

800 °C 至 500 °C 冷却时间对 9Ni 低温钢相转变行为和微观结构的影响

杨秀芝 华文林 杨春杰 董春法

(湖北理工学院机电学院,黄石 435003)

摘要 利用 Gleeble-3500 热模拟试验机对 9Ni 低温钢(∕% : 0.049C, 0.22Si, 0.58Mn, 0.000 6S, 0.002 9P, 9.16Ni, 0.020Al, 0.003Ti, 0.003 0N, 0.000 9O)在 800 °C 冷却至 500 °C 时间- $t_{8/5}$ (6 ~ 100 s)的热循环过程进行了模拟,结合金相法建立了试验钢的 SHCCT(模拟热影响区连续冷却转变)曲线。采用光学显微镜和扫描电镜对不同 $t_{8/5}$ 试样的显微组织进行了观察,研究了冷却时间对原奥氏体晶粒尺寸、M-A 组元含量、尺寸、数量和形状因子(M-A 组元面密度)的影响。结果表明,模拟热影响区连续冷却转变试样的显微组织由贝氏体(B)和马氏体(M)组成,其相对含量取决于冷却时间 $t_{8/5}$;随 800 °C 至 500 °C ($t_{8/5}$)冷却时间的增加原奥氏体晶粒尺寸,粒状贝氏体含量、M-A 组元尺寸增加,同时 M-A 组元含量和面密度降低,有利于改进 9Ni 钢粗晶热影响区的低温韧性。

关键词 热模拟影响区连续冷却转变(SHCCT) 9Ni 低温钢 800 °C-500 °C 相变 M-A 组元 贝氏体

Effect of Cooling Time from 800 °C to 500 °C on Phase Transition Behavior and Microstructure of Low Temperature Steel 9Ni

Yang Xiuzhi, Hua Wenlin, Yang Chunjie and Dong Chunfa

(Mechanical and Electrical Engineering College, Hubei Science and Technology Institute, Huangshi 435003)

Abstract The simulation on circulation process of heat of low temperature steel 9Ni (∕% : 0.049C, 0.22Si, 0.58Mn, 0.000 6S, 0.002 9P, 9.16Ni, 0.020Al, 0.003Ti, 0.003 0N, 0.000 6O) with different cooling time (6 ~ 100 s) from 800 °C cooling to 500 °C ($t_{8/5}$) has been carried out by using Gleeble-3500 simulator, and combined with metallography the simulated heat affected zone continuous cooling transformation (SHCCT) curves of tested steel are established. The structure in tested specimen with different cooling time of $t_{8/5}$ is observed by optical and scanning electron microscope to study the effect of cooling time on original austenite grain size, M-A group area, size, number and shape factor (ratio of massive M-A). Results show that the structure of simulated heat affected zone of continuous cooling specimen consists of bainite (B) and martensite (M), the relative content of M depends on cooling time of $t_{8/5}$; with increasing cooling time from 800 °C to 500 °C ($t_{8/5}$) the original austenite grain size, particle bainite content and M-A group size increase while the M-A group content and ratio of massive M-A decrease, it is available to improve the low temperature toughness of coarse grain heat affected zone of steel 9Ni.

Material Index Simulated Heat Affected Zone Continuous Cooling Transformation (SHCCT), Low Temperature Steel 9Ni, Phase Transition from 800 °C to 500 °C, M-A Group, Bainite

9Ni 钢广泛应用于液化天然气存储罐的内壁材料^[1-2]。液化天然气存储罐的服役温度一般是非常低的^[3-4],经淬火 + 中间淬火 + 回火处理(Quasi-lattice tempering, QLT)的 9Ni 钢基体具有良好的断裂韧性,但是其热影响区由于经历高温热循环过程,一般存在 $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ 的完全或部分相变,在沿熔合线的近缝区还发生奥氏体晶粒的长大过程,形成粗晶热影响区(Coarse Grain Heat Affected Zone, CGHAZ)而产生粗晶脆化现象,同时一种新的脆性相 M-A 组元形成,产生局部脆化,一般对此现象研究较少^[5-10]。

本文对 9Ni 钢的组织与相变行为进行了初步研究,在单道次不同线能量条件下,通过绘制 SHCCT 曲线^[9],研究粗晶区微观组织结构,马氏体亚结构(packet 和 block),原奥氏体晶粒,来分析 M-A 组元的转变特征和 9Ni 低温钢的内部组织结构。

1 实验材料及方法

本实验是通过超纯净冶炼(钢水中各元素含量为∕% : C ≤ 6、P ≤ 2、S ≤ 1、N ≤ 14、O ≤ 5、H ≤ 0.2,总含量控制不超过 28.3),控制轧制(Thermo mechanical control process, TMCP),轧制温度为(860 ± 10)°C 和 QLT 循环热处理(830°C 淬火 + 690°C 淬火 + 570°C 回火)等生产 9Ni 钢(∕% : 0.05C, 0.22Si, 0.58Mn, 0.001S, 0.003P, 9.16Ni, 0.020Al, 0.003Ti, 0.000 9O, 0.003 0N),其力学性能为屈服强度 R_{eL} 684 MPa,抗拉强度 R_m 726 MPa,伸长率 A 26.2%, -192 °C 冲击功 A_{KV} 231 J。

在 16 mm 厚的 9Ni 钢板中加工取 $\Phi 6$ mm × 80 mm 的圆棒试样若干,试样长度方向垂直于钢板轧向。采用 Gleeble3500 热模拟试验机制备单道次不同线能量热循环 SHCCT 试样,利用 HAZ 软件包中

Rykalin-2D 模型制定模拟焊接热循环的试验参数,采用 $t_{8/5}$ (焊接热循环中温度从 800 °C 冷却到 500 °C 所需时间) 表征线能量。

2 实验结果与分析

2.1 9Ni 钢的 SHCCT 曲线

由图 1 可见, $t_{8/5}$ 为 6 s 到 10 s 时, 9Ni 钢为单一板条马氏体, $t_{8/5}$ 增加至 30 s 时, 组织为大量的板条马氏体和少量的粒状贝氏体的混合组织, $t_{8/5}$ 继续增加, 组织中粒状贝氏体含量增多, 当 $t_{8/5}$ 增至 100 s, 组织大部分为粒状贝氏体。

2.2 组织观察和原奥氏体晶粒尺寸分析

不同 $t_{8/5}$ 热循环条件下得到的原奥氏体晶粒如图 2(a₁, b₁, c₁, d₁) 所示, 同一热循环条件下得到的原奥氏体晶粒尺寸并不均匀。不同 $t_{8/5}$ 条件下得到的组织照片如图 2(a₂, b₂, c₂, d₂) 所示, 当 $t_{8/5}$ 为 6 s 和 10 s 时, 组织均为单一的板条马氏体[图 2(a₂)], $t_{8/5}$ 增加至 30 s 时, 组织中出现少量的粒状贝氏体, 粒

状贝氏体的出现减小了马氏体的空间, 因此马氏体得到一定程度的细化[图 2(b₂)]。可以看出, 组织中粒状贝氏体含量随着 $t_{8/5}$ 增加而增多[图 2(c₂, d₂)]。

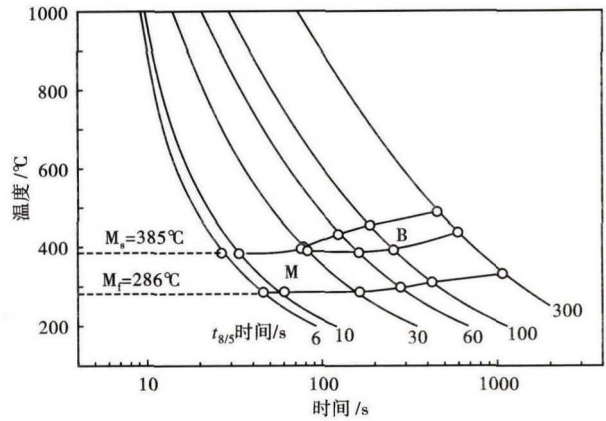


图 1 9Ni 试验钢 SHCCT 曲线(加热速度 100 °C/s, 峰值温度 1 300 °C, 高温停留时间 1 s)

Fig. 1 SHCCT curves of tested steel 9Ni; heating rate 100 °C/s, peak temperature 1 300 °C and residence time at high temperature 1 s

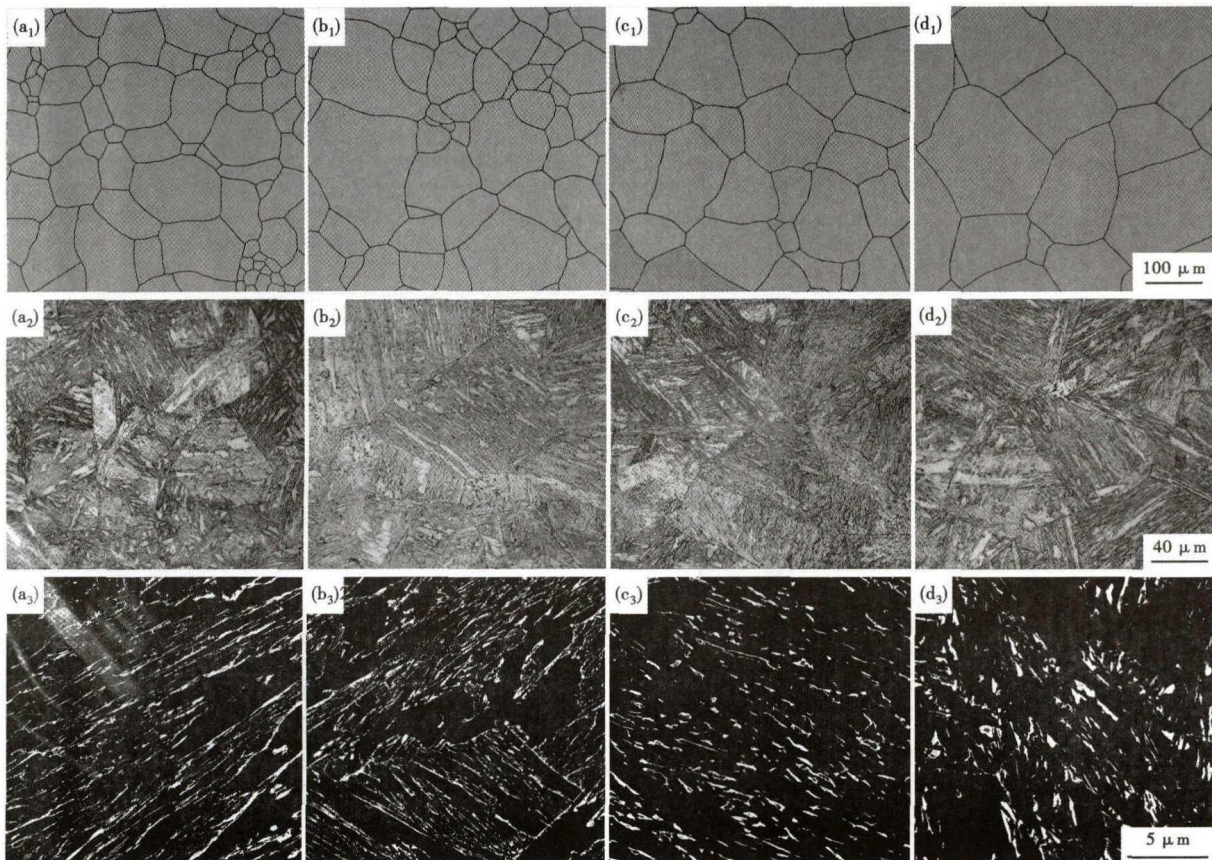


图 2 9Ni 钢原奥氏体晶粒(a₁)(b₁)(c₁)(d₁), 组织(a₂)(b₂)(c₂)(d₂) 和 M-A 组元(a₃)(b₃)(c₃)(d₃) 形貌, 800 °C 至 500 °C 的冷却时间 10 s(a₁)(a₂)(a₃), 30 s(b₁)(b₂)(b₃), 60 s(c₁)(c₂)(c₃), 100 s(d₁)(d₂)(d₃)

Fig. 2 Morphology of original austenite grains (a₁)(b₁)(c₁)(d₁), structure (a₂)(b₂)(c₂)(d₂) and M-A group (a₃)(b₃)(c₃)(d₃) of steel 9Ni; cooling time from 800 °C to 500 °C - 10 s (a₁)(a₂)(a₃), 30 s (b₁)(b₂)(b₃), 60 s (c₁)(c₂)(c₃) and 100 s (d₁)(d₂)(d₃)

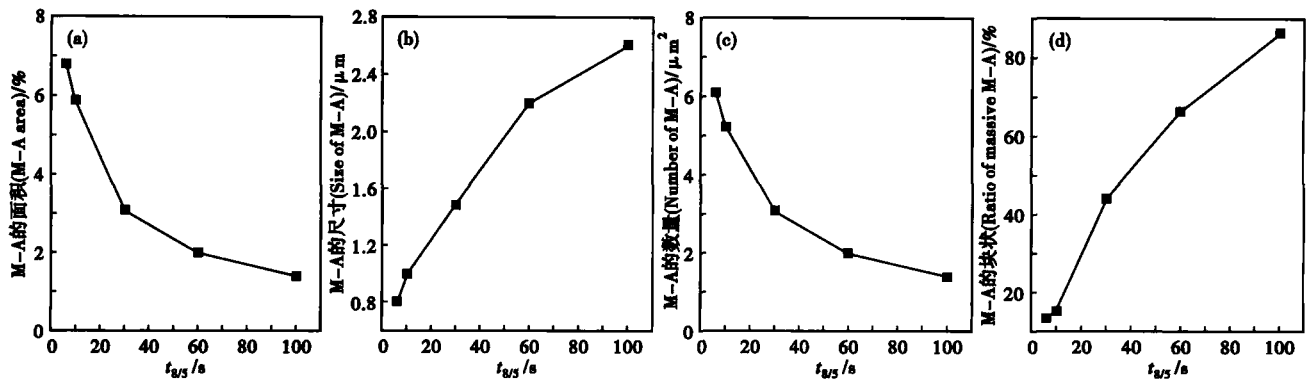


图3 800 ℃至500 ℃的冷却时间对9Ni钢中M-A组元面积百分比(a),尺寸(b),单位面积M-A数量(c)和块状M-A的百分比(d)的影响

Fig. 3 Effect of cooling time from 800 ℃ to 500 ℃ on percentage of M-A area (a), size of M-A (b), number of M-A (c) and ratio of massive M-A (d) in steel 9Ni

当 $t_{8/5}$ 增至100s,粒状贝氏体含量最多[图2(d₂)]。

2.3 热影响区粗晶区(CGHAZ)的M-A组元分析

图2(a₃, b₃, c₃, d₃)为经两阶段电解腐蚀得到的不同 $t_{8/5}$ 热循环后的CGHAZ显微组织照片,白色部分为M-A组元,M-A组元的尺寸、含量、分布和形状都可通过定量金相法测量。可以看出,M-A组元存在条状和块状两种形态,定义长宽比 $Ra \geq 3$ 的M-A组元为条状, $Ra < 3$ 的M-A组元为块状,采用块状M-A与全部M-A组元的数量比-形状因子 R 来描述M-A组元的形态。采用单个M-A组元最大弦长来表示M-A组元的尺寸;采用M-A组元的面积百分数 $S(\%)$ 来表征M-A组元的含量;采用单位面积(μm^2)内M-A组元的数量表示M-A组元的面密度,统计结果见图3。

随着 $t_{8/5}$ 的增加,M-A组元的含量和面密度均下降,但尺寸逐渐增大,同时其形状由条状向块状变化。大多数研究表明,M-A组元含量、尺寸、面密度(单位面积内M-A组元个数)越小,块状M-A组元

所占比例率越大,CGHAZ的低温韧性越好。本文的研究中随 $t_{8/5}$ 增加,M-A组元含量、面密度降低,M-A尺寸、块状M-A组元含量增大,低温韧性变好。除了M-A组元尺寸增大对低温韧性有利外,M-A组元含量、面密度和块状M-A组元含量的变化与韧性变化与大多数研究结果一致。

3 结论

(1)研究了9Ni钢的组织转变规律并绘制了SHCCT曲线,连续冷却试样中主要存在两种组织:马氏体和贝氏体。

(2)随着 $t_{8/5}$ 的增大,CGHAZ原奥氏体晶粒尺寸增大,M-A组元含量增加,M-A尺寸增大,M-A面密度增加,有利于改进9Ni钢粗晶热影响区的低温韧性。

湖北省教育厅青年基金(Q20123001);湖北省自然科学基金(2014CFB177);校级重大项目(2015A05)资助

参考文献

- [1] 孟雪君,闫夏云.大型LNG储罐安全存储影响因素分析[J].化工管理,2016,4(7):136-136.
- [2] 战国锋,刘继雄,刘文斌.Mn元素对9Ni钢组织及力学性能的影响[J].金属热处理,2016,41(3):180-183.
- [3] 李员妹,孙新军,雍岐龙,等.回火温度对5.5Ni低温钢组织和力学性能的影响[J].材料研究学报,2015,29(11):860-866.
- [4] 张坤,唐荻,武会宾.回火保温时间对9Ni钢逆转变奥氏体和低温韧性的影响[J].金属热处理,2012,37(3):85-88.
- [5] 侯家平,潘涛,朱莹光,等.临界淬火工艺对9Ni低温钢力学性能及精细组织的影响[J].材料热处理学报,2014,7(10):88-93.
- [6] 杨才定,唐文军,张汉谦,等.两相区热处理对9Ni低温钢组织和性能的影响[J].热加工工艺,2008,37(2):73-74.
- [7] 潘涛,朱静,杨才福,等.QLT处理9Ni低温钢精细结构的动力学模拟和实验[J].科学通报,2014,37(10):859-865.
- [8] 朱绪祥,刘东升.低C含7.7%Ni低温钢经两相区淬火后的组织性能[J].钢铁,2013,48(11):72-78.
- [9] 崔占全,康国旺,张向红,等.3Cr-1Mo-0.25V钢SHCCT曲线测定与分析[J].物理测试,2008,26(1):1-5.
- [10] 李建民,王沛占,刘东风,等.大型LNG低温储罐用9Ni钢服役过程中组织性能变化研究[J].太原理工大学学报,2013,44(1):71-75.

杨秀芝(1974-),女,博士(2006年武汉科技大学),副教授,1993年武汉汽车工业大学(本科)毕业,焊接新材料和工艺研究。E-mail:yangliushuzhi@163.com

收稿日期:2017-04-19