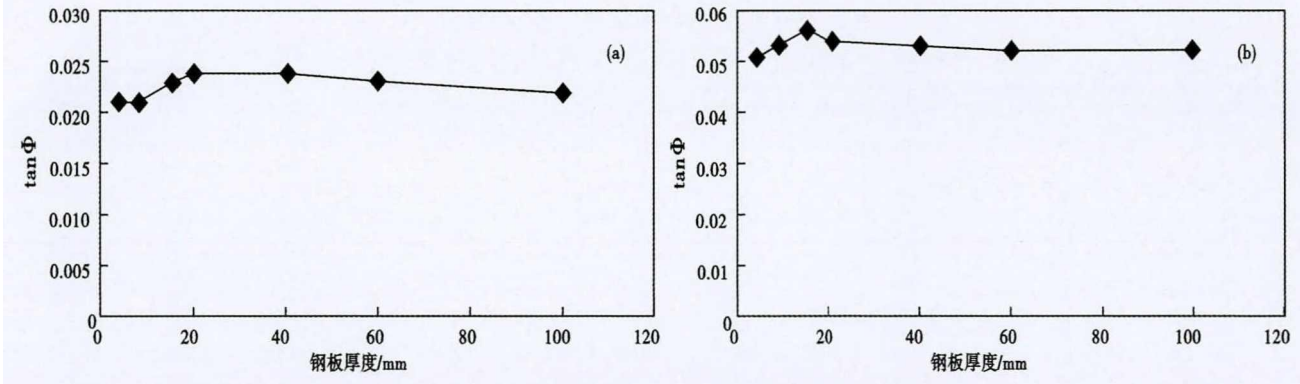


图 2 鞍钢 17Mn 阻尼钢阻尼性能:(a)50 Hz;(b)100 Hz

Fig. 2 Damping performance of Ansteel 17Mn damping steel plate: (a) 50 Hz; (b) 100 Hz

3 结语

鞍钢成功研制生产 4 ~ 100 mm 17Mn 阻尼钢板,该阻尼钢板采用低碳高锰、低硫磷的成分设计,其屈服强度可达 300 MPa, -20 ℃ 冲击吸收能量可达 110 J 以上,适用于焊接结构。其组织为残余奥氏体和 ϵ 马氏体,在 30 ℃、50 Hz 双悬臂应变扫描条件下,不同厚度阻尼钢阻尼值均大于 0.02,满足预期指标;在 100 Hz 下测试不同厚度阻尼钢阻尼值

均大于 0.05。

鞍钢生产的 17Mn 阻尼钢具备在船舶、机械设备减振部位使用条件,该钢种已在鞍钢内部作为替换轧机 AGC 液压传动管路支架使用,减振效果好,提升支架使用寿命;此外鞍钢还在中船重工、中集海洋工程研究院等多家单位进行推广、应用、评价,均得到满意的反馈。

参考文献

- [1] 王敬丰,魏文文,潘复生,等. 金属阻尼材料研究的新进展及发展方向[J]. 材料导报,2009,23(7):15-17.
- [2] 高 鹏,齐笑冰,宋照伟,等. 铁基阻尼合金的研究现状及展望[J]. 铸造,2010,59(11):1190-1193.
- [3] Pulino Sagradi D, Sagradi M, Karimi A, et al. Damping Capacity of Fe-Cr-X High-Damping Alloys and its Dependence on Magnetic Domain Structure[J]. Scripta Materialia, 1998, 39(2): 131-138.
- [4] 罗兵辉,柏振海,谢佑卿. 微量 Sc 和 Zr 对铝共析合金微观结构和阻尼性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2002,12(4): 725-728.
- [5] 黄姝珂,李 宁,文玉华,等. 运动位错运动理论分析 Fe-Mn 合金的减振机理[J]. 功能材料,2007,38: 3907-3909.
- [6] Baik Seung han. High Damping Fe-Mn Martensitic Alloys for Engineering Applications[J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 198(3): 241-252.
- [7] Baik Seung han, KimJung chui, Han Dong woon, et al. Fe-Mn Martensitic Alloys for Control of Noise and Vibration in Engineering Applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 438-440: 1101-1105.
- [8] Lee Young kook, Jun Joong hwan, Choi Chong sool. Damping Capacity in Fe-Mn Binary Alloys[J]. ISIJ International, 1997, 37(10): 1023-1030.
- [9] Jun J H, Lee Y K, Choi C S. Damping Mechanisms of Fe-Mn Alloy with ($\gamma + \epsilon$) Dual Phase Structure[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(4): 389-392.

刘 璇(1989-),女,硕士(2014 年东北大学),工程师,2012 年辽宁科技大学(本科)毕业,船用钢研究。
E-mail:905202185@qq.com

收稿日期:2021-12-17