DH40级船板钢小轧机试验研究*

徐 强

(内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要:实验室进行了DH40级高强度钢板研制,研究了轧制工艺、正火工艺,进行了力学性能检测和显微组织分析,结合试验结果分析了正火工艺对钢板力学性能的改善。结果表明:通过合适的正火热处理工艺制度可适当调节钢板机械性能,但钢板显微组织中心偏析问题,还需继续探索各阶段工艺因素及之间关系,以达到消除带状组织的目标。

关键词:控轧控冷;高强钢;细化晶粒;正火

中图分类号:TG335 文献标识码:B 文章编号:1009-5438(2020)02-0045-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2020.02.014

Experimental Study on DH40 Ship Plate with Hot Rolling Test Machine

Xu Qiang

(*Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the paper, it is introduced the development of DH40 high-strength steel plate with studying the rolling and normalizing technologies, testing the mechanical properties as well as analyzing the microstructure and effects of normalizing technology on mechanical properties of steel plate combining with the test results. The results showed that the mechanical properties of steel plate could be adjusted appropriately by proper normalizing heat treatment process system. Due to the problem of center segregation for microstructure of plate, the process factors at each stage and their relation need to be explored continuously to eliminate the banded structure.

Key words: controlled rolling and controlled cooling; high-strength steel; refining grain; normalizing

造船工业的发展加速了对船板数量的需求。造船业的兴旺,不仅使造船板的消耗大量增加,而且给船板制造企业也带来了机遇。同时,随着造船工业的发展,对船板性能的要求也越来越高。除了要求具有高的强度和优良的低温冲击韧性外,对材料的可焊性和表面质量等要求也在不断提高。

随着微合金化的应用和控轧控冷技术的发展,使用TMCP生产工艺,不仅在产品设计方面可以采用更低的合金含量来降低成本,而且提高了产品的可焊性,同时提高了生产效率和产品质量[1]。

本文总结了在包钢技术中心Φ750 mm×550 mm热轧试验机组上进行DH40高强度船用钢板控轧控冷实验和正火实验研究。

1 试验材料及工艺过程

1.1 成分设计

为保证船舶的安全性和可靠性,各国船级社对不同规格、牌号船板的化学成分、力学性能和交货状

* 收稿日期:2020-01-07

作者简介:徐 强(1982-),男,山西省原平市人,工程师,现从事中试实验工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

态都作了严格的规定。为满足DH40级船板钢的高强度、良好低温韧性和优良焊接性能的要求，采用中碳、中锰、低硫，Nb、V、Ti微合金化的成分设计。实际化学成分如表1所示。

表1 DH40钢的化学成分(质量分数) %

等级	C	Si	Mn	P	S	Al_t	Nb + V + Ti
DH40	0.170	0.424	1.470	0.011	<0.002	0.030	<0.250

1.2 轧制工艺

实验坯料来自包钢中厚板生产线冶炼的钢坯，将坯料切割成300 mm(厚)×290 mm(宽)×310 mm(长)的小坯料，并保证小坯料长度方向与原坯料长度方向相同，实验轧制成品厚度为10 mm的厚板。

热轧实验在包钢技术中心Φ750 mm×550 mm热轧试验机组上进行。工艺采用两阶段控轧控冷技术，充分保证再结晶区的变形量。轧制后采用加速冷却，保证变形后的相变组织。通过成分和工艺的最佳配合，以获得高强度和良好低温冲击韧性。

钢坯在加热炉内加热到1 200 ℃左右，经高压水除鳞降温后，开轧温度在1 000～1 050 ℃，然后在奥氏体再结晶区和奥氏体未再结晶区的低温段轧制变形。利用奥氏体再结晶区和未再结晶区低温段的多道次轧制变形使晶粒充分细化，并尽可能降低轧制平均温度和增加道次压下量，充分细化晶粒和发挥合金元素的作用，使各种类型的强化达到最佳效果。

奥氏体再结晶区轧制时，单道次压下率在10%～23%范围内。

第二阶段轧制的温度要求：控制开轧温度，使其在880～910 ℃。

钢板轧制后进入层流冷却和超快冷却装置，进一步细化晶粒，使来不及析出的合金元素固溶，强化铁素体基体。终冷温度：600～650 ℃。

DH40船体结构用钢的标准性能及轧制后检验结果见表2。由表2可见，屈服强度、延伸率指标均达到标准要求，抗拉强度高于标准要求上限值，-20 ℃低温冲击功未达到标准要求。-40 ℃冲击功标准未要求，但考虑到产品实际使用的环境因素，做了延深到-40 ℃低温检验。

表2 DH40钢的标准性能与检测结果

名称	R_{el}/MPa	R_m/MPa	A/%	-20 ℃ A_{kv}/J			-40 ℃ A_{kv}/J		
				纵向			横向		
标准	≥390	510～660	≥20	≥41					
试验结果	525	705	23.5	14.1	29.4	31.7	23.5	37.6	43.6

2 正火实验及检验结果

根据轧制后-20 ℃低温冲击功未达到标准要求这一情况，对此进行不同工艺正火热处理试验，目的是为了调整不合格的低温冲击功性能指标。随后进行机械性能检验，正火工艺制度及机械性能对应如表3所示。

由表3可以看出，保温时间一样，采取三组不同温度进行正火工艺试验。通过正火试验调整，三组正火工艺制度对延伸率都有提高，但是提高延伸率同时还要保证屈服强度、抗拉强度满足标准要求。3#工艺制度下的试样屈服强度不满足标准要求，此工艺制度不合格；所以选1#、2#工艺制度下的试样进行了-20 ℃、-40 ℃低温冲击功试验，试验结果见表4。

表3 试验参数及机械性能

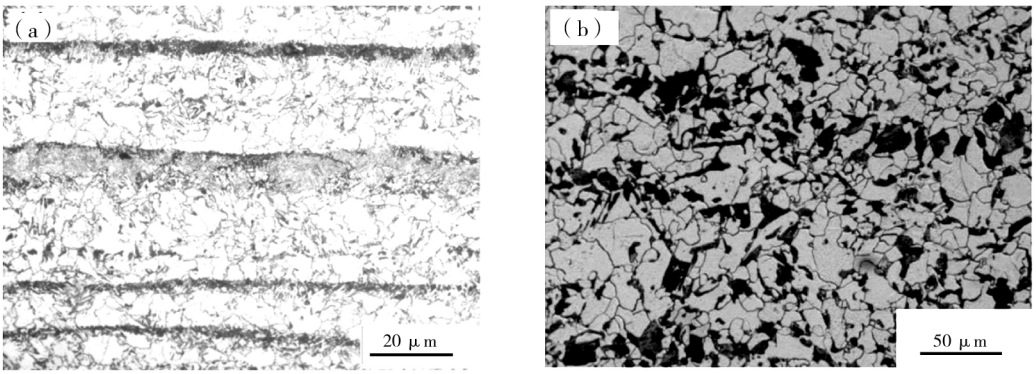
编号	热处理工艺	R_{el}/MPa	R_m/MPa	A/%
1#	890 ℃×10 min	486	634	26.0
	890 ℃×10 min	492	637	25.0
2#	900 ℃×10 min	440	585	28.0
	900 ℃×10 min	430	585	29.5
3#	910 ℃×10 min	370	540	31.0
	910 ℃×10 min	365	535	30.5

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 4　DH40 钢的低温冲击功结果

名称	方向	−20 ℃ A_{kv} /J			−40 ℃ A_{kv} /J		
轧制状态	纵向	14.1	29.4	31.7	23.5	37.6	43.6
1#	纵向	69.2	64.4	70.9	64.3	54.7	59.6
2#	纵向	81.1	84.1	75.2	46.8	58.4	70.6

由表 4 可以看出，两种工艺下低温冲击功性能都满足标准要求，综合表 3 检验数据情况，1#、2# 工艺制度下的试样检验结果都满足标准要求，但考虑到实际工业化生产节凑及衔接其他产品热处理温度问题，2# 工艺制度更合适。对 2# 工艺制度下试样进行显微组织观察，结果见图 1。



（a）热轧状态　　（b）正火后状态

图 1　试样的显微组织

晶粒度 10 级，晶粒平均尺寸为 10 μm，组织为 F + P。试样中心有明显的偏析现象。珠光体呈带状分布。经正火工艺后，晶粒度 9.5 ~ 10 级。

3　讨论

低合金高强度控轧钢的成分设计，必须对其焊接性重点考虑，在要求高强度和良好低温韧性的同时具有低碳当量，即普通合金元素 C、Mn 的合理控制及 Nb、V、Ti 微合金元素的充分利用。

C、Mn 元素降低从奥氏体到铁素体的相变温度（A_{r3}），有利于控制轧制的进行；更重要的是 A_{r3} 的降低抑制铁素体的生长，有利于晶粒细化。C 含量的提高虽然能提高强度和降低 A_{r3}，但恶化钢的低温韧性和焊接性能；因此应降低 C 含量，由此造成的 A_{r3} 升高可依靠提高 Mn 含量添加弥补。适当添加 Nb、V、Ti 微合金元素，充分发挥细晶强化、沉淀强化和相变强化的作用以达到高强韧性和优良的焊接性能[2]。

钢坯的最高加热温度决定着奥氏体的原始晶粒度和合金元素的固溶程度，并直接影响钢板的最终性能。钢坯在加热炉加热，奥氏体晶粒在 1 000 ~ 1 050 ℃开始粗化，钢中加入 Nb、V、Ti 微合金元素时，Nb、V、Ti 形成的碳氮化物质点阻止奥氏体晶粒聚集长大，可将奥氏体粗化温度提高到 1 150 ~ 1 250 ℃。另外，Nb(CN) 完全固溶的温度为 1 150 ~ 1 200 ℃。因此，在保证较低的轧制形变抗力前提下，钢的最高加热温度确定为 1 180 ~ 1 240 ℃。

奥氏体再结晶区轧制时，由于单道次压下率在 10% ~ 23% 范围内，小于发生完全再结晶的临界变形率，只能达到部分再结晶，若不能及时进入精轧而长时间待温，则因晶粒异常长大而造成严重混晶现象，混晶影响钢的韧性。为此，第一阶段控制轧钢温度和轧钢节奏尤为重要。

第二阶段轧制介于未再结晶区的低温段和两相区的高温段；在此阶段受合金元素的综合作用，析出大量的碳化物、氮化物质点钉扎在变形奥氏体晶界处，阻止再结晶并使奥氏体基体中的畸变得以积累。高温形变诱发 Nb、V、Ti 碳氮化物的析出。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由轧态显微组织照片中珠光体组织为等轴状多边形或者是球状，中心贝氏体偏析带较窄，所以其心部组织的冲击韧性肯定差。

在相对较短的时间内，正火对带状组织偏析及其中的硫化物夹杂的整体状况不会有太大的改善。但是还是可以看到在较高温度正火后，贝氏体带中有很多粒状贝氏体转变成铁素体和珠光体组织，使得贝氏体带中不再是完全的粒状贝氏体组织，还有铁素体和珠光体组织。铁素体组织的存在可以很好地改善贝氏体带给轧板冲击性能带来的有害作用。

本次试验过程中，此厚度正火后得到的是铁素体+等轴状的珠光体组织，其冲击韧性很好，并且在不同的正火温度下均表现出稳定的冲击韧性，说明它受正火温度和正火时间的影响较小，由于正火能使贝氏体带中的粒状贝氏体部分转变为铁素体+珠光体组织，从而大大的降低了贝氏体带对冲击韧性的损害，提高了材料的韧性。

4 结论

(1)本次试验中，利用Nb、V、Ti等微合金元素强化铁素体基体，采用控轧控冷可获得屈服强度525 MPa、抗拉强度705 MPa、延伸率23.5%的钢材产品。

(2)采用正火热处理工艺，能使轧制后的试验钢达到DH40船体结构用钢的标准性能，解决了DH40钢板轧制后-20 ℃低温冲击不满足标准的问题。

(3)试验中DH40钢板显微组织中心偏析问题，还需继续探索各阶段工艺，以达到消除带状组织的目标。

参 考 文 献

[1] 高珊，张才毅，章传国. 高强度高韧性TMCP般板的研制[J]. 世界钢铁，2009，(5)：14-17.

[2] 姚海涛. 高强度船板DH40的生产工艺研究[J]. 宽厚板，2006，(3)：27-29.

(上接第44页)

的使用，实现了包钢桥壳卷板产品的批量生产和供货。

参 考 文 献

[1] 刘东升，宋丹，王国栋. 汽车桥壳用热连轧微合金高强钢板的研究[J]. 钢铁，2000，35(2)：41-46.

[2] 宋振官. 60 kg级冲压桥壳钢600QK的生产实践和应用[J]. 宽厚板，2014，20(4)：28-31.

[3] 初元璋，祁鹏，狄丽华. 热轧冲压桥壳用钢板的研制开发[J]. 北京科技大学报，1999，21(4)：342-348.

[4] 孟延军. 轧钢基础知识[M]. 北京：冶金工业出版社，2005.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net