

海洋石油平台用 H 型钢 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 连续冷却转变曲线

朱敏¹ 任安超¹ 徐光² 吉玉¹

(1 武汉钢铁(集团)公司研究院, 武汉 430080; 2 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘要 试验用 H 型钢(成分: 0.11C、0.25Si、1.50Mn、0.006S、0.012P、0.038Nb) 由 30 kg 真空感应炉冶炼, 并轧成 15 mm 钢板。通过 Formastor-F 热模拟机测定了 H 型钢在 0.1 ~ 100 °C/s 的冷却速度下的膨胀曲线, 结合金相法绘制出 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 钢的连续冷却转变 (CCT) 曲线。得出当冷却速度 ≤ 10 °C/s 时获得铁素体 + 珠光体组织, 当冷却速度 ≥ 20 °C/s 时得到上贝氏体组织, ≥ 100 °C/s 时为马氏体 + 少量贝氏体。

关键词 海洋平台 H 型钢 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb CCT 曲线

Continuous Cooling Transformation Curves of H Beam Steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb for Offshore Oil Platform

Zhu Min¹, Ren Anchao¹, Xu Guang² and Ji Yu¹

(1 Research and Development Center, Wuhan Iron and Steel (Group) Corp., Wuhan 430080;
2 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The test H beam steel (composition: 0.11C, 0.25Si, 1.50Mn, 0.006S, 0.012P, 0.038Nb) is melted by a 30 kg vacuum induction furnace and rolled to 15 mm plate. The continuous cooling transformation (CCT) curves of H-section steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb are plotted by thermal dilatation curves at cooling rate 0.1 ~ 100 °C/s measured using Formastor-F hot simulation machine and combined with metallographic examination. It is obtained that with cooling rate ≤ 10 °C/s, the steel has ferrite + pearlite structure, with cooling rate ≥ 20 °C/s, the steel has upper bainite structure and with cooling rate ≥ 100 °C/s, the structure of steel is martensite + minor bainite.

Material Index Offshore Oil Platform, H Beam Steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb, CCT Curves

随着世界各国对石油需求量的增加, 海洋石油开采量越来越大, 对石油平台用钢需求量越来越多。海上石油平台结构复杂, 使用环境恶劣, 因此海洋平台用钢要求具有足够的强度、良好的韧性以及可焊性。我国 H 型钢多为碳素结构钢, 近年来通过 Nb 微合金化方法, 开发出海洋石油平台用热轧 H 型钢, 为了更好的研发石油平台用热轧 H 型钢, 故对海洋石油平台用 H 型钢连续冷却转变行为进行了研究^[1-4]。

1 试验材料及方法

采用 30 kg 真空感应炉冶炼成钢锭, 经两辊轧机轧制成 15 mm 厚钢板, 试验钢化学成分(%) 为 0.11C、0.25Si、1.50Mn、0.006S、0.012P、0.038Nb。

连续冷却转变试验在热模拟试验机 Formastor-F 上进行。轧后钢板加工成 Φ3 mm × 10 mm, 端部开一个 Φ2 mm × 2 mm 孔的热模拟试样。

按照 YB/T5128-1993 要求, 试样以 200 °C/h 加热到 1 050 °C, 保温 10 min, 然后以 200 °C/h 冷却到室温, 记录温度-膨胀曲线, 根据曲线确定石油平台

用钢的临界点。

加工好的 11 个热模拟试样以 10 °C/s 加热到 900 °C, 保温 10 min 使其奥氏体化, 然后分别以 0.1 ~ 100 °C/s 冷却到室温, 绘制出温度-膨胀曲线、温度-时间曲线。经冷却后的试样, 取与加热电偶接触部分横截面, 加工成金相试样, 经 3% 乙醇溶液浸蚀后, 观测金相组织; 试验后的试样, 经抛光后利用 AAV-502 显微硬度计测量其维氏硬度, 结合金相法及硬度法, 最终绘制出连续冷却转变曲线。

2 试验结果与分析

2.1 临界点测定

从膨胀曲线上确定临界点的方法通常有 2 种: 顶点法和切线法。顶点法是取膨胀线上转折最明显的点作为临界点。这种方法的优点在于拐点明显, 缺点是它确定的转变开始温度比真实的高, 而转变结束温度又比真实的低。切线法是取膨胀曲线直线部分的延长线与曲线部分的分离点做临界点, 这种方法优点在于接近真实的转变开始温度, 缺点是在于分离点的确定有一定的随意性, 误差较大^[1]。

根据温度膨胀曲线,采用顶点法,测定各临界点温度 $Ac_1 = 699\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Ac_3 = 821\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Ar_1 = 567\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $Ar_3 = 707\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过公式(1)计算出 $M_s = 427\text{ }^\circ\text{C}$ 。

$$M_s = 520 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo \quad (1)$$

式中: M_s - 马氏体转变开始点;元素符号- 钢中元素的质量分数 $\times 100$ 。

2.2 绘制温度-膨胀曲线

常见的连续冷却转变曲线的绘制,有膨胀法、磁性法、差热分析法、金相等。本试验采用膨胀法绘制连续冷却转变曲线。

本实验按照 200 ms 记录一次温度和膨胀量,根据温度-膨胀数据,利用切线法绘制出不同冷却速度下温度-膨胀曲线,见图 1。

当钢发生固态相变时,伴随着体积的变化,从而引起热膨胀的不连续变化。通过热膨胀的变化,就可以研究在不同温度下膨胀系数和钢的相变温度。当相变发生时,由于新相与旧相的结构发生了变化,比容不同,因此钢的体积发生变化,表现在温度-膨胀曲线上就是出现了拐点。钢中不同的组织有不同的热膨胀系数,其中奥氏体 $>$ 铁素体 $>$ 珠光体 $>$ 贝氏体 $>$ 马氏体,因此在冷却过程,钢中铁素体析出、奥氏体分解为珠光体或马氏体时,将伴随着体积的膨胀,在 $\gamma\text{-Fe}$ 与 $\alpha\text{-Fe}$ 相变过程中,铁素体所占比例越大,体积效应也较大;碳化物含量高,则体积效

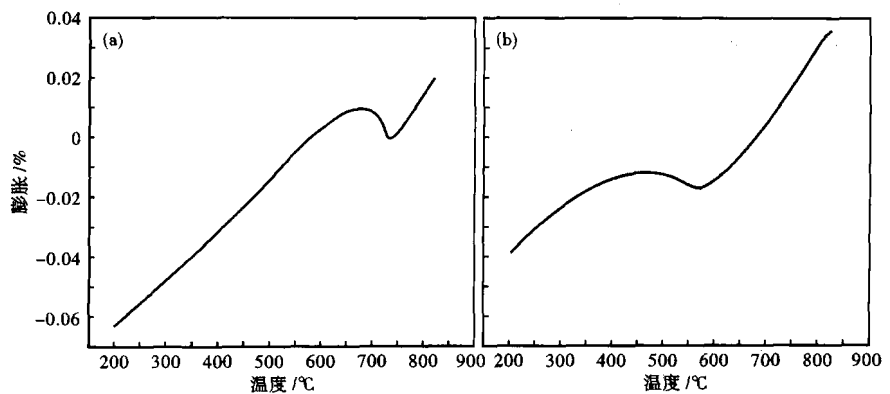


图1 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 钢的膨胀曲线,冷却速度:(a)0.1 °C/s;(b)100 °C/s

Fig.1 Dilatation curves of steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb, cooling rate: (a) 0.1 °C/s; (b) 100 °C/s

应小^[1]。

从图 1 可以看出,冷却过程中,当从奥氏体中析出铁素体和奥氏体转变为珠光体时,膨胀曲线由于试样体积增大而表现为膨胀,当奥氏体全部转变成铁素体和珠光体后,膨胀曲线随着温度的降低而继续表现为收缩,从而出现拐点,确定不同温度下转变点。

2.3 不同冷却速度下组织分析

由于膨胀法只能从曲线上分析奥氏体转变产物的类型,不能直接观察,当转变数量少或者转变点不明显时,测量的准确度受到影响。金相分析法是对膨胀法的一个有效补充,根据金相分析结果,提高测量准确度。

通过金相分析,当冷却速度 $\leq 10\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,组织为铁素体 + 珠光体,当冷却速度达到 $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 时,出现贝氏体组织,随着冷却速度增加,贝氏体含量越来越多;当冷却速度继续增加到 $50\text{ }^\circ\text{C/s}$,钢中出现马

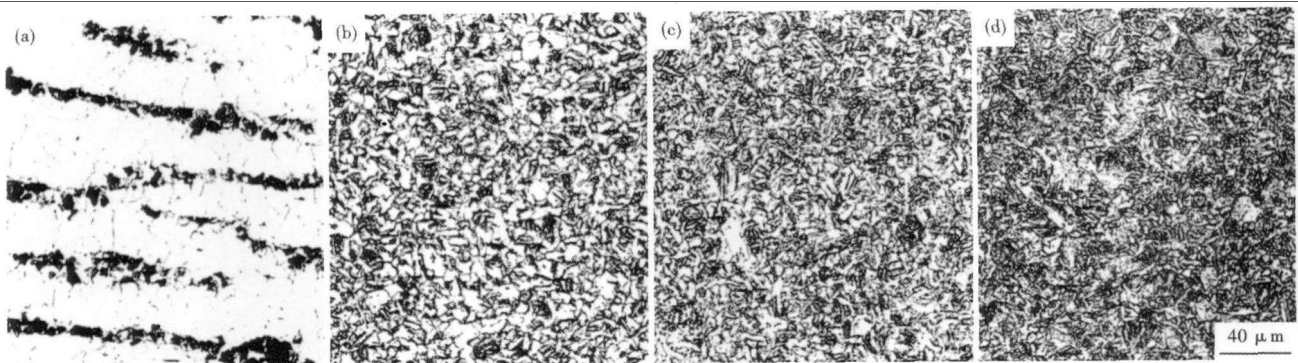


图2 冷却速度对0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 钢组织的影响:(a)0.2 °C/s,铁素体+珠光体;(b)20 °C/s,贝氏体;(c)50 °C/s,贝氏体+马氏体;(d)100 °C/s,马氏体+贝氏体

Fig.2 Effect of cooling rate on structure of steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb: (a) 0.2 °C/s, ferrite + pearlite; (b) 20 °C/s, bainite; (c) 50 °C/s, bainite + martensite; (d) 100 °C/s, martensite + bainite

氏体,当冷却速度达到 100 ℃/s时,组织为马氏体 + 贝氏体,不同冷却速度下组织见图 2。

2.4 不同冷却速度下显微硬度

连续冷却转变曲线测定中,根据不同冷却速度下试样硬度的测定,辅助确定某些较难分辨组织。根据显微维氏硬度测定试验,当冷却速度 < 10 ℃/s 时,维氏硬度在 140 ~ 180 HV;当冷却速度 ≥ 10 ℃/s 时,维氏硬度大于 270 HV,组织发生明显转变,当冷却速度超过这一临界点时,硬度快速上升;当冷却速度 ≥ 20 ℃/s 时,硬度大于 420 HV,钢中出现贝氏体组织;随着冷却速度增加,维氏硬度大于 490 HV,钢中出现马氏体组织。

2.5 转变点测定

根据膨胀曲线拐点位置,结合金相组织分析,判定各转变温度和类型,转变类型及临界温度见表 1。

表 1 冷却速度对 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 钢转变组织及临界温度的影响

Table 1 Effect of cooling rate on transformation structure and critical temperature of steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb

| 冷却速度/ (℃·s ⁻¹) | 组织 | A→F 温度/℃ | | A→P 温度/℃ | | A→B 温度/℃ | |
|-------------------------------|-----------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
| | | 开始 | 结束 | 开始 | 结束 | 开始 | 结束 |
| 0.1 | F + P | 748 | 706 | 706 | 585 | | |
| 0.2 | F + P | 740 | 701 | 701 | 575 | | |
| 0.5 | F + P | 739 | 700 | 700 | 564 | | |
| 1 | F + P | 737 | 681 | 681 | 539 | | |
| 2 | F + P | 739 | 664 | 664 | 516 | | |
| 5 | F + P | 737 | 608 | 608 | 504 | | |
| 10 | F + P | 735 | 593 | 593 | 469 | | |
| 20 | F + B | 715 | 577 | | | 577 | 481 |
| 30 | F + B | 724 | 594 | | | 594 | 468 |
| 50 | B + M + F | 724 | 584 | | | 584 | 439 |
| 100 | M + B | | | | | 573 | 427 |

由表 1 可以看出,当奥氏体冷却时,单相奥氏体温度高于 Ar₃ 时首先析出铁素体,形成先共析铁素体。冷却速度小于 10 ℃/s 时,随着温度的进一步降低,当温度小于 Ar₃ 时发生共析转变,形成珠光体;冷却速度达到 20 ℃/s 时,在 577 ℃ 时过冷奥氏体发生贝氏体转变,形成上贝氏体;冷却速度达到 100 ℃/s 时,钢中将不再有铁素体析出,过冷奥氏体转变成马氏体和少量贝氏体。

2.6 连续冷却转变曲线绘制

利用膨胀法(YB/T5128-1993),结合金相法,绘制出海洋石油平台用热轧 H 型钢连续冷却转变曲线见图 3。

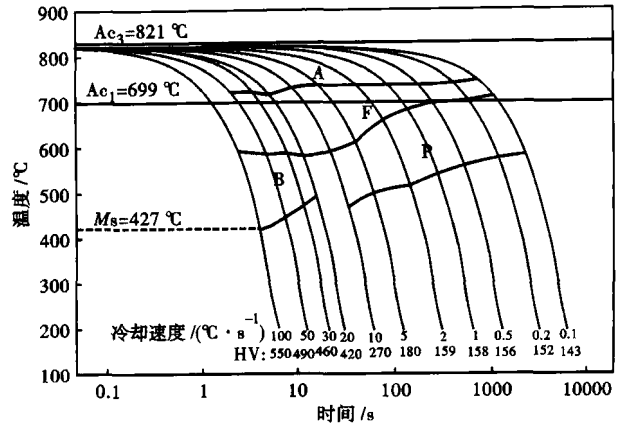


图 3 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb 钢的连续冷却转变曲线
Fig. 3 Continuous cooling transformation curves of steel 0.11C-0.25Si-1.50Mn-0.038Nb

3 结论

(1) 通过热模拟试验,利用膨胀法和金相法,确定不同冷却速度下相变点和组织,当冷却速度大于 10 ℃/s 时,钢中出现贝氏体组织,对海洋石油平台 H 型钢的性能产生不利影响。

(2) 通过绘制连续冷却转变曲线,为制定海洋石油平台 H 型钢冷却工艺提供理论指导。

参考文献

- 徐光,王巍,张鑫强,等.金属材料 CCT 曲线测定及绘制[M].北京:化学工业出版社,2009:142.
- 崔忠圻,覃耀春.金属学与热处理[M].北京:机械工业出版社,2007,242-246.
- 王超,赵刚,蔡国庆,等.高碳钢帘线 72A 连续冷却转变(CCT)特性[J].特殊钢,2008,29(5):13-15.
- Trzaska J, Dobrzanski L A. Modelling of CCT Diagrams for Engineering and Constructional Steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007(192-193):504-510.

朱敏(1981-),男,硕士,工程师,东北大学毕业,型钢新品种开发。

收稿日期:2012-05-11