

文章编号: 1673-5196(2018)03-0001-05

Al 元素对 Fe-Mn-Al-C 钢微观组织和力学性能的影响

喇培清, 汪科良, 王力, 盛捷, 石玉, 李正宁

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 使用中频感应炉在大气环境下熔炼不同 Al 质量分数的 Fe-Mn-Al-C 钢, 利用 XRD, OM 和 EPMA 分析不同 Al 质量分数下 Fe-Mn-Al-C 钢的显微组织, 并对其力学性能进行测试. 结果表明: 中锰钢由铁素体和奥氏体 2 相及少量碳化物组成, 随着 Al 质量分数的增多, 铁素体的体积分数增大. 且不同 Al 质量分数下奥氏体中都有 C 元素的富集. 另外, Al 质量分数为 6%、8%、10% 的中锰钢的硬度分别为 267、330、323 HV, 合金的强度和塑性都随着 Al 质量分数的增多而降低, 且合金实测强度远低于由经验公式计算得到的理论强度值, 合金塑性较差.

关键词: 中锰钢; Al 质量分数; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG142.1 **文献标志码:** A

Effects of element Al on microstructure and mechanical performance of Fe-Mn-Al-C steel

LA Pei-qing, WANG Ke-liang, WANG Li, SHENG Jie, SHI Yu, LI Zheng-ning

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Fe-Mn-Al-C steel with different mass-fractions of Al was smelted in medium-frequency induction furnace in atmospheric environment. XRD, OM and EPMA were used to analyze its microstructure and test its mechanical performance. The result showed that the Fe-Mn-Al-C medium-manganese steel would mainly consist of ferrite and austenite phases and the ferrite volume fraction would increase with the mass-fraction of Al. The C element would be enriched in the austenite under different conditions of Al mass-fraction. In addition, the hardness of the medium-manganese steel with Al mass-fraction of 6%, 8%, and 10% would be 267, 330, and 323 HV, respectively. The strength and plasticity of the medium-manganese steel would decrease with the mass-fraction of Al, and the measured strength would greatly be lower than the theoretical strength calculated with empirical formula. The alloy would have a poor plasticity.

Key words: medium-manganese steel; Al mass-fraction; microstructure; mechanical performance

随着能源和环境问题的日益突出, 提高汽车效率和减少尾气排放迫在眉睫, 有研究指出^[1-2], 在其他条件不变时, 汽车自重每减少 10%, 燃油消耗可降低 6%~8%, 从而有效节约能源; 每减少 1 L 的燃油消耗, 会少排放 2.45 kg 的 CO₂, 也可减小其他污染物的排放.

近年来, 以中锰 TRIP 钢为代表的第三代汽车用钢受到广大学者的关注^[3-4], 中锰钢是指锰质量分数在 5%~12% 的钢材, 其具有低密度、高强度、高的碰撞吸收能、良好的成型性能和成本低的优点, 广

泛应用于汽车加工, 可以减轻自重, 达到节能减排的目的^[5]. 在中锰钢中添加 Al 元素不仅能够降低材料的密度, 而且对钢的组织 and 性能都产生显著影响^[6]. 蔡志辉等^[7]对成分为 Fe-11Mn-4Al-0.2C 的钢进行优化的 Q&P 处理后, 发现拉伸过程中有特殊的锯齿流变特性. 韩国 Park 等^[8]对 Fe-8.1Mn-5.3Al 的中锰钢冷轧退火处理后, 发现其抗拉强度超过 900 MPa, 延伸率大于 50%, 减重潜力为 5%~8%.

为了获得最佳的综合力学性能, 目前多采用多相 (Multiphase)、亚稳 (Metastable) 和多尺度 (Multiscale) 的 3M 组织调控思路^[10-11]. 本文通过制备不同 Al 质量分数的 Fe-Mn-Al-C 钢, 研究 Al 元素对中锰钢组织和力学性能的影响, 为 Fe-Mn-Al-C 钢

收稿日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51561020)

作者简介: 喇培清 (1971-), 男, 甘肃临夏人, 研究员, 博导.

的生产提供理论指导.

1 实验方法

1.1 Fe-Mn-Al-C 钢的铸造

实验原料为高纯铁(99.99%)、高碳锰铁(C 质量分数 5.985%)、低碳锰铁(C 质量分数 0.685%)、工业铝锭.以表 1 设计的成分备料.在大气环境中采用中频无芯感应炉进行熔炼,每炉熔炼 15 kg,炉衬材料为低碳碱性镁砂.将备好原料加入炉中,开始加热升温,当温度上升到 700 °C 左右时铝开始熔化,保温 10 min 后继续升温,温度达到 1 600 °C,所有原料全部熔化,为了使各种原料熔化混合均匀,在 1 600 °C 时保温 15 min,然后出炉浇铸在用呋喃树脂造型而成的砂型中,为了加快冷却速度,增加组织致密性,在砂型底部预埋了冷铁.

表 1 实验合金的成分质量分数

Tab.1 Mass-fraction of compositions of experimental alloy

| 合金编号 | Mn | Al | C | Si | P | Fe |
|------|----|----|------|------|---------|------|
| 1 | 10 | 6 | 0.25 | 0.16 | 0.005 2 | Bal. |
| 2 | 10 | 8 | 0.25 | 0.16 | 0.005 2 | Bal. |
| 3 | 10 | 10 | 0.25 | 0.16 | 0.005 2 | Bal. |

1.2 实验测试与分析

将试样用线切割机切割后,用水砂纸打磨、抛光并用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀,用 D/Max-2400 型 X 射线衍射仪研究试样物相,产生 X 射线的电压为 40 kV,电流为 150 mA,在 30° ≤ 2θ ≤ 100° 扫描,扫描速度为 7 (°)/min.利用 Mef3 光学显微镜观察试样的显微组织.采用 EPMA-1600 电子探针检测样品表面的元素分布.

在室温下用 HBRVU-187.5 型布洛维光学硬度计测量样品的维氏硬度,载荷 294 N,加载时间是 12 s.根据国家标准 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法》技术要求,将铸锭加工成标距为 25 mm,直径为 5 mm 的标准拉伸试样,根据试样的载荷-位移数据,绘制 σ-ε 曲线.再根

据 σ-ε 曲线,确定各成分试样的屈服强度 σ_{0.2}、抗拉强度 σ_b 以及延伸率 δ.

2 结果与讨论

2.1 室温组织

图 1 为不同 Al 质量分数中锰钢的 XRD 图谱,可知不同 Al 质量分数的合金都主要由铁素体、奥氏体和 κ 系碳化物组成.且 κ 系碳化物主要由 Mn、Al 和 C 元素组成,晶体结构为钙钛矿结构^[10].

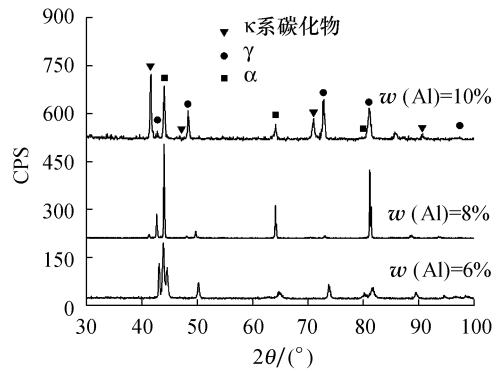


图 1 不同 Al 质量分数中锰钢的 XRD

Fig.1 XRD patterns of medium-manganese steel with different mass-fractions of Al

图 2 为不同 Al 质量分数中锰钢的金相组织照片,从图可以看出,合金 1 由粗大的黑色奥氏体和灰白色铁素体组成,另外还有一些小的黑色颗粒状析出相.并且随着钢中 Al 质量分数的增加,黑色颗粒状析出相增多.合金 2 和合金 3 奥氏体体积分数明显减少且形貌发生改变,合金 2 的奥氏体呈长短枝干状,合金 3 由少量的枝干状奥氏体分布在铁素体基体上.对相同成分下 10 张金相照片中铁素体相的体积分数利用 IPWIN6.0 软件手动统计并取平均值,由此得到合金 1、合金 2 和合金 3 中的铁素体体积分数分别为 42%、68% 和 81%.

为了进一步分析合金的组织成分,对不同 Al 质量分数的中锰钢做 EPMA 面扫,如图 3~5 所示.由于 Al 元素是铁素体的形成元素,结合金相组织

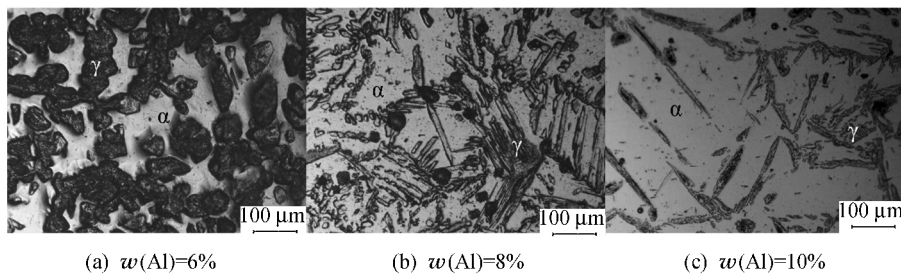


图 2 不同 Al 质量分数中锰钢的 OM 像

Fig.2 OM images of medium-manganese steel with different mass-fractions of Al

照片,黑色区域为奥氏体,灰色区域为铁素体.从电子探针照片可以看出不同 Al 质量分数下的合金中 Mn,Fe 元素都在奥氏体和铁素体中均匀分布,C 元素在奥氏体中富集.BSE 像中黑色颗粒为 κ 系碳化物,与 XRD 结果吻合.随着 Al 质量分数的增加,碳

化物体积分数减少,这是因为 Al 元素能够抑制碳化物的析出,稳定奥氏体组织^[12].

中锰系 Fe-Mn-Al-C 钢一般具有铁素体和奥氏体双相组织,两相的比例随着钢的化学成分而变化^[13].由于 Al 元素是铁素体的形成元素,随着 Al 质量分

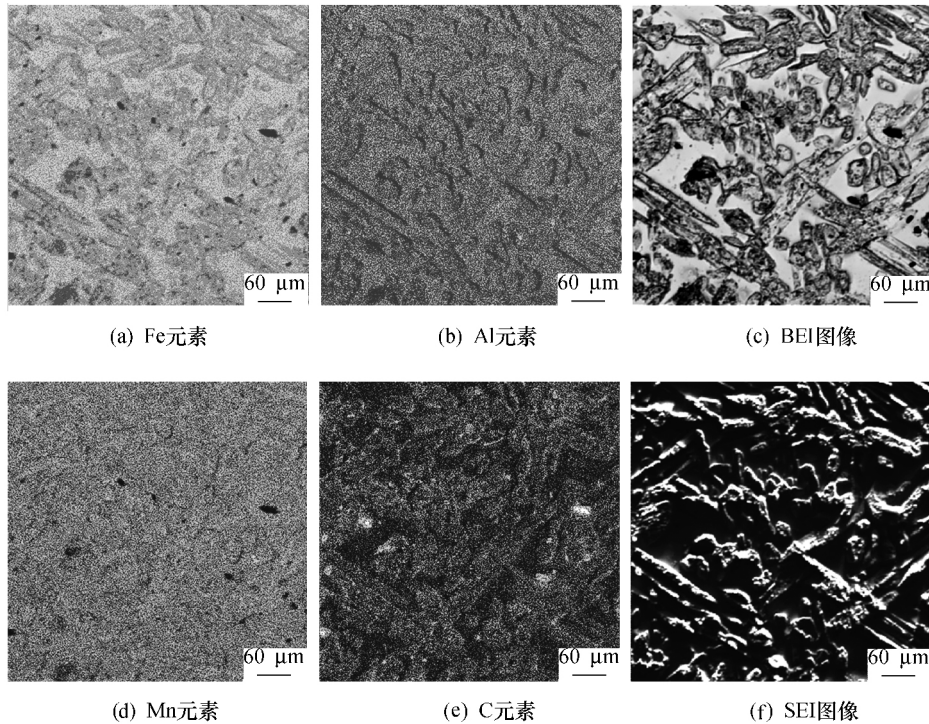


图 3 Al 质量分数为 6% 的中锰钢 EPMA 图和元素分布

Fig.3 EPMA image and element distribution of medium-manganese steel with mass-fraction 6% of Al

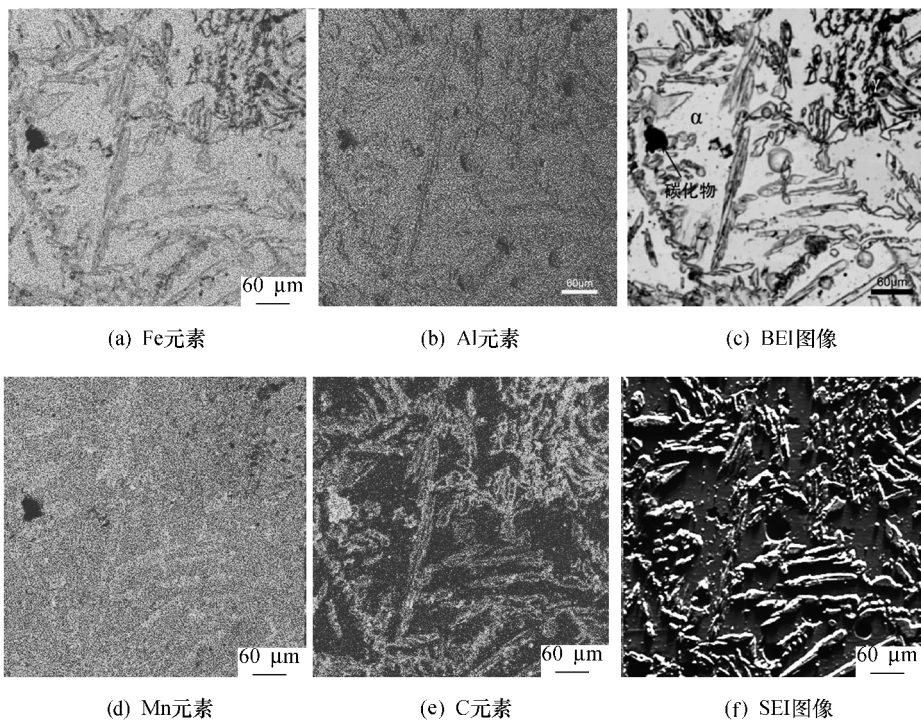


图 4 Al 质量分数为 8% 的中锰钢 EPMA 图和元素分布

Fig.4 EPMA image and element distribution of medium-manganese steel with mass-fraction 8% of Al

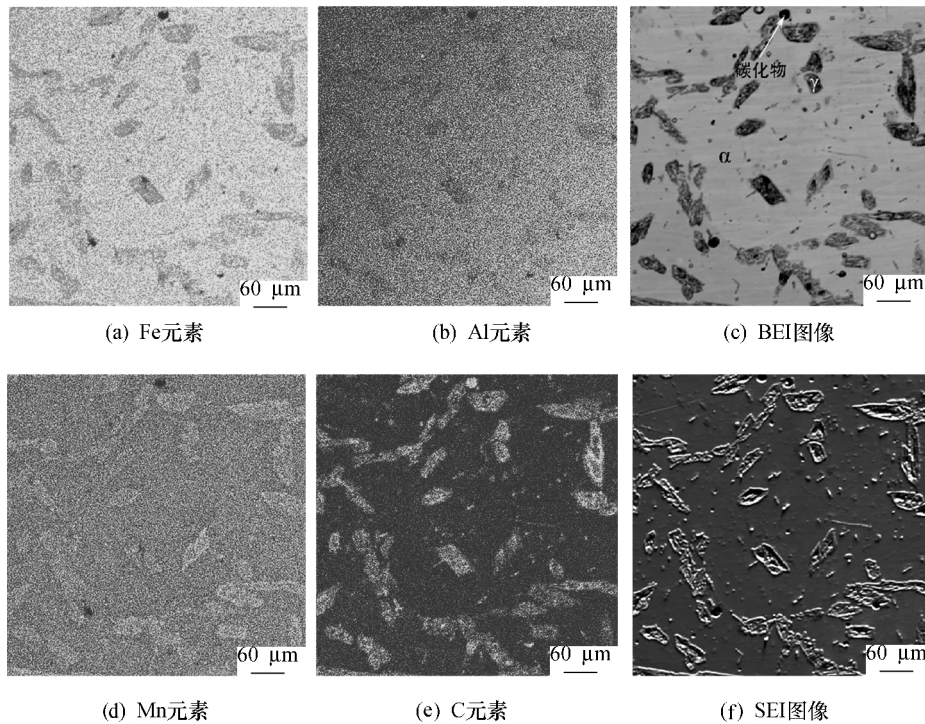


图 5 Al 质量分数为 10% 的中锰钢 EPMA 图及元素分布

Fig.5 EPMA image and element distribution of medium-manganese steel with mass-fraction 10% of Al

数的增加,钢中铁素体的体积分数增大.由于 C 元素在铁素体中的溶解度低于奥氏体中的,所以 C 元素富集于奥氏体中,且随着 Al 质量分数的增加,更多的 C 元素被排挤到奥氏体中,使得奥氏体中 C 元素的富集更加显著.

2.2 力学性能

表 2 为不同 Al 质量分数合金的维氏硬度和根据经验公式计算得到以及实测的抗拉强度.从表中可以看出,合金 1、合金 2 和合金 3 的硬度分别为 267、330、323 HV.随着 Al 质量分数的增加,钢的硬度先明显增加,后基本不变.由经验公式^[14]:

$$\left(\sigma_b = 9.8 \times \left(\frac{2\,463\,622}{3031 - H_v} - 801.633\right)\right)$$

计算得到的合金 1、合金 2 和合金 3 对应的抗拉强度分别为 879、1 083、1 060 MPa,由此可看出中锰钢 Al 元素的添加可使得材料强度达到理想值.图 6 为不同 Al 质量分数下合金的拉伸应力-应变曲线,由应力-应变曲线可确定出各合金的力学性能参数,见表 2.可以看出合金 1、合金 2 和合金 3 的屈服强度分别为 378、324、138 MPa,抗拉强度分别为 445、360、159 MPa.实测合金强度随 Al 质量分数的增加而逐渐降低,并且明显低于由经验公式计算得到的强度.另外,合金 1 具有明显的塑性变形平台且出现屈服,延伸率为 4.4%.合金 2 和合金 3 都没有加工硬化阶段,出现脆断.

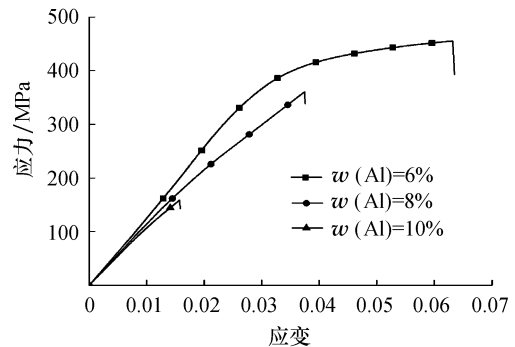


图 6 不同 Al 质量分数中锰钢的室温应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of medium-manganese steel with different mass-fractions of Al under tensile at indoor temperature

表 2 不同 Al 质量分数中锰钢的硬度和拉伸性能

Tab.2 Tensile performance and hardness of medium-manganese steel with different mass-fraction of Al

| 合金编号 | 维氏硬度 /HV | 理论抗拉强度 /MPa | 实验屈服强度 /MPa | 实验拉伸强度 /MPa | 实验延伸率 /% |
|------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 1 | 267 | 879 | 378 | 455 | 4.4 |
| 2 | 330 | 1 083 | 324 | 360 | 3.6 |
| 3 | 323 | 1 060 | 138 | 159 | 2.4 |

研究表明^[15],奥氏体中 C 质量分数的增加会导致合金硬度的提高,见表 2,中锰钢的硬度随 Al 质量分数的增加而增加.另外,由组织图片可以看出碳化物成颗粒状分布,这会使得合金在拉伸过程中裂

纹极易在碳化物颗粒处形成,从而导致断裂^[8].随Al质量分数的增加,奥氏体中碳化物颗粒增多,则合金1、合金2和合金3的强度和塑性呈下降趋势.

在铸态条件下,3种钢的强度和经验公式计算得到的理论值相差很大,这主要归结于2个因素.

1) 本实验采用中频感应炉在大气环境下熔炼,必然存在着氧化现象,使得钢中含有氧化物夹杂.另外铸造过程中使用砂型铸模,冷却速度远低于金属铸模,这造成材料的晶粒粗大,形成微观孔洞,在拉伸过程中极易产生裂纹源,导致合金强度和塑性降低.

2) 颗粒状碳化物的析出会使得拉伸过程中裂纹极易产生,导致合金强度和塑性降低.

3 结论

1) 中锰钢由铁素体和奥氏体两相及少量碳化物组成,随Al质量分数的增多,铁素体的体积分数增大.不同Al质量分数下奥氏体中都有C元素的富集;

2) 合金1、合金2和合金3的硬度分别为267、330、323 HV.随Al质量分数的增多,合金强度和塑性都降低,且合金实测强度远低于由经验公式计算得到的理论强度值,合金塑性较差.

参考文献:

- [1] 康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排 [J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1-7.
- [2] 唐 荻, 米振莉, 陈雨来. 国外新型汽车用钢的技术要求及研究开发现状 [J]. 钢铁, 2005, 40(6): 1-5.
- [3] 康华伟. 现代汽车用钢特点及发展趋势分析 [J]. 山东冶金, 2015, 37(3): 22-24.
- [4] HAN Q, ZHANG Y, WANG L. Effect of annealing time on microstructural evolution and deformation characteristics in 10Mn1.5Al TRIP steel [J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2015, 46(5): 1917-1926.
- [5] 张磊峰, 宋仁伯, 赵 超, 等. 新型汽车用钢——低密度高强韧钢的研究进展 [J]. 材料导报, 2014, 28(19): 115-122, 133.
- [6] 喇培清, 马付良, 孟 倩, 等. 不同Al质量分数的铸造304不锈钢组织和性能 [J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(2): 1-8.
- [7] CAI Z H, DING H, MISRA R D K, *et al.* Unique serrated flow dependence of critical stress in a hot-rolled Fe-Mn-Al-C steel [J]. *Scripta Materialia*, 2014, 71(2): 5-8.
- [8] PARK S J, HWANG B, LEE K H, *et al.* Microstructure and tensile behavior of duplex low-density steel containing 5mass% aluminum [J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(6): 365-369.
- [9] 董 瀚, 曹文全, 时 捷, 等. 第3代汽车钢的组织与性能调控技术 [J]. 钢铁, 2011, 46(6): 1-11.
- [10] GIL L C, SUNG-JOON K, CHANG-SEOK O H, *et al.* Effects of heat treatment and Si addition on the mechanical properties of 0.1 wt% C TRIP-aided cold-rolled steels [J]. *Isij International*, 2002, 42(10): 1162-1168.
- [11] HAN S Y, SHIN S Y, LEE S, *et al.* Effect of carbon content on cracking phenomenon occurring during cold rolling of three light-weight steel plates [J]. *Metall Mater Trans A*, 2011, 42(1): 138-146.
- [12] 蔡志辉, 李志超, 才 博, 等. Fe-8/11Mn-4Al-0.2C钢的力学性能及应变硬化行为 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 224-228.
- [13] 杨富强, 宋仁伯, 孙 挺, 等. Fe-Mn-Al轻质高强钢组织和力学性能研究 [J]. 金属学报, 2014, 50(8): 897-904.
- [14] 王庆山. 黑色金属强度-硬度换算经验公式 [J]. 理化检验: 物理分册, 1995, 31(2): 39-40.
- [15] HAN S Y, SHIN S Y, LEE B J, *et al.* Effect of tempering time on microstructure, tensile properties, and deformation behavior of a ferritic light-weight steel [J]. *Metall Mater Trans A*, 2013, 44(1): 235-247.