

脉冲磁场处理对超细贝氏体转变的影响

张瑞祥, 李青春, 张 月, 陈淑英, 常国威

(辽宁工业大学材料科学与工程学院, 辽宁锦州 121001)

摘要: 在低温贝氏体转变孕育期、转变初期和转变全程施加脉冲磁场, 研究脉冲磁场对超细贝氏体转变组织和碳原子分布的影响。结果表明, 与未加磁场的等温贝氏体转变相比较, 贝氏体转变初期和转变全程施加1.5 T脉冲磁场使组织细化, 而在孕育期施加1.5 T的脉冲磁场贝氏体转变作用不明显。在贝氏体转变全程施加脉冲磁场强度较小时, 贝氏体转变量和形貌上变化不明显, 当脉冲磁场强度为1.5 T时, 贝氏体转变量明显增多, 贝氏体束长度变短, 宽度变窄。

关键词: 超细贝氏体钢; 脉冲磁场; 残留奥氏体

贝氏体钢具有高强度和高韧性, 受到人们的广泛重视, 可作为汽车轻量化材料之一。2003年, Bhadeshia等^[1]将含碳量为0.98%的高硅高碳低合金钢在200 ℃下等温热处理, 获得了由超薄贝氏体铁素体及其间的富碳薄膜状残余奥氏体组成的厚度为20~40 nm的超细片状组织, 其抗压强度高达2.5 GPa。超细贝氏体钢的超高强度源自显微组织的超细化(尺度效应)和贝氏体铁素体中的过饱和碳原子。然而, 数十小时的等温转变限制了其工业应用。因此, 关于纳米结构贝氏体钢的研究工作主要集中于相变加速手段的开发^[2-6]。

近年来, 研究人员在贝氏体相变过程中采用强磁场来加速贝氏体相变。Ohtsuka等^[7]采用10 T强磁场使Fe-3.6Ni-1.45Cr-0.5C钢贝氏体相变过程加速, 贝氏体转变量增加。Jaramillo等^[8]对一种新型贝氏体钢的连续冷却过程施以30 T的强磁场, 发现强磁场加速了贝氏体相变。上述研究主要集中在稳恒的强磁场上。与稳恒磁场相比, 脉冲磁场可通过功率较低的设备实施间歇式大能量的输出, 得到瞬间更高的磁场强度, 且脉冲磁场的大小、频率、施加方式等都很容易控制。从强磁场对贝氏体相变的作用机理看, 强磁场除了提高贝氏体相变驱动力, 还会影响相变时溶质元素的扩散, 可为探索超细贝氏体相变机理提供旁证, 本试验在贝氏体转变孕育期、转变初期和转变全程施加不同强度的脉冲磁场, 研究脉冲磁场对超细贝氏体转变组织与溶质分布的影响。

1 试验材料与方法

熔炼浇注试验钢锭, 将其在1 250 ℃保温48 h进行均匀化处理。试验钢的化学成分为: 0.95%C、1.42%Si、1.82%Mn、0.93%Cr、0.24%Mo、1.34%Co、1.05%Al, 其余为Fe。采用热膨胀仪测量试验钢在300 ℃等温时的贝氏体转变孕育期为1 h, 而在300 ℃等温2 h后, 贝氏体转变还没有结束。具体的热处理工艺曲线如图1所示。普通热处理时, 将尺寸为3 mm×10 mm×15 mm的试样放到700 ℃热处理炉中, 随炉加热到900 ℃保温30 min, 然后以1 ℃/s的速度快速冷却到300 ℃保温2 h后空冷。为了研究脉冲磁场对超细贝氏体转变的影响, 在上述相同热处理工艺下, 分别在贝氏体

作者简介:

张瑞祥(1991-), 男, 硕士生, 主要研究方向为外场作用下金属固态相变。
E-mail: 991206577@qq.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)01-0007-05

基金项目:

辽宁省教育厅重点实验室
基础项目(LZ2015046)。

收稿日期:

2018-09-13。

转变孕育期、转变初期和转变全程施加脉冲磁场。在300℃保温开始施加0.5 h磁场强度为1.5 T的脉冲磁场，此为孕育期施加磁场处理；在300℃保温1 h后开始施加0.5 h磁场强度为1.5 T的脉冲磁场，此为贝氏体转变初期施加磁场处理；在300℃保温开始施加0.5 h磁场强度为1.5 T的脉冲磁场，保温1 h后继续施加0.5 h磁场强度为1.5 T的脉冲磁场，此为贝氏体转变全程施加磁场处理。为了研究脉冲磁场强度对超细贝氏体转变的影响，在贝氏体转变全程分别施加强度为0.5 T、1 T、1.5 T的脉冲磁场。

热处理后的试样经过磨制和抛光后，用4%的硝酸酒精溶液腐蚀，采用Axiovert 200 MAT型号的蔡司金相显微镜和型号为Sigma 500的场发射扫描电镜场观察贝氏体组织形貌。采用型号为PHI710的俄歇电子能谱仪分析贝氏体铁素体和残余奥氏体中碳元素的分布情况。

2 试验结果与分析

2.1 不同阶段施加脉冲磁场对贝氏体转变的影响

试验钢经普通热处理、贝氏体转变孕育期、贝氏体转变初期和贝氏体转变全程施加脉冲磁场处理后的金相和扫描电镜组织如图2所示。从图中可以看出，不同工艺处理后试样的组织均由黑色针状贝氏体束、

灰白色马氏体、残留奥氏体和少量黑色团状珠光体组成。试验钢经奥氏体化处理后，以1℃/s的速度冷却，在冷却过程中会有少量过冷奥氏体发生珠光体转变，大部分奥氏体在300℃等温过程中发生贝氏体转变，等温2 h后，仍有少量残余奥氏体在随后的空冷过程中转变为马氏体或保留至室温。因此，最终的室温组织是由少量团状珠光体、针状贝氏体束、灰白色马氏体和残余奥氏体组成的复相组织。

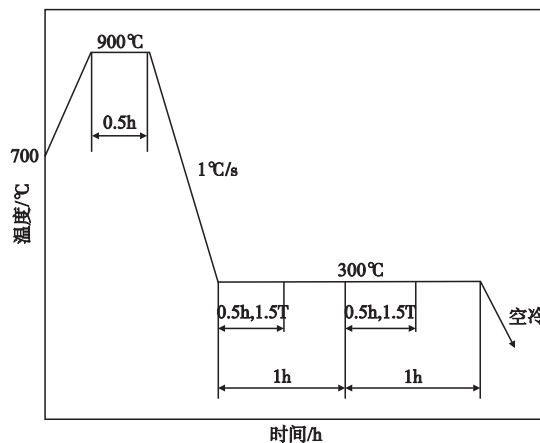
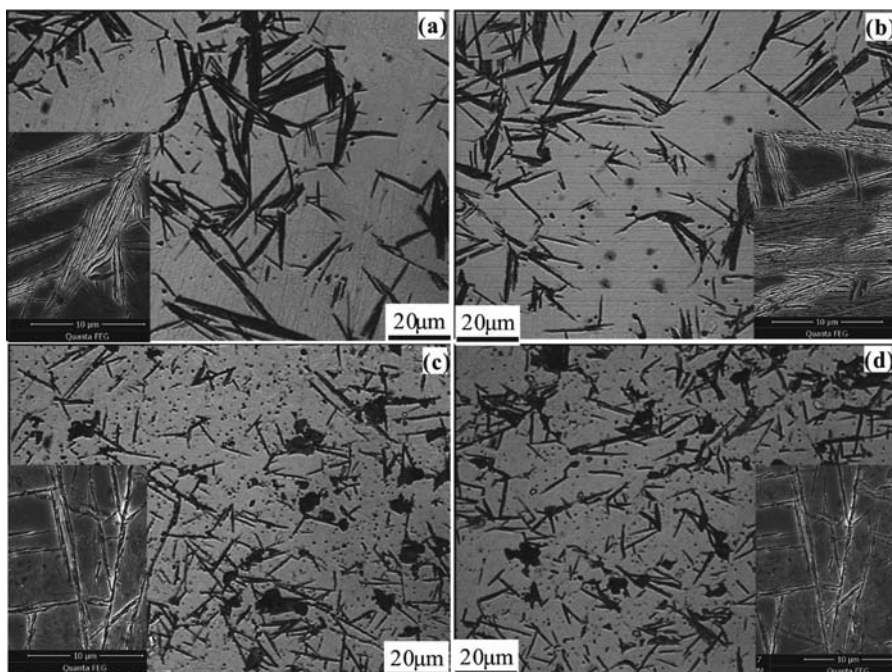


图1 脉冲磁场处理工艺曲线

Fig. 1 Pulse magnetic field treatment process curve



(a) 无磁场；(b) 孕育期加磁场；(c) 转变初期加磁场；(d) 全程加磁场

图2 不同阶段施加脉冲磁场处理后的金相组织和扫描电镜组织

Fig. 2 Metallographic structure and SEM structure after pulsed magnetic field treatment at different stages

比较图2a和2b发现,普通热处理后,贝氏体束又长又宽,在一个贝氏体束中,由许多相互平行的贝氏体铁素体条和条间薄膜状残留奥氏体组成,孕育期施加磁场处理后针状贝氏体束的数量和形态并没有明显变化。而在转变初期和全程施加1.5 T脉冲磁场处理后,贝氏体束的数量增加,贝氏体束的形貌发生了明显变化,长度变短,宽度变窄,在一个贝氏体束中,并没有形成明显的超细贝氏体组织,即贝氏体束不是由相互平行的贝氏体铁素体条和条间薄膜状残留奥氏体组成,有的甚至是单根铁素体条在生长。可见,在贝氏体转变初期和全程施加脉冲磁场,由于贝氏体铁素体和残留奥氏体具有很大的磁化强度差别,奥氏体是顺磁性,铁素体是铁磁性,因此脉冲磁场提高了贝氏体相变驱动力,导致贝氏体的形核率增加,贝氏体的数量增加。但是,脉冲磁场改变了贝氏体铁素体和奥氏体中的溶质分布而使贝氏体束的生长方式发生改变。在贝氏体转变的孕育期施加脉冲磁场,脉冲磁场提供的能量和冲击力可加速碳原子的扩散,但由于温度较低,1.5 T的脉冲磁场难以对碳原子的扩散有明显影响,对奥氏体中贫碳区和富碳区的影响不大,因此对贝氏体转变没有明显影响。

2.2 脉冲磁场强度对贝氏体转变的影响

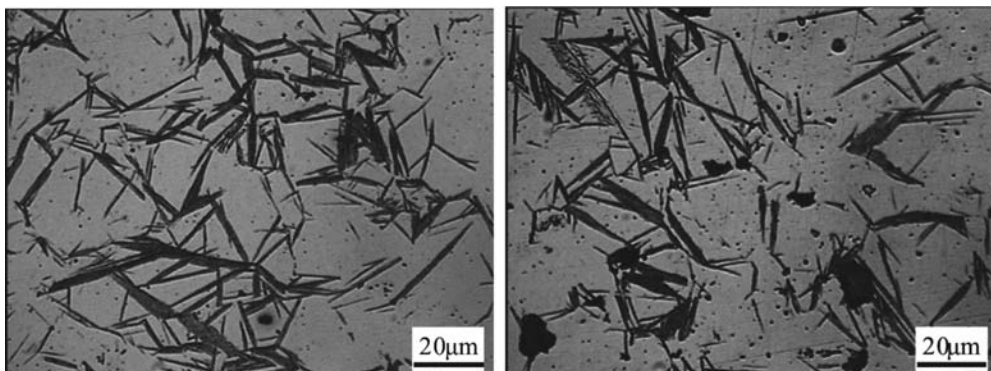
在贝氏体转变全程施加磁场强度为0.5 T和1 T的脉冲磁场处理后的显微组织如图3所示。可以看出,不同强度脉冲磁场处理后,试样的组织仍由黑色针状贝氏体、灰白色马氏体、残留奥氏体和少量黑色团状珠光体组成。与施加强度为1.5 T的脉冲磁场比,强度降低为0.5 T和1 T时,贝氏体转变量和贝氏体束形貌变化不明显。利用Photoshop CS3软件和截线法,测得未加磁场处理和全程施加0.5 T、1 T和1.5 T不同强度的脉冲磁

场处理后,贝氏体束的长度平均值分别为:28.17 μm 、21.51 μm 、23.27 μm 和11.19 μm ,贝氏体宽度依次为:3.47 μm 、2.25 μm 、2.49 μm 和1.29 μm 。可见,在贝氏体转变全程施加强度小于1 T的脉冲磁场,对贝氏体转变影响不大。只有当脉冲磁场强度达到1.5 T,贝氏体的转变量才明显增加,且贝氏体束前沿由于溶质碳的富集状态发生改变,从而影响贝氏体束的生长。

2.3 脉冲磁场对超细贝氏体组织中碳分布的影响

图4是试验钢贝氏体组织关于碳分布的线扫描分析图,图4a和4c为普通热处理,4b和4d为贝氏体转变全程施加1.5 T脉冲磁场处理,图中纵坐标强度代表组织中相对碳含量,强度越高,碳含量越高。图中灰白色为残留奥氏体(γ),黑色为贝氏体铁素体(BF)。从图4a和4c可以看出,普通热处理时贝氏体束由薄膜状残留奥氏体和贝氏体铁素体组成,薄膜状残留奥氏体中的碳含量均高于贝氏体铁素体条的碳含量。图中(1)处残奥厚度小于(2)处残奥厚度,(1)处残奥中平均碳含量高于(2)处残奥中平均碳含量。可见,薄膜状残留奥氏体中的碳含量与残留奥氏体的厚度有关,残留奥氏体越厚,碳含量越低。在贝氏体铁素体和残留奥氏体(BF/ γ)界面处,碳含量缓慢上升,经过BF/ γ 界面后,残留奥氏体中的碳含量也是缓慢下降。

从图4b和4d可以看出,脉冲磁场处理后,贝氏体铁素体中有断续的几片残留奥氏体,并没有形成连续的相互平行的薄膜状残留奥氏体,在BF/ γ 界面一侧的贝氏体铁素体,碳含量急剧上升,上升程度高于普通热处理,经过BF/ γ 界面后,在残留奥氏体中的碳含量又急剧下降,下降程度也高于普通热处理。说明在贝氏体转变全程施加脉冲磁场处理,碳原子在BF/ γ 界面前沿残留奥氏体一端富集程度增加。贝氏体相变时先

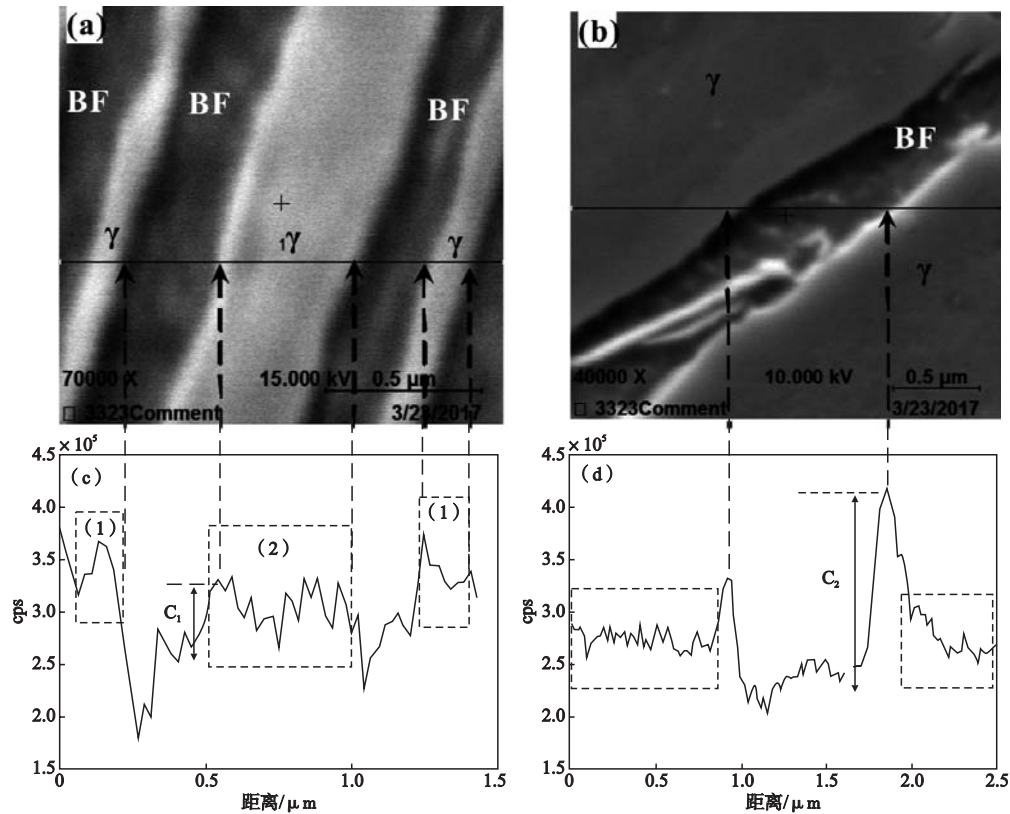


(a) 0.5 T

(b) 1 T

图3 不同磁场强度处理的显微组织

Fig. 3 Microstructure of the samples applying different magnetic density



(a)、(c) 常规处理；(b)、(d) 磁场处理

图4 超细贝氏体钢的线扫描分析图

Fig. 4 Line scan analysis diagram of ultrafine bainitic steel

在贫碳区形成贝氏体铁素体，贝氏体铁素体形核后开始长大，碳原子随即在铁素体中向 γ/α 相界面扩散，即向周围的奥氏体排碳^[9-10]。脉冲磁场加速了碳原子移向 γ/α 界面， γ/α 相界处的碳原子不能及时向远离相界的残留奥氏体中扩散，导致碳原子在 γ/α 界面残余一侧富集程度增加，从而阻碍贝氏体铁素体的增粗和长大。

3 结论

(1) 在试验钢贝氏体转变过程中施加脉冲磁场与未施加磁场最终获得的组织相同，均为少量黑色团状珠光体、针状贝氏体束、灰白色马氏体和残余奥氏体组成的复相组织。

(2) 与普通热处理相比，在贝氏体转变孕育期施

加1.5 T的脉冲磁场对贝氏体转变无明显作用，在贝氏体转变初期和贝氏体转变全程施加1.5 T脉冲磁场，贝氏体铁素体的形核加速，贝氏体转变量增加，贝氏体束变细变短，组织细化。

(3) 与普通热处理相比，在贝氏体转变全程施加不同强度的脉冲磁场，残留奥氏体含量均增加。在转变全程施加脉冲磁场强度较小时(0.5 T和1 T)，磁场对贝氏体转变作用不明显。当施加脉冲磁场强度为1.5 T时，贝氏体转变量增加，贝氏体束变细变短。

(4) 与普通热处理相比，施加脉冲磁场使碳原子在铁素体和残留奥氏体相界面富集明显，脉冲磁场改变了超细贝氏体中碳原子的分布。

参考文献:

- [1] Caballero F G, Bhadeshia H K D H, Mawella K J A, et al. Very strong low temperature bainite [J]. *Materials Science & Technology*, 2002, 18 (3) : 279-284.
- [2] Yoozbashi M N, Yazdani S, Wang T S. Design of a new nanostructured high-Si bainitic steel with lower cost production [J]. *Materials & Design*, 2011, 32 (6) : 3248-3253.
- [3] Garcia-Mateo C, Caballero F G, Bhadeshia H. Acceleration of low-temperature bainite [J]. *ISIJ international*, 2003, 43 (11) : 1821-1825.
- [4] Caballero F G, Bhadeshia H K D H. Very strong bainite [J]. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004 (8) : 251-257.
- [5] Zhang M, Wang Y H, Zheng C L, et al. Effects of ausforming on isothermal bainite transformation behaviour and microstructural refinement in medium-carbon Si-Al-rich alloy steel [J]. *Materials & Design*, 2014, 62 (10) : 168-174.
- [6] Sista V, Nash P, Sahay S S. Accelerated bainitic transformation during cyclic austempering [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42 (21) : 9112-9115.
- [7] Ohtsuka H. Effects of a high magnetic field on bainitic and martensitic transformations in steels [J]. *Materials Transactions*, 2007, 48 (11) : 2851-2854.
- [8] Jaramillo R A, Babu S S, Ludtka G M, et al. Effect of 30 T magnetic field on transformations in a novel bainitic steel [J]. *Scripta Materialia*, 2005, 52 (6) : 461-466.
- [9] Bhadeshia H K D H, Edmonds D V. The mechanism of bainite formation in steels [J]. *Acta Metallurgica*, 1980, 28 (9) : 1265-1273.
- [10] Rakha K, Beladi H, Timokhina I, et al. On low temperature bainite transformation characteristics using in-situ neutron diffraction and atom probe tomography [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 589: 303-309.

Effect of Pulsed Magnetic Field Treatment on Transformation of Ultrafine Bainite

ZHANG Rui-xiang, LI Qing-chun, ZHANG Yue, CHEN Shu-ying, CHANG Guo-wei

(School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

Abstract:

In this paper, the pulsed magnetic field was applied during the incubation period, the initial stage of transformation and the whole process of transformation to study the effect of pulsed magnetic field on the transformation structures of ultrafine bainite and carbon atom distribution. The results show that compared with isothermal bainite transformation without magnetic field, 1.5 T pulsed magnetic field was applied to the initial stage of bainite transformation and to the whole process of bainite transformation to make the tissue thin, while the pulsed magnetic field that applied 1.5 T to the incubation period did not show obvious bainite transformation. When the intensity of pulsed magnetic field was weak during the whole process of bainite transformation, the content and morphology of bainite transformation were not obvious. Moreover, when the intensity of pulsed magnetic field was 1.5 T, the bainite transformation increased significantly, the length of bainite bundle became shorter and width narrowed.

Key words:

ultra-fine bainite steel; pulse magnetic field; retained austenite