

# 9Ni 钢焊接热影响区组织转变规律的研究

Study on Phase Transformation in Welding Heat Affected Zone of 9Ni Steel

严春妍<sup>1</sup>, 李午申<sup>2</sup>, 白世武<sup>3</sup>, 薛振奎<sup>3</sup>

(1 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072;

3 中国石油天然气管道科学研究院, 河北 廊坊 065000)

YAN Chun-yan<sup>1</sup>, LI Wu-shen<sup>2</sup>, BAI Shi-wu<sup>3</sup>, XUE Zhen-kui<sup>3</sup>

(1 College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University,

Changzhou 213022, Jiangsu, China; 2 School of Material Science and

Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3 Pipeline

Research Institute of CNPC, Langfang 065000, Hebei, China)

摘要: 采用热模拟技术研究了液化天然气储罐用 9Ni 钢焊接热影响区的组织转变规律。实验结果表明, 9Ni 钢经历热循环后的显微组织类型包括贝氏体和马氏体两种。低冷却速度条件下, 9Ni 钢经历热循环后的主要转变产物为贝氏体(包括粒状贝氏体和上贝氏体两种类型); 随着冷却速度的提高, 组织类型由粒状贝氏体向上贝氏体转化。高冷却速度条件下, 经历热循环后的转变产物为马氏体。

关键词: 9Ni 钢; 组织转变; 热影响区

中图分类号: TG 142. 79 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)02-0006-04

**Abstract:** Thermal simulation with Gleeble was performed to investigate phase transformation in the heat affected zone of 9Ni steel for liquefied natural gas storage tanks. Results showed that bainite and martensite might be obtained after experiencing heat cycles. With low cooling rates, a mainly bainitic microstructure( including granular bainite and upper bainite) developed after experiencing heat cycles. When cooling rate increased, granular bainite was more likely to generate than upper bainite. With high cooling rates, a mainly martensitic microstructure developed after experiencing heat cycles.

**Key words:** 9Ni steel; phase transformation; heat affected zone

9Ni 钢是 20 世纪 40 年代由美国首先开发出的含 Ni 量为 9% (质量分数) 的钢种, 使用温度最低可达 - 196℃, 是国际上建造液化天然气( Liquefied Natural Gas, LNG) 储罐广泛使用的钢种。9Ni 钢属于低温用钢, 具有良好的强韧性匹配, 其低温力学性能主要决定于化学成分、钢的纯净度以及微观组织<sup>[1]</sup>。9Ni 钢在经历焊接热循环作用后, 焊接热影响区的力学性能在很大程度上取决于该区域的最终组织类型和形态, 且由于焊接热影响区( Heat Affected Zone, HAZ) 是整个焊接接头的薄弱环节, 因此研究该区域的组织转变规律、确定组织变化与焊接热循环之间的关系, 对于预测焊接接头的性能和控制焊接质量是极其重要的。

由于热循环峰值温度在 1300℃ 以上的过热粗晶区为焊接热影响区中力学性能较差的部分, 因此, 本工作以该区域为研究对象, 采用热模拟技术对其进行模拟, 观察和分析了不同焊接热循环条件下该区域的组织类型和构成、组织形态以及 M-A 组元, 研究了 9Ni

钢粗晶热影响区的组织转变规律, 从而提高 9Ni 钢焊接接头的低温性能、保证 LNG 低温储罐的安全运行提供了可靠的实验依据。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

实验材料为淬火+ 回火态 9Ni 钢, 牌号为 ASTM A553,  $A_{c1}$  和  $A_{c3}$  分别为 620℃ 和 730℃, 显微组织为回火马氏体和质量分数为 7% 左右的残余奥氏体。实验用 9Ni 钢的主要化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示, 显微组织如图 1 所示。

表 1 9Ni 钢的化学成分(质量分数/ %)						
Table 1 Chemical composition of 9Ni steel( mass fraction/ %)						
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr
0.036	0.592	0.003	0.0003	0.209	9.115	0.042

表 2 9Ni 钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of 9Ni steel

Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%	Impact energy (-196℃)/J
703	727	24	230

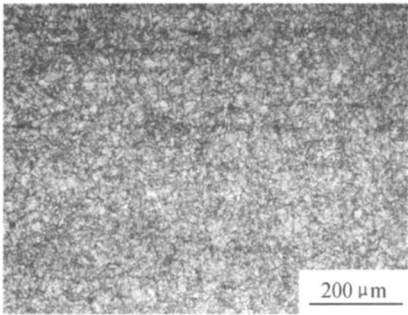


图 1 9Ni 钢母材显微组织

Fig. 1 Optical micrograph of 9Ni base material

1.2 实验方法

在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行试验。热模拟试样尺寸为  $\phi 6\text{mm} \times 90\text{mm}$ ，加热速率为  $200\text{ }^\circ\text{C/s}$ ，峰

值温度为  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ 、保温  $1\text{ s}$ ，冷却阶段的高温段以  $40\text{ }^\circ\text{C/s}$  冷却至  $750\text{ }^\circ\text{C}$ ，随后分别以  $0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 60\text{ }^\circ\text{C/s}$  等一系列不同冷却速度冷却至室温。

采用 OLYMPUS GX-51 光学显微镜、PHILIPS XL-30 ESEM 环境扫描电镜和 JEM-100CX II 型透射电镜，对经历了不同热循环的试样进行显微组织观察，并采用定量金相法对热模拟试样中各相的比例进行确定。

2 结果与讨论

2.1 组织类型和形态

经历热循环后，在缓慢冷却条件下（冷却速度为  $0.02\sim 1.5\text{ }^\circ\text{C/s}$ ），室温下得到的转变产物为贝氏体和马氏体混合组织；冷却速度达到  $2\text{ }^\circ\text{C/s}$  以上时，所得的组织为马氏体。不同热循环条件下的贝氏体和马氏体形貌分别如图 2 和图 3 所示。

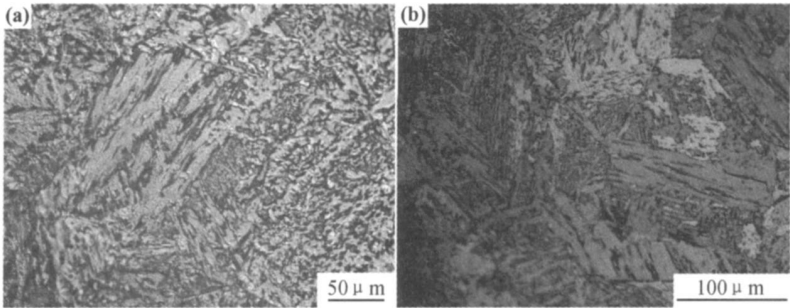


图 2 不同冷速下贝氏体形貌 (a)  $0.02\text{ }^\circ\text{C/s}$ ；(b)  $0.3\text{ }^\circ\text{C/s}$

Fig. 2 Bainite morphologies with different cooling rates (a)  $0.02\text{ }^\circ\text{C/s}$  ; (b)  $0.3\text{ }^\circ\text{C/s}$

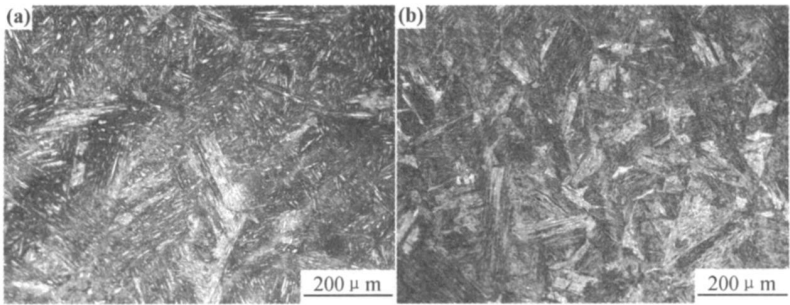


图 3 不同冷速下马氏体形貌 (a)  $5\text{ }^\circ\text{C/s}$ ；(b)  $60\text{ }^\circ\text{C/s}$

Fig. 3 Martensite morphologies with different cooling rates (a)  $5\text{ }^\circ\text{C/s}$  ; (b)  $60\text{ }^\circ\text{C/s}$

2.1.1 贝氏体

在低冷速范围内，经历热循环后的组织类型主要为贝氏体，包括上贝氏体和粒状贝氏体两种形态（见图 4），贝氏体铁素体基体具有板条状形貌。

上贝氏体是在贝氏体转变温度区的上部形成的，

碳化物在铁素体板条之间析出，析出的方向与贝氏体铁素体的板条束方向平行。

粒状贝氏体形成温度也较高，不仅在奥氏体晶界形成，也可在奥氏体晶内形成。含碳量较低的 9Ni 钢贝氏体转变的起始温度  $B_s$  较高<sup>[2]</sup>，在稍低于  $B_s$  温度

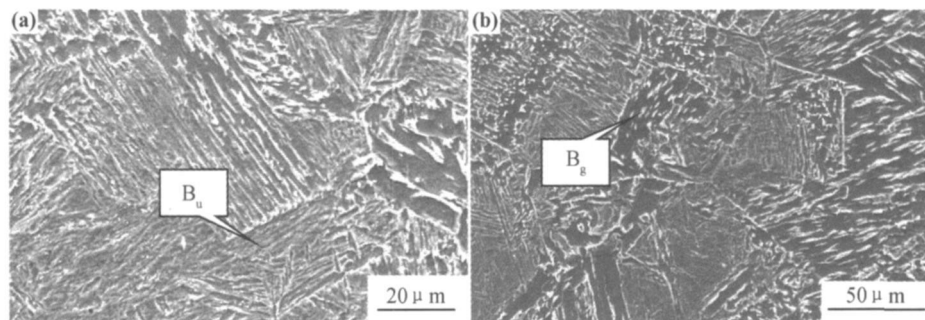


图 4 上贝氏体和粒状贝氏体形貌 (a) 上贝氏体; (b) 粒状贝氏体

Fig. 4 Morphologies of upper bainite and granular bainite

(a) SEM micrograph of upper bainite; (b) SEM micrograph of granular bainite

并高于上贝氏体形成温度有一个粒状贝氏体转变区。贝氏体铁素体基体上分布呈方向性排列的岛状富碳奥氏体或其冷却转变产物(通常是马氏体, 残余奥氏体和马氏体的混合组织即 M-A 组元)。

## 2. 1. 2 马氏体

在快速冷却条件下, 9Ni 钢经历热循环后的组织类型为马氏体。由于 9Ni 钢的含碳量很低, 形成的马氏体为低碳板条马氏体(见图 5)。

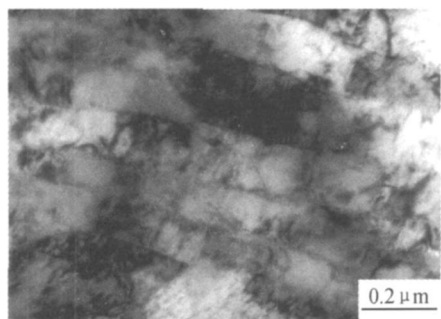


图 5 马氏体 TEM 形貌

Fig. 5 TEM morphology of martensite

由图 5 可以看出, 马氏体成条排列, 马氏体板条内部具有高密度位错的亚结构, 每条马氏体的宽度不一, 约为  $0.15\mu\text{m}$ , 相邻的马氏体条大致平行(位相差较小), 这些大致平行的马氏体条组成一个马氏体领域。

## 2. 2 组织转变规律

### 2. 2. 1 组织形态的变化

冷却速度对相变过程有着较大的影响, 它不仅会影响材料焊后的组织类型, 还能影响组织的形态。

当冷速较慢时, 所得的组织为上贝氏体、粒状贝氏体的混合组织, 此外还有极少量的马氏体组织。上贝氏体和粒状贝氏体均属于贝氏体转变区高温部分的产物, 但铁素体条的厚度和排列间距大小方面有所不同, 上贝氏体组织的铁素体条更细、更连续。粒状贝氏体由接近相互平行的铁素体条束构成, 在铁素体板条间以及不同铁素体条束间分布着长条形或不规则多边形的第二相 M-A 小岛(见图 6)。

冷速非常低时(如  $0.02^\circ\text{C}/\text{s}$ ), 在贝氏体转变区高

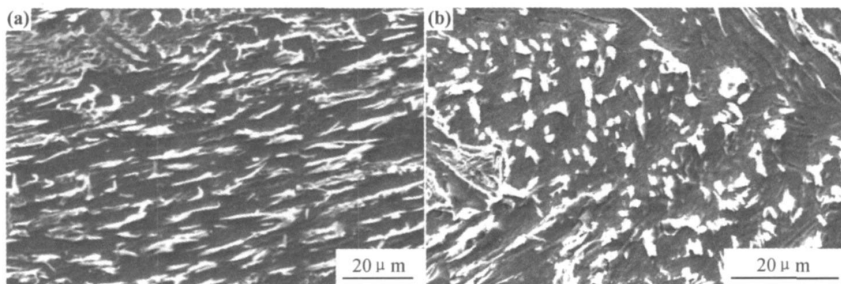


图 6 不同形态的 M-A 组元形貌 (a) 长条形 M-A 组元; (b) 不规则多边形 M-A 组元

Fig. 6 M-A constituent morphologies with different shapes

(a) elongated M-A particle; (b) irregular polygonal M-A particle

温段的停留时间较长, 此时碳原子的扩散能力强, 扩散距离远, 在较大的奥氏体范围内富集, 使铁素体-奥氏体界面处不会形成很高的碳浓度峰值, 因此难以形成

渗碳体的高温富集<sup>[3]</sup>, 转变产物为粒状贝氏体及少量的上贝氏体。此时, 第二相 M-A 小岛较为细小, 宽度、长度尺寸都较小, 铁素体板条相对快冷下的则更宽, 条

束间的位相关系不定, M-A 小岛排列的方向性不明显。

冷速增加时, 贝氏体转变温度稍低, 碳的扩散距离近, 在较小的奥氏体范围内富集, 界面处形成较高的碳浓度峰值, 因此易沉淀出碳化物而形成上贝氏体, 使得转变产物中上贝氏体的比例增加, 粒状贝氏体所占比重减小。转变产物中上贝氏体的比重显著增加, 而粒状贝氏体则大大减少, 粒状贝氏体的第二相 M-A 小岛相对慢冷情况其尺寸有所增加, 贝氏体铁素体条变细。

当冷速增加到  $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以上时, 冷却后的转变产物为 100% 的马氏体。马氏体的形貌呈板条状, 其组织是由许多呈板条状的马氏体束构成。先形成的马氏体束领域较大, 后形成的则较小, 各束之间有一定角度区分开来。随着冷却速度的增加, 马氏体板条略有细化, 但其受冷速变化的影响不是很大<sup>[4,5]</sup>。

### 2.2.2 组织构成的变化

为定量研究焊接热循环对 9Ni 钢的组织转变规律的影响, 本工作采用定量金相分析软件对不同冷却速度下的组织构成进行了统计, 结果如图 7 所示。

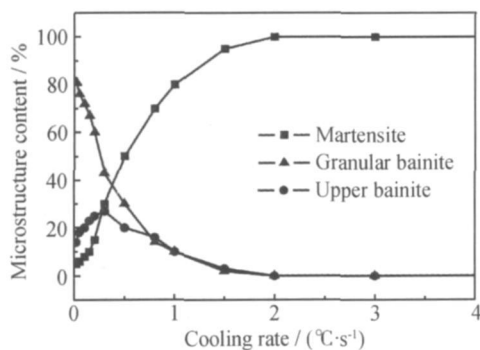


图 7 热模拟试样金相组织统计结果

Fig. 7 Microstructure content for the simulated specimens

由图 7 可见, 随着冷却速度的增加, 马氏体所占的比重增加, 粒状贝氏体所占比重减小, 而上贝氏体所占的比重则呈先增加后减小的变化趋势。在冷却速度很慢的条件下, 在贝氏体转变温度范围的高温段停留时间较长, 恰好满足粒状贝氏体形成的条件, 因此, 绝大部分的转变产物为粒状贝氏体, 上贝氏体和马氏体仅占很少一部分; 当冷速增加时, 在粒状贝氏体转变温度范围的高温段停留时间略有减少, 而在适合上贝氏体转变的温度区间则有所增加, 此时, 转变产物中上贝氏体的比重有所增加, 同时因过冷度的增加使得马氏

体的比重也略有增加。冷速继续增加时, 在贝氏体转变温度区间的停留时间较少, 粒状贝氏体和上贝氏体的比重也随之减小, 而马氏体在转变产物中所占的比重逐渐增加。当冷却速度增加至  $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 所得转变产物全部为马氏体。

焊接条件下的冷却速度远大于  $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , 因此在现场焊接 9Ni 钢时粗晶区的组织为低碳板条马氏体, 亚结构为位错。

### 3 结论

(1) 9Ni 钢经历热循环后的粗晶区组织有贝氏体和马氏体两种类型。

(2) 当冷却速度较低时, 主要转变为贝氏体, 此外还有少部分马氏体。随着冷却速度的增加, 贝氏体的形态由粒状贝氏体向上贝氏体转化。

(3) 当冷却速度增加时, 转变产物中马氏体所占比重逐渐增加, 贝氏体所占比重下降。冷却速度达到  $2^{\circ}\text{C}/\text{s}$  以上时, 9Ni 钢经历热循环后的组织全部为马氏体。

### 参考文献

- [1] DEGENKOLBE J, MUSGEN B, UWER D. Progress in the production and fabrication of 9% Ni steel [A]. Transport and Storage of LPG and LNG [C]. Belgium: Royal Flemish Society of Engineers, 1984. 49- 57.
- [2] 陈铭谟. 贝氏体的转变机制和高强度贝氏体钢设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] YANG Z G, FANG H S. An overview on bainite formation in steels [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2005, (9): 277- 286.
- [4] TSUZAKI K, MAKI T. The effect of cooling rate on the morphology of lath martensite in Fe-Ni alloys [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1981, 45(2): 126- 134.
- [5] CHOIC S, RO K S. Fundamental study of ultra high strength steel development-effect of cooling rate on mechanical properties of Fe-20Ni martensitic alloy [J]. Journal of the Korean Institute of Metals, 1985, 23(10): 1127- 1135.

收稿日期: 2009-03-23; 修订日期: 2009-09-25

作者简介: 严春妍 (1982—), 女, 讲师, 博士, 主要从事焊接物理冶金和金属焊接性的研究, 联系地址: 江苏省常州市晋陵北路 200 号河海大学机电工程学院材料系 B402(213022), E-mail: yanchunyan1982@126.com