

热处理对 14MnVTiRE 钢 4 mm 薄板组织和力学性能的影响

刘东风^{1,2} 卫英慧¹

(1 太原理工大学材料科学与工程学院,太原 030024; 2 太原钢铁(集团)有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 14MnVTiRE 钢 [/% : 0.10 ~ 0.15C, 0.30 ~ 0.60Si, 1.20 ~ 1.60Mn, 0.03 ~ 0.09V, 0.07 ~ 0.16Ti, 0.10 ~ 0.15RE (加入量)] 4 mm 薄板的生产流程为 180 t 顶底复吹转炉-180 mm × 1 260 mm 连铸板坯-连轧-卷取工艺。在连铸时由结晶器喂 Φ2.5 mm RE 丝。试验研究了 950 °C 正火, 950 °C 正火 + 690 °C 1 ~ 5 h 回火对薄板组织和力学性能的影响。结果表明, 正火后钢的组织为铁素体 + 细珠光体, 在正火 + 690 °C 回火 1 ~ 3 h 钢中的珠光体片层碳化物发生球化, 分布在晶界和晶粒内部, 随回火时间进一步增加, 碳化物呈点状和三角形, 全部分布在晶界, 材料的强度降低很大。14MnVTiRE 钢薄板的最佳热处理工艺为 950 °C 正火 + 690 °C 1 ~ 2 h 回火, 其屈服强度为 510 ~ 610 MPa, 抗拉强度 630 ~ 680 MPa, 伸长率 22% ~ 25%。

关键词 14MnVTiRE 钢 薄板 正火 + 回火 碳化物 力学性能

Effect of Heat Treatment on Structure and Mechanical Properties of 4 mm Sheet of Steel 14MnVTiRE

Liu Dongfeng^{1,2} and Wei Yinghui¹

(1 College of Science Materials and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2 Technical Center, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The production flow sheet for 4mm sheet of steel 14MnVTiRE [/% : 0.10 ~ 0.15C, 0.30 ~ 0.60Si, 1.20 ~ 1.60Mn, 0.03 ~ 0.09V, 0.07 ~ 0.16Ti, 0.10 ~ 0.15RE (adding amount)] is 180 t top and bottom combined blowing converter-180 mm × 1 260 mm casting slab-continuous rolling-coiling process. During casting the Φ2.5 mm RE wire is feeding in mold. The effect of 950 °C normalizing and 950 °C normalizing + 690 °C 1 ~ 5 h tempering on structure and mechanical properties of sheet is tested and studied. Results show that structure of normalized steel is ferrite + fine pearlite, in normalized + 690 °C 1 ~ 3 h tempered steel the spheroidizing of lamella carbide in pearlite occurs and the spheroidized carbide is distributed at grain boundary and inner of grain, with further increasing tempering time the carbide presents particle and triangle shape and all carbide is distributed at grain boundary led to large decrease of material strength. The optimum heat treatment process for steel 14MnVTiRE sheet is 950 °C normalizing + 690 °C 1 ~ 2 h tempering, its yield strength is 510 ~ 610 MPa, tensile strength 630 ~ 680 MPa and elongation 22% ~ 25%.

Material Index Steel 14MnVTiRE, Sheet, Normalizing + Tempering, Carbide, Mechanical Properties

14MnVTiRE 是船体结构用屈服点 ≥ 440 MPa 级低合金钢。以连轧方式生产的厚度 3 ~ 5 mm 薄钢板使用状态是控轧加高温回火, 但由于这种钢含有多种微合金化元素, 如 V、Ti 等, 往往存在高温回火后材料强度波动较大的现象^[1], 其原因主要是对钢中形成碳化物的溶解和球化长大规律不清楚所致。本文利用金相分析、透射电镜 (TEM) 观察等手段对钢中不同热处理状态下材料的组织结构、碳化物的形成规律、形貌和分布及其对钢强度的影响进行了分析研究。

1 试验材料和方法

试验材料为连铸连轧方式生产的 14MnVTiRE 薄钢板, 工艺流程为: 180 t 顶底复吹转炉 → 弧形连铸 → 钢坯加热 → 1 549 mm 热连轧控轧 → 卷曲 →

开平剪切 → 热处理。其中连铸坯规格为 (mm): 180 × 1 260 × L, 连铸结晶器中双线喂入 Φ2.5 mm 的稀土丝, 数量 0.2 ~ 0.3 kg/t_钢。标准要求材料的成分、性能和试验用材料的力学性能见表 1、表 2^[2]。选择试验材料的原始状态和材料经 950 °C 正火、950 °C 正火 + 690 °C 回火 1 h、950 °C 正火 + 690 °C 回火 2 h、950 °C 正火 + 690 °C 回火 5 h 等工艺进行热处理的试样, 采用金相显微镜观察相应的组织变化; 显微组织中碳化物析出的数量、形态、分布用 H-800 型透射电镜观察。电解双喷液为高氯酸乙醇溶液 (体积

表 1 试验用 14MnVTiRE 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steel 14MnVTiRE / %

薄板厚度 / mm	C	Si	Mn	S	P	V	Ti	Cu	RE (加入量)
3 ~ 5	0.10 ~ 0.15	0.30 ~ 0.60	1.20 ~ 1.60	≤ 0.030	≤ 0.035	0.03 ~ 0.09	0.07 ~ 0.16	≤ 0.35	0.10 ~ 0.15

注: RE 成分按要求加入, 不分析结果。

表 2 试验 14MnVTiRE 钢薄板的力学性能和工艺性能
Table 2 Mechanical properties and processing performance of test steel 14MnVTiRE sheet

项目	薄板厚度/ mm	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	冷弯 $B=7a$ $d=2a$ 120°
标准要求	3~4	≥440	550~685	≥18	完好
	5	≥440	550~685	≥18.5	完好
实验用材料	4	585	705	20	完好

分数 5%)，双喷薄化时，工作电压 45 V，工作电流 50 mA，工作温度约 -40 ℃。

2 试验结果

将试验用 14MnVTiRE 钢不同热处理状态的力学性能测试结果列于表 3。钢的金相组织照片见图 1，透射电镜和电子衍射形貌照片见图 2，可以看出，试验用控轧态钢(图 1a)和钢经正火后(图 1b)的金相组织为铁素体 + 珠光体。但不同的是因控轧钢高温卷曲后冷却较慢，相当于有一个自回火过程，可见有较多的碳化物在晶界和晶内析出(图 1a)，而 950 ℃ 正火后钢中碳化物析出较少(图 1b)。

试验用钢经 950 ℃ 正火并在 690 ℃ 下以不同时间回火后，各种状态的金相组织均由铁素体和分布

于其上的碳化物组成，但碳化物的形态和分布不同。随回火时间的延长，碳化物逐渐趋于球状，并伴随着聚集和长大，这是导致钢性能变化的重要因素。图 1(a)为试验用钢的原始组织，从中可以看出，碳化物分布不均匀，并且存在轻微的带状组织。图 1(b)为实验室正火后的组织，同图 1(a)相比，晶界明显，晶粒尺寸增大，碳化物呈团状，精细形貌难以区分，这可能是在 950 ℃ 加热时，发生了再结晶，使轧制带状晶粒转变成了等轴晶粒。同时碳化物溶解，形成均匀的奥氏体组织，正火空冷时形成铁素体 + 珠光体类组织。

图 1(c, d)为不同时间高温回火后的组织，随时间延长，颗粒状碳化物增多，且趋于均匀；而回火 5 h

表 3 热处理工艺对 14MnVTiRE 钢的力学性能的影响
Table 3 Effect of heat treatment process on mechanical properties of steel 14MnVTiRE

热处理工艺	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
950 ℃ 正火	-	755	19
950 ℃ 正火 + 690 ℃ 回火 1 h	610	680	22
950 ℃ 正火 + 690 ℃ 回火 2 h	510	630	25
950 ℃ 正火 + 690 ℃ 回火 5 h	400	515	31

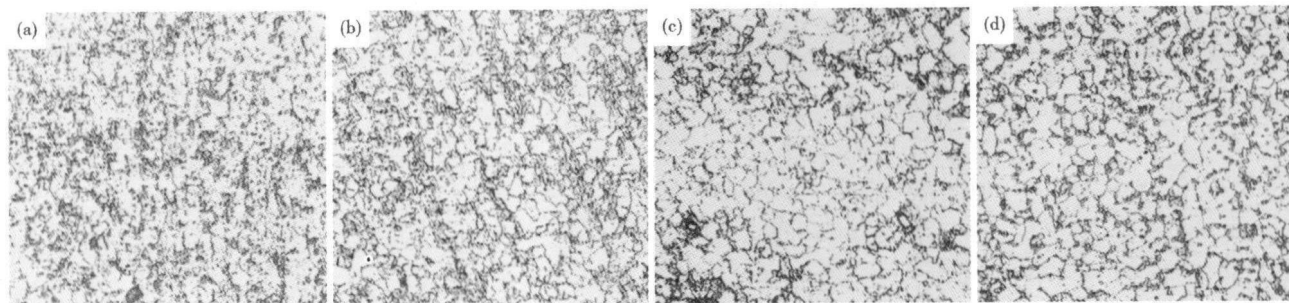


图 1 14MnVTiRE 钢薄板的组织形貌：(a)原始组织；(b)950 ℃ 正火；(c)950 ℃ 正火 + 690 ℃ 1 h 回火；(d)950 ℃ 正火 + 690 ℃ 5 h 回火，×100

Fig. 1 Morphology of structure of steel 14MnVTiRE sheet: (a) original structure; (b) 950 ℃ normalized; (c) 950 ℃ normalized + 690 ℃ 1 h tempered; (d) 950 ℃ normalize + 690 ℃ 5 h tempered, ×100

后，碳化物基本上沿晶界分布，并已合并长大。

3 试验结果讨论

上述从金相组织方面分析了正火和正火 + 高温回火后 14MnVTiRE 钢中组织和第二相碳化物的形态、数量和分布，但由于放大倍数较小，更精细的组织结构难以了解，因此可通过 TEM 方法详细观察和分析热处理过程中碳化物的变化情况。

3.1 碳化物的形态和分布

图 2(a)为 14MnVTiRE 钢经 950 ℃ 正火后的组织形态，是由铁素体和珠光体所组成，因珠光体片层

较细，故在光学显微镜下难以明确分辨。通过 690 ℃ 1 h 回火，片层状珠光体中的碳化物开始球化，颗粒较小(图 2b)；随回火时间延长至 2 h，碳化物球化尺寸分布不均匀但已长大，且仍有部分珠光体未完全球化(图 2c)；回火 5 h 后碳化物则全部球化，颗粒尺寸增大，形状变得不规则。可见 14MnVTiRE 钢高温回火随时间的延长，分布于晶粒内部的碳化物，逐渐向晶界过渡，到 5 h 碳化物基本上均沿晶界(平直晶界和三叉晶界)分布(图 2d)。

综上所述，回火过程中研究材料碳化物的形态和分布可以发生如下变化：

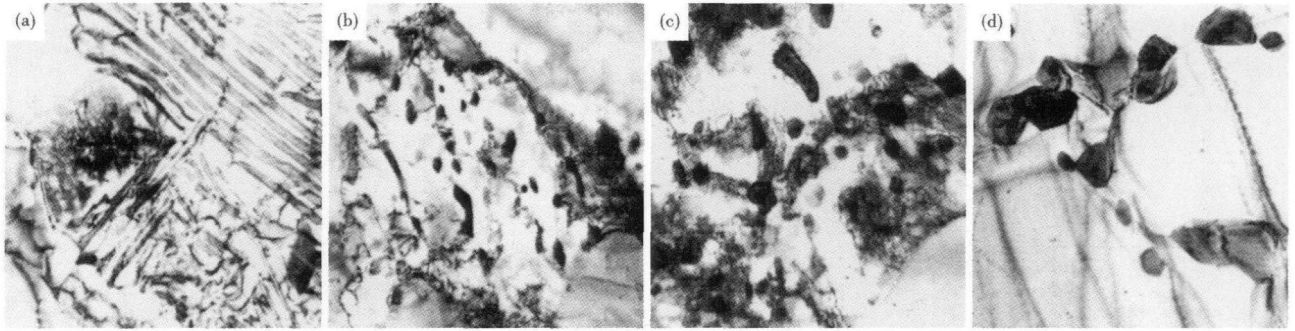


图2 14MnVTiRE 钢薄板碳化物形貌:(a)950 °C 正火,铁素体+珠光体(片状碳化物), $\times 20\,000$; (b)950 °C 正火+690 °C 1 h 回火,碳化物开始球化, $\times 20\,000$; (c)950 °C 正火+690 °C 2 h 回火,球化碳化物, $\times 20\,000$; (d)950 °C 正火+690 °C 5 h 回火,沿晶界分布的粗碳化物, $\times 10\,000$, TEM

Fig. 2 Morphology of carbide in steel 14MnVTiRE sheet: (a) 950 °C normalized, Ferrite + pearlite (lamella carbide), $\times 20\,000$; (b) 950 °C normalized + 690 °C 1 h tempered, carbide beginning spheroidizing, $\times 20\,000$; (c) 950 °C normalized + 690 °C 2 h tempered, spheroidized carbide, $\times 20\,000$; (d) 950 °C normalized + 690 °C 5 h tempered, coarse carbide distributed along grain boundary, $\times 10\,000$, TEM

形态:片层状(珠光体)→球化(从晶界开始)→球状(不均匀)→球状→不规则形状(以棒状和三角形为主)。

分布:晶粒内(珠光体)→晶内分布→向晶界过渡→完全沿晶界分布(平直晶界和三叉晶界)。

3.2 碳化物类别

14MnVTiRE 钢属于低合金高强度工程构件用钢,其中含有强碳化物形成元素 V 和 Ti。从理论上讲,在热处理过程中通过特殊碳化物的溶解和析出,起阻碍奥氏体晶粒长大和弥散强化的作用^[3,4],但实际上,只有前者的作用比较明显,而後者的作用则不显现,钢的晶粒度都控制在 8 级以上,因为在正火和正火+高温回火过程中没有观察到弥散析出的细小碳化物颗粒,而发现的只是片层状和球状碳化物。

对 14MnVTiRE 钢来讲,钢中的碳含量和强碳化物形成元素的量都较少,因此在奥氏体状态下,溶解于基体中的合金元素和碳分布均匀,浓度较低。钢在冷却时,随着先共析铁素体的形成,合金元素在铁素体和奥氏体之间发生再分配,弱的碳化物形成元素如锰,保留在铁素体中,而钒、钛和碳则进入了奥氏体中。在共析温度,富碳、钒和钛的奥氏体转变成了珠光体,珠光体中的渗碳体其实是一种复合碳化物,含有多种合金元素,在后续的高温回火过程中,才有可能因晶体结构的不同而分离开来。

3.3 钢的强度

试验用 14MnVTiRE 钢由于是经过控轧加高温卷曲,强度较高;而钢经正火后必然有碳化物的重新分解回溶,空冷导致基体获得更高的强度;但经不同时间的回火处理,在发生合金碳化物的重新分布及

聚集长大的同时,铁素体基体的强度逐渐下降;而如果回火时间太长,碳化物已充分在晶界聚集长大,此时材料强度已不符合技术标准的要求。所以控制强度存在最佳的热处理工艺。

4 结论

(1) 14MnVTiRE 薄板钢的强度取决于组织中所形成的珠光体粗细和钢中碳化物形态、分布。

(2) 钢正火后组织为铁素体加细珠光体,690 °C 回火时珠光体中片层状碳化物发生球化;在 2 h 以内回火,碳化物基本呈棒状和球状,分布于晶界和晶粒内部;随回火时间进一步延长,碳化物呈点状和三角形状,全部分布于晶界,这时材料的基体强度已降得很低。

(3) 研究材料最佳的热处理工艺是在 690 °C (1~2)h 回火可满足标准技术要求。

山西省自然科学基金资助项目(20051050)

参考文献

- 1 太原钢铁集团有限公司内部资料. 太钢 14MnVTiRE 热轧板研制报告,2001
- 2 中华人民共和国国家军用标准 GJB458-1988. 舰艇船体结构用 14MnVTiRE 钢板
- 3 刘云旭. 金属热处理原理. 北京:机械工业出版社,1981
- 4 雍岐龙,马鸣图,吴宝镛,等. 微合金钢—物理和力学冶金. 北京:机械工业出版社,1989

刘东风(1957-),男,高级工程师,在职博士研究生,2003 年太原理工大学工程硕士毕业,钢铁材料研究。

收稿日期:2012-01-13