

强磁场下冷却速率对 Fe-0.76% C 钢先共析铁素体组织的影响 *

宫明龙 王守晶 赵 骧 左 良

(东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室 沈阳 110004)

摘 要 研究了在 12 T 强磁场下冷却速率对 Fe-0.76% C 钢中先共析铁素体的显微组织和性能的影响, 结果表明: 先共析铁素体晶粒的伸长方向与磁场方向的夹角随着冷速度的提高而增大, 其原因是高速冷却时原子扩散减弱. 在冷却速率相同的条件下, 与非磁场热处理样品相比, 强磁场热处理样品的先共析铁素体面积明显增加, 宏观硬度下降, 因为强磁场使 Fe-0.76% C 钢表现出更明显的亚共析钢特征.

关键词 金属材料, 强磁场, Fe-0.76% C 钢, 冷却速率, 先共析铁素体, 显微组织

分类号 TG115

文章编号 1005-3093(2008)05-0490-05

Effect of cooling rates on the microstructure of proeutectoid ferrite in Fe-0.76% C steel under high magnetic field

GONG Minglong WANG Shoujing ZHAO Xiang** ZUO Liang
(Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials, Ministry of Education,
Northeastern University, Shenyang 110004)

* Supported by National Natural Science Foundation of China No.50771026 and National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars No.50325102.

Manuscript received November 8, 2007; in revised from June 5, 2008.

** To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)83681723, E-mail: zhaox@mail.neu.edu.cn

ABSTRACT The microstructure features of proeutectoid ferrite during transformation from austenite to ferrite and the hardness of specimens heat treated at different cooling rates without and with applying a magnetic field (12 T) in the Fe-0.76% C steel were investigated. The results showed that the angle between the major axis of proeutectoid ferrite and the magnetic field direction increases with the cooling rate increasing. The reason is that the diffusion is limited with the cooling rate increasing. At the same cooling rate, the area percentage of proeutectoid ferrite in the specimen heat treated with magnetic field is more than that in the specimen without magnetic field, and the hardness of the specimen heat treated with magnetic field is lower. The main reason is that Fe-0.76% C steel shows more characteristics of proeutectoid steel under magnetic field.

KEY WORDS metallic materials, high magnetic field, Fe-0.76% C steel, cooling rates, proeutectoid ferrite, microstructure

奥氏体状态的冷却过程是钢热处理的关键工序, 其性能最终取决于奥氏体冷却转变后的组织. 因此, 研究不同冷却条件下钢中奥氏体组织的转变规律, 对于正确制定钢的热处理冷却工艺、获得预期的性能具有重要的意义. 对于 70S6 非调质钢, 随着冷

却速率的提高 70S6(0.72% C) 钢中珠光体比例的增大导致样品的硬度提高 [1]. 对钢帘线 (0.70%–0.84% C) 表面和性能质量控制工艺的研究表明, 铅浴后的空冷能够提高抗拉强度和面缩率, 从而提高拉拔性能 [2]. 在热处理过程中, 强磁场能显著提高中碳钢 [3,4] 和中碳低合金钢 [5] 退火显微组织中先共析铁素体的面积百分数; 减少过共析钢 (Fe-1.0% C) 退火组织中的二次渗碳体百分数、增大珠光体平均片间距 [6]; 使 Fe-0.81% C 共析钢中出现一些位于珠光体球团之间的铁素体组织 [7]、完全消除有害的二次渗碳体; 提高中碳

* 国家自然科学基金 50771026 和国家自然科学基金杰出青年基金 50325102 资助项目.

2007 年 11 月 8 日收到初稿; 2008 年 6 月 5 日收到修改稿.
本文联系人: 赵 骧, 教授

低合金钢硬度值^[8]、回火冲击韧性^[9]和回火抗拉强度^[10]。但是,以上的研究所采用的 Fe-C 合金中杂质较多,特别是没有解释铁素体单个晶粒沿磁场方向拉长的程度。本文研究强磁场下冷却速率对高纯度 Fe-0.76%C 合金的显微组织和性能的影响,并给出相应的理论解释。

1 实验方法

以纯度为 99.99% 的电解铁和高纯石墨为原料,使用水冷铜坩埚真空磁悬浮熔炼法融炼高纯度的 Fe-0.76%C 合金(杂质元素的总含量小于 0.01%),其化学成分为 0.76% C, <0.0010 Si, <0.0010 Mn, <0.0010 P, <0.0010 S, <0.0010 Cu。

为了使合金铸锭的成份及组织均匀化,将合金热锻为(31 mm×31 mm×35 mm)正方体料,然后进行长时间真空扩散退火(1100 °C、10 h)和完全退火。用线切割机从退火体料上切出尺寸为 7 mm×7 mm×1 mm 的薄片试样。将薄片试样放在型号为 JMTD-12T100 的超导直流稳恒磁体的中心位置,待磁场强度达到 12 T 后,以 5 °C/min 的速率将真空炉加热到 807 °C,将试样保温 30 min 后以 5 °C/min 冷却到 757 °C,再分别以 0.5 °C/min、2 °C/min 和 5 °C/min 的冷却速率将试样冷却到 600 °C,然后随炉冷却;待温度降至 400 °C 时撤去磁场;在其它工艺条件相同的情况下,对试样进行非磁场热处理。

用 OLYMPUS/GX71 金相显微镜观察试样的显微组织,并测定样品的先共析铁素体面积百分数和伸长方向与磁场方向的夹角。用 450SVDTM 硬度计测定样品的宏观维氏硬度(HV),硬度测试面为试样的表面,加载负荷为 98 N,加载时间为 10 s。取每个试样 5 个硬度数据的平均值。

2 结果与讨论

图 1 为在磁场和无磁场条件下 0.76%C 钢在 807 °C 保温 30 min、以不同速率冷却后的显微组织。磁场的方向为水平方向(图 1 中黑色箭头所示)。图中白色块状组织为先共析铁素体晶粒,黑色部分为片状珠光体。定量统计得到的先共析铁素体的面积百分数,列于表 1。比较图 1 和表 1 可见,随着冷却速率的提高,先共析铁素体的含量明显减少,而且其晶粒也逐渐变小。在冷却速率相同的条件下,强磁场热处理样品(图 1b, d, f)的先共析铁素体面积百分数明显地比非磁场热处理样品(图 1a, c, e)的高。

0.76%C 钢样品经磁场与非磁场奥氏体化并保温 30 min 后,在不同的速率冷却得到的宏观硬度(HV)如图 2 所示。结果表明,无论是磁场还是非磁场热处理,试样的宏观硬度值都随着冷却速率的提高而

提高。在冷却速率相同的条件下,磁场热处理试样的宏观硬度明显比非磁场热处理试样的低。

强磁场热处理样品的先共析铁素体晶粒的伸长方向明显呈现出与水平方向即磁场方向平行的趋势(图 1b, d, f),而非磁场热处理样品的先共析铁素体伸长方向则显得杂乱无章(图 1a, c, e)。为了研究磁场对固态相变先共析铁素体形貌的作用规律并描述上述实验现象,将伸长的先共析铁素体长轴的两端用直线连接起来,然后测定该直线与磁场方向之间的夹角(α_n)并求其平均值 $\alpha=(\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_n)/n$,可以得到先共析铁素体的伸长方向与磁场方向之间的夹角的平均值随着冷却速率的变化(图 3)。可以看出,随着冷却速率的提高,样品的先共析铁素体的伸长方向与磁场方向的夹角增大,表明先共析铁素体沿着磁场方向伸长的趋势随着冷却速率的提高而逐渐变弱。

与文献[3-5]的结论相似,加磁场使先共析铁素体面积百分数明显提高。根据热力学理论,具有不同 Gibbs 自由能的相在某一特定条件下其稳定性不同。在磁场中,物质相磁化后其 Gibbs 自由能降低,降低的量取决于各相的磁化强度或磁化率^[11]。磁场引起的系统自由能的变化为^[8] $dG = -SdT - MdH$,其中 S 为熵, T 为热力学温度, H 为磁场强度, M 为磁化强度。可见,磁化强度越高的相,其 Gibbs 自由能越低,越稳定。对于 Fe-C 合金,在高温状态的奥氏体和二次渗碳体均具有顺磁性,在所涉及的温度范围内,它们的磁化强度都明显地比无论是顺磁态还是铁磁态的铁素体的低。因此,由磁化而导致的铁素体 Gibbs 自由能下降幅度高于奥氏体 Gibbs 自由能的下降幅度,两者的自由能差增大,相平衡发生变化。

另外,实验^[5]及分子场理论的模拟计算结果^[12-14]均表明,在强磁场作用下铁素体相区扩大和奥氏体相区缩小,使共析点的碳含量和共析温度同时升高,相当于共析点向高碳和高温方向移动。因此,强磁场热处理状态下的 0.76%C 钢,其共析点的碳含量远远高于 0.76%,呈现出明显的亚共析钢特征,导致其先共析铁素体含量明显增加,珠光体面积百分数减少,样品的宏观硬度降低。

强磁场使先共析铁素体晶粒沿磁场方向伸长可归因于磁偶极子的作用。一方面,在强磁场的作用下铁素体晶核沿磁场方向形成一个的磁偶极子;另一方面,在顺磁性奥氏体晶粒中,每个 Fe 原子是一个小的磁偶极子。在磁场中,磁偶极子与磁场方向平行时能量最低。位于铁素体晶核上方的奥氏体铁原子的 S 极受到其下方的铁素体晶核的磁偶极子的 N 极的吸引,而位于铁素体晶核下方的奥氏体铁原子的 N 极也受到其上方的铁素体晶核的磁偶极子 S 极的吸引力。这种作用使该方向的排列在能量上有利,从

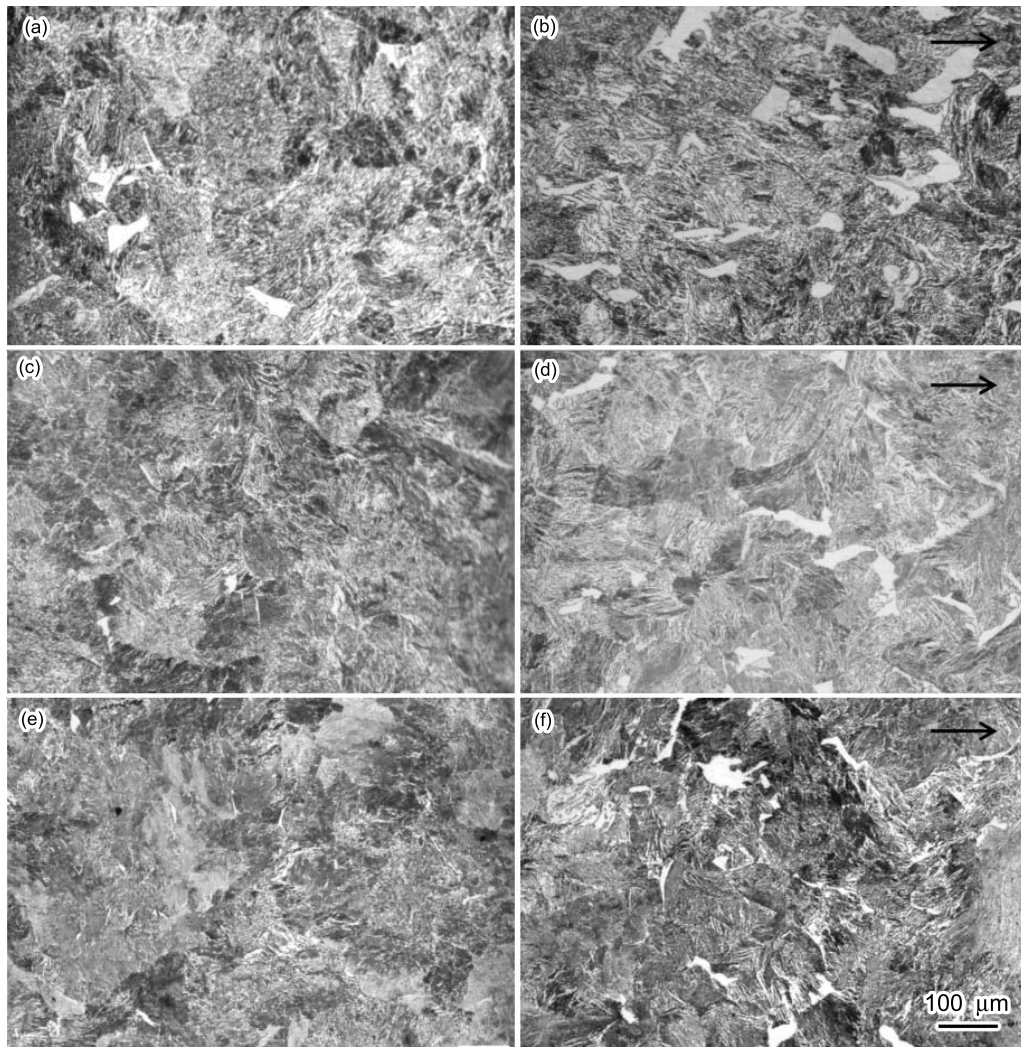


图 1 0.76% C 钢经磁场与非磁场 807 °C 保温 30 min 后, 不同冷却速率 (0.5, 2 和 5 °C/min) 下的显微组织

Fig.1 Microstructures of 0.76% C steel heated at 807 °C for 30 min at various cooling rates (0.5, 2 and 5 °C/min) with and without a 12 T magnetic field, (a) 0 T, 0.5 °C/min, (b) 12 T, 0.5 °C/min, (c) 0 T, 2 °C/min, (d) 12 T, 2 °C/min, (e) 0 T, 5 °C/min, (f) 12 T, 5 °C/min (the white grains are proeutectoid ferrite, the black regions are pearlite. The directions of the applied magnetic field shows by black arrows)

表 1 磁场与非磁场下先共析铁素体面积百分数随冷却速率的变化

Table 1 Area fraction of proeutectoid ferrite of the specimens austenitized at 807 °C for 30 min cooled at various cooling rates under 0T- and 12T-magnetic field (%)

| Magnetic field intensity/T | Cooling rate/(°C/min) | | |
|----------------------------|-----------------------|-------|-------|
| | 0.5 | 2 | 5 |
| 0 | 1.459 | 0.64 | 0.324 |
| 12 | 6.148 | 3.319 | 2.01 |

而降低铁原子向铁素体晶核迁移所需的驱动力, 导致铁原子沿磁场方向的迁移速率明显增加. 而位于铁素

体晶核两侧的奥氏体铁原子, 由于其 N 极和 S 极与铁素体晶核的磁偶极子的 N 极和 S 极方向相同且二者平行排列, 它们将受到铁素体晶核的磁偶极子的排斥力, 使其周围的奥氏体原子作为磁偶极子不易于向铁素体晶核扩散. 由此导致先共析铁素体晶核沿磁场方向优先生长, 形成沿磁场方向伸长的组织形貌.

在强磁场中先共析铁素体晶粒的伸长方向与磁场方向的夹角随冷却速率的提高而增大的主要原因是, 冷却速率比较高时试样在高温停留的时间短, 使原子扩散不能充分进行, 奥氏体转变在较低温度下发生, 导致奥氏体转变的过冷度大, 即相变驱动力大, 使先共析铁素体晶核的形核率增加, 新生相的晶核在其后的冷却过程中来不及充分长大, 于是得到比较分散

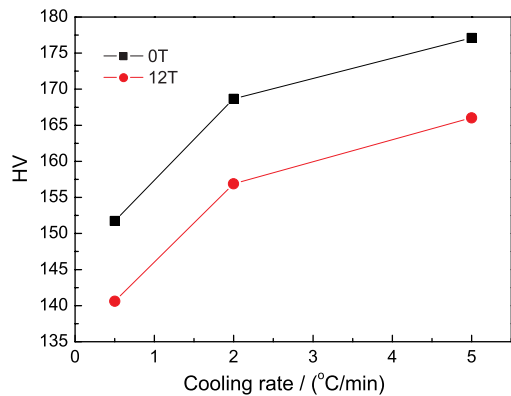


图2 在磁场与无磁场条件下样品的硬度与冷却速率的关系

Fig.2 Hardness (HV) of the specimens austenitized at 807 °C for 30 min cooled at various cooling rates under 0 T- and 12 T-magnetic field

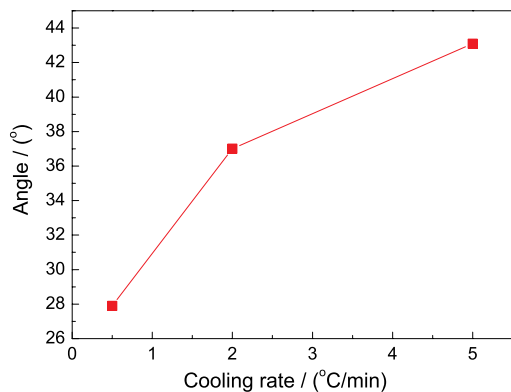


图3 强磁场下样品的先共析铁素体伸长方向与磁场方向的夹角的平均值与冷却速率的关系

Fig.3 Mean angle between the major axis of proeutectoid ferrite and magnetic field direction for specimens austenitized at 807 °C for 30 min cooled at various cooling rates under a 12 T magnetic field

且晶粒相对细小的先共析铁素体组织。与此同时,由于原子扩散不易进行,先共析铁素体晶粒沿磁场方向生长的趋势受到抑制,导致先共析铁素体晶粒的伸长方向与磁场方向的夹角随冷却速率的提高而增大。

另外,图1还表明,部分先共析铁素体晶粒的伸长方向与磁场方向并不完全平行,而是有一定的夹角。其原因是,先共析铁素体晶粒的形成和长大既取决于磁场,同时又取决于铁素体与奥氏体的界面。先共析铁素体晶核往往形成于奥氏体的三叉晶界,铁原子易于沿晶界扩散,从而使先共析铁素体晶核沿奥氏体晶界方向快速长大,此时如果形成先共析铁素体晶核的奥氏体的三叉晶界中没有与磁场方向平行的晶界,则强磁场的影受到限制。因此先共析铁素体晶粒中不仅有沿着强磁场方向伸长的晶粒,也有与强磁

场方向呈一定角度甚至垂直于强磁场方向伸长的晶粒,但是强磁场使先共析铁素体晶粒沿磁场方向伸长的现象依然很明显。

3 结 论

0.76%C 钢样品经磁场与非磁场奥氏体化并保温适当时间后以不同冷却速率进行冷却处理后,先共析铁素体晶粒的伸长方向与磁场方向的夹角随冷却速率的增加而增大,原因是快速冷却时原子扩散被减弱;而在冷却速率相同的条件下,强磁场热处理样品的先共析铁素体面积百分数明显高于非磁场热处理样品的先共析铁素体面积百分数,同时样品宏观硬度值下降,因为强磁场使 Fe-0.76% 钢显现出更明显的亚共析钢特征。

参 考 文 献

- ZHAO Yu, Ran Xu, Effect of heating temperature and cooling speed on structure and hardness of nontempered steel 70S6, *Hot Working Technology*, (1), 37(2002)
- WANG Yong, Research on controlling process of surface and properties quality of steel cord, Master Dissertation, Wuhan University of Science and Technology(2007)
- V.N.Pustovoi, Yu.M.Dombrovskii, S.A.Grishin, Characteristics of the structure of pearlite in carbon steels, *Metal Science and Heat Treatment*, **21**(11), 838(1979)
- G.M.Ludtka, R.A.Jaramillo, R.A.Kisner, D.M.Nicholson, J.B.Wilgen, G.Mackiewicz-Ludtka, P.N.Kalu, In situ evidence of enhanced transformation kinetics in a medium carbon steel due to a high magnetic field, *Scripta Materialia*, **51**, 171(2004)
- Y.D.Zhang, C.S.He, X.Zhao, L.Zuo, C.Esling, New microstructural features occurring during transformation from austenite to ferrite under kinetic influence of magnetic field in a medium carbon steel, *Magn. Mater.*, **284**, 287(2004)
- Y.D.Zhang, C.Esling, M.L.Gong, G.Vincent, X.Zhao, L.Zuo, Microstructural features induced by a high magnetic field in a hypereutectoid steel during austenitic decomposition, *Scripta Materialia*, **54**, 1897(2006)
- Y.D.Zhang, C.Esling, M.Calcagnotto, M.L.Gong, X.Zhao, L.Zuo, Shift of the eutectoid point in the Fe-C binary system by a high magnetic field, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**, 6501(2007)
- J.K.Choi, H.Ohtsuka, Y.Xu., W.Y.Choo, Effects of a strong magnetic field on phase stability of plain carbon steels, *Scripta Materialia*, **43**, 221(2000)
- Y.D.Zhang, X.Zhao, N.Bozzolo, C.S.He, L.Zuo, C.Esling, Low temperature tempering behaviors in a structural steel under high magnetic field, *ISIJ Inter.*, **45**(6), 913(2005)
- Y.D.Zhang, N.Gey, C.S.He, X.Zhao, L.Zuo, C.Esling, High temperature tempering behaviors in a structural steel under high magnetic field, *Acta Mater.*, **52**, 3467(2004)

- 11 T.Kakeshita, K.Shimizu, S.Funada, M.Date, Composition dependence of magnetic field induced martensitic transformations in Fe-Ni alloys, *Acta Metallurgica*, **33**(8), 1381(1985)
- 12 H.D.Joo, S.U.Kim, N.S.Shin, Y.M.Koo, An effect of high magnetic field on phase transformation in Fe-C system, *Materials Letters*, **43**, 225(2000)
- 13 H.Guo, M.Enomoto, Influence of magnetic field on equilibrium in Fe-C(-X) alloys, *Materials Transactions, JIM*, **41**(8), 911(2000)
- 14 Y.D.Zhang, C.S.He, X.Zhao, Y.D.Wang, L.Zuo, C.Esling, Calculation of magnetization and phase equilibrium in Fe-C binary system under a magnetic field, *Solid State Phenom.*, **105**, 187(2005)