

# 冷却工艺参数对海洋工程用H型钢组织性能的影响

董春宇, 赵宪明, 周晓光, 赵景莉  
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 通过对 SM490YB 实验钢进行热轧和超快速冷却实验,研究了不同工艺参数对实验钢厚度方向不同位置的显微组织的影响,分析了 SM490YB 实验钢的强韧化机理. 实验结果表明:随着终冷温度的降低,实验钢厚度方向相同位置的贝氏体和针状铁素体含量逐渐增加,多边形铁素体和珠光体含量减少;实验钢的强度和低温韧性随着终冷温度的降低而增加,终冷温度为 480 ℃、返热温度为 554 ℃时,力学性能最佳. 冷却速率的增加可以提高实验钢的强度,但过快的冷却速率会损害材料的韧性.

**关 键 词:** 海洋工程用 H 型钢;超快冷;高强度;大规格;贝氏体

**中图分类号:** TG 142.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)04-0478-05

## Effect of Cooling Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Marine Engineering H-Beam Steel

DONG Chun-yu, ZHAO Xian-ming, ZHOU Xiao-guang, ZHAO Jing-li  
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: ZHAO Xian-ming, E-mail: zhaoxm@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** The effect of different process parameters on the microstructure and mechanical properties of marine engineering H-beam steel (SM490YB) were studied through the hot rolling and ultra-fast cooling experiments. The mechanisms of strengthening and toughening of SM490YB steel were analyzed. The results showed that with decreasing temperature of the final cooling, the contents of bainite and acicular ferrite increase at the same position in thickness direction of the tested steel, in contrast to those of polygonal ferrite and pearlite. Moreover, the strength and low-temperature toughness of the steel increase with the decrease of the final cooling temperature. When the final cooling temperature is 480 ℃ and the heat return temperature is 554 ℃, the performance of mechanical property is the best. The increase of the cooling rate can improve the strength of the tested steel, however the excessive cooling rate can deteriorate the toughness.

**Key words:** marine engineering H-beam steel; ultra-fast cooling; high strength; large size; bainite

随着海洋油气资源的开采,海洋工程用钢的需求量和力学性能要求逐渐增高. 主要原因:①现在应用的大多数海洋工程装备由于使用寿命的限制,开始更新换代<sup>[1]</sup>. ②全球对油气资源的开采依旧狂热,海洋的油气资源占有量大,目前各国都将开发资源的靶向对准海洋. 从 2005 ~ 2015 年,我国的 H 型钢的年产量由 500 ~ 550 万 t 增长到 1 430 万 t. 在全球经济持续走低的环境下,热轧 H 型钢(特别是大规格)呈现出供不应求的状况<sup>[2]</sup>. ③由于近海岸油气资源经过长时间的开采已经日

趋枯竭,现在正朝着深远海域发展,而深远海域具有更加强烈的风、波浪、地震等交变载荷共同作用的恶劣环境,因此对于应用的海洋工程用钢具有更加严格的力学性能要求<sup>[3]</sup>. 除了高强度、高韧性、大线能量焊接要求,同时还需要具备大厚度及大尺寸规格的要求<sup>[4]</sup>. 海洋工程用 H 型钢由于其自身具有的经济高效断面、质量轻、截面模数大、便于拼装组合的特点,已经成为建造海洋工程平台最具使用价值的优异钢材,呈现出极强的市场需求,尤其是高强度大规格 H 型钢. 目前,国产 H

型钢可以满足大部分海洋工程的需要,但是高强度大规格海洋工程用H型钢仍需从国外进口.

在 高 强 度 H 型 钢 实 际 生 产 中,普 遍 采 用“微合金化 + 控制轧制”技术,轧制线缺少对轧件性能的调控能力,空冷后组织主要为铁素体和珠光体,贝氏体等硬相组织含量很少<sup>[5-7]</sup>. 为了提高海洋工程用H型钢的强韧性,通过轧后超快速冷却技术,对H型钢中针状铁素体、粒状贝氏体、板条贝氏体等组织所占比例进行有效控制,从而影响H型钢最终的力学性能<sup>[7-9]</sup>.

## 1 实验材料和方法

选用 SM490YB 作为实验用钢,具体的化学成分如表 1 所示. 由于 H 型钢轧制时翼缘部分的压缩比小于腹板,用于承担更多的力学载荷,力学性能检测位置位于翼缘部分,因此本实验通过平

板轧制模拟翼缘部分的压下过程. 本实验的目标产品规格为 700 mm × 300 mm,大型 H 型钢的压缩比较小,为 4,坯料厚度为 96 mm,产品翼缘厚度为 24 mm. 加热温度为 1 200 ℃,开轧温度为 1 050 ℃,终轧温度为 850 ℃. 采用控制轧制和超快冷工艺结合的方式进行实验,研究不同终冷温度和冷却速率对实验钢组织性能的影响. 拟定超快冷后返热温度分别为 650,600,550 ℃,冷却速率分别为 20,45,60 ℃/s. 具体的工艺路线如图 1 所示,冷却工艺参数见表 2.

表 1 SM490YB 实验钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of SM490YB

tested steel( mass fraction)									%
C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Al	Fe	
0. 12	0. 24	1. 35	0. 005	0. 002	0. 04	0. 015	0. 025	余量	

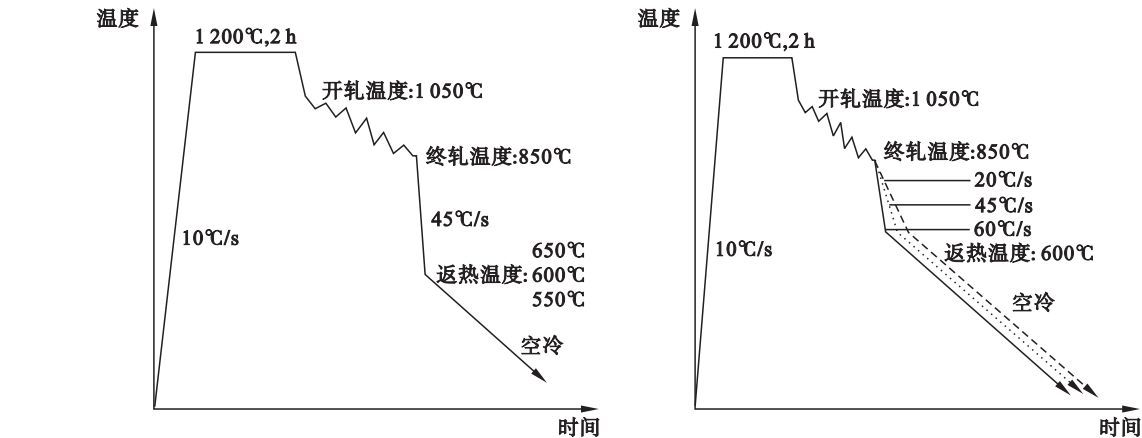


图 1 不同终冷温度和冷却速率的实验工艺方案

Fig. 1 Experimental schemes for different final cooling temperatures and cooling rates

表 2 冷却工艺参数

Table 2 Cooling process parameters

编号	终轧温度 ℃	终冷温度 ℃	返热温度 ℃	冷却速率 ℃·s <sup>-1</sup>
0#	850	—	—	—
1#	850	560	646	45
2#	850	534	600	45
3#	850	480	554	45
4#	850	556	618	20
5#	850	502	607	60

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同终冷温度的组织性能分析

对 不 同 终 冷 温 度 下 实 验 钢 厚 度 方 向 1/8, 1/4, 1/2 处 的 显 微 组 织 进 行 观 察,发 现 实 验 钢 的 显 微 组 织 主 要 有 板 条 贝 氏 体、粒 状 贝 氏 体、针 状 铁

素 体、多 边 形 铁 素 体 和 少 量 的 珠 光 体. 在 空 冷 条 件 下,实 验 钢 厚 度 方 向 的 显 微 组 织 为 铁 素 体 和 珠 光 体,越 靠 近 中 心 处 铁 素 体 晶 粒 尺 寸 越 大. 在 超 快 冷 条 件 下,随 着 终 冷 温 度 的 降 低,无 论 是 表 层 还 是 中 心 层,晶 粒 尺 寸 都 得 到 了 不 同 程 度 的 细 化. 随 着 终 冷 温 度 的 降 低,实 验 钢 厚 度 方 向 1/8 处 的 板 条 状 贝 氏 体 含 量 明 显 增 多,粒 状 贝 氏 体 含 量 明 显 减 少;厚 度 方 向 1/4 处 的 多 边 形 铁 素 体 逐 渐 减 少,粒 状 贝 氏 体 增 加,并 得 到 一 定 程 度 的 细 化;厚 度 方 向 1/2 处 的 多 边 形 铁 素 体 逐 渐 减 少,珠 光 体 消 失,粒 状 贝 氏 体 和 针 状 铁 素 体 数 量 逐 渐 增 加,晶 粒 越 来 越 细 小. 终 冷 温 度 为 480 ℃ 时,实 验 钢 厚 度 方 向 1/8 处 的 显 微 组 织 为 板 条 贝 氏 体 和 少 量 的 粒 状 贝 氏 体,1/4 处 的 显 微 组 织 为 粒 状 贝 氏 体 和 少 量 针 状 铁 素 体,1/2 处 的 显 微 组 织 为 针 状 铁 素 体 和 少 量 粒 状 贝 氏 体. 自 然 空 冷 条 件 下 实 验 钢 的 显 微 组

织主要为铁素体和珠光体. 0#,1#,2#,3#工艺下的显微组织如图 2 所示.

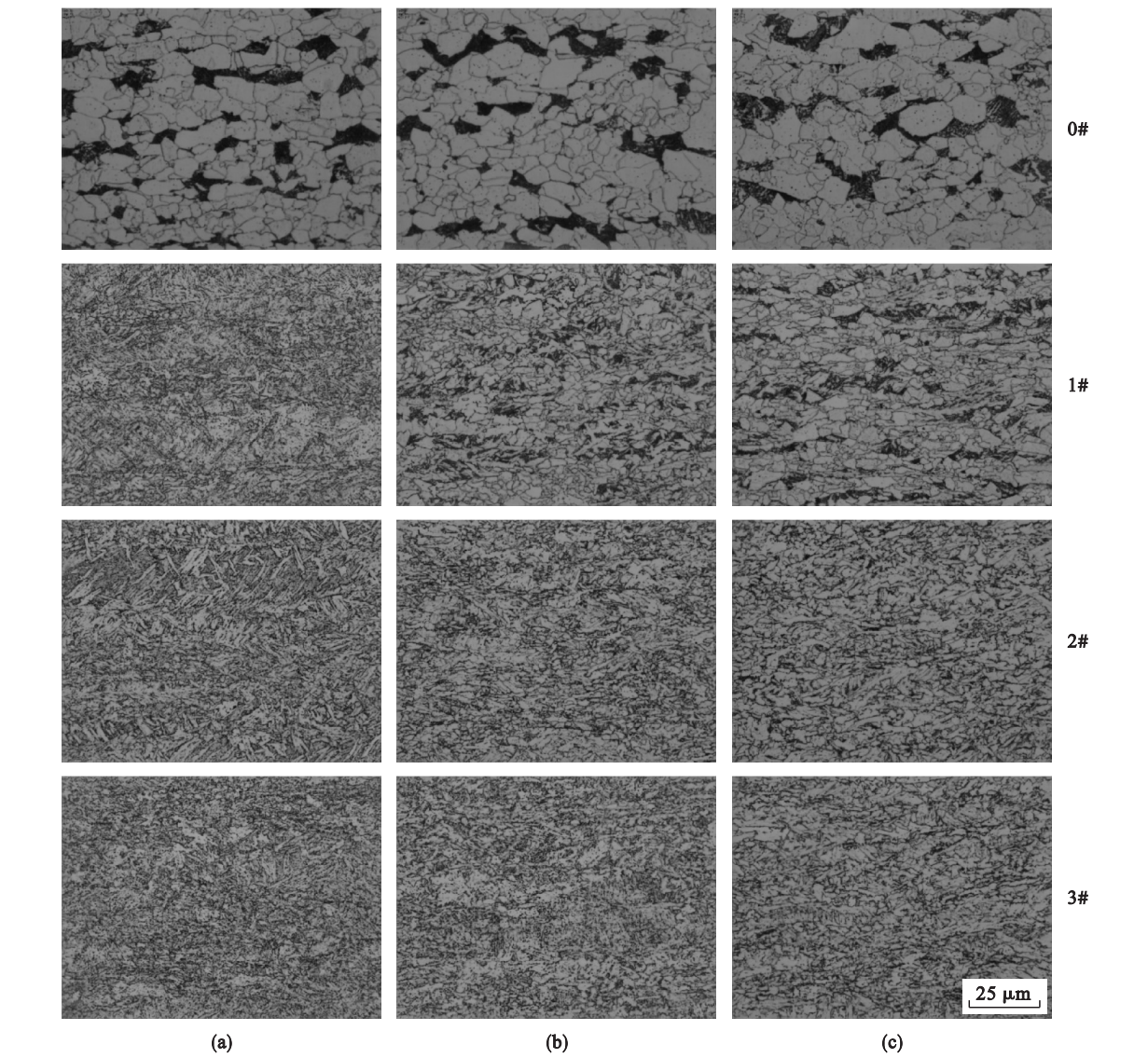


图 2 实验钢厚度方向显微组织  
Fig. 2 Microstructure in thickness direction of tested steel  
(a)—1/8; (b)—1/4; (c)—1/2.

对不同终冷温度下的实验钢进行力学性能测试发现,空冷条件下的实验钢综合力学性能最低,终冷温度为 480 ℃、返热温度为 554 ℃的 3#工艺强韧性结合最好,相对于相同终轧温度但采取自然空冷的 0#工艺来说,实验钢的屈服强度提高了 101 MPa,抗拉强度提高了 92 MPa,横向冲击韧性提高了 26 J,纵向冲击韧性降低了 5 J,延伸率降低了 6%. 随着终冷温度的降低,强度和低温冲击韧性都得到了不同程度的提升. 具体力学性能如表 3 所示.

表 3 不同终冷温度下 SM490YB 实验钢的力学性能					
Table 3 Mechanical properties of SM490YB tested steel at different final cooling temperatures					
工艺编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	-40 ℃冲击功/J		延伸率/%
			横向	纵向	
0#	456	559	185	230	25
1#	530	638	179	191	20
2#	534	639	194	225	20
3#	557	651	211	225	19



2.2 不同冷却速率的组织性能分析

4#工艺的冷却速率为20℃/s,5#工艺的冷却速率为60℃/s时,实验钢厚度方向显微组织见图3.与冷却速率为45℃/s的2#工艺对比发现,冷却速率的提高对组织均匀化和晶粒细化有很大的促进作用.随着冷却速率的增加,实验钢厚度方向1/8处的显微组织中板条贝氏体含量增加,粒状贝氏体含量减少;1/2处的铁素体含量减少,粒状贝氏体和针状铁素体含量增加.冷却速率为45℃/s时表层与中心层的晶粒尺寸差别比冷却速率为20℃/s时明显减小,这意味着增加冷却速率提高了厚度方向的组织均匀性.当冷却速率为20℃/s时,厚度方向1/8处的显微组织主要有

粒状贝氏体和少量的板条贝氏体;1/4处板条贝氏体基本消失,多数为多边形铁素体、粒状贝氏体和少量的珠光体;1/2处的显微组织主要是多边形铁素体,与1/4处相比,粒状贝氏体含量减少,珠光体含量增加.冷却速率为45℃/s的显微组织相比于20℃/s的组织,贝氏体的转变量增加并得到了明显的细化.厚度方向1/8处主要以板条贝氏体为主,1/4处以粒状贝氏体和针状铁素体为主,1/2处以针状铁素体和少量的粒状贝氏体为主.当冷却速率为60℃/s时,厚度方向1/4和1/2处以大量粒状贝氏体和针状铁素体为主,粒状贝氏体较为粗大.

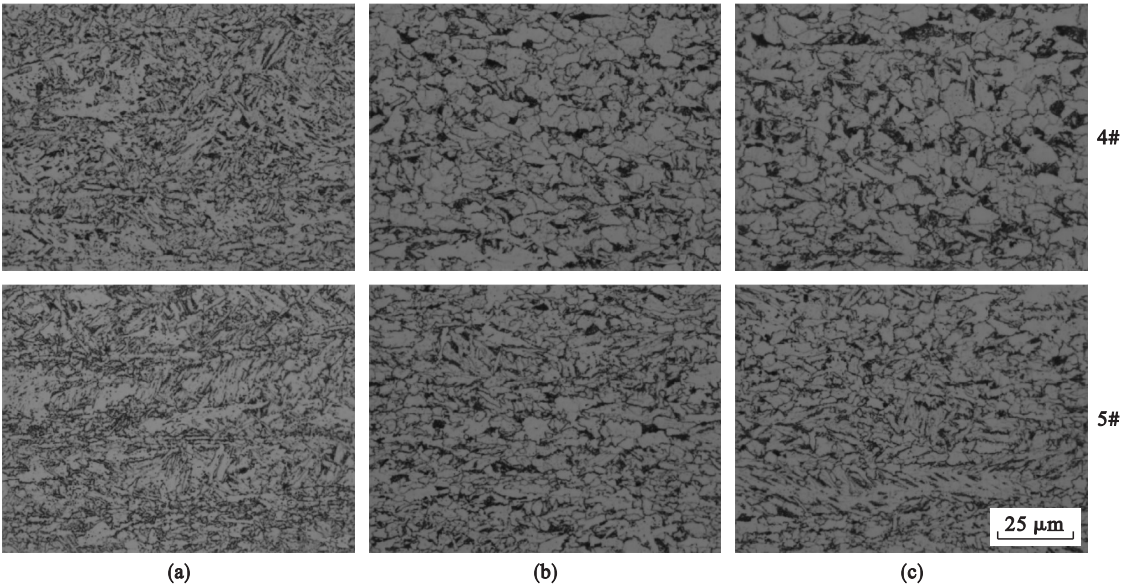


图3 实验钢厚度方向显微组织  
Fig. 3 Microstructure in thickness direction of test steel  
(a)—1/8; (b)—1/4; (c)—1/2.

不同冷却速率下实验钢的力学性能如表4所示.从中可知,冷速从20℃/s提高到45℃/s,力学性能得到了很大的提升,屈服强度提高了47MPa,抗拉强度提高了33MPa,-40℃横向冲击功提高了52J,纵向冲击功提高了33J,延伸率仍然保持20%.这说明冷却速率的提高有利于贝氏体含量增多、晶粒细化、厚度方向组织均匀性改善,对于实验钢强韧性的结合起到了非常明显的

促进作用.当冷却速率提高到60℃/s时,实验钢的强度变化并不明显,但韧性有所降低.因为对于轧后厚度为24mm的钢材来说,45℃/s的冷却速率已经足够大,冷却速率的继续增加不会对强度的提升有明显的促进作用,反而使有利于韧性提升的针状铁素体减少,大量的粗大粒状贝氏体增多,导致韧性降低.

表4 不同冷却速率下SM490YB实验钢的力学性能  
Table 4 Mechanical properties of SM490YB tested steels at different cooling rates

工艺编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	-40℃冲击功/J		延伸率/%
			横向	纵向	
4#	487	606	142	192	20
2#	534	639	194	225	20
5#	516	626	136	177	18

3 结 论

1) 终冷温度是影响最终组织配比的关键因素,随着终冷温度的降低,实验钢厚度方向 1/8 处的板条贝氏体含量明显增多,粒状贝氏体含量明显减少;厚度方向 1/4 处的多边形铁素体逐渐减少,粒状贝氏体增加,并得到一定程度的细化;厚度方向 1/2 处的多边形铁素体逐渐减少,珠光体消失,粒状贝氏体和针状铁素体逐渐增加.

2) 在不同终冷温度实验中,终冷温度为 480 ℃,返热温度为 554 ℃时,力学性能达到最佳:屈服强度达到 557 MPa,抗拉强度达到 651 MPa,−40 ℃横向冲击功达到 211 J,纵向冲击功达到 225 J,延伸率为 19% .

3) 冷却速率的提高使实验钢厚度方向表层的板条贝氏体含量逐渐增加,中心层的贝氏体和针状铁素体含量逐渐增加;冷却速率对于实验钢厚度方向的组织均匀性有明显的影 响,冷却速率越大,实验钢厚度方向组织形态越接近. 冷却速率的增加可以提高实验钢的强度,但过快的冷却速率会损害材料的韧性.

参考文献:

[1] 中国海洋工程网. “十二五”全球和中国海工产业分析[J]. 广东造船,2016,35(2):78.  
( China Offshore Engineering Network. “Twelve Five” global and China offshore industry analysis [ J ]. *Guangdong Shipbuilding*,2016,35 ( 2 ):78. )

[2] 赵一臣,于利峰,张春晖,等. 国产热轧 H 型钢的全球化营销思维初探[J]. 冶金标准化与质量,2016 ( 1 ):42 – 43.

( Zhao Yi-chen, Yu Li-feng, Zhang Chun-hui, et al. The globalization of domestic hot-rolled H-beam marketing thinking[ J ]. *Metallurgical Standards and Quality*,2016 ( 1 ): 42 – 43. )

[3] 袁鹏举. 海洋石油平台用 H 型钢研究与开发[D]. 沈阳:东北大学,2013:9 – 10.  
( Yuan Peng-ju. The research and development of H section steel used in offshore platform [ D ]. Shenyang: Northeastern University,2013:9 – 10. )

[4] 杨才福,苏航. 高性能船舶及海洋工程用钢的开发[J]. 钢铁,2012,47(12):1 – 8.  
( Yang Cai-fu, Su Hang. Research and development of high performance shipbuilding and marine engineering steel [ J ]. *Iron and Steel*,2012,47 ( 12 ):1 – 8. )

[5] 程鼎,杨俊. 高强度 H 型钢的研究与开发[J]. 中国冶金,2008,18(4):39 – 42.  
( Cheng Ding, Yang Jun. Development of high strength H-beam [ J ]. *China Metallurgy*,2008,18 ( 4 ):39 – 42. )

[6] 吴保桥,奚铁,龚庆华,等. Q460 以上级热轧高强 H 型钢的生产和应用现状[C]//全国钢结构技术学术交流会. 北京,2013:16 – 19.  
( Wu Bao-qiao, Xi Tie, Gong Qing-hua, et al. The production and application status of Q460 high-strength and higher strength hot-rolled H-beam [ C ]//National Steel Structure Technology Conference. Beijing,2013:16 – 19. )

[7] Shanmugam S, Ramisetty N K, Misra R D K, et al. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Nb-microalloyed steels[ J ]. *Materials Science & Engineering A*,2007,460(1):335 – 343.

[8] Olasolo M, Uranga P, Rodriguez-Ibabe J M, et al. Effect of austenite microstructure and cooling rate on transformation characteristics in a low carbon Nb-V microalloyed steel[ J ]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528 ( 6 ): 2559 – 2569.

[9] Cota A B, Santos D B. Microstructural characterization of bainitic steel submitted to torsion testing and interrupted accelerated cooling[ J ]. *Materials Characterization*,2000,44 ( 3 ):291 – 299.