

钛对铌-钛微合金化700L大梁钢组织和性能的影响

王鑫

(德州宇力液压有限公司, 山东德州 253004)

摘要: 对不同钛含量的700L汽车大梁钢母材及熔化活性气体保护焊(MAG)焊接后试样的显微组织、力学性能进行对比研究。结果表明:钛含量为0.11%时,试验钢显微组织中 ferrite 晶粒为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,还有少量的变形带,屈服强度为678 MPa,抗拉强度为760 MPa,伸长率为17.0%;钛含量为0.07%时,显微组织中 ferrite 晶粒为 $4 \sim 8 \mu\text{m}$,还有少量的珠光体颗粒,屈服强度为658 MPa,抗拉强度为734 MPa,伸长率为24.0%;MAG焊接后,两种试验钢的强度升高10 MPa左右,但伸长率分别降低1.0、3.0个百分点,背弯 $180^\circ (d = 2a)$ 性能合格;随着钛含量的增加,试验钢的热影响区显微组织得到细化,低碳马氏体含量有所增多。

关键词: 铌-钛微合金化;700L汽车大梁钢;焊接热影响区;显微组织;力学性能

中图分类号: TG142.1

文献标识码: B

文章编号: 1009-5438(2023)02-0055-05

Effects of Ti on Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloyed 700L Beam Steel

Wang Xin

(Dezhou Yuli Hydraulic Co., Ltd., Dezhou 253004, Shandong, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of parent metal for 700L beam steel with different titanium contents and specimens with metal active gas (MAG) welding are compared and studied. The results showed that the ferrite grains in the microstructure of test steel were $3 \sim 5 \mu\text{m}$, there were a small quantity of deformation bands, yield strength was 678 MPa, tensile strength was 760 MPa and elongation was 17.0% when Ti content was 0.11%; the ferrite grains in the microstructure was $4 \sim 8 \mu\text{m}$, there were a small quantity of pearlite grains, yield strength was 658 MPa, tensile strength was 734 MPa and elongation was 24.0% when Ti content was 0.07%; the strength of the two types of test steel was increased by about 10 MPa, but elongation was decreased by 1.0 and 3.0 percent points respectively and property of root bending of $180^\circ (d = 2a)$ was qualified after MAG welding; the content of low carbon martensite was increased and microstructure of heat affected zone for test steel was refined with the increase of Ti content.

Key words: Nb-Ti microalloy; 700L beam steel; welding heat affected zone; microstructure; mechanical properties

汽车大梁是汽车的主要承重部件,比如重卡汽车底盘上的纵梁、衬梁及横梁等结构件。这几年以

降低成本、提高性能、节约资源为目的减量化钢材生产工艺技术越来越引起人们的重视^[1],高强度汽车用大梁钢产品的应用比例及等级逐渐提高,从传统的 510L、610L 向 700L、750L,甚至 800L、850L 过渡,但目前使用量最大的是 700L 汽车大梁钢。

为实现大梁钢强韧性的合理配合,通常采用铌、钒、钛等微合金化技术,充分发挥其析出强化、细晶强化作用。由于钒价格的日益上涨及钛微合金化技术的日趋成熟,低成本热轧 700L 汽车大梁钢在商用车轻量化的使用增多。这几年钢厂在 700L 汽车大梁钢的合金设计时,多以铌-钛复合或者单钛微合金化为主,但钛元素由于化学性质活泼,液析的大颗粒 TiC 夹杂物容易造成产品塑性差、性能波动大等问题,钛含量一般在 0.06%~0.12% 之间,同时在汽车各种梁的成形过程中,除了冷弯、铆接成形外,还有少量的焊接成形,在汽车载重过程中也出现过由于焊接缺陷导致的大梁断裂问题。所以本文以铌-钛复合微合金化的 700L 汽车大梁钢为研究对象,设计了两种不同钛含量的大梁钢,研究了钛对 700L 汽车大梁钢母材及焊接后显微组织和力学性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 化学成分

为保证强度、低温冲击性能及焊接性能的合理匹配,700L 汽车大梁钢一般采用低碳设计,碳含量一般在 0.06%~0.12% 之间,既能保证碳的析出及固溶强化,同时辅助硅、锰等固溶强化达到强度设计要求。硅对热轧态汽车大梁钢的表面质量有不利的影响,故添加量一般不超过 0.3%,在大梁钢中锰元素发挥固溶强化和抑制相变点的作用,但锰元素含量太高,容易导致偏析和带状组织,锰含量一般不超过 2.0%。铌含量一般不超过 0.06%,铌含量过高不仅降低连铸坯的热塑性,同时铌共晶碳化物将恶化钢的韧性^[2]。钛以析出强化为主,辅助以细晶强化。但由于钛比较活跃,易于与氧、氮和硫结合,只有剩余的有效钛才能以 TiC 析出,显著提高强度^[3],钛含量较高的钢对其冶炼控制水平的要求更高,同时液析 TiC 容易恶化低温冲击性能。如表 1 所示,设计了两种钛含量不同的试验钢,其中试验钢 1 的钛含量为 0.11%,试验钢 2 的钛含量为 0.07%,其余化学元素含量接近。

表 1 试验钢的化学成分及标准要求(质量分数)

| 名称 | C | Si | Mn | P | S | Al _l | Nb | Ti |
|----------------|-------|------|------|--------|--------|-----------------|-----------------------------|------|
| 试验钢 1 | 0.08 | 0.16 | 1.51 | 0.014 | 0.003 | 0.04 | 0.03 | 0.11 |
| 试验钢 2 | 0.08 | 0.10 | 1.60 | 0.012 | 0.002 | 0.03 | 0.03 | 0.07 |
| GB/T 3273—2015 | ≤0.12 | ≤0.6 | ≤2.0 | ≤0.025 | ≤0.015 | ≥0.02 | ω(Nb) + ω(V) + ω(Ti) ≤ 0.22 | |

1.2 生产及焊接工艺

试验钢的生产工艺流程:板坯加热→高压水除鳞→2 机架粗轧机轧制→精轧机轧制→加密型层流冷却→卷取→托盘运输→取样、检验→称重→入库^[2]。

根据客户常用的焊接规范,采用 GB/T 13817—1992 标准^[4]对试验钢焊接性能进行评估,焊接试样大小:300 mm × 160 mm × T mm(T 为厚度),数量:2 块,焊丝型号和规格:ER50-6 型焊丝,直径:1.2 mm,焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 试验钢的焊接工艺参数

| 焊接方式 | 焊丝型号 | 焊丝规格/mm | 焊接电流/A | 焊接电压/V | 焊接速度/(cm·min ⁻¹) |
|-------|--------|---------|---------|--------|------------------------------|
| MAG 焊 | ER50-6 | 1.2 | 200~250 | 23~28 | 28~38 |

1.3 试验方法

依照 GB/T 228.1—2018 标准^[5]在兹维克 Z600 拉伸试验机进行母材及焊接试样的室温拉伸试验,根据 GB/T 232—2010 标准^[6]在 LWV-2000 弯曲

试验机进行冷弯试验($d = 2a, 180^\circ$),母材及焊接试样经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后,采用 Axio observer A1M 光学显微镜对其显微组织进行观察^[7]。

2 试验结果及分析

采用相近的加热及轧制工艺,在某钢厂2 250 mm热连轧生产线轧制5 mm厚试验热轧钢卷,待冷至室温,从板宽1/4处取拉伸、金相试样进行检测,采用表2工艺对两种试验钢进行焊接,焊后进行拉伸性能、弯曲性能、金相组织检测,两种试验钢母材及焊缝、热影响区显微组织如图1、图2所示,试验钢母材及焊接试样力学性能如表3所示,试验钢冷弯照片如图3所示。

如图1所示,试验钢室温显微组织以铁素体为主,根据GB/T 6394—2017标准^[8],采用截点法对试验钢1的铁素体晶粒尺寸进行测量,多数为3~5 μm,晶粒细小,部分晶粒为扁平状,还分布着几条由再结晶不充分且细长晶粒组成的铁素体带。



(a) 试验钢1



(b) 试验钢2

图1 试验钢母材显微组织

图2为两种试验钢经MAG焊接后,焊缝、熔合线及焊接热影响区的显微组织。如图2(a)、(e)所示,焊缝组织为典型的焊材熔化空冷后的铸态组织,焊缝组织比较粗大,由粗大的等轴状铁素体和针状组织组成。如图2(b)、(f)熔合区组织分析看,焊缝和热影响区组织自然过渡,没有裂纹、未焊合等缺陷,说明焊丝、母材及焊接工艺匹配较好。对比图2(c)、(g)可知,焊接粗晶热影响区的显微组织为低碳马氏体+贝氏体的混合组织,但贝氏体形态略有不同,试验钢1的以针状贝氏体为主,而试验钢2的以上贝氏体为主,主要是因为试验钢1钛含量较高,淬透性较高,促进粗晶热影响区中低碳马氏体及针状贝氏体组织的生成^[9]。整体分析,试验钢1的粗晶区的晶粒要比试验钢2粗晶区的晶粒细,主要因为试验钢1的钛含量较高,生成的TiC、TiN

试验钢2的显微组织除了有细小的铁素体,还有少量的珠光体颗粒,采用相同标准和方法对试验钢2的铁素体晶粒进行测量,晶粒尺寸多为4~8 μm,大部分晶粒接近等轴状^[2]。在化学成分、加热及轧制工艺相近的情况下,试验钢1的铁素体晶粒较细的主要因为试验钢钛含量较高,为充分发挥钛元素的析出强化作用,试验钢的卷取温度设定为TiC最佳析出温度600℃左右,高达0.11%的钛促进试验钢1在卷取过程中析出弥散细小的TiC颗粒,抑制铁素体晶粒的再结晶和长大,同时发挥钛元素细化晶粒的作用。而钛含量为0.07%的试验钢2的显微组织中,铁素体晶粒再结晶及长大较充分,除固溶外,未被铌、钛充分消耗的碳原子,在试验钢冷却过程中还促进了珠光体的生成。

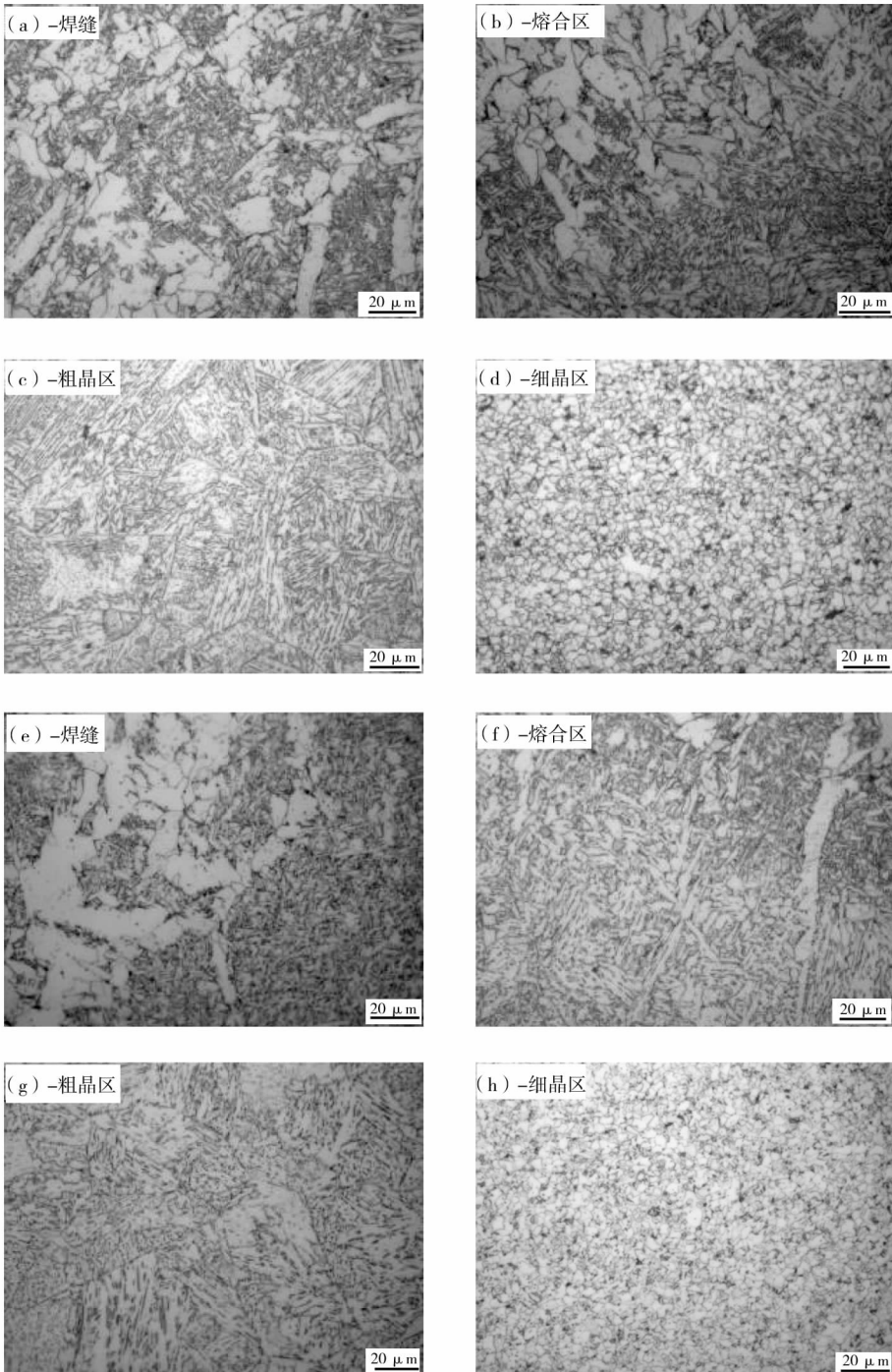
颗粒较多,且高温稳定性好,弥散析出的TiC、TiN粒子能够钉扎原始奥氏体晶界,有效地阻止原始奥氏体晶粒长大^[10]。从图2(d)、(h)可知,对比两种试验钢细晶热影响区的显微组织,试样钢1的晶粒较试验钢2的细小,说明钛含量的增加主要影响大梁钢焊接热影响区组织的再结晶、长大行为。

表3为两种试验钢母材及焊接后的力学性能,试验钢1的屈服强度为678 MPa,抗拉强度为760 MPa,伸长率为17.0%,试验钢2的屈服强度为658 MPa,抗拉强度为734 MPa,伸长率为24.0%,钛含量从0.11%降低到0.07%,屈服强度、抗拉强度分别降低20 MPa、26 MPa,但伸长率提高了7.0个百分点,这和两种试验钢的显微组织有很大的关系,从图1可见,试验钢1的晶粒较试验钢2的细小,但试验钢1的晶粒不均匀,出现铁素体变形带,在拉伸

过程中,影响各晶粒变形协调性,导致试验钢 1 的断后伸长率较低。

试验钢 1 焊接后的屈服强度为 685 MPa,抗拉强度为 767 MPa,伸长率为 16.0%,试验钢 2 焊接后的屈服强度为 664 MPa,抗拉强度为 744 MPa,伸长

率为 21.0%,和母材性能相比,抗拉强度和屈服强度略有升高,但伸长率略有降低,试验钢 1 的伸长率降低 1.0 个百分点,试验钢 2 的伸长率降低 3.0 个百分点。



(a)、(b)、(c)、(d):试验钢 1;(e)、(f)、(g)、(h):试验钢 2

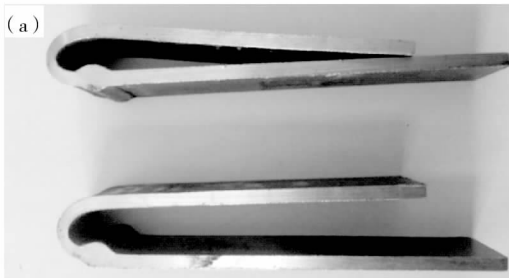
图 2 试验钢焊接组织

表3 试验钢母材、焊接后试样力学性能

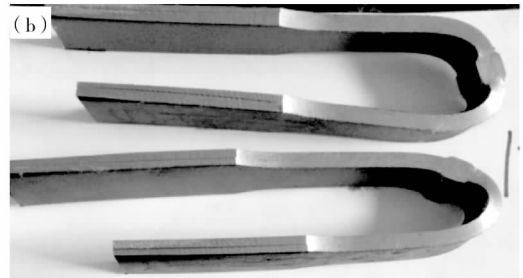
| 试验钢 | 状态 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 冷弯 ($d = 2a, 180^\circ$) |
|----------------|----|------------|----------|-------------|----------------------------|
| 试验钢1 | 母材 | 678 | 760 | 17.0 | |
| | 焊接 | 685 | 767 | 16.0 | 合格 |
| 试验钢2 | 母材 | 658 | 734 | 24.0 | |
| | 焊接 | 664 | 744 | 21.0 | 合格 |
| GB/T 3273—2015 | | ≥ 620 | 700~800 | ≥ 14.0 | |

图3为两种试验钢焊接后 180° 背弯照片,两种试验钢受拉面的焊缝、热影响区、母材等未出现裂纹、开裂等现象,表现出良好的弯曲变形能力,说明

焊接效果良好,焊接接头具有良好的塑性,焊丝及焊接工艺与700L汽车大梁钢匹配性较好。



(a) 试验钢1



(b) 试验钢2

图3 试验钢 180° 冷弯照片

综上所述,钛元素虽然能显著细化700L汽车大梁钢基体及焊接热影响区的组织,对于5 mm厚的700L汽车大梁钢,当钛含量为0.11%时,母材及焊接后的伸长率较低,建议在保证700L大梁钢强度的同时,控制钛含量的加入量,在该成分体系下,钛含量保持在0.07%左右即可。

3 结论

(1) 钛含量为0.11%的试验钢1显微组织以细小的铁素体为主,尺寸为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,还分布几条由扁平晶粒组成的铁素体带,钛含量为0.07%的试验钢2显微组织由细小的铁素体和弥散分布的珠光体颗粒组成,铁素体晶粒尺寸为 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ 。

(2) 试验钢1母材的屈服强度为678 MPa,抗拉强度为760 MPa,伸长率为17.0%,试验钢2母材的屈服强度为658 MPa,抗拉强度为734 MPa,伸长率为24.0%,钛含量降低0.04个百分点,700L大梁钢的强度降低20 MPa左右,但伸长率提高7.0个百分点,在保证强度等级的情况下,该成分体系,选择钛含量为0.07%为宜。

(3) MAG焊接后,试验钢1的屈服强度为685 MPa,抗拉强度为767 MPa,伸长率为16.0%,试验钢2的屈服强度为664 MPa,抗拉强度为744 MPa,伸长率为21.0%,和母材性能相比,强度升高10 MPa左右,但伸长率分别降低1.0、3.0个百分点,焊件背弯 180° ($d = 2a$)未出现裂纹、开裂等现象,焊丝及焊接工艺与母材匹配性较好。

(4) 钛含量为0.11%试验钢1的粗晶、细晶热影响区的显微组织要比钛含量为0.07%试验钢2的细,说明钛含量的增加,细化了700L大梁钢焊接热影响区的显微组织。

参 考 文 献

- [1] 谷海容,张建,杨兴亮,等.铁素体/贝氏体双相钢的延伸凸缘性能研究[J].上海金属,2011,33(6):32-35.
- [2] 杨维宇,王建钢,张智刚,等.14 mm厚的700L汽车大梁钢热轧卷强度不合格的原因分析[J].热加工工艺,2022,51(9):155-158.

(下转第77页)

混合动力车运用后碳排放量大大降低。同时,噪音也大大降低,经测算噪音降至 75 dB 以下,实现了包钢绿色、低碳、环保运输目标。

4 结束语

包钢是我国西北地区首先运用油电混合动力车的冶金企业。随着全球能源需求不断增加和石化资源逐渐枯竭,国家对于环保、节能和可持续性发展越来越重视,各企业及个人的节能意识也越来越强烈。混合动力技术可以将内燃机和电池作为动力来源,从而提高燃油利用率和减少排放,比传统的汽油或柴油机车更加环保和节能,在企业运输中油电混合动力车未来的运用前景将非常广阔。

参 考 文 献

(上接第 59 页)

- [3] 徐栋. 钛强化 510 MPa 级汽车大梁钢的试制 [J]. 新疆钢铁, 2018(2): 6-9.
- [4] GB/T 13817—1992, 对接接头刚性拘束裂纹试验[S].
- [5] GB/T 228. 1—2018, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法[S].
- [6] GB/T 232—2010, 金属材料弯曲试验方法[S].
- [7] 杨维宇, 刘妍, 宿成, 等. 16 mm 厚的 700L 钢热轧卷板低温冲击性能不合格的原因分析 [J]. 热加工工艺, 2022, 51(9): 159-162.
- [8] GB/T 6394—2017, 金属平均晶粒度测定方法[S].
- [9] 白世武, 李午申, 邸新杰, 等. 07MnNiCrMoVDR 钢焊接粗晶热影响区的韧化机理[J]. 焊接学报, 2008, 29(3): 25-28.
- [10] 陈茂爱, 武传松, 王建国, 等. 含 Ti 微合金钢中的第二相粒子对焊接粗晶热影响区组织及韧性的影响[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 37-40.