

文章编号: 1673-5196(2011)01-0005-04

几种不锈钢的拉伸应变硬化行为

杨瑞成^{1,2}, 夏渊¹, 胡天雷¹, 张安明¹

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 采用金相、X射线衍射(XRD)、拉伸试验和洛氏硬度检测等实验方法, 研究4种不锈钢(410S、430、409L和304)的室温拉伸应变硬化行为, 探讨其拉伸应变行为的特征与规律. 结果表明: 304不锈钢的加工硬化能力远高于410S、430、409L不锈钢, 而且304冷轧(固溶)态的 n 值(0.57)高于304热轧(空冷)态 n 值(0.48). 晶粒大小和第二相粒子数量是铁素体不锈钢应变硬化的主要因素, 3种铁素体不锈钢应变硬化能力大小为: $n_{410S} > n_{430} > n_{409L}$. 304钢的强化主要来自加工硬化和应变诱发马氏体的相变硬化的贡献, 冷轧态304与热轧态相比, 在拉伸过程中诱发的马氏体很少(10%), 其拉伸强化效应(384 MPa)主要来自加工硬化本身.

关键词: 不锈钢; 应变硬化行为; 应变诱发马氏体; n 值; 加工硬化

中图分类号: TG172.9 文献标识码: A

Tensile strain hardening behavior of several kinds of stainless steels

YANG Rui-cheng^{1,2}, XIA Yuan¹, HU Tian-lei¹, ZHANG An-ming¹

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The tensile strain hardening behavior at room temperature was investigated for four kinds of stainless steels(410S、430、409L and 304) by means of optical microscopy, X-ray diffraction(XRD), tensile test and Brined hardness test. The characteristics and regularity of the tensile strain behavior was explored. The results showed that the ability of working hardening of 304 stainless steel was higher than that of 410S, 430, 409L stainless steel. The n -value of 304 cold rolling (melting) condition(0.57) was further higher than 304 hot rolling (air cooled) condition (0.48). The two primary factors of the ferritic stainless steel strain hardening were grain size and second phase granule quantity. The strain hardening ability of three kinds of ferritic stainless steel was: $n_{410S} > n_{430} > n_{409L}$. the strengthening of 304 steel mainly came from the working hardening and transformation hardening by strain-induced martensite phase transformation. Compared with the hot-rolled 304 stainless steel, the quantity of the induced martensite of the cold-rolled 304 stainless steel in tensile process was very few (10%), its tensile strengthening effect (384 MPa, higher than that in hot rolling condition)mainly came from the working hardening itself.

Key words: stainless steel; strain hardening behavior; strain-induced martensite; n -value; working hardening

金属的应变硬化是其最基本、最重要的力学行为之一. 对于稳定态材料, 表征金属材料形变硬化的特征参数是硬化指数 n 值, n 也常引用到断裂、疲劳性能的表达式中, 如断裂韧性 K_{IC} 、 J_{IC} , Manson-Coffin 关系式中的 b 、 c 表达式, 裂纹扩展速率以及循环硬

化、软化、裂纹扩展速率以及循环硬化、软化等^[1]. 通常可近似认为 n 值是不随应变变量而变化的常数, 近年来发现 n 与强度、应变率有关^[2]. 对亚稳态材料, 由于变形过程中产生诱发转变, 可能会导致硬化参量新的变化. 张旺峰等^[3-4]研究了亚稳态奥氏体不锈钢的形变硬化, 发现低温下由于产生应变诱发马氏体相变, 其拉伸曲线硬化阶段呈现 S 形, 硬化指数 n 值为非恒定值, 硬化率与硬化指数 n 随应变变量的增

收稿日期: 2010-04-29

作者简介: 杨瑞成(1946-), 男, 江苏宝应人, 教授, 博导.

加表现为抛物线型. 周小芬等^[5]研究了 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢(孪生诱发塑性钢)的拉伸应变硬化行为, 表明试验钢在拉伸过程中的应变硬化存在着孪晶与奥氏体基体的共格作用, 高界面能不利于裂纹的扩展, 表现为阶段性多 n 值现象. 本文主要研究 4 种典型不锈钢(410S、430、409L 和 304)的室温拉伸应变硬化行为, 探索其拉伸应变行为的特征与规律, 分析其应变硬化程度的差异以及其与组织结构的关系.

1 试验材料及试验方法

试验材料取自氩氧脱碳法(AOD)精炼工艺生产的 304 奥氏体不锈钢以及 410S、430 和 409L 铁

素体不锈钢冷轧板材, 经测试它们主要的化学成分如表 1 所示. 由表 1 可知, 这 4 种不锈钢的 S 和 P 等有害元素含量明显低于国标规定的特级优质钢 ($w(S) \leq 0.015\%$ 、 $w(P) \leq 0.025\%$) 的最低要求. 410S、430 和 409L 铁素体不锈钢经过退火处理, 304 奥氏体不锈钢经过固溶处理.

按国标 GB/T 228—2002 在 AG-10TA 程控万能材料试验机上进行拉伸试验, 拉伸速率为 5 mm/min. 随机取 3 个炉次板材, 每炉次纵向和横向各取 3 个试样, 试样尺寸如图 1 所示. 在 TH301 洛氏硬度机测试其洛氏硬度(HRB). 实验数据处理后取其平均值, 如表 2 所示.

表 1 4 种钢的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of four kinds steels

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	N	Ti
304	0.039	0.41	1.21	0.024	0.002	8.05	18.14	0.06		
410S	0.027	0.36	0.30	0.021	0.002	0.07	12.10			
430	0.044	0.32	0.29	0.019	0.002	0.12	16.0	0.042		
409L	0.01	0.39	0.23	0.019	0.002	0.07	11.29		0.007 5	0.18

表 2 4 种不锈钢的室温力学性能

Tab.2 Mechanical properties of four kinds of steels at room temperature

	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	$\delta_n/(\%)$	$\psi/(\%)$	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$	HRB	n
304	294	678	384	49.9	53.8	0.43	114	0.56
410S	360	550	190	21.1	26.2	0.58	90.2	0.35
430	284	449	165	27.3	29.3	0.63	83.2	0.33
409L	255	398	143	26.3	35.2	0.64	65.5	0.31

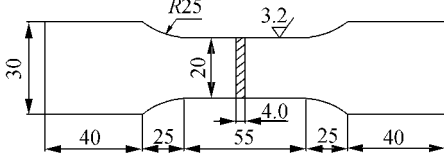


图 1 拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen dimensions

2 试验结果

2.1 拉伸应力-应变行为与性能

4 种不锈钢的工程应力-应变曲线如图 2 所示. 对于钢铁材料, 其工程应力-应变曲线一般有 3 种: 连续过渡型、均匀屈服型和非均匀屈服型^[6].

从图中可以看出, 4 种不锈钢拉伸曲线为连续过渡型, 没有明显的屈服平台出现. 其真实应力-应变曲线如图 3 所示. 屈服后曲线的斜率 $K_{304} > K_{410S} > K_{430} > K_{409L}$, 很明显, 304 的应变硬化曲线高于其他 3 种铁素体不锈钢, 而且在水平轴的应变方向延伸很远.

和形变条件下宏观应力随应变的变化规律. 从屈服点到颈缩的形变强化规律, 可以用 Hollomon 关系式表述^[7]: $S = K\epsilon^n$, 式中, S 为真实应力, K 为硬化系数, ϵ 为真实应变, n 为应变硬化指数. n 值的高低表征了材料发生颈缩前依靠硬化使材料均匀变形能力的大小. 根据 Hollomon 关系, 由图 3 求得的 n 值列于表 2 中. 可知 304、410S、430 和 409L 不锈钢的 n 值分别为 0.56、0.35、0.33 和 0.31. 相应地, 它们的抗拉强度和屈服强度的差值 $\Delta\sigma$ 分别为 384、190、

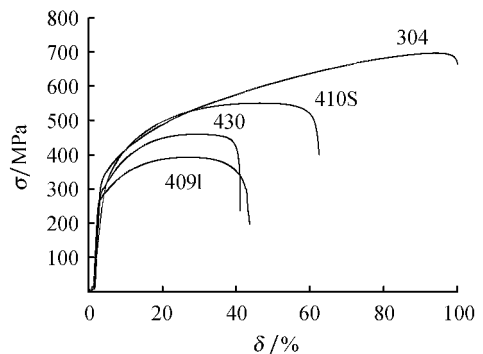


图 2 不锈钢的工程应力-应变曲线

Fig.2 Stress vs strain curves of stainless steels

金属材料的加工硬化曲线表示在一定组织状态

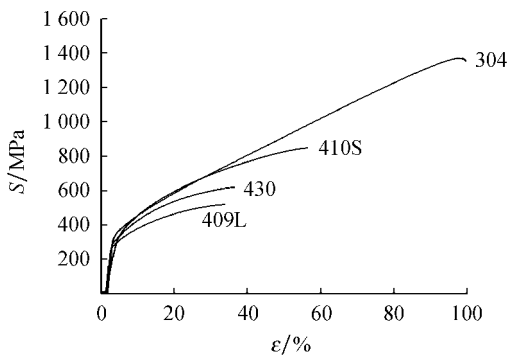


图3 不锈钢的真应力-应变曲线

Fig.3 σ - ϵ curves of stainless steels

165 和 143. 表明 4 种不锈钢的应变硬化能力大小分别为: $n_{304} \gg n_{410S} > n_{430} > n_{409L}$, 可知铁素体不锈钢的应变硬化能力远低于 304 奥氏体不锈钢.

2.2 试验用钢组织结构特征

利用光学显微镜 (MeF3) 分析了 4 种不锈钢 (304、410S、409L 和 430) 的显微组织结构, 如图 4 所示.

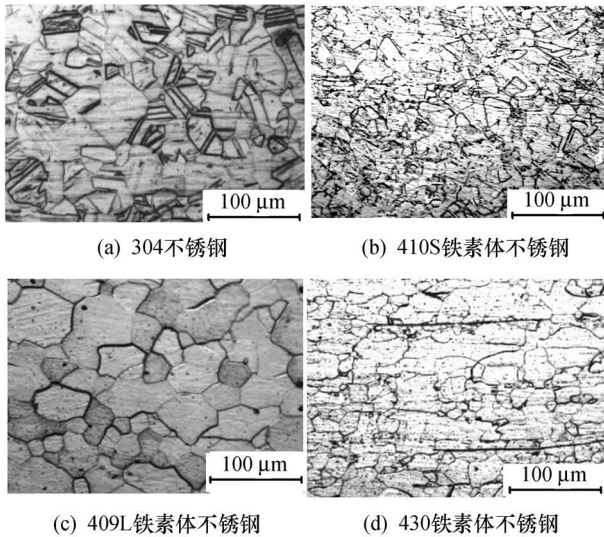


图4 4种不锈钢的金相组织

Fig.4 Microstructure of four kinds of stainless steels

304 奥氏体不锈钢冷轧态(固溶)基体为较均匀的等轴奥氏体晶粒, 晶粒度为 7 级, 还有明显的多量的孪晶存在, 在晶界处较暗部分为碳化物细小颗粒; 410S 铁素体不锈钢基体(退火)为较均匀的等轴铁素

表3 304 奥氏体不锈钢的拉伸性能

Tab.3 Tensile property of 304 austenitic stainless steel at room temperature

试样状态	硬度/HRB	n	$\alpha_0.2$ /MPa	σ_b /MPa	δ_5 /%	$\Delta\sigma$ /MPa	α_s/σ_b	马氏体体积分数/%
热轧 304	114	0.48	469	759	42.7	290	0.59	35
冷轧 304	108	0.57	294	678	49.9	384	0.43	10

3 不锈钢应变硬化因素分析

由图 2、图 3、表 2 可知, 本试验的 3 种铁素体不

锈钢的应变硬化能力远低于 304 奥氏体不锈钢. 大部分金属的 n 值是从 0.1 到 0.55. 研究表明: 应变硬化指数与层错能有关^[8]. 在拉伸的过程中, 新的位

2.3 拉伸应变诱发马氏体的表征

1) XRD 表征

利用日本理学公司的 D/MAX2500VPC 衍射仪对试验用钢拉伸前后进行组成相分析. 对 304 奥氏体不锈钢拉伸后的试样进行 XRD 测试, 并与未拉伸的 304、409L 的 XRD 图谱进行对比分析. 如图 5 可知: 在室温下经拉伸的奥氏体不锈钢在 2θ 约为 44° , 64° 和 82° 处产生体心立方结构的峰位.

2) 磁针法表征

用 FERITSCOPE MP30 机可测试磁性相, 304 冷轧态(固溶)、热轧态(轧后空冷)在拉伸变形前均无磁性, 而拉伸后都有磁性, 表明出现了马氏体, 而且热轧态的马氏体量高得多(如表 3). 304 中的奥氏体属于半稳定化的奥氏体, 其 M_s 点低于室温, 因此, 室温(小于 M_d 点)下拉伸变形时, 在一定程度应变的驱动下, 304 奥氏体不锈钢中亚稳的奥氏体转变为马氏体, 即发生了由 $\gamma \rightarrow M$ 转变. 304 固溶态的合金度高、奥氏体稳定性提高, 因此同样应变下所诱发的马氏体量要少得多.

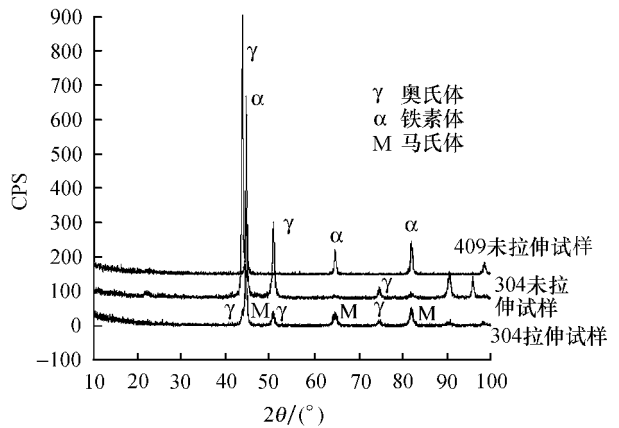


图5 不锈钢的 XRD 图谱

Fig.5 XRD spectrum of stainless steel

锈钢的应变硬化能力远低于 304 奥氏体不锈钢. 大部分金属的 n 值是从 0.1 到 0.55. 研究表明: 应变硬化指数与层错能有关^[8]. 在拉伸的过程中, 新的位

错及层错的大量产生是产生应变硬化的主要原因。304 不锈钢基体为面心立方结构的奥氏体, 410S、430、409L 不锈钢基体为体心立方结构的铁素体。奥氏体不锈钢的层错能(如 18-8 型为 13 mJ/m^2)较铁素体不锈钢低得多^[9], 奥氏体不锈钢中很容易出现层错和孪晶(参图 4a), 从而导致位错的塞积, 形变硬化倾向更大, 使局部强度提高。奥氏体中难以继续变形的位错在障碍附近产生的应力集中水平要高于层错能高的铁素体不锈钢的材料, 304 奥氏体不锈钢应变诱发的马氏体作为第二相, 对位错运动起阻碍作用, 从而产生硬化。这也是铁素体不锈钢应变硬化能力低于奥氏体不锈钢的原因之一。另一方面, 应变诱发马氏体相变提高了奥氏体不锈钢形变强化能力, 可以抵消因截面减少增加的内应力, 抑制局部塑性失稳(缩颈)的发生, 而且马氏体相变本身可以诱发塑性, 这些因素均改善奥氏体不锈钢的塑性^[10-11], 使 304 奥氏体不锈钢具有远高于其他 3 种铁素体不锈钢的断后伸长率和均匀伸长率(约为 2 倍)。

3 种铁素体不锈钢中, 晶粒大小和第二相粒子是其应变硬化的主要因素。晶粒越细, 细小碳化物越多, 则应变硬化能力越强, 409L 含碳量极低(0.01%)、碳化物稀少, 且晶粒较粗大(5.5 级), 故应变硬化能力最低(0.31)。由于 Cr 与 C 的化学亲和力大, 故尽管 430 的含碳量高于 410S, 但 430 高的 Cr 含量会使相当的碳原子保留在基体之中。因此, 430、410S 的显微组织中的碳化物数量并无明显差异(图 4), 但 410S 的铁素体晶粒(8.0 级)要细于 430(7.0 级), 因此 410S 的 n 值要高于 430。

304 不锈钢 2 种轧制状态的 n 值都很高, 冷轧材($n=0.57$)高于热轧材(0.48)。与之相对应, 304 热轧态和 304 冷轧态拉伸时的强化效果都很显著, 其 $\Delta\sigma(\sigma_0.2)$ 分别为 290、384 MPa, 后者也高于前者近 100 MPa。可以认为: 304 的强化主要来自加工硬化和应变诱发马氏体 2 方面, 但对于 304 热轧态和冷轧态强化的贡献不尽相同。热轧态 304 在热轧以及随后冷却过程中从奥氏体中析出 M_{23}C_6 型碳化物(合金质量分数达 90%), 必然降低了奥氏体的合金度, 使不锈钢奥氏体的稳定性下降, 应变诱发马氏体点(M_s)会升高, 在拉伸应变的诱发、驱动下, 形成了高达 35% 的马氏体, 将产生明显的相变强化效果。冷轧态的 304 在轧制后经过了高温固溶处理(1 050~1 100 °C), 奥氏体组织均匀、合金度高, 奥氏体的稳定性大为提高, 故冷轧态 304 在拉伸过程

中诱发的马氏体体积分数很少(10%)。很明显, 冷轧态 304 的强化主要来自应变硬化本身, 而热轧态 304 的强化不仅有来自应变硬化的贡献, 还有应变诱发的多量马氏体(35%)相变强化的贡献。

4 结论

1) 304 不锈钢的加工硬化能力远高于 410S、430、409L 不锈钢, 而且 304 冷轧(固溶)态的 n 值(0.57)高于 304 热轧(空冷)态 n 值(0.48)。

2) 晶粒大小和第二相粒子数量是铁素体不锈钢应变硬化的 2 个主要因素, 410S 由于较细晶粒和较细小碳化物的存在, 其 n 值高于 430、409L 的 n 值, 409 晶粒较粗、碳化物稀少, 其 n 值最小、加工硬化能力最低。

3) 304 钢的强化主要来自加工硬化和应变诱发马氏体的相变硬化。与热轧态相比较(其诱发马氏体高达 35%), 冷轧态 304 中的奥氏体稳定性较高, 在拉伸过程中诱发的马氏体体积分数很少(10%), 其拉伸强化效应(384 MPa, 高于热轧态)主要来自加工硬化本身。

致谢: 本文得到甘肃省有色金属新材料重点实验室开放基金(SK105011)的资助, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 胡志忠, 曹淑珍. 形变硬化指数与强度的关系 [J]. 西安交通大学学报, 1993, 27(6): 71-76.
- [2] 张旺峰, 陈瑜眉, 朱金华. 低层错能奥氏体钢的变形硬化特点 [J]. 工程材料, 2000, 20(2): 25-27.
- [3] 张旺峰, 陈瑜眉, 朱金华. 亚稳态奥氏体钢的形变硬化 [J]. 钢铁, 2000, 35(9): 52-55.
- [4] 张旺峰, 卢正欣, 陈瑜眉, 等. 组织结构对应变硬化的影响 [J]. 机械工程材料, 2002, 26(10): 7-10.
- [5] 周小芬, 符仁钰, 苏钰, 等. Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的拉伸应变硬化行为研究 [J]. 钢铁, 2009, 44(3): 71-74.
- [6] 杨瑞成, 孟威, 舒俊, 等. 铁素体不锈钢热轧板材的拉伸行为和断裂特征 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(6): 25-29.
- [7] 刘云堂, 刘博文, 刘锦文. 工程材料力学性能 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [8] 徐洪民, 赵振铎. 不锈钢薄板拉伸、冲压成形性能的试验研究 [J]. 金属成形工艺, 2003, 21(2): 23-26.
- [9] TANG Changguo, ZHU Jinhua. Effect of stain rate on straihardening exponent of some metallic materials [J]. Acta Metallurgical Sinica, 1994, 17(3): 183-186.
- [10] 王健, 杨卓越, 陈嘉砚, 等. 304 不锈钢应变诱发 α' 马氏体相变及对力学性能的影响 [J]. 物理测试, 2006, 24(5): 8-11.
- [11] 李维东, 马金达. 冷变形对 304 不锈钢组织和性能影响的探讨 [J]. 理化检验: 物理分册, 2002, 38(11): 507-513.