

利用超快冷开发低成本 E36 的实验研究

李鑫磊¹, 狄国标², 田鹏¹, 杨春卫¹, 沈开照¹, 王立坚¹

(1. 秦皇岛首秦金属材料有限公司 河北 秦皇岛 066326; 2. 首钢技术研究院 北京 100043)

摘要: 本文采用不添加微合金元素的成分设计, 利用超快冷(UFC)的大冷速的特点, 最大限度地发挥控制冷却的作用, 有效控制冷却过程, 改善钢材的微观组织, 获得良好的综合力学性能。为生产高强度 TMCP 交货 E36 船板提供一种低成本工艺路线。

关键词: TMCP; 超快冷; 船板; 显微组织

中图分类号: TG 142.1 **文献标识码:** A

Experimental Research on Low-cost E36 with UFC

LI Xin-lei¹, DI Guo-biao², TIAN Peng¹, YANG Chun-wei¹,
SHEN Kai-zhao¹, WANG Li-jian¹

(1. Qinhuangdao Shouqin Metal Materials Co., Ltd. Qinhuangdao 066326;

2. ShouGang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: Making good use of non-microalloy element composition design and high cooling rate characteristics of UFC, thermo mechanical control process(TMCP) was conducted to improve microstructure of the steel to obtain better combination mechanical properties. This paper provides a low-cost technology for high strength TMCP E36 ship plate.

Keywords: TMCP; UFC; ship plate; microstructure

我国是造船业大国,随着造船技术的发展,造船与海洋平台用钢的需求量不断增加,质量等级也越来越高,这就需要大量的高强度、具有良好低温冲击韧性、焊接性能的船体用结构钢。TMCP(Thermo Mechanical Control Process,热机械控制工艺)工艺就是一种有效的改善产品最终组织和性能的方法,TMCP的实质是控制轧制工艺和控制冷却工艺的结合,是细化晶粒和提高强度、韧性的重要手段,而利用超快冷的大冷速特点,能够更好地发挥控制冷却的作用,获得更为细小的晶粒,充分发挥“水是最廉价的合金元素”的特点,减少合金元素的添加,大大降低成本。

1 超快冷简介

某中厚板厂超快冷装置(UFC, ultra fast cool-

ing)是由东北大学设计,长7.2米,水量最大可达到500 m³/h,可以使钢板表面温度快速降低,在钢板内部和中心形成很大的温度梯度,根据钢的CCT曲线控制冷却速度及冷却终止点,厚度不同的钢板可实现冷速5~80 °C/s,终冷温度450~800 °C范围内控制,达到控制相变过程的目的。

1.1 超快冷的冷却原理

采用传统加速冷却装置,冷却水落到热钢板表面上以后,立刻沸腾汽化,在冷却水与钢板的界面上生成一层汽膜。由于汽膜与钢板之间的换热系数远小于水与钢板之间的换热系数,所以汽膜的存在影响了换热效率,使进一步提高冷却速度得到限制。无论是管层流还是水幕,水流下落到钢板表面击破汽膜的范围都是很有限制的,仅限于在连续水流正下方的局部区域内,离开这个区域,在钢板和冷却水之间的界面上仍然有大面

收稿日期: 2012-08-17

作者简介: 李鑫磊, 1982年生,男,硕士,工程师,毕业于东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,现从事船板、海工用钢开发工作,Email: landry_915@163.com。

积的汽膜存在,亦即所谓的膜沸腾,如图 1 所示。超快速冷却技术由于避开了传统形式下的过渡沸腾和膜沸腾,通过调整冷却系统喷嘴与钢板的距离以及喷射角度和喷水方式等,达到钢板与冷却水之间的完全接触而实现了全面核沸腾,使其在全温度区域的冷却能力大大提高^[1]。

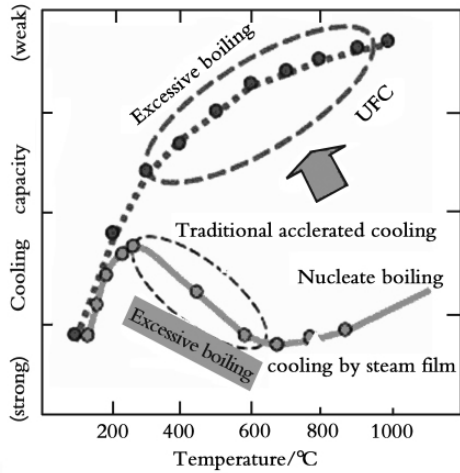


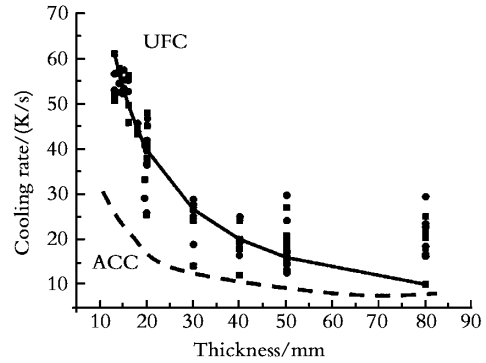
图 1 超快速冷却与传统冷却能力比较

Fig. 1 Comparison of UFC and the traditional cooling ability

1.2 超快冷的冷却能力

传统的冷却工艺与超快速冷却工艺在冷却速度方面存在相同点,即随着板厚的增加,冷却速度下降,而且钢板厚度方向上的差异性更加明显;但在同样钢板厚度情况下,超快速冷却的冷却强度几乎是传统冷却的冷却强度的两倍,如图 2 所示。传统的冷却工艺,相变前发生奥氏体中析出相长大和析出现象,铁素体相变为碳元素扩散所控制,晶粒尺寸较大,在铁素体晶粒内析出也较少。而超快速冷却工艺,相变前奥氏体中析出相来不及长大和再析出,相变时由于碳元素

扩散因超快速冷却而被“冻结”,此时铁素体相变进程的控制机制为晶格转变机制,铁素体晶粒尺寸细小,析出相更加细小和弥散,晶粒细化使得钢板强度得到提高,韧性不受损害^[2-3]。



2 超快速冷却条件下冷却强度随板厚度的变化关系
ig. 2 The Changes of cooling intensity with the plate thickness

2 化学成分设计

目前国内 TMCP 状态交货 E36 船板普遍采用低碳微合金化的成分设计,Nb 含量大都在 0.02% (质量分数,下同)以上,特别是成品厚度大于 30 mm 的船板,其 Nb + V + Ti 含量在 0.03% 以上,甚至更高。这种设计能保证较高的冲击韧性和焊接性能,但微合金加入量较大,造成制造成本的增加。另外,由于低碳—高锰的成分设计需要,在冶炼时有较低的终点碳含量,使用中碳锰铁甚至低碳锰铁,又要增加成本。本文针对成品厚度 50 mm 的 E36 船板,考虑到 UFC 最大冷速能够达到 18 °C/s,可以充分发挥水是最廉价的合金元素这一作用,在满足船级社碳当量要求的前提下,采用中碳成分设计,各元素含量如表 1 所示。

表 1 实验钢成分

Table 1 Composition of the experimental steel(w)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb + V + Ti	C_{eq}
0.12 ~ 0.15	0.10 ~ 0.30	1.2 ~ 1.5	<0.02	<0.005	0.03 ~ 0.05	<0.01	<0.38

3 TMCP 工艺

加热温度 1180 ~ 1220 °C,轧制采用两阶段

轧制,粗轧阶段采用大扭矩低速轧制,最大压下率达到 20% 以上,使形变在厚度方向充分渗透至中心部位,使奥氏体再结晶充分进行,细化晶粒^[4],压下规程见图 3。钢板采用两倍待温,终轧

温度在 810 ℃ 以下,通过低温大变形诱导铁素体机制,保证晶粒细小均匀^[4],考虑到超快冷速度,冷却均匀性好,终冷温度设定 540 ~ 560 ℃,

相比采用 ACC 冷却,终冷温度提高约 30 ~ 50 ℃,充分发挥大冷速的优势获得更为细小的晶粒,同时也保证了钢板冷后板形,工艺参数见表 2。

表 2 实验钢工艺参数

Table 2 Parameters of the experimental steel

Finished thickness /mm	Holding thickness /mm	Rolling temperature after holding /℃	Finishing temperature /℃	Final cooling temperature /℃	cooling rate / (℃ · s ⁻¹)
50	100	<850	<810	540 ~ 560	> 15

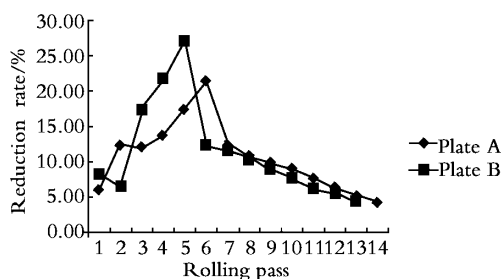


图 3 压下规程

Fig. 3 The reduction rules

4 试验结果

4.1 力学性能

为分析和摸索超快冷工艺冷却均匀性及对钢板组织性能的影响,分别在钢板头尾的左右 1/4 处和中间位置取样进行性能检验,两块试验钢板 A 与 B 的各项力学性能结果见表 3、表 4。样品编号 T—头部, W—尾部, L—左 1/4, M—中间, R—右 1/4, Q—钢板厚度 1/4 位置, C—钢板心部位置。

表 3 实验钢拉伸试验结果

Table 3 The tensile test results of the experimental steel

Serial number	Position	Upper yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation after fracture/%
Plate A-TL	Q	447	561	26.5
Plate A-TL	C	371	516	30.5
Plate A-TM	Q	424	557	26.5
Plate A-TM	C	361	511	30.0
Plate A-TR	Q	438	585	26.5
Plate A-TR	C	381	530	27.5
Plate A-WL	Q	412	566	25.0
Plate A-WL	C	372	516	27.5
Plate A-WM	Q	428	571	27.5
Plate A-WM	C	370	515	28.5
Plate A-WR	Q	455	601	23.0
Plate A-WR	C	374	527	29.0
Plate B-TL	Q	464	587	28.0
Plate B-TL	C	394	540	27.5
Plate B-TM	Q	448	587	23.5
Plate B-TM	C	404	546	27.0
Plate B-TR	Q	462	602	23.0
Plate B-TR	C	403	554	24.0
Plate B-WL	Q	426	576	24.0
Plate B-WL	C	354	519	31.5
Plate B-WM	Q	422	569	26.5
Plate B-WM	C	374	518	27.5
Plate B-WR	Q	430	580	26.0
Plate B-WR	C	369	526	26.0

表 4 实验钢冲击试验结果
Table 4 The impact test results of the experimental steel

Serial number	Position	Direction	-40℃				-60℃			
			Measured value/J	Measured value/J	Measured value/J	Average value/J	Measured value/J	Measured value/J	Measured value/J	Average value/J
Plate A-TL	Q	Longitudinal	179.0	182.0	151.0	170.7	77.0	158.0	172.0	135.7
Plate A-TL	C	Longitudinal	145.0	168.0	209.0	174.0	51.0	145.0	146.0	114.0
Plate A-TM	Q	Longitudinal	174.0	180.0	169.0	174.3	214.0	169.0	147.0	176.7
Plate A-TM	C	Longitudinal	19.0	28.0	22.0	23.0	5.1	4.2	15.0	8.1
Plate A-TR	Q	Longitudinal	146.0	80.0	163.0	129.7	137.0	107.0	103.0	115.7
Plate A-TR	C	Longitudinal	146.0	132.0	157.0	145.0	34.0	138.0	130.0	100.7
Plate A-WL	Q	Longitudinal	175.0	163.0	161.0	166.3	38.0	81.0	151.0	90.0
Plate A-WL	C	Longitudinal	21.0	67.0	101.0	63.0	13.0	11.0	9.8	11.3
Plate A-WM	Q	Longitudinal	169.0	231.0	189.0	196.3	168.0	162.0	158.0	162.7
Plate A-WM	C	Longitudinal	95.0	28.0	30.0	51.0	8.9	21.0	103.0	44.3
Plate A-WR	Q	Longitudinal	159.0	178.0	166.0	167.7	167.0	97.0	162.0	142.0
Plate A-WR	C	Longitudinal	38.0	20.0	105.0	54.3	29.0	8.4	11.0	16.1
Plate B-TL	Q	Longitudinal	175.0	166.0	165.0	168.7	163.0	155.0	160.0	159.3
Plate B-TL	C	Longitudinal	46.0	21.0	32.0	33.0	15.0	13.0	18.0	15.3
Plate B-TM	Q	Longitudinal	180.0	197.0	200.0	192.3	160.0	157.0	126.0	147.7
Plate B-TM	C	Longitudinal	26.0	24.0	21.0	23.7	7.2	9.8	7.7	8.2
Plate B-TR	Q	Longitudinal	186.0	191.0	143.0	173.3	134.0	140.0	167.0	147.0
Plate B-TR	C	Longitudinal	19.0	58.0	15.0	30.7	8.4	8.9	9.3	8.9
Plate B-WL	Q	Longitudinal	170.0	176.0	161.0	169.0	69.0	153.0	168.0	130.0
Plate B-WL	C	Longitudinal	60.0	49.0	47.0	52.0	7.9	4.7	7.9	6.8
Plate B-WM	Q	Longitudinal	172.0	152.0	188.0	170.7	161.0	137.0	100.0	132.7
Plate B-WM	C	Longitudinal	18.0	17.0	31.0	22.0	11.0	12.0	7.2	10.1
Plate B-WR	Q	Longitudinal	251.0	171.0	166.0	196.0	135.0	133.0	128.0	132.0
Plate B-WR	C	Longitudinal	22.0	25.0	16.0	21.0	12.0	7.2	12.0	10.4

由表 4 可见 实验钢厚度 1/4 处上屈服强度为 412 ~ 464 MPa 抗拉强度为 557 ~ 602 MPa 延伸率为 23.0% ~ 28.0% , - 40 ℃ 的冲击吸收功平均值都在 80 ~ 251 J , - 60 ℃ 的冲击吸收功平

均值在 38 ~ 214 J , 心部 1/2 处低温冲击稍差。钢板横向与纵向均匀性较好 , 力学性能指标满足船级社标准要求^[5] , 见表 5。

表 5 E36 船板力学性能标准要求(位置: 厚度 1/4 处)

Table 5 The mechanical properties standards of E36 ship plate(Position: The thickness of 1/4)

Yield strength/MPa	Tensile strength /MPa	Elongation after fracture /%	Impact absorbing energy (-40℃) /J
355	490 ~ 620	21	34

4.2 显微组织

钢板金相组织如图 4 所示,钢板各部位的组
织主要为多边形铁素体 + 珠光体,钢板 A 与钢板
B 表面均存在一定的过冷组织,出现较多贝氏
体,晶粒与组织分布较为均匀,说明采用超快冷
进行水冷冷却较为均匀,从图中也可以看出,合

理的控轧和超快冷工艺起到了很好的细晶强化
作用,晶粒直径小于 10 μm,晶粒较传统冷却工
艺(大于 10 μm)更为细小,这主要受益于超快冷
的“大冷速”特点,增大了奥氏体过冷度,提高了
形核率,从而晶粒得到细化^[6]。

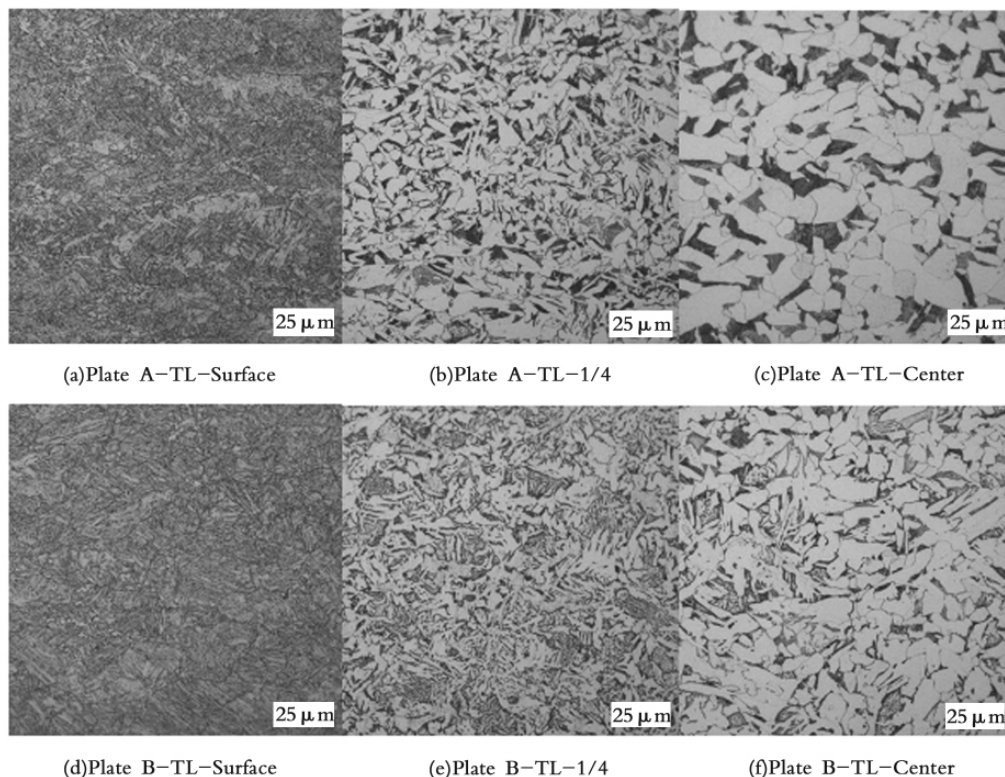


图 4 实验钢的金相组织

Fig. 4 The microstructure of the experimental steel

6 结论

(1) 采用超快冷工艺可以实现更大的冷却速
度,获得更为细小的晶粒,对于不添加微合金元
素的成分设计,能够使 50 mm 厚 E36 船板各项力
学性能达到船级社规范要求。

(2) 采用超快冷工艺实现了低成本高等级船
板的试制开发,试制的钢板头尾、左中右位置的
同板强度差在 20 MPa 以内,钢板性能均匀性较好。

(3) 采用超快冷技术充分发挥其冷却能力,
可以大大降低对微合金和合金元素的依赖,在材
料设计上实现低成本、减量化。

参考文献:

[1] 王国栋. 新一代控制轧制和控制冷却技术与创新

的热轧过程[J]. 东北大学学报(自然科学版),
2009, 30(7): 913-922.

Wang G D. New generation TMCP and innovative hot
rolling process[J]. Journal of Northeastern University
(Natural Science), 2009, 30(7): 913-922.

[2] 付天亮, 邓想涛, 王昭东, 等. 超快速冷却工艺对中
低碳钢组织性能的影响[J]. 东北大学学报(自然
科学版), 2010, 31(3): 370-373, 393.

Fu T L, Deng X T, Wang Z D, et al. Effect of UFC
technology on structure property of medium/low car-
bon steel[J]. Journal of Northeastern University(Nat-
ural Science), 2010, 31(3): 370-373, 393.

[3] 王有铭, 李曼云. 钢的控制轧制和控制冷却[M]. 北
京: 冶金工业出版社, 1995.

Wang Y M, Li M Y. Steel of Controlled Rolling and
Controlled Cooling[M]. Beijing: Metallurgical Indus-

- try Press ,1995.
- [4] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社 2001.
Cui Z Q. Metallurgy and Heat Treatment [M]. Beijing: China Machine Press 2001.
- [5] 中国船级社. 材料与焊接规范 [M]. 北京: 人民交通出版社 2012.
China Classification Society. Standard of Materials and Welding [M]. Beijing: People's Communications Press 2012.
- [6] 王鹏. 厚规格 E36 高强度船板轧制工艺研究 [J]. 轧钢 2008 25(5): 16-18.
Wang P. Research on rolling technology of E36 high strength thick ship plate [J]. Steel Rolling , 2008 ,25 (5): 16-18.

(编辑: 房威)