

· 组织和性能 ·

Mo 对 TMCP 工艺轧制 EH460 高强度船体钢组织和性能的影响

孙逸婷 李激光 孙 傲

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘 要 试验用 EH460 钢 ($\% : 0.06 \sim 0.08\text{C}, 0.20 \sim 0.33\text{Si}, 1.51 \sim 1.52\text{Mn}, 0.003 \sim 0.013\text{P}, 0.002\text{S}, 0 \sim 0.18\text{Mo}, 0.34 \sim 0.36\text{Ni}, 0.04 \sim 0.05\text{Nb}, 0.05 \sim 0.06\text{V}, 0.013 \sim 0.015\text{Ti}, 0.006 \sim 0.026\text{Als}$) 300 mm 铸坯由 $\Phi 550$ mm 轧机轧制成 60 mm 钢板, 终轧温度 798 ~ 817 °C, 冷却速率 5 ~ 20 °C/s。研究了不含 Mo 和含 0.18% Mo 对该钢组织和力学性能的影响。实验结果表明, 当冷却速率为 15 °C/s 时, 不含 Mo 钢抗拉强度 645 ~ 655 MPa, -40 °C 冲击功 168 ~ 200 J, 含 0.18% Mo 钢抗拉强度 677 ~ 679 MPa, -40 °C 冲击功 48 ~ 64 J; 对于高强度船板钢 EH460, 采用含 Mo 钢, 可以提高钢板强度, 达到船级社对其强度要求 (屈服强度 ≥ 460 MPa, 抗拉强度 570 ~ 720 MPa, -40 °C 冲击功 ≥ 46 J), 但含较高 Mo 钢的冲击功降低较多, 因此, 在实际生产中, 高强度船板钢 EH460 中的 Mo 含量, 宜 $\leq 0.15\%$ 。

关键词 EH460 船体钢 Mo TMCP 组织 强度 冲击功

Effect of Mo on Structure and Properties of High Strength Hull Steel EH460 Rolled by TMCP Technology

Sun Yiting, Li Jiguang and Sun Ao

(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051)

Abstract The 300 mm slab of tested steel EH460 ($\% : 0.06 \sim 0.08\text{C}, 0.20 \sim 0.33\text{Si}, 1.51 \sim 1.52\text{Mn}, 0.003 \sim 0.013\text{P}, 0.002\text{S}, 0 \sim 0.18\text{Mo}, 0.34 \sim 0.36\text{Ni}, 0.04 \sim 0.05\text{Nb}, 0.05 \sim 0.06\text{V}, 0.013 \sim 0.015\text{Ti}, 0.006 \sim 0.026\text{Als}$) is rolled to 60 mm plate by $\Phi 550$ mm mill, end rolling temperature at 798 ~ 817 °C and cooling rate 5 ~ 20 °C/s. The effect of no-bearing Mo and bearing 0.18% Mo on structure and mechanical properties of the steel has been studied. Test results show that with cooling rate 15 °C/s, of no-adding Mo steel the tensile strength is 645 ~ 655 MPa, -40 °C impact energy is 168 ~ 200 J, and of 0.18% Mo steel the tensile strength is 677 ~ 679 MPa, -40 °C impact energy is 48 ~ 64 J. For the high strength hull steel EH460, the strength of plate shall be increased by adding Mo in steel to meet the ships' classification society standard requirement for strength of steel (yield strength ≥ 460 MPa, tensile strength 570 ~ 720 MPa and impact energy at -40 °C ≥ 46 J), but the impact energy of higher Mo content steel decreases more, therefore in real production the Mo content in high strength hull steel EH460 should be $\leq 0.15\%$.

Material Index Bull Steel EH460, Mo, TMCP, Structure, Strength, Impact Energy

我国每年要从国外进口大量的高技术含量、高附加值的高级别船板钢^[1-3], 因此需要研发大厚度、高强度及良好低温冲击韧性的船板钢^[4-5]。

国内钢厂通过采用微合金轧制, 结合热机械控制工艺 (TMCP- Thermo Mechanical Controlled Process) 试生产大厚度的 EH460 高强度船体结构用钢。为此, 在试轧前, 本文作者通过优化钢的化学成分、调节钢中 Mo 的含量, 制定不同的轧制工艺来对船板钢 EH460 的力学性能进行实验室研究。

1 实验材料

根据国内钢厂的实际情况及已有的研究结果表明, 设计成分时将碳的质量分数控制在 0.05% ~ 0.07%, 并添加适量微合金元素和合金元素可以满足使用要求^[6]。

本实验选用 300 mm 厚的连铸坯, 加工成厚度为 60 mm 的钢板, 分别设计含 Mo 与不含 Mo 的两种成

分的 EH460 级船板钢, 具体化学成分如表 1 所示。

2 轧制工艺制度

本实验在 $\Phi 550$ mm 热轧机组上将 300 mm 厚的铸坯轧制成厚度为 60 mm 的钢板。连铸坯的加热温度 (1200 ± 20) °C, 加热时间 5.5 h; 采用两阶段进行轧制: (1) 再结晶区控制轧制, 开轧温度定于 1050 °C, 而终轧温度定于再结晶温度以上, 在此控制区间, 通过变形-再结晶反复更替变形以细化奥氏体晶粒。(2) 未再结晶区控制轧制, 开轧温度定于 850 °C 左右, 终轧温度应保证高于 A_{r3} 线以避免产生混晶现象, 在此区间, 塑性变形使奥氏体晶粒被拉长, 使其内部形成高密度的变形带, 增加了相变时铁素体形核位置, 进而细化晶粒。具体轧制工艺路线如图 1 所示。

在本文中, 对于成品厚度为 60 mm 的钢板其中间坯厚度可设定为 170 mm。中间坯厚度是按照低

表 1 实验 EH460 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested steel EH460 / %

实验钢	C	Si	Mn	P	S	Mo	Als	Ni	Nb	V	Ti
1	0.08	0.33	1.52	0.003	0.002	-	0.006	0.34	0.05	0.05	0.013
2	0.06	0.20	1.51	0.013	0.002	0.18	0.026	0.36	0.04	0.06	≤0.015

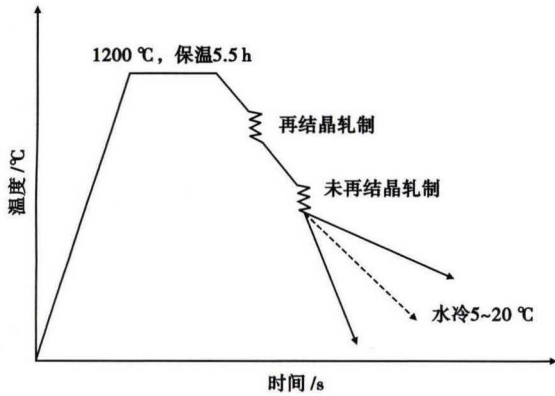


图 1 EH460 钢实验工艺示意图

Fig. 1 Schematics of tested process of steel EH460

碳钢未再结晶区总压下量在 60% 左右为最优原则确定的,即粗轧后的变形量使中间坯的厚度为成品厚度的 2.5 倍左右^[7-8]。本次实验共轧制 10 个道次,分为粗轧 3 个道次和精轧 7 个道次,粗轧时单道次压下率大于 15%,精轧时保证了大于 60% 的累计变形量且单道次压下率大于 12%。其具体压下规程如表 2 所示。表 3 为 EH460 实验钢在实际试轧过程中具体的工艺参数。

3 实验结果及讨论

分别在钢板纵向厚度的 1/4 及 1/2 处取拉伸和冲击试样。拉伸试样作直径 Φ10 mm 标距 50 mm;冲击试验用标准 V 型缺口试样。表 4 为 EH460 级船板钢的国家标准和 EH460 实验钢的力学性能检测结果。

3.1 拉伸性能

表 2 实验 EH460 钢的轧制压下规程

Table 2 Scheme of rolling reduction for tested steel EH460

道次/N	厚度/mm	压下率/%
0	300	-
1	250	16.7
2	205	18.0
3	170	17.1
4	145	14.7
5	125	13.8
6	108	13.6
7	93	13.9
8	80	14.0
9	69	13.8
10	60	13.0

从表 4 中的检测数据可以看出,两组实验钢的屈服强度及抗拉强度均达到了船级社标准要求,钢板的不同位置处的伸长率均大于 17%,满足船级社标准要求。含 0.18% Mo 实验钢的屈服强度明显高于不含 Mo 钢的屈服强度(约高出 50 MPa),相对于船级社标准要求仍有较大的富余量;此外,不同成分实验钢的 1/4 厚度处的强度均要高于 1/2 处强度。随着冷却速率的增大,不含 Mo 钢 1/4 厚度处的屈服强度最大值为 528 MPa,含 0.18% Mo 钢的屈服强度最大值可达到 568 MPa。

3.2 冲击性能

从表 4 可以看出,两组实验钢的冲击韧性均已满足 E 级 (-40 °C) 船板钢的低温冲击性能要求,但是含 0.18% Mo 实验钢的冲击功较低。不含 Mo

表 3 实验 EH460 钢的热轧工艺实测参数

Table 3 Measured hot-rolling process parameters of tested Steel EH460

实验钢	Mo/%	粗轧温度/°C	精轧温度/°C	终轧温度/°C	终冷温度/°C	冷却速率/(°C·s ⁻¹)
1-1	0	1 145	851	817	572	5
1-2	0	1 140	820	800	561	10
1-3	0	1 152	832	812	548	15
1-4	0	1 150	844	805	429	20
2-1	0.18	1 143	835	811	569	5
2-2	0.18	1 155	829	806	557	10
2-3	0.18	1 147	831	798	532	15
2-4	0.18	1 151	842	802	417	20

表 4 热轧实验 EH460 钢 60 mm 板的力学性能

Table 4 Mechanical properties of hot-rolled 60 mm plate of tested steel EH460

实验钢	取样位置	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	纵向冲击功/J	
					-20 °C	-40 °C
1-1	1/4	458	612	24.3	232/244/251	221/243/208
	1/2	434	595	25.2	208/210/205	198/205/200
1-2	1/4	476	632	23.1	190/202/182	210/190/204
	1/2	464	618	23.5	192/189/197	208/215/187
1-3	1/4	513	655	21.6	200/184/192	214/180/200
	1/2	501	645	21.8	190/176/188	203/168/185
1-4	1/4	528	671	20.3	198/212/235	175/202/198
	1/2	522	664	20.0	174/201/210	177/180/184
2-1	1/4	502	654	22.8	105/107/99	102/92/94
	1/2	485	642	22.4	94/91/85	80/79/82
2-2	1/4	531	677	21.3	82/87/85	82/75/60
	1/2	521	658	21.5	62/73/78	78/49/68
2-3	1/4	557	679	20.8	62/66/60	58/48/49
	1/2	546	677	20.8	70/68/55	64/55/54
2-4	1/4	568	688	18.8	58/56/45	55/52/38
	1/2	557	675	18.6	60/59/47	51/53/48
船级社标准要求		≥460	570 ~ 720	≥17.0	-	≥46

的钢 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的冲击功明显高于含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢,且前者冲击功数值相对稳定,单值偏低现象不明显,并且具有较大的富余量,一般都在 200 J 左右;含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢的冲击功数值几乎都在 90 J 以下,且个别实验钢的冲击性能并未达标。

3.3 显微组织

从图 2 中可以看出,当冷却速率较低时,不含 Mo 钢的显微组织中以针状铁素体和准多边形铁素体为主,含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢的显微组织中以铁素体和贝氏体为主,并伴有少量的铁素体;随着冷却速率的增大,两种成分钢的组织中贝氏体含量增多,含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢中的贝氏体逐渐变为板条贝氏体;由于组织中贝氏体所占比例的增多,且板条贝氏体的产生,导致实验钢的强度增大,塑性、韧性均有所降低,特别是含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢的低温冲击性能大幅度降低。

4 结论

(1) 在 TMCP 工艺相同的情况下,含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢与不含 Mo 钢的性能对比,前者能提高钢的屈服强度,但其低温冲击韧性明显低于后者,在本实验中,个别含 $0.18\% \text{ Mo}$ 实验钢的冲击功达不到 E 级别 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的韧性要求。

(2) 含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢的组织主要为板条状贝氏体和少量的准多边形铁素体,不含 Mo 钢的组织主要由针状铁素体和准多边形铁素体组成,其中还含有少量的贝氏体。此外,各组织所占比例与其冷却速率有关,且在相同冷却速率下,含 $0.18\% \text{ Mo}$ 钢的显微组织更为细小。

(3) 为了使钢板强度与冲击性能得到良好的匹配、进一步提高其低温冲击韧性,在实际生产过程中,可将 Mo 含量控制在 0.15% 之内;同时采用水冷的方式,将热轧后钢的终冷温度控制在 $450\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却速率可控制在 $5\sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,从而可以生产 EH460 级高强度船板钢。

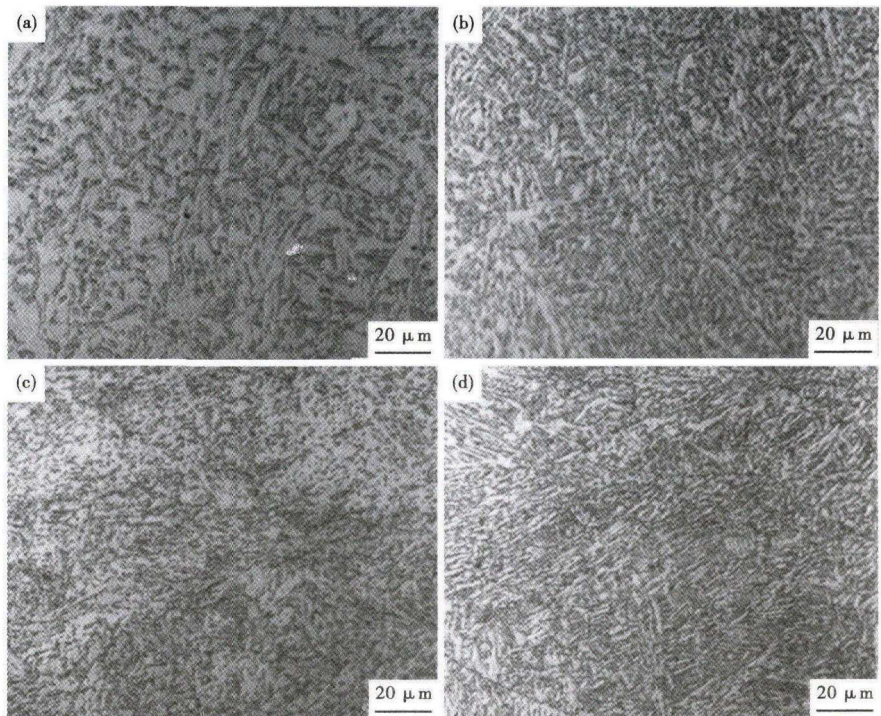


图 2 实验钢 EH460 板厚 $1/4$ 处的组织形貌:(a)(b) 不含 Mo 钢,多边形铁素体 + 少量粒状贝氏体;(c)(d) $0.18\% \text{ Mo}$ 钢,贝氏体 + 少量铁素体;冷却速率:(a)(c) $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$;(b)(d) $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$

Fig. 2 Morphology of structure of tested steel EH460 at plate $1/4$ thickness: (a) (b) non-bearing Mo steel, polygonal ferrite + minor globular bainite; (c) (d) $0.18\% \text{ Mo}$ steel, bainite + minor ferrite; cooling rate: (a) (c) $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$; (b) (d) $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$

参考文献

- [1] 倪志军,张向葵. 采用 TMCP 工艺对高强度船体结构钢 EH50 的研究与开发[J]. 钢铁,2009,44(5):48-49.
- [2] 徐 莉,麻庆申,刘学一,等. 首钢低温高韧性系列船板的研发[J]. 世界钢铁,2010,10(6):15-16.
- [3] 张 豪,雷运涛,魏金山. 高强度船体结构钢的现状与发展[J]. 特种钢结构,2004,19(2):39-40.
- [4] 李 丰,武会宾,唐 荻,等. FH690 级超高强船板显微组织特征及其对低温韧性影响[J]. 热加工工艺,2010,39(10):67-68.
- [5] Narasaiah N, Ray K K. Small Crack Formation in a Low Carbon Steel with Banded Ferrite-Pearlite Structure [J]. Material Science and Engineering. 2005,392(1-2):269-277.
- [6] 周桂峰,文慕冰,王学敏. 超低碳贝氏体钢 ULCB600 组织结构及性能的研究[J]. 钢铁,2000,35(12):47-48.
- [7] 王从增. 材料性能学[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001:56-58.
- [8] 贺达伦,胡 聆,胡执虎,等. 宝钢 TMCP 高强度船板的开发[J]. 轧钢,2007,24(1):231-234.

孙逸婷(1992-),女,硕士研究生,2015 年辽宁科技大学(本科)毕业,材料加工工艺研究。
E-mail:ting1992210@sina.com

收稿日期:2017-04-21