

奥氏体 304 不锈钢形变诱发马氏体相变与磁记忆效应

胡 钢^{1,2}, 许淳淳², 袁俊刚³

(1. 北京大学 考古文博学院, 北京 100871; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029;
3. 北京工业大学 机电学院, 北京 100022)

摘 要:通过金相观察和透射电镜分析,研究了奥氏体 304 不锈钢试样拉伸变形过程中发生马氏体相变和位错增殖对材料磁性的影响。运用铁素体检测仪和磁记忆检测仪分别研究了马氏体相在试样内的分布规律和试样表面磁场强度分布特征。结果表明,奥氏体 304 不锈钢发生形变诱发马氏体相变后,试样表面的磁场强度分布特征与马氏体相分布规律之间具有明显的对应关系,试样表面磁场强度变化可反映材料内的组织变化与应力集中情况。磁记忆检测技术可以应用于奥氏体 304 不锈钢的组织变化检测分析,并有效地诊断材料中的应力集中区。

关键词:磁记忆检测; 不锈钢; 奥氏体; 马氏体; 组织变化

中图分类号: TG115. 28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)04-0216-04

Deformation Induced Martensite Transformation and its Magnetic Memory Effect of Austenitic 304 Stainless Steel

HU Gang^{1,2}, XU Chun-Chun², YUAN Jun-Gang³

(1. School of Archaeology and Museology, Peking University, Beijing 100871, China;
2. College of Material Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
3. College of Mechanical and Electron Engineering, Beijing Dolytechnic University, Beijing 100022, China)

Abstract: By metallographic examination and transmission electron microscope analysis, the effects of martensite phase transformation and dislocation multiplication of austenitic 304 stainless steel during the tensile strain process were investigated. Ferritic detector and metal magnetic memory technology were used to analyze the distribution of martensite phase in specimen and the distribution of magnetic density on the specimen surface, respectively. The results showed that a corresponding relation existed between the martensite phase distribution and magnetic density distribution of austenite 304 stainless steel containing deformation induced martensite transformation. The magnetic density change can reflect the morphology change and stress concentration in material. Metal magnetic memory technology can be used to analyze the microstructure change of austenite 304 stainless steel. The stress concentration position can be diagnosed effectively.

Keywords: Magnetic memory testing; Stainless steel; Austenite; Martensite; Microstructure change

奥氏体 304 不锈钢具有优越的耐蚀性,被广泛应用于石油、化工、电力以及原子能等工业。其在加工制造过程中,要经过冷轧、冷拔、冷弯、平整

及矫正等冷加工工艺,会发生变形,致使部分奥氏体相转变为马氏体相,即形变诱发马氏体相变^[1]。马氏体相变会引起材料物理化学性质的改变,增强了奥氏体 304 不锈钢的应力腐蚀敏感性和点蚀敏感性^[2,3];马氏体相变还与材料的应力集中情况密切相关^[4]。因此,采用准确、便捷的方法对材料中马氏体相分布情况和应力集中区域进行早期诊断,对材

收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G19990650)

作者简介: 胡 钢(1971—),男,博士后,研究方向为材料失效机理与金属文物保护。

料的性能评估具有重要的意义。

金属磁记忆检测技术是基于铁磁性金属的磁记忆效应原理开发出来的新型无损检测技术。通过测定工件表面漏磁场强度,可以推断工件的应力集中部位并对材料性能进行诊断^[5,6]。奥氏体 304 不锈钢中的奥氏体相为顺磁性,部分奥氏体相发生马氏体相转变后,因马氏体相具有铁磁性,而引起材料的磁性发生变化。可见,材料表面的磁场强度变化与材料形变、组织变化和应力集中情况等密切相关。笔者通过研究奥氏体 304 不锈钢材料的微观结构变化,分析材料表面的磁场强度信息与马氏体相转变和应力集中情况的相关性,并对磁场变化规律和材料微观组织变化规律之间的关系进行了研究。

1 实验方法

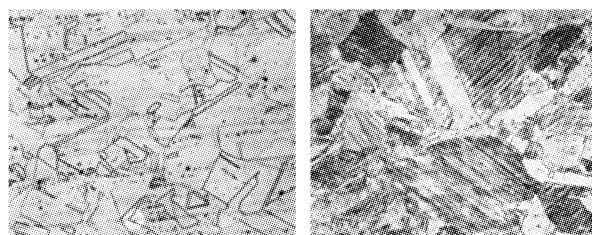
实验材料采用板厚 3 mm 的工业级冷轧奥氏体 304 不锈钢板材。将不锈钢板剪切成 220 mm×25 mm×3 mm 的平板试样,在 1 050±10 °C 进行固溶处理半小时,水淬,使试样形变前的组织均匀化为奥氏体相。参照文献[2],采用低温(-70 °C)拉伸形变的方式促成马氏体相变来分析材料微观组织结构变化,经线切割后,试样进行金相分析和透射电子显微镜观察。

平板试样拉伸形变前,取中间 120 mm 段为研究部分,以 2 mm/min 的速度进行不同程度的拉伸变形后,测量试样内马氏体相分布和试样表面磁场强度分布。双边切口试样是在试样中间用线切割方法切入 6 mm 深的切口,取试样中间包含切口的 120 mm 段作为研究部分,以 0.5 mm/min 的速度进行不同变形量拉伸后,测量试样内马氏体相分布和试样表面磁场强度分布。拉伸实验用 Instron-1185 型万能拉伸机,室温进行拉伸变形。马氏体相转变量用 TSJ-1A 型铁素体测量仪测定,检测步长为 5 mm。磁记忆检测仪为俄罗斯动力诊断公司生产的 ИКНМ-2Φ,检测步长为 1 mm。

2 实验结果与讨论

2.1 形变过程中的马氏体相变

图 1 是试样在拉伸形变前后的金相组织形貌。由图 1a 可见,未形变试样的组织形貌为均匀的奥氏体相,奥氏体中的孪晶结构清晰可见。试样经拉伸形变后,组织结构发生了较大的变化。图 1b 显示拉伸形变量 $\epsilon=12\%$ 时,试样内部分奥氏体相转变成



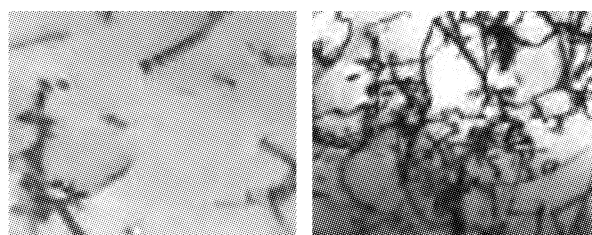
(a) $\epsilon=0\%$

(b) $\epsilon=12.0\%$

图 1 金相组织形貌(200×)

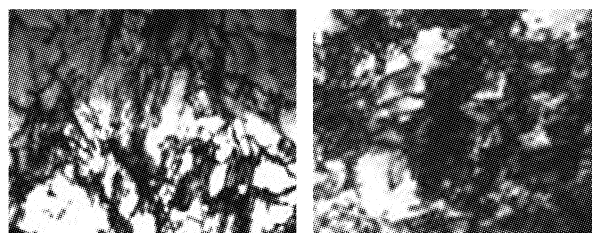
了马氏体相(以板条状形态存在)。可见,奥氏体 304 不锈钢在拉伸形变的过程中发生的微观组织变化是部分奥氏体相转变成了板条状的马氏体相。

图 2 是试样经过不同程度拉伸形变后的透射电镜照片。图 2 可见,在发生马氏体相变的同时,材料内发生的另一个微观变化就是位错的增殖。图 2a 中未形变试样内仅有少量的位错线;图 2b 中试样的形变量 $\epsilon=6\%$ 时,出现了位错的缠结;图 2c 和 d 中变形量达到 12% 和 20% 时可观察到大量的位错线在材料中缠集,并且,随着材料变形量的增加,材料中的位错密度增大。



(a) $\epsilon=0\%$

(b) $\epsilon=6.0\%$



(c) $\epsilon=12.0\%$

(d) $\epsilon=20.0\%$

图 2 透射电镜照片(6 000×)

位错增殖对奥氏体 304 不锈钢具有如下影响:首先,位错增殖在材料内产生很高的应力能,使材料的自由能增大,促成了马氏体相变过程中的形核,进而发生马氏体相的转变^[4]。从材料磁性变化分析,由于奥氏体相为顺磁性,而马氏体相是铁磁性,随着材料微观组织的变化,奥氏体 304 不锈钢便具有了铁磁性特征。其次,由于位错增殖增加了材料的应

力能,会在材料中形成应力集中区,应力集中又进一步促成了马氏体相变的转化。为使材料内的总自由能趋于最小,具有铁磁性的马氏体相在磁机械效应的作用下,引起内部磁畴在地球磁场中作畴壁的位移,甚至是不可逆的重新取向排列,主要由磁弹性能的形式来抵消应力能的增加,从而使奥氏体 304 不锈钢内部产生高于地球磁场强度的磁场强度^[7]。以上分析说明,奥氏体 304 不锈钢材料表面磁场强度的变化,是材料内微观组织变化和应力集中共同作用的结果。利用磁记忆检测技术有可能通过监测奥氏体 304 不锈钢表面的磁场变化来诊断材料的性能。

2.2 马氏体相分布与磁场强度分布关系

2.2.1 平板试样拉伸试验

平板试样拉伸形变的不同阶段,形变诱发产生的马氏体相在试样内具有不同的分布规律(图 3)。图 3 中未形变线表明奥氏体 304 不锈钢试样内各处基本没有马氏体相的存在。图 3 均匀形变阶段时试样内的马氏体相含量略有增加,马氏体相在试样内分布比较均匀。随拉伸形变量的增加,试样发生不均匀的塑性变形,沿检测方向,约在 125 mm 附近出现明显颈缩。在颈缩区间马氏体相含量迅速增大,马氏体相集中分布在颈缩位置(图 3 中颈缩阶段线)。而远离颈缩处,马氏体相增加量较少,在材料中的分布仍然比较均匀。继续拉伸,在颈缩段约 128 mm 附近发生断裂,断口处马氏体相迅速增多,此时马氏体相分布曲线如图 3 中断裂线所示,马氏体相主要集中分布在断口附近,且在断口位置含量最大,远离断口位置马氏相含量增加较少、分布均匀。

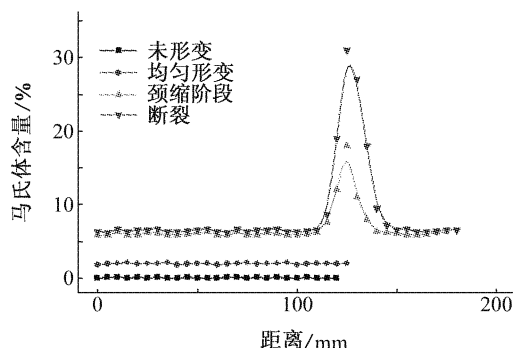
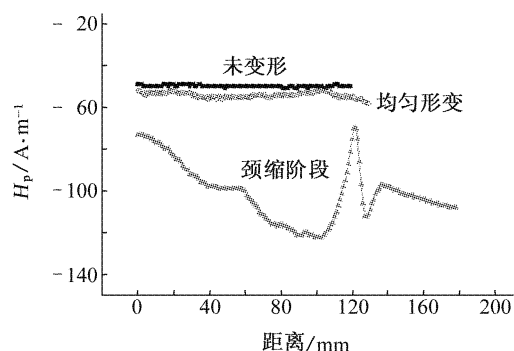
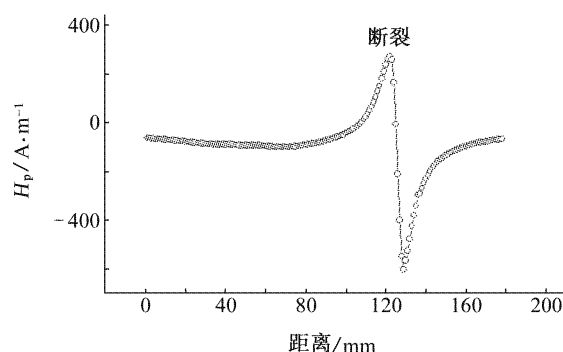


图 3 试样内的马氏体相分布曲线

图 4 为奥氏体 304 不锈钢试样拉伸形变前后,试样表面磁场强度分布曲线。图 4 中未变形试样表面的磁场强度约为 -50 A/m 左右,与测试地点的



(a) 断裂前磁场分布



(b) 断裂后磁场分布

图 4 试样表面磁场强度分布曲线

地磁场强度相等。在均匀形变阶段,试样表面的磁场强度出现了一定的波动,但波动幅值较小。发生颈缩后,由图 4 可见,试样表面非颈缩段的磁场强度向负值方向缓慢增加,但在颈缩位置,沿检测方向大约 125 mm(颈缩位置)附近,磁场强度发生急剧的波动,磁场强度波动幅值达 54 A/m 。继续拉伸至断裂时,断口位置磁场强度波动更加剧烈,断口附近磁场变化幅值达 895 A/m 。

对比图 3 和 4 可见,在拉伸形变的不同阶段,试样表面的磁场强度分布特征与马氏体相分布规律具有明显的对应关系。拉伸形变使奥氏体 304 不锈钢发生马氏体相变,从而引起材料表面磁场强度的变化。均匀变形阶段,试样内各处应力大小基本相等,形变诱发产生的马氏体相在材料内分布均匀,试样表面的磁场强度仅出现小幅波动。试样发生颈缩后,颈缩处对应材料的应力集中区,该处马氏体相变量增加显著,同时颈缩位置的磁场强度波动幅值较大。继续拉伸变形,在颈缩处的应力集中程度进一步增大,直至材料发生断裂,断口处马氏体相含量最大,集中分布在断口附近,该处的磁场强度波动幅值也最大。可见,材料表面磁场强度的分布特征能反映奥氏体 304 不锈钢中的应力集中情况和马氏体相

的分布情况。

2.2.2 双边切口试样拉伸试验

双边切口试样在拉伸形变过程中马氏体相分布曲线如图 5 所示。由于在切口处形成应力集中,马氏体相转变主要集中在切口附近。图 5 中随着试样拉伸伸长量的增加,切口处马氏体相含量迅速增大。并且马氏体相比较集中地分布在切口附近,而远离切口位置马氏体相仅有少量的增加,这些部位的马氏体相分布比较均匀。

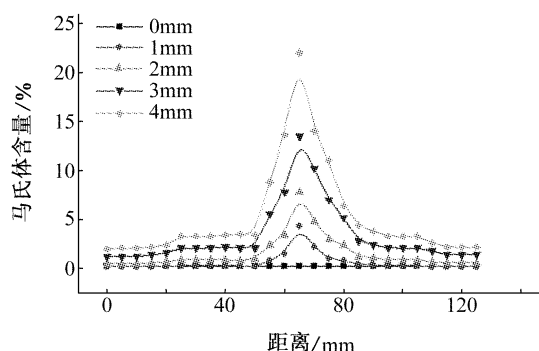


图 5 马氏体相分布曲线

与马氏体相分布规律的变化相对应,双边切口试样表面的磁场强度分布曲线也发生着相应的变化。由图 6 中的 a~e 线磁场强度分布曲线变化情况可以看到,切口附近磁场强度出现的波动较大,而远离切口位置磁场强度波动比较平缓。随着试样拉伸伸长量的增加,切口附近磁场强度波动的幅值增大,马氏体相含量越多,试样表面的磁场强度波动幅值越大。

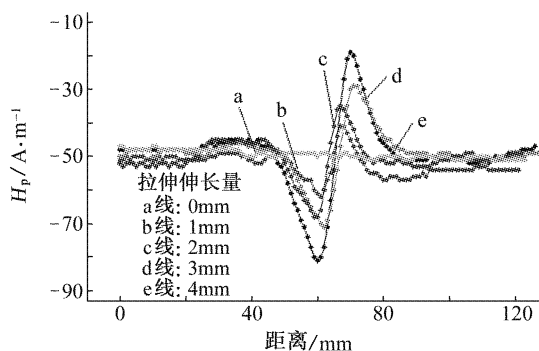


图 6 试样表面磁场强度分布曲线

以上实验结果表明,在奥氏体 304 不锈钢中的应力集中部位,马氏体相变剧烈,材料表面的磁场强度波动幅度较大。运用磁记忆技术检测奥氏体 304 不锈钢材料表面的磁场强度分布特征,可以反映材料内部马氏体相变分布规律,尤其是在应力集中部

位,磁场强度会发生显著的波动。

3 结论

(1) 奥氏体 304 不锈钢拉伸形变过程中产生位错的增殖,引发马氏体相变,并在材料中形成应力集中区。由于马氏体相具有铁磁性,导致奥氏体 304 不锈钢也发生了磁性转变,从而使磁记忆检测技术应用于奥氏体 304 不锈钢的检测成为可能。

(2) 奥氏体 304 不锈钢拉伸形变过程中,材料表面磁场强度分布特征与材料内马氏体相的分布规律具有明显的对应关系。应力集中程度越大,马氏体相变量越多,材料表面的磁场强度波动幅值越大。

参考文献:

- [1] 徐祖耀. 马氏体相变与马氏体[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [2] 胡 钢, 许淳淳, 张新生, 等. 冷加工对 304 不锈钢孔蚀敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4): 198—201.
- [3] 许淳淳, 张新生, 胡 钢. 马氏体相变对 304 不锈钢应力腐蚀的影响[J]. 材料研究学报, 2003, 17(3): 310—314.
- [4] 胡德林. 金属学及热处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [5] Doubov A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9): 401—402.
- [6] Doubov A A. Screening of weld quality using the metal magnetic memory[J]. Welding in the World, 1998, 41(3): 196—199.
- [7] 任吉林, 林俊明. 金属磁记忆检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

本 刊 启 事

《无损检测》网上远程投稿系统已正式运行, 欢迎登录“材料与测试网”(http://www.mat-test.com)进行网上投稿。

请新老读者尽快到邮局办理 2008 年《无损检测》杂志订阅手续, 邮发代号: 4-237, 定价每期 8 元, 全年 96 元。漏订第 1 季度期刊的读者请与本刊发行部联系补订, 联系人: 王 敏; 电话: 021-65527634, 65556775-311。