

试验研究

热处理工艺对新型贝氏体/马氏体双相高强钢氢脆敏感性的影响

常开地 顾家琳 方鸿生 等

(清华大学材料科学与工程系)

摘要 通过阴极电解充氢,研究了具有不同组织形貌的常规处理和形变热处理两种材料的氢脆敏感性。研究表明,组织越细,氢脆敏感性越低。断口分析显示,在所采用的电解充氢规范下,两种处理工艺所得到的充氢拉伸试样断口为韧窝和准解理混合断口,形变热处理的准解理小平面较常规的细小。断口金相显示裂纹优先沿着贝氏体或马氏体板条界扩展,断裂模式为板条界分离。断口分析表明,矩形 Ti(N,C)夹杂是形变热处理充氢样品断裂表面的主要夹杂物 Ti(N,C)夹杂,造成基体分离后的小平面脆性断裂,由此说明,Ti(N,C)可能引起氢脆的有害夹杂。

关键词 贝氏体 马氏体 高强钢 氢脆 形变热处理

1 前言

为提高钢材质量和利用率,满足日益发展的需求,高洁净度、高均匀性、超细晶粒的新一代钢铁材料的研究显得十分必要。但是,强度的提高将使材料的抗环境敏感断裂性能下降。上一世纪,航空航天部门已广泛采用高强钢,如飞机的起落架等,但都存在氢致断裂问题^[1]。1970~1980年,氢脆的研究受到人们的普遍重视。目前广泛使用的高强钢在屈服强度大于 1380MPa 时^[2,3],对氢脆相当敏感。影响钢的氢脆敏感性因素很多,主要有强度^[3,4]、成分^[5]和组织^[6]等。其中,组织的影响比强度更重要。关于组织的影响,前人已做了许多工作^[8-10],各种组织对氢脆的影响程度也各不相同。一般来说,马氏体对氢脆的敏感性较珠光体、奥氏体强。许坚先生认为,各种组织的脆化指数依马氏体-屈氏体-索氏体-铁素体+珠光体的次序变小^[11]。最近,有关超纯、超净、超细材料的氢脆研究引起人们的广泛重视。细化晶粒不仅能提高钢的强度,改善韧性,还能提高其抗环境氢脆能力^[12]。通过贝氏体/马氏体双相钢可显著提高材料的强度和常规韧性^[13],这是一种很有前途的新钢种。从已发表的文献来看,目前关于贝氏体/马氏体双相组织氢脆问题的研究很少,而贝氏体/马氏体双相组织细化对氢脆敏感性的影响更无人涉足,因此,研究贝氏体/马氏体双相组织细化对氢脆敏感性的影响是非常必要

的,这也能为研制新一代高强钢提供依据。

2 实验材料及方法

实验材料为真空熔炼的贝氏体钢,化学成分为 Fe-1.8Mn-1.3Si-0.3Cr-0.01Ti-0.27C-0.009S-0.007P。热处理工艺见表 1。拉伸试样为标准短标距光滑拉伸试样,直径 6.4mm。部分试样被阴极电解充氢,电解液为 5% H₂SO₄ 水溶液 + 250mg/L 的 As₂O₃,电流密度分别为 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 1mA/cm²,时间 4h,充氢后时效 0.5h 再进行拉伸实验。根据文献^[14]的分类,本文所采用的充氢条件属苛刻类。拉伸实验是在 AG-75TA 日本岛津万能电子试验机上进行的,拉伸速度为 0.5mm/min,用 OPTONCSM950 和透射电镜观察组织和断口。用 D/MAX-RB 型 X 光衍射仪按 GB8362-87 标准测量所用材料的残余奥氏体量。

3 实验结果

图 1 为两种热处理工艺的原始组织,均为贝氏体/马氏体双相组织,还有少量残余奥氏体,其量见表 1。经形变热处理得到的马氏体板条尺寸由平均长 10μm,宽 0.7μm 减至长 5μm,宽 0.6μm。从图 1 可见,所用形变热处理规范对细化贝氏体/马氏体双相组织有效果。图 2 为经透射电镜观察到的形变热处理试样组织。从图中可见,在贝氏体内部以及贝氏体/马氏体板条间分布着残余奥

表 1 两种热处理的工艺参数

试样号	热处理方式	奥氏体化温度,℃	保温时间,min	冷却方式	回火温度,℃	残余奥氏体量,%
C	常规热处理	900	10	空冷	280	6
B	形变热处理	860	18(860℃变形,变形量 36%, 变形速率 $6 \times 10^{-3}/s$)	空冷	280	9

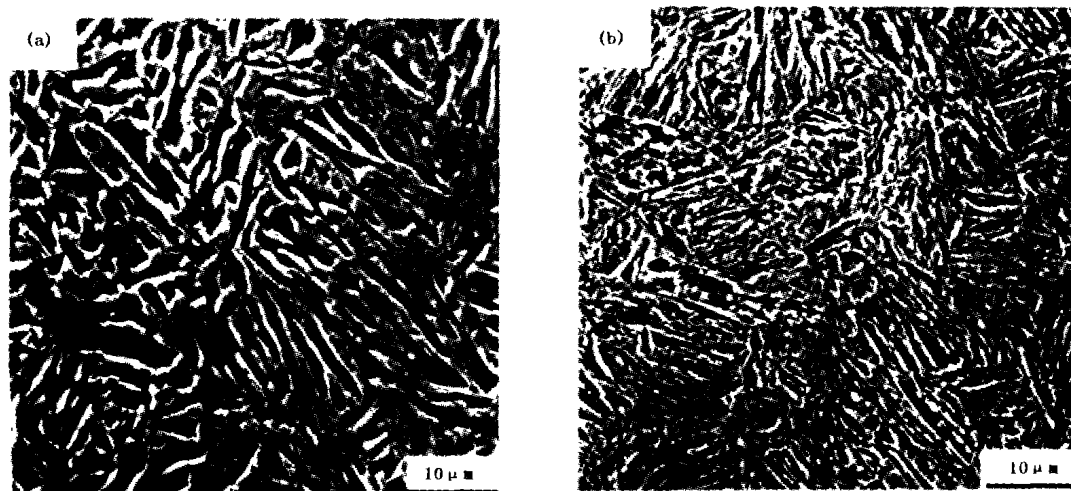


图 1 两种热处理的 SEM 形貌:(a)常规热处理;(b)形变热处理

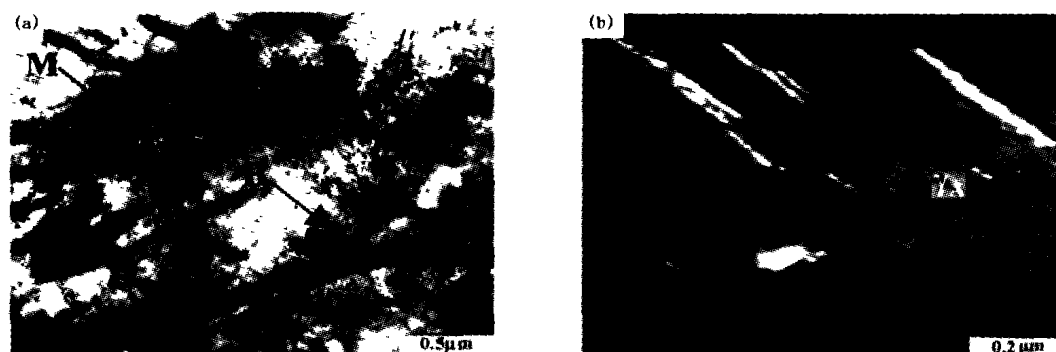


图 2 形变热处理试样的透射电镜照片

(a)含有残余奥氏体的贝氏体/马氏体双相组织,(b)图 a 左上角放大的残余奥氏体暗场像

B:贝氏体,M:马氏体,A:残余奥氏体

氏体,而马氏体内则存在高密度位错。

充氢能明显降低材料的塑性指标,一般用脆化指数 E_H 表示氢脆敏感性,其表达式为 $E_H = (\Psi_0 - \Psi_H) / (\Psi_0 \times 100\%)$,其中 Ψ_0 和 Ψ_H 分别表示未充氢、充氢后的断面收缩率。图 3 为经过两种工艺处理后未充氢和充氢试样断面收缩率(R_A)、脆化指数(E_H)随充氢电流密度(i)变化的规律,表明充氢能明显降低钢的韧性。

从图 3 可见,经过形变热处理的钢,在充氢电流密度 $i \leq 0.5 A/cm^2$ 时,其断面收缩率变化很小,

脆化指数也很低。文献^[15]根据脆化指数 E_H 将材料氢脆敏感性分为三类,认为 $E_H > 25\%$ 时安全, $E_H > 35\%$ 为脆断;所研究的钢经形变热处理后,充氢电流密度 $i = 0.5 A/cm^2$ 时, E_H 为 15%, $< 25\%$,由此认为,氢脆敏感性不大。但经过常规热处理之后却表现出较高的氢脆敏感性,在 $i = 0.2 A/cm^2$ 时,其断面收缩率急剧下降,曲线变得很陡,脆化指数远大于形变热处理的脆化指数。

图 4(a)、(b)分别为常规热处理和形变热处理试样以电流密度 $i = 0.2 A/cm^2$,充氢 4h 后的

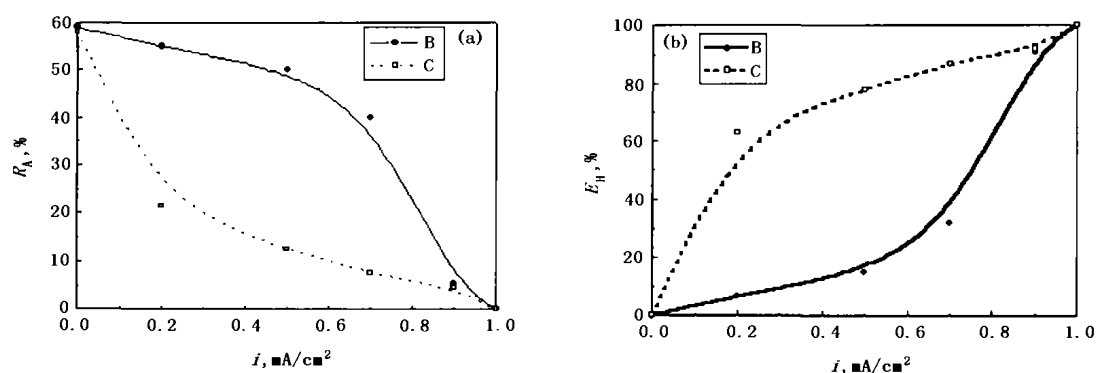


图3 两种工艺试样的断面收缩率(a)、脆化指数(b)随充氢电流密度的大小而变化

注: B 为形变热处理试样; C 为常规热处理试样

准解理断口形貌,但未发现沿晶断口。从图 4(a)可见,常规热处理试样拉伸断口上出现的准解理小平面较大,而经过形变热处理的试样以相同的电流密度充氢,拉伸断口上出现的准解理小平面较小,其准解理小平面的大小与组织的单元尺寸

对应。另外,两种试样未充氢拉伸断口均为同样的杯锥状韧性断口。

断口横截面金相表明充氢后的裂纹大部分沿贝氏体板条或马氏体板条边界扩展,见图 5(a);有时裂纹也穿过贝氏体、马氏体,见图 5(b)。

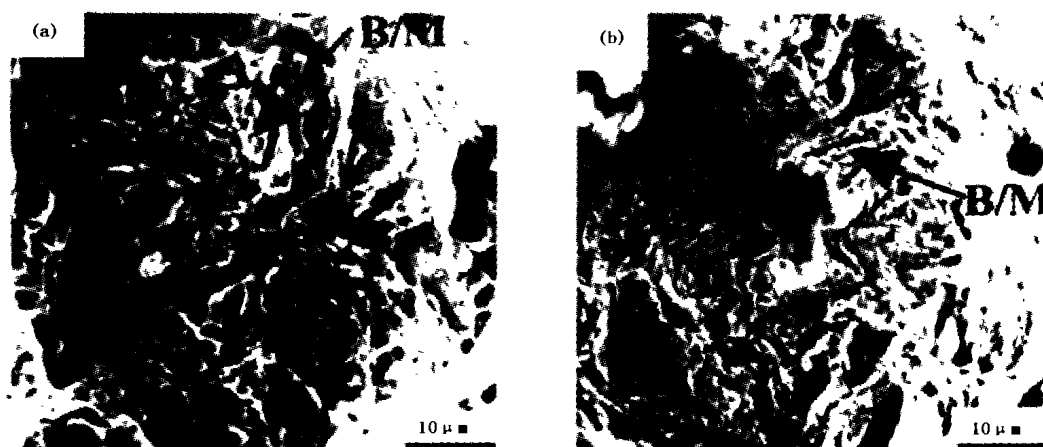


图4 两种热处理工艺以电流密度 $i = 0.2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 充氢后的拉伸断口形貌

(a) 常规热处理, (b) 形变热处理

注: B/M 为贝氏体/马氏体

如图 6(a) 箭头所示, 形变热处理的试样充氢后, 拉伸断口表面发现矩形夹杂物。经能谱分析为 $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ (图 6(b))。图中, $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ 周围为准解理断裂, 说明夹杂物与基体是以较脆的方式分离, 但在未充氢的试样上却未发现 $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ 夹杂物。

4 讨论

在图 3(b) 中, B 材料 E_H 小于 C 材料, 这主要

与组织有关。形变热处理获得的贝氏体/马氏体双相组织明显较常规处理的细(图 1)。贝氏体/马氏体双相组织越细, 板条界就越多。由于板条界是氢陷阱^[16], 板条界的增加也会使氢陷阱的数量增加, 使氢分布更加均匀。与此同时, 经过形变热处理后, 大量的缺陷(包括高密度位错、多边化亚晶块)由贝氏体/马氏体双相组织继承。其实, 这些缺陷也是一种氢陷阱。因为氢陷阱的大量存

在大大减少了氢在材料中的扩散系数,减缓了氢在局部的富集程度,因此,形变热处理所得的细小组织提高了抗氢脆能力。形变热处理所得的残余奥氏体较常规热处理多,残余奥氏体韧性好,可以

阻碍裂纹的扩展。而且,残余奥氏体也可作为氢陷阱^[17],使氢难以在局部富集,同样也可提高抗氢脆能力。

断口金相的观察结果与 Kikuta^[18]的实验结果

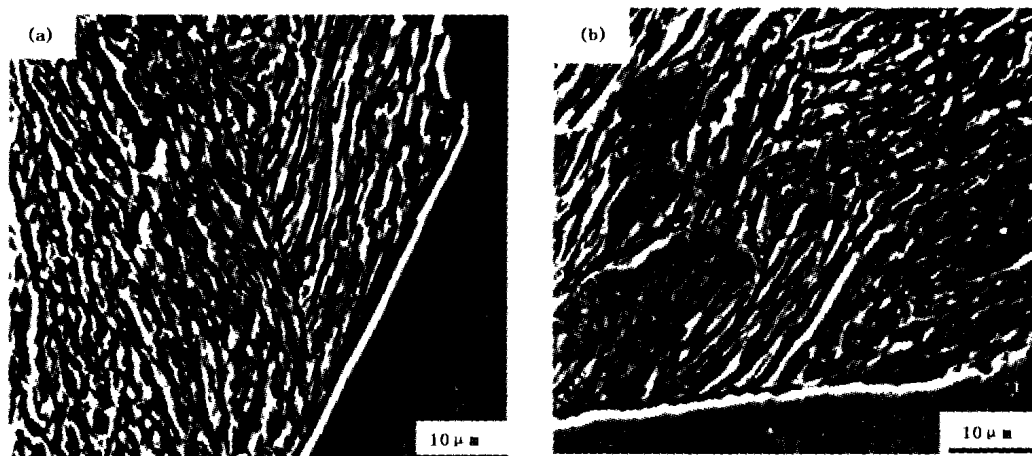


图 5 形变热处理试样以电流密度 $i = 0.2 \text{ mA/cm}^2$ 充氢后的拉伸断口横截面金相组织

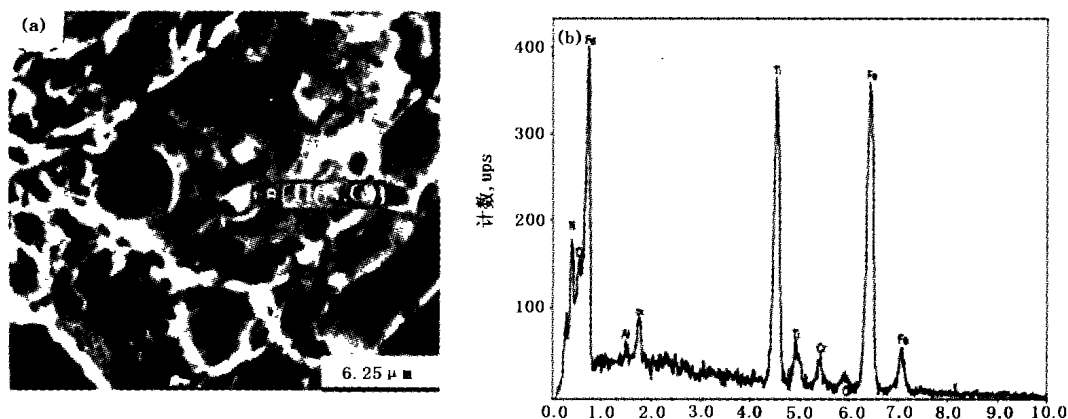


图 6 充氢拉伸断口夹杂形貌及其 X 衍射能谱图(夹杂物为 Ti(N,C))

(a)夹杂物形貌;(b)夹杂物 X 衍射能谱图

一致(图 5),因为板条界是氢陷阱,氢在界面上的富集降低了界面与基体的结合力。细小的贝氏体/马氏体双相组织则导致贝氏体、马氏体取向杂乱以及下贝氏体对裂纹尖端的应力松弛,迫使裂纹在遇到下贝氏体或马氏体时经常改变方向,以致消耗更多的能量,这就改善了其韧性。

氢在钢中的分布是不均匀的,在局部地区(如裂纹前沿、微孔洞、晶界、夹杂处等)的氢含量可能很高,这是因为氢通过扩散和位错携带两种方式在钢中迁移,遇到氢陷阱时,氢就被捕获,以致局

部地区的氢含量有所增加,在一定应力条件下达到临界氢含量时,就会在此萌生裂纹。 Ti(N,C) 是一种强氢陷阱,特别是粗大的 Ti(N,C) 夹杂物($\geq 1 \mu\text{m}$)更容易引起氢致开裂^[19],因为陷阱越强,偏聚氢浓度越高,萌生裂纹所需应力就越低。一般来说,均匀弥散分布的氢陷阱可以更加有效地减少氢的扩散系数和裂纹尖端的氢含量。相反,如果存在不均匀分布的强氢陷阱,则会引起此处氢含量的增高,从而导致氢脆敏感性的增大^[20]。在拉伸断口可发现矩形 Ti(N,C) 夹杂物,其尺寸约

1.2 μm (图6(a))。根据弱键理论,氢降低了Ti(N,C)与基体及附近基体间的结合力,因此,其与基体为脆性分离,断裂应力较低。

5 结论

(1)形变热处理后,钢的组织明显细化,贝氏体、马氏体尺寸由平均长10 μm ,宽0.7 μm 减至长5 μm ,宽0.6 μm 。

(2)随着充氢电流密度的增加,两种热处理材料的氢脆敏感性增大,形变热处理的氢脆敏感性则低于常规热处理的氢脆敏感性。这与组织细化及缺陷增加有关。

(3)断口纵截面金相表明,充氢后裂纹大部分沿贝氏体和马氏体板条界扩展,有时也穿过贝氏体和马氏体。

(4)在充氢拉伸试样断裂表面发现矩形Ti(N,C)夹杂物,Ti(N,C)与基体的分离为脆性断裂。

参考文献

- 1 W. W. Gerberich, Y. T. Chen. Metall. Trans., 1975(6A): 271.
- 2 M. H. Peterson, B. F. Brown, R. L. Newbegin, R. E. Groover. Corrosion, 1967(23): 142.
- 3 G. Sandoz. Metall. Trans., 1972(3): 1169.
- 4 N. Bandyopadhyay, Jun Kameda, C. J. McMahon. Metall. Trans., 1983(14A): 881.
- 5 E. A. Steigerwald, W. D. Benjamin. Metall. Trans., 1971(2): 606.
- 6 T. Boniszewski, F. Watkinson. Metals and Materials, 1973, 7(2): 90.
- 7 I. M. Bernstein, A. W. Thompson. Int. Met. Rev., 1976(21): 269.
- 8 R. Kerr, F. Solana, I. M. Bernstein, A. W. Thompson. Metall. Trans., 1987(18A): 1011.
- 9 E. Snape. Corrosion, 1968(24): 261.
- 10 B. Pawlowski, A. Mazur, S. Gorczyca. Corros. Sci., 1991, 32(7): 685.
- 11 徐坚,戴新民,夏雨筑.腐蚀金属学及耐腐蚀金属材料.浙江:浙江科技出版社,1981.77.
- 12 A. W. Thompson, I. M. Bernstein. Advances in Corrosion Science and Technology, ed. By M. G. Fontana and R. W. Stachle eds., New York: Plenum New York, 1980(7): 53.
- 13 黄维刚,方鸿生,等.中低碳含硅空冷贝氏体钢的冲击韧性.钢铁研究学报,1997,9(2): 31~34.
- 14 肖纪美.应力作用下的金属腐蚀.北京:化学工业出版社,1990.372.
- 15 Y. - L. Du, W. - Z. Tan. Mater. Prot., 1988, 21(3): 10.
- 16 W. - H. Gye, J. - Y. Lee. J. Mater. Sci., 1983(18): 271.
- 17 何建宏,唐祥云,陈南平.金属学报,1989,25(1): A42~A47.
- 18 Y. Kikuta, T. Araki. Hydrogen Effects in Metals. Edited by I. M. Bernstein and Anthony W. Thompson. New York, The Metallurgical Society of AIME., 1981.309.
- 19 H. Y. Liou, R. I. Shieh, et al. Corrosion, 1993, 49(5): 389~398.
- 20 B. G. Pound. Acta. Mater, 1998, 46(16): 5733.

· 会讯 ·

2002 年第 4 季度国际钢铁界主要会议

英国材料协会(IOM)主办的第四届欧洲连铸会议(CONCAST)定于2002年10月14日~16日在英国伯明翰召开。

Fax: 44 - 020 - 7839 - 2289

<http://www.materials.org.uk>

日本塑性技术学会主办的第七届国际塑性技术会议(7th ICTP)定于2002年10月27日~11月1日在日本横滨召开。

Fax: + 81 - 3 - 5452 - 6203

E-mail: ictp7@iis.u-tokyo.ac.jp

美国钢铁协会(ISS)主办的第60届电炉会议定于2002年11月10日~13日在美国德克萨斯州圣安东尼奥召开。

Fax: + 1 - 724 - 776 - 0430

<http://www.iss.org>