

Fe-0.4C-2Mn-4Al 系 δ -TRIP 钢组织 与力学性能研究

张东梅 ,冯运莉 ,曹 阔

(华北理工大学冶金与能源学院 ,河北 唐山 063210)

摘 要: 通过 SEM、XRD、EBSD 等技术手段分析了 Fe-0.4C-2Mn-4Al 钢在铸态以及热轧态的组织形貌 ,研究了试验钢轧制前后力学性能的变化。结果表明: 此种 TRIP 钢热轧前后组织中都含有大量的 δ -铁素体 ,但是热轧后 δ -铁素体形貌发生了变化 ,由鱼骨状拉伸为沿轧制方向的条状 ,并且晶粒尺寸得到了细化 ,强度和延伸率有了明显的提升 ,强塑积达到 $13.7 \text{ GPa} \cdot \%$ 。

关键词: δ -TRIP 钢; Fe-0.4C-2Mn-4Al; 组织; 力学性能

中图分类号: TF76 ,TF713. 6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2020) 02-0142-05

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2020.02.025

开放科学(资源服务) 标识码(OSID) :



听
语
音
聊
科
研
与
作
者
互
动

Microstructure and Mechanical Properties of Fe-0.4C-2Mn-4Al System δ -TRIP Steel

Zhang Dongmei ,Feng Yunli ,Cao Kuo

(College of Metallurgy and Energy ,North China University of Science and Technology ,Tangshan 063210 ,Hebei ,China)

Abstract: The microstructure of Fe-0.4C-2Mn-4Al experimental steel in as-cast and hot-rolled state was analyzed by SEM ,XRD and EBSD. The mechanical properties of the experimental steel before and after rolling were studied. The results show that the TRIP steel contains a large amount of δ -ferrite in the microstructure before and after hot rolling ,but the δ -ferrite morphology changes after hot rolling ,and the fish bone shape is stretched into strips along the rolling direction. Shape and the grain size has been refined. Consequently ,the strength and elongation have been significantly improved ,and the strong plastic product has reached $13.7 \text{ GPa} \cdot \%$.

Key words: δ -TRIP steel ,Fe-0.4C-2Mn-4Al ,microstructure ,mechanical properties

0 引言

汽车制造业基于可持续发展的理念 ,追求低油耗、低排放量、获得轻量化的同时兼顾安全性的目标。目前普遍承认将强塑积(抗拉强度与断后延伸率之积) 作为衡量汽车板性能的指标。第一代汽车

板的强塑积较低($10 \sim 20 \text{ GPa} \cdot \%$) ,不能满足高强度、高塑性汽车板的性能要求^[1] ;第二代汽车板虽然强塑性得到极大提升 ,数值上高达 $60 \text{ GPa} \cdot \%$,但是由于其合金添加元素比较多 ,生产工艺流程复杂 ,生产成本低 ,导致其实际应用受到极大的限制^[2-4] ;第三代汽车板的强塑积介于第一代和第二代之间^[1] ,

收稿日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674123) ,河北省自然科学基金资助项目(E2017209237) 。

作者简介: 张东梅(1996—) ,女 ,河北衡水人 ,硕士 ,主要研究方向: 超细晶金属材料 ,E-mail: 290468949@ qq.com; 通讯作者: 冯运莉(1966—) ,女 ,河北唐山人 ,教授 ,博士 ,主要研究方向为金属材料及加工工程 ,E-mail: tsfengyl@ 163.com。

其优异的综合力学性能既满足轻量化又实现了安全性的要求,因而得到广泛研究。

Mn-TRIP 钢作为典型的第三代汽车板得到学者的广泛研究。其优异的强塑积依赖于残余奥氏体发生的 TRIP 效应,而室温下残余奥氏体的含量以及稳定性都取决于临界区退火过程中的奥氏体逆转变行为以及临界区 C 和 Mn 原子的富集。在 Mn-TRIP 钢的基础上,考虑到实际生产的轻量化低密度设计,研究者提出了 Mn-Al 系 TRIP 钢的概念:其中添加一定量 Al 元素阻碍了完全奥氏体化进程从而得到粗大的 δ -铁素体组织,对原始组织的元素配分和残余奥氏体的稳定性起到积极作用^[5-10]。随后对试验钢进行热轧,将使得位错发生动态回复,有利于综合力学性能提高。

笔者以 Fe-0.4C-2Mn-4Al 为试验钢,分析研究了其铸态和热轧态的微观组织结构及力学性能。

1 试验材料及方法

试验用钢的化学成分见表 1。试验钢经电磁真空感应炉冶炼,通氩气气氛保护,浇注为 40 kg 的钢锭。在 1 200 ℃ 下保温 2 h,热锻并切割成尺寸为 80 mm×70 mm×40 mm 的锻坯,空冷至室温。锻坯加热到 1 200 ℃,保温 30 min,经过 7 道次热轧,获得最

终厚度为 4 mm 的热轧板,热轧板空冷至室温。

分别在铸坯和热轧板上利用线切割机切取尺寸为 4 mm×10 mm 的试样若干,研磨抛光至镜面后铸坯试样用 4% 的硝酸酒精腐蚀,热轧试样用 Villella 试剂(5 mLHCl+1 g 苦味酸+100 mL 酒精)腐蚀,用光学显微镜和扫描电镜进行显微组织观测。EBSD 的观测试样经研磨抛光得到镜面后,控制抛光电压 28 V,抛光电流 0.2 A,置于电解液(80% C₂H₅OH+15% HClO₄+5% 甘油)中电解抛光 30 s。从铸坯和热轧板中切取标距长为 32 mm,转角弧度半径 6 mm,夹头长 32 mm 的拉伸样,利用 Instron 3382 万能拉力试验机以 0.007 5 mm/s 的拉伸速率在室温下进行拉伸试验,测定材料的拉伸性能。

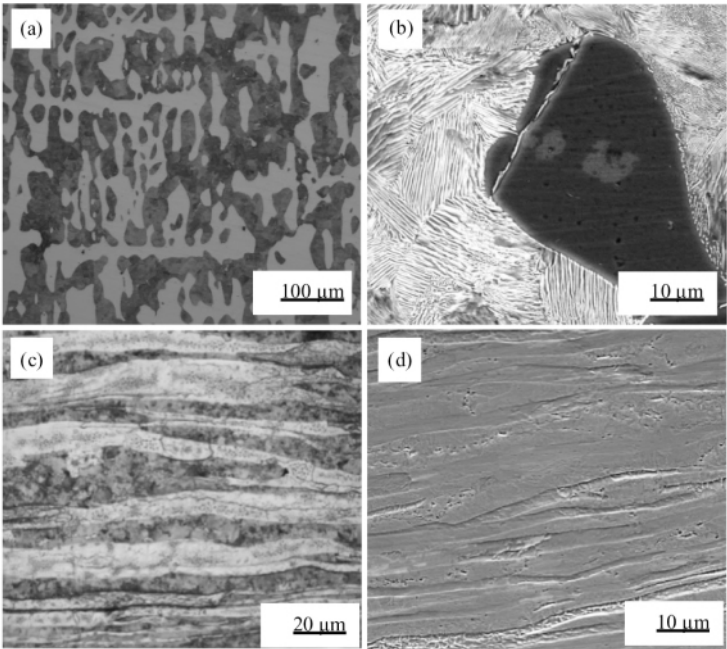
表 1 试验钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical compositions of the test steel(mass fraction) %

C	Mn	Al	Si	P	S	Fe
0.4	2	4	0.3	0.009 4	0.008 6	Bal.

2 试验结果和讨论

2.1 微观组织分析

图 1 为试验钢铸态及热轧态显微组织。



(a)铸坯 OM 形貌;(b)铸坯 SEM 形貌;(c)轧后 OM 形貌;(d)轧后 SEM 形貌

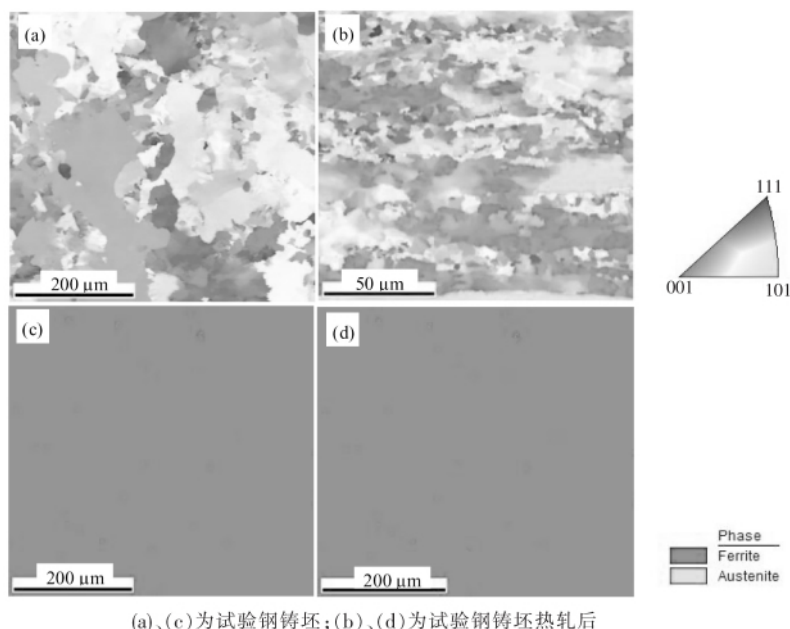
图 1 试验钢铸态及热轧态显微组织

Fig.1 Microstructure images of as-cast and hot rolled steel

从图 1(a) 铸态组织的 OM 照片可以明显看出浅色鱼骨状组织为 δ -铁素体 枝晶间的深色区域为 γ 奥氏体的等温产物(γ 奥氏体 $\rightarrow \alpha$ -铁素体 + M_3C/κ)。而 γ 奥氏体的产生原因是由于液相和 δ -铁素体发生包晶反应。经过七道次的热轧之后,结合 OM 和 SEM 图片可知:图 1(c) 所示的深色区域为 γ 奥氏体共析反应生成的马氏体(α -铁素体与碳化物片层相间的混合物)。在光学显微镜下观测到的浅色区域是:原鱼骨状的 δ -铁素体沿轧制方向被拉长为条带状,而且其尺寸较为粗大。主要原因是因为试验钢所添加的 Al 元素是稳定铁素体的元素,在轧制过程中 δ -铁素体没有发生回复再结晶过程。

图 2 为 Fe-0.4C-2Mn-4Al 钢铸坯组织和热轧后

组织的 EBSD 照片及相含量测定,从图 2 不难看出,热轧后组织相较于铸坯组织,发生明显细化过程。铸坯组织的 δ -铁素体经轧制后呈带状组织,与轧制方向平行,分层分布。图 2(c)、(d) 内的小面积区域为奥氏体,大面积区域为铁素体。铸坯组织和热轧组织几乎都是铁素体相,奥氏体含量极少。寻峰处理后的 XRD 分析(图 3)再次证实了有关相含量的分析。热轧前后组织均得到明显的铁素体峰以及碳化物。这是因为: Mn 元素为稳定奥氏体相区的合金元素, Mn 的含量直接影响到奥氏体的稳定性,考虑到试验钢铸坯 Mn 含量为 2%,属于低锰钢,且奥氏体在轧制过程中发生共析反应生成了马氏体;铸坯试验钢添加了 4% 的 Al 元素,起到了很好的稳定铁素体的作用。



(a)、(c)为试验钢铸坯;(b)、(d)为试验钢铸坯热轧后

图 2 铸坯及热轧后试样的 EBSD 图和相分布
Fig.2 EBSD diagram of as-cast and hot rolled steel

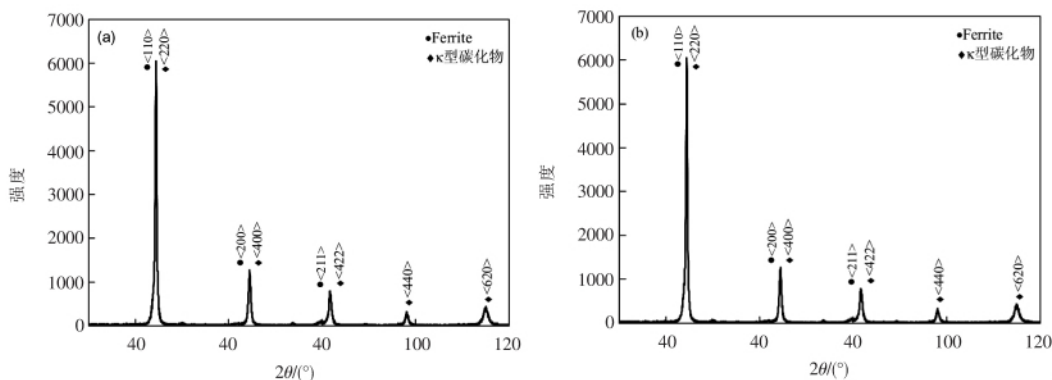


图 3 铸态(a)和热轧态(b) XRD 图谱

Fig.3 XRD diagram of as-cast steel and hot rolled steel

图 4 为热轧前后的晶粒大小尺寸对比和取向差分布。铸坯组织的平均晶粒尺寸为 $13.7\ \mu\text{m}$, 而热轧后的平均晶粒尺寸为 $3.1\ \mu\text{m}$, 晶粒尺寸细化了 77.4%。通过对试验钢变形前后晶界取向差的统计分析可以看出: 经过热轧之后, 虽然小角度晶界的数量有所上升, 但是其所占比例下降; 铸态组织大角度晶界 ($\theta \geq 15^\circ$) 占 39.8%, 轧制后组织中大角度晶界含量为 52.4%。说明经过大变形之后, 小角度晶界的产生与变形过程中小角度向大角度的转换之间趋于动态平衡, 因而取向差分布向大角度移动。综上所述可以得出经过热轧后, 组

织得到明显细化的结论。其主要原因是: 在轧制过程中会发生动态回复再结晶, 合金元素的添加以及碳化物的析出会对晶界起到钉扎作用, 从而阻碍晶界运动, 使得晶粒长大的驱动力减小; 小角度晶界 ($2^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$) 向较大角度晶界 ($5^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$) 不断转变的结果使大角度晶界数量不断增加, 最终导致晶粒显著细化。值得注意的是: 虽然热轧后平均晶粒尺寸为 $3.1\ \mu\text{m}$, 但是仍有部分晶粒的尺寸在 $30 \sim 40\ \mu\text{m}$ 。这是由于 Al 元素的添加, 稳定 δ -铁素体相, 使之在热轧时没有发生回复再结晶过程细化晶粒。

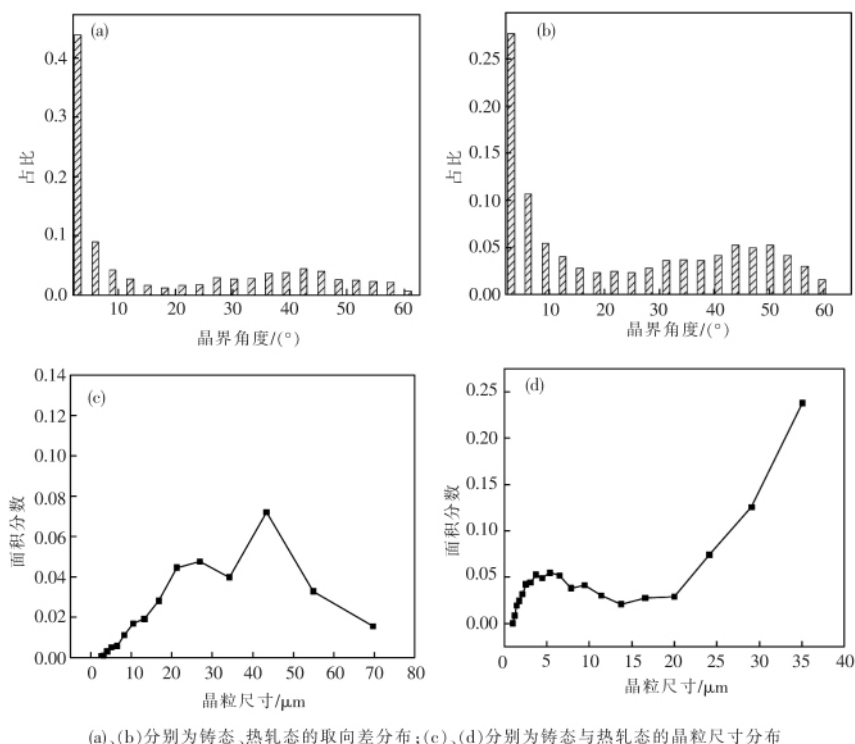


图 4 热轧前后的晶粒大小尺寸对比和取向差分布

Fig.4 Distribution of misorientations and grain size of as-cast steel and hot rolled steel

2.2 力学性能分析

图 5 为铸坯和热轧后 Fe-0.4C-2Mn-4Al 试验钢的工程应力—应变曲线。热轧前后都未见明显的屈服平台, 但是热轧后试验钢的拉伸曲线出现颈缩现象。表 2 是两种状态下试验钢的力学性能。铸态时, 屈服强度 520.1 MPa, 热轧后增大到 672.3 MPa, 增长了 29.3%; 铸态抗拉强度为 693.1 MPa, 热轧之后升高到 910.3 MPa, 增长了 31.3%; Fe-0.4C-2Mn-4Al 试验钢的延伸率在热轧过后得到了大幅度提升, 是铸态的 4 倍之多; 强塑积由铸态的 $2.5\ \text{GPa} \cdot \%$ 上升至热轧态的 $13.7\ \text{GPa} \cdot \%$ 。

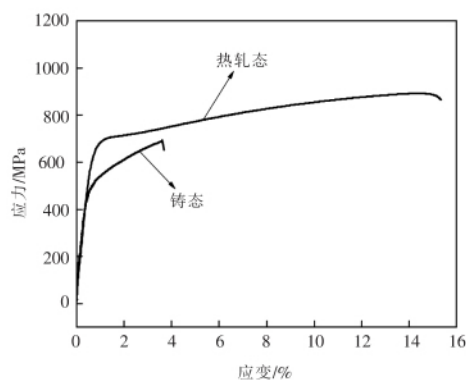


图 5 铸态 (a) 和热轧态 (b) 拉伸曲线
Fig.5 Stress-strain curves of as-cast steel and hot rolled steel

表2 铸坯及热轧板试验钢的力学性能数据
Table 2 Mechanical properties of the steels

	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	均匀延伸率 /%	强塑积 / (GPa·%)
铸坯	520.1	693.1	3.6	2.5
热轧板	672.3	910.3	15.1	13.7

总的来说:热轧后的力学性能要优于铸坯,综合性能强塑积得到了很大的提升。经分析可得:铸坯力学性能较低是因为其中各种缺陷以及夹杂物和脆性相的存在,产生应力集中。经过热轧后,夹杂物以及脆性相的形貌和分布状况都得到了改善,使得钢板的致密性得到提高,从而提高了塑韧性,这从图2的EBSD图片上得到了证实;本次轧制试验压下量为90%,大压下量使得随机取向的晶粒逐渐趋于一致;相对细小的 δ -铁素体会使得试验钢的伸长率得到一定程度的提高,而且由于合金的析出强化以及弥散强化等作用,使得轧制

后强塑性优于铸坯。

进一步的退火试验^[11]表明,600℃退火后试验钢的强塑积上升至34.5 GPa·%,符合第三代汽车钢强塑积要求。

3 结论

1) Fe-0.4C-2Mn-4Al试验钢的铸态组织以 δ -铁素体为主,其中还存在片层分布的 α -铁素体和k型碳化物,在轧制过程中 δ -铁素体拉伸成带状, γ 奥氏体的等温产物转变为马氏体。经过热轧之后,平均晶粒尺寸由13.7 μm 细化到3.1 μm 。由于 δ -铁素体没有参加到细化过程,导致存在部分尺寸在30~40 μm 的粗大晶粒。

2) 铸态试验钢抗拉强度为693.1 MPa,热轧后增大到910.3 MPa。断后延伸率由铸态3.6%增长到15.1%。轧制后无论是强度还是塑性皆有大幅度提升,强塑积可达13.7 GPa·%。

参考文献

- [1] Dong Han, Wang Maoqiu, Weng Yuqing. Performance improvement of steels through M3 structure control [J]. Iron and Steel, 2010, 45(7): 1-7.
(董瀚, 王毛球, 翁宇庆. 高性能钢的M3组织调控理论与技术[J]. 钢铁, 2010, 45(7): 1-7.)
- [2] Han H N, Oh C S, Kim G *et al.* Design method for TRIP-aided multiphase steel based on a microstructure-based modelling for transformation-induced plasticity and mechanically induced martensitic transformation [J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 499(1-2): 462-468.
- [3] Dini G, Najafizadeh A, Uejiri R *et al.* Improved tensile properties of partially recrystallized submicron grained TWIP steel [J]. Materials Letters, 2010, 64(1): 15-18.
- [4] Matlock D K, Speer J G. Processing opportunities for new advanced high-strength sheet steels [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2010, 25(1-3): 7-13.
- [5] Xu L Y, Zhu J, Jing H Y *et al.* Effects of deep cryogenic treatment on the residual stress and mechanical properties of electron-beam-welded Ti-6Al-4V joints [J]. Materials Science & Engineering A, 2016(673): 503-510.
- [6] Zeng Maoyan. Alloy elements optimization of high strength Al alloy plate for automobile [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(4): 63-67.
(曾茂燕. 钒在铝合金高强汽车板中的应用研究[J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(4): 63-67.)
- [7] Wei Yuansheng. Performance and application of the 3rd generation high strength automobile steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(12): 34-39.
(魏元生. 第三代高强度汽车钢的性能与应用[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 34-39.)
- [8] Han Zhiyong, Zhang Mingda, Xu Haifeng *et al.* Research and application of high performance automobile steel [J]. Iron and Steel, 2016, 51(2): 1-9.
(韩志勇, 张明达, 徐海峰, 等. 高性能汽车钢组织性能特点及未来研发方向[J]. 钢铁, 2016, 51(2): 1-9.)
- [9] Zhang Gongting, Zheng Zhiwang, Wang Minli *et al.* Effects of heat treatment processes on microstructures and properties of the vanadium-alloyed cold-rolled TRIP steel [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2016, 37(6): 46-50.
(张功庭, 郑之旺, 王敏莉, 等. 热处理工艺对钒微合金化冷轧TRIP钢组织性能影响研究[J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(6): 46-50.)
- [10] Ehrhardt B, Gerber T, Schaumann T W. Approaches to microstructural design of TRIP and TRIP aided cold rolled high strength steels [C]//Proc. of Inter. Conf. on Advanced High Strength Sheet Steels for Automotive Applications, 2004, Colorado, USA, 39-50.
- [11] Wang Yuchen. The effect of rolling and annealing process on microstructure and properties of δ -TRIP [J]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.
(王宇辰. 轧制退火工艺对 δ -TRIP钢组织和性能的影响[J]. 唐山: 华北理工大学, 2019.)

编辑 杨冬梅