

Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu 高锰 TWIP 合金 铸铁的热处理金相组织分析

蔡曙光, 王明杰

(福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 通过改变加热温度和保温时间, 研究不同热处理工艺对 Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu 高锰 TWIP 合金铸铁组织的影响, 对试样进行物相分析和金相组织观察。实验结果表明: 随着加热温度和保温时间的增加, 组织中退火孪晶的数量增加, 孪晶发育趋于完善。热处理后其室温组织为单一奥氏体; 热处理的合金铸铁拉伸变形后, 产生大量形变孪晶, 其变形后的基体仍然保持单一奥氏体组织, 未发生马氏体相变, 发生了完全的 TWIP 效应。

关键词: 合金铸铁; 热处理工艺; 组织形貌; TWIP 效应

中图分类号: TG143.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)01-0032-04

Study on metallographic structure of Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu high manganese TWIP alloy cast iron via heat treatment

Cai Shuguang, Wang Mingjie

(College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Different heat treatment processes for Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu high manganese TWIP alloy cast iron were investigated through X-ray diffraction (XRD) and metalloscope. Experimental results show that the number of annealing twins in tissue has increased, and twin development tends to be perfect with the increase of heat treatment temperature and maintaining time. The alloy cast iron was fully austenitic after heat treatment, which produced large quantities of deformation twins after alloy cast iron underwent tensile strain. The matrix after deformation kept fully austenitic structure without the occurrence of martensitic transformation, while TWIP effect occurred completely.

Keywords: alloy cast iron; heat treatment process; metallographic structure; TWIP effect

近年来,随着人们对环境问题的进一步认识和对安全性要求的不断提高,现代汽车工业的发展趋势也演变成在保证安全性能不变的前提下尽可能轻量化,从而实现降低油耗和减少排放。为了满足这一需求,科学工作者开发了一系列强度高、塑性好、吸收撞击能量强的 TWIP 钢材料。该

系列钢材料可在变形过程中发生孪生诱发塑性效应 (twinning induced plasticity, TWIP 效应),从而大幅提高钢的伸长率^[1-6]。

球墨铸铁因其铸造性能好,成本低廉等特点而成为工业生产中应用广泛的材料之一^[7]。其中,合金奥氏体铸铁更因其较好的减振减摩性及

收稿日期: 2016-01-21

基金项目: 福建省科技厅工业引导性重点项目 (2015H0002)

第一作者简介: 蔡曙光 (1971-), 男, 福建泉州人, 讲师, 博士, 研究方向: 高温合金及复合材料。

高低温抗氧化性,在汽车领域广泛应用^[8-9]。目前常见的奥氏体铸铁体系有 Ni-Mn 系和 Mn-Cu 系^[10]。林淑梅^[11]等采用熔炼法制备了新型 Fe-Ni-Mn-C-Si 系合金铸铁,该铸铁经过再高温固溶处理后,其拉伸强度可达 730MPa,伸长率更达到同类 QT700-2 球墨铸铁的 10 倍,其良好塑性源于 TWIP 效应,即通过奥氏体基体密集孪生切变实现的。黄芬芬^[12]等在 Fe-Mn-C-Si-Cu-Ni 合金铸铁的研究中发现,锰含量的增加,形变孪晶更密集,TWIP 效应更显著。但镍的价格比较昂贵,合金铸铁的制备成本较高。

本研究在 Fe-Ni-Mn-C-Si 系合金铸铁的基础上,进一步提高 Mn 含量,并通过加入少量 Cu 替换 Ni,探索不同热处理工艺对 TWIP 合金铸铁组织的影响。

1 实验部分

1.1 材料

采用已熔炼好的 Fe-Mn-C-Si-Cu 合金铸铁样块,成分见表 1。

表 1 TWIP 合金铸铁的化学成分

Tab.1 Chemical composition of TWIP alloy cast iron					
元素	C	Mn	Si	Cu	Fe
质量百分比/%	3.5	16.0	3.0	3.0	其余

1.2 实验方法

采用电火花线切割机将样品加工成 Φ15 mm×30 mm 的样件。对试样进行分组编号,具体工艺见表 2。

表 2 样件的热处理工艺

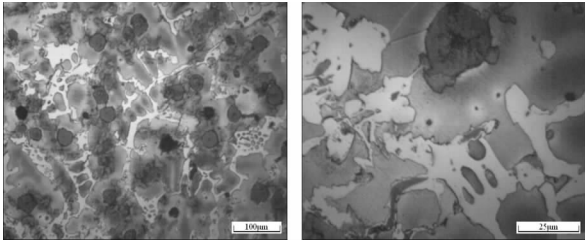
Tab.2 Heat treatment process of samples		
样件编号	热处理温度/℃	热处理时间/h
A1	铸态	
A2	900	保温 1 h 后水淬
A3	1 000	保温 1 h 后水淬
A4	1 100	保温 1 h 后水淬
A5	1 000	保温 2 h 后水淬
A6	1 000	保温 3 h 后水淬

采用 XJZ-6A 金相显微镜观察 TWIP 合金铸铁样件的组织形貌;采用德国布鲁克 D8Advance X 射线衍射仪对合金进行物相分析。

2 实验结果与分析

2.1 组织分析

图 1 为 Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu 合金铸铁的金相组织图片,从图中可以看出,该铸铁的铸态组织由奥氏体基体、碳化物和球化石墨组成,碳化物呈粗大的“鱼骨”状分布。

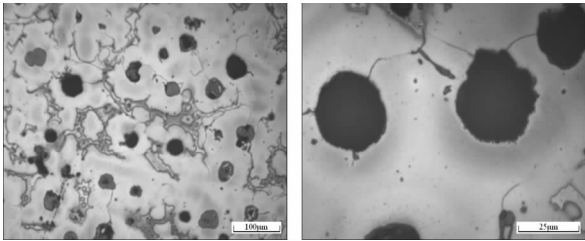


(a) 铸态 100 × (b) 铸态 400 ×

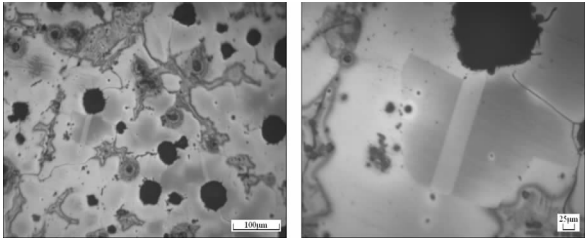
图 1 合金铸铁的铸态组织形貌

Fig.1 Metallographical tissue morphology of casting-iron

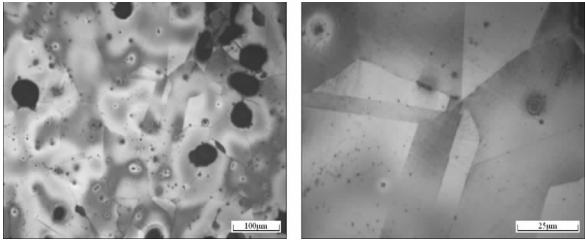
图 2 为同一固溶时间不同热处理温度下,合



(a) 900 °C 1 h 100 × (b) 900 °C 1 h 400 ×



(c) 1 000 °C 1 h 100 × (d) 1 000 °C 1 h 400 ×



(e) 1 100 °C 1 h 100 × (f) 1 100 °C 1 h 400 ×

图 2 合金铸铁不同固溶温度保温 1 h 的组织形貌

Fig.2 Morphology of casting iron maintained for one hour under different solution temperatures

金铸铁的组织形貌图片。从图中可以看出,当热处理温度达到 900 ℃ 时,铸态中的碳化物急剧减少,分解出的碳原子一部分固溶到奥氏体基体中,另一部分通过扩散聚集形成球状石墨均匀分布在奥氏体晶粒和晶界上;当温度达到 1 000 ℃ 时,奥氏体晶粒中出现了少量边界平直的退火孪晶;当达到 1 100 ℃ 时,合金铸铁中的奥氏体晶粒中形成了更多的退火孪晶。

图 3 为铸态和 1 000 ℃ 下不同保温时间合金铸铁的金相组织图片。从图中可以看出,随着保温时间的增加,奥氏体晶粒明显长大。退火孪晶的发育也随保温时间的增加逐渐完善。这是因为保温时间增长,奥氏体晶粒生长有更充足的时间和能力支持,也为孪晶的生长提供了有利条件,孪晶尺寸、孪晶数量和孪晶界面也随保温时间增加明显加大。

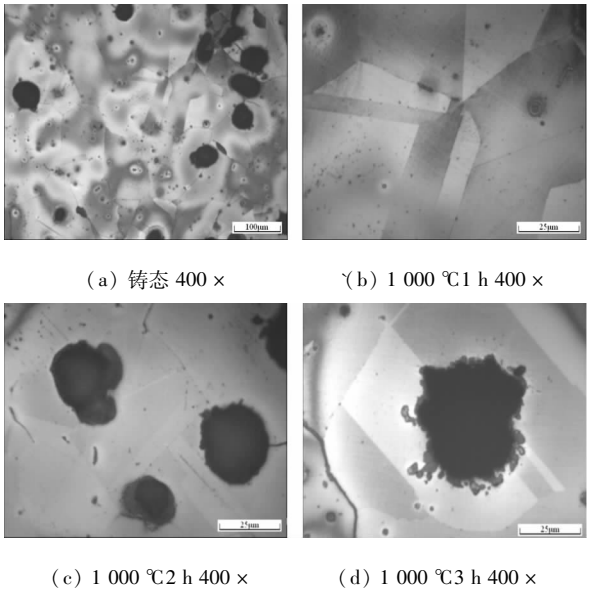


图 3 1 000 ℃ 下保温不同时间 TWIP 合金铸铁的组织形貌

Fig. 3 Tissue metallographical morphology of TWIP alloy casting iron at 1000 ℃ at different maintaining time

图 4 为 1 000 ℃ 保温 3 h 的 Fe - 16Mn - 3.5C - 3Si - 3Cu 合金铸铁试样进行拉伸变形后的金相组织图片。从图中可以看出,试样拉伸变形后,奥氏体晶粒中形成了纵横交错的形变条带组织,覆盖了原有的退火孪晶,由于孪晶对位错的钉扎作用阻止了滑移变形,促成了应变诱发孪晶,产生了大量的形变孪晶。米振莉^[5]等认为奥氏体晶

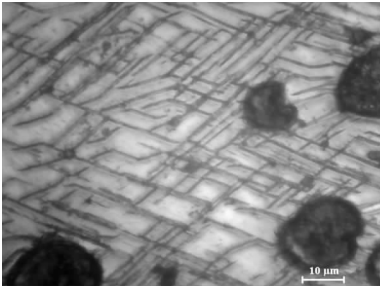


图 4 1 000 ℃ 保温 3 h 合金铸铁拉伸试样的组织形貌
Fig. 4 Tissue metallographical morphology of TWIP alloy casting iron at 1000 ℃ under a maintaining time of 3 hours

粒中退火孪晶的形成与晶粒的取向有关,仅在取向有利的晶粒内部会形成退火孪晶,取向不利的晶粒中不产生孪晶。形变孪晶的形成不但与晶粒取向有关,也和晶粒的变形量有关。首先在取向有利的晶粒内部形成形变孪晶。在随后的变形过程中,随着形变孪晶的不断增多导致晶粒取向的变化,使得原先不是最有利取向的那部分晶粒也会变成取向有利的晶粒,从而在这些晶粒内部产生形变孪晶。通过不断地产生形变孪晶,造成晶粒滑移面方向的变化,从而使原来不发生滑移的晶面发生滑移。增加了材料内可以发生滑移的晶粒数量,导致材料的延伸率得到极大的提高,发生 TWIP 效应。

2.2 XRD 分析

图 5 是 Fe - 16Mn - 3.5C - 3Si - 3Cu 系 TWIP 合金铸铁的铸态 X 射线衍射图。

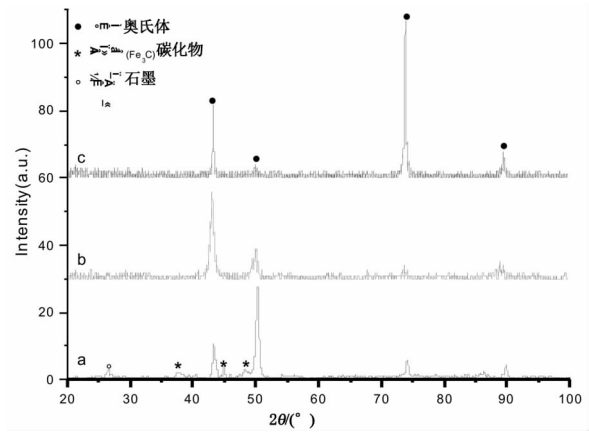


图 5 Fe - 16Mn - 3.5C - 3Si - 3Cu 系 TWIP 合金铸铁的 X 射线衍射图
Fig. 5 XRD of Fe - 16Mn - 3.5C - 3Si - 3Cu high manganese TWIP alloy cast iron

从图5(a)中可以看出,奥氏体峰清晰可辨, Fe_3C 峰可辨但相对较低。1 000 °C 3 h 固溶(b)后, Fe_3C 峰完全消失,而奥氏体峰仍清晰可辨,这表明固溶态的基体组织为单一奥氏体组织;固溶试样拉伸后(c)仍为单一奥氏体相。这主要归因于高含量的锰元素提高了 Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu 合金铸铁的层错能,从而有效地抑制应变诱发马氏体。此外,XRD 分析结果也进一步证实了金相组织观察结论。

3 结论

1) Fe-16Mn-3.5C-3Si-3Cu 系高锰

TWIP 合金铸铁经过 1 000 °C 保温 3 h 固溶处理后,组织中的碳化物完全消除,基体组织转变为单一奥氏体组织,并在奥氏体晶粒内出现发育完善的退火孪晶。

2) 固溶处理后的合金铸铁拉伸变形,发生奥氏体密集孪生切变,形成大量机械孪晶,发生了 TWIP 效应。

3) 合金铸铁拉伸变形后,基体组织仍保持单一奥氏体组织,未发生马氏体相变。

参考文献:

- [1] Scott C, Allain S, Faral M, et al. The development of a new Fe-Mn-C austenitic steel for automotive applications[J]. Revue De Métallurgie, 2006, 103(6): 293-302.
- [2] Allain S, Chateau J P, Bouaziz O, et al. Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe-Mn-C alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 387/388/389: 158-162.
- [3] Vercammen S, Blanpain B, De Cooman B C, et al. Cold rolling behaviour of an austenitic Fe-30Mn-3Al-3Si TWIP-steel: the importance of deformation twinning[J]. Acta Materialia, 2004, 52(7): 2005-2012.
- [4] Jin J E, Lee Y K. Strain hardening behavior of a Fe-18Mn-0.6C-1.5Al TWIP steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 527(1/2): 157-161.
- [5] 米振莉,唐荻,严玲,等. 高强度高塑性 TWIP 钢的开发研究[J]. 钢铁, 2005, 40(1): 58-63.
- [6] Gutierrez-Urrutia I, Zaefferer S, Raabe D. The effect of grain size and grain orientation on deformation twinning in a Fe-22 wt. % Mn-0.6 wt. % C TWIP steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(15): 3552-3560.
- [7] 郝石坚. 现代铸铁学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004: 353-364.
- [8] 申泽骥,唐骥,苏贵桥. 高镍奥氏体铸铁的生产工艺特征[J]. 铸造技术, 2003, 24(2): 91-93.
- [9] 戴塘顺. 镍奥氏体铸铁的生产[J]. 现代铸铁, 2004(2): 36-38.
- [10] 吴德海. 球墨铸铁[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006: 50-68.
- [11] 林淑梅,朱定一,杨泽斌,等. 高强韧 TWIP 铸铁的形变组织与力学性能[J]. 铸造, 2010, 59(12): 1267-1275.
- [12] 黄芬芬,朱定一,宋卫涛,等. Mn 含量对高强韧 TWIP 球墨铸铁组织和性能的影响[J]. 铸造, 2011, 60(9): 831-835.

(责任编辑:陈雯)