

冷轧对含少量Mo的301不锈钢(15Cr17Ni7) 组织和性能影响

陈波 高明 马颖澈 赵秀娟 刘奎

(中国科学院金属研究所 沈阳 110016)

摘要 对含有 0.8%(质量分数)Mo 的 301 奥氏体不锈钢板进行了压下率为 0–52% 的冷轧变形实验,研究了不同变形量下合金室温拉伸性能、显微组织、马氏体含量及显微硬度。结果表明合金的加工硬化与变形过程中应力诱发马氏体相变密切相关,合金的屈服强度、抗拉强度和显微硬度与压下率呈线性关系。当压下率为 52% 时,合金组织中马氏体含量约 75%,抗拉强度达 1700 MPa 以上。添加 0.8%Mo 对合金起到轻微强化作用,强度提高约 100 MPa,但塑性没有降低。

关键词 金属材料,奥氏体不锈钢,301 不锈钢,冷轧,性能,组织

分类号 TG113

文章编号 1005-3093(2010)03-0278-05

Effect of Cold Rolling on the Structure and Properties of 301(15Cr17Ni7) Containing Mo Stainless Steel

CHEN Bo GAO Ming MA Yingche ZHAO Xiujuan LIU Kui*
(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Manuscript received October 20, 2009; in revised form March 17, 2010.

* To whom correspondence should be addressed, Tel:(024)23971986, E-mail: kliu@imr.ac.cn

ABSTRACT This article investigates the effect of various degrees of plastic deformation introduced by cold rolling at ambient temperature on the tensile properties of 301 stainless steel containing 0.8% Mo. The results indicate that the formation of strain-induced martensite evidently leads to a significant strengthening of the steel. The tensile and yield strengths as well as hardness increase linearly with the increase of cold rolling reduction. After 52% rolling reduction, the amount of martensite is about 75%, and the tensile strength is elevated to be about 1700 MPa. The addition of 0.8% Mo has a slight effect on tensile and yield strengths, but the plasticity is not decreased.

KEY WORDS metallic materials, austenitic stainless steel, AISI 301, cold rolling, tensile property, microstructure

奥氏体不锈钢是不锈钢中使用量最大的一类,这种合金不能通过热处理强化,但塑性变形可导致合金加工硬化。加工硬化行为十分复杂,主要与应力诱发马氏体相变^[1–6]和加工导致位错密度增大密切相关。对于稳定的奥氏体不锈钢,如 316 和 310,在应力作用下基体少量转变为马氏体组织,塑性变形的强化相对有限^[7];但对亚稳奥氏体不锈钢,奥氏体基体在应力作用下部分转变为马氏体组织,这种转变直接导致合金强化。301 不锈钢仅含有 7% 的奥氏体稳定元素 Ni,是所有奥氏体不锈钢中奥氏体最不稳定的

一个钢种,这种亚稳态奥氏体不锈钢在加工、制造过程中,经过不同程度的冷加工,发生塑性变形,诱发部分奥氏体组织转变为马氏体组织,形成 α' 板条状马氏体^[8],正是这种应力诱发造成的相变强化和加工硬化,使 301 不锈钢成为强度最高的奥氏体不锈钢。

在奥氏体不锈钢中添加 Mo 可提高合金在还原性介质的耐蚀性和提高耐点蚀性能^[9],但目前对于力学性能的影响研究较少。本文在 301 成分的基础上添加少量 (0.8%, 质量分数,下同)Mo(以下简称 301Mo 合金),研究不同冷轧变形量组织、性能的变化规律,以理解该合金的加工工艺。

1 实验方法

实验用 301Mo 不锈钢通过真空感应炉熔炼,化

表 1 实验用 301Mo 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 301Mo stainless steel used in this study(%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0.13	1.23	0.85	0.007	0.006	16.84	0.80	7.37	Bal.

学成分见表 1。铸锭经锻造、热轧得到 1.8 mm 厚薄板。将板材在 1050 °C 真空固溶 15 min, 气淬后进行冷轧变形实验, 具体变形过程见表 2。对固溶态和 5 种冷轧压下率的试样进行分析, 力学性能试样沿平行轧制方向和垂直轧制方向分别取样, 实验结果为 2 支试样的平均值。

X 射线衍射试样尺寸为 10 mm×10 mm, 在 Rigaku-D/Max-RAX 射线衍射仪上进行实验。扫描范围 $2\theta=40^{\circ}\sim 140^{\circ}$, Cu 靶 Fe 滤波, 管电压 20 kV, 70 μ A, 扫描速率 $1^{\circ}/\text{min}$, 为了避免织构影响, 样品旋转 78 r/min。

2 结果与讨论

图 1 给出了不同压下率冷轧板材对应的屈服强度、抗拉强度、延伸率和显微硬度变化趋势, 虚线表示平行轧制方向, 实线表示垂直轧制方向。从图 1a 可以看出, 随着压下率的增大, 301Mo 板材的加工硬化显著, 板材的强度和显微硬度明显增加, 同时延伸率下降。此外, 板材平行于轧制方向的强度高于垂直轧制方向, 这与晶粒拉长和位错密度增大导致的强化有关。冷加工材料的屈服强度、抗拉强度与冷轧压下率存在大致的线性关系。屈服强度增加的速率大于抗拉强度增加的速率, 即随着压下率的增加, 屈服强度和抗拉强度的差值越来越小, 屈服比从固溶态的 0.3 左右增加到 52% 压下率的 0.9 左右。冷加工导致强度增加的同时, 合金的塑性降低, 延伸率显著降低, 从固溶态的 66% 降低到 52% 压下率时的 6.5%。压下率 52.8% 的合金达到 JIS G4313-1996 标准中的 SHE 级别 ($HV>530$, $YS>1450$ MPa, $UTS>1740$ MPa)。

图 1b 给出了冷轧压下率与显微硬度的关系, 图中所示每个显微硬度数值均是 5 次测量的平均值。可以看出显微硬度随冷轧压下率的增加而增加, 并且显微硬度和冷轧压下率也呈现近似的线性关系。

从上面的两个线性关系中可以发现:

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\min}} = 1.32, \frac{HV_{\max} - HV_{\min}}{HV_{\min}} = 1.36$$

两者相差很小, 可以认为合金强度增加的速率和显微硬度增加的速率相等。抗拉强度和显微硬度大致呈线性关系, 如图 1c 所示, 线性拟合后为 $\sigma_b = 2.5HV + 380$ 。在 0-52% 压下率下, 对不方便测量

性能的该合金薄板材料, 可通过此关系式由显微硬度获得大致的抗拉强度。

合金强度、显微硬度的增加与冷轧过程应力诱导马氏体相变有关, 关于奥氏体不锈钢中冷加工导致

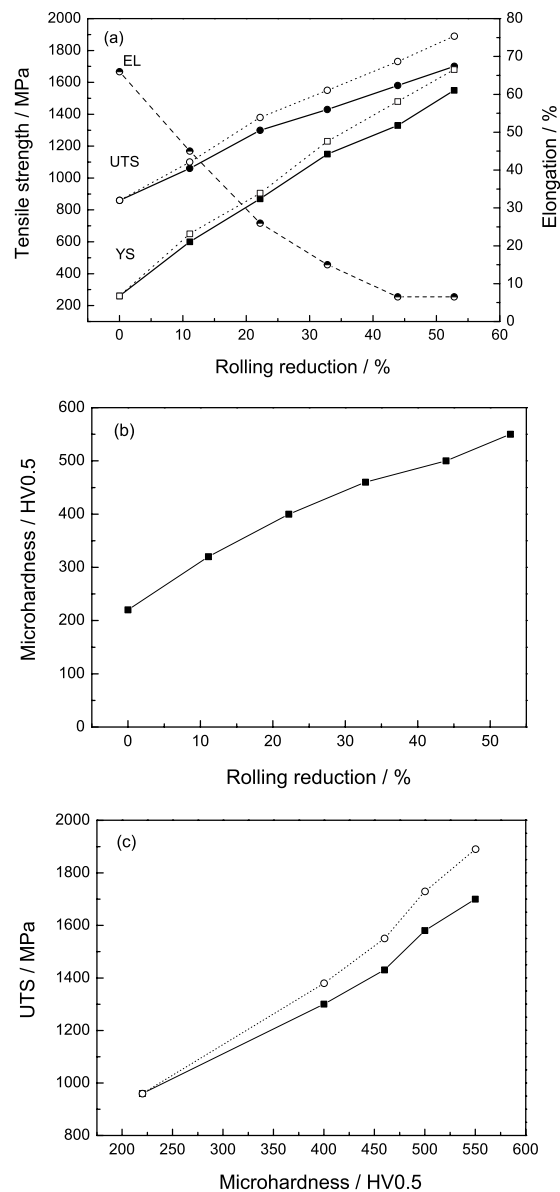


图 1 冷轧压下率与力学性能、显微硬度的关系

Fig.1 Relationship between rolling reduction, tensile strength and the microhardness. (a) Effect of cold rolling on the tensile properties; (b) Effect of cold rolling on the Vickers hardness; (c) The relationship between the tensile strength and the Vickers hardness.

马氏体相变的研究相当多,文献中关于相同牌号合金在相同塑性变形量下应力诱导马氏体的含量不尽相同。但合金中马氏体含量与温度、合金特性和变形速率密切相关^[10,11]。随 Ni 当量的增加和变形温度的提高,不锈钢中应力诱发马氏体含量减少;而变形速率主要影响变形过程的材料的温度,从而导致马氏体含量的差异^[12]。

对含有两相的合金,合金总强度和各相的强度及各相的含量有如下关系^[13]。

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_1 V_1 + \sigma_2 V_2$$

对含有马氏体和奥氏体的两相不锈钢来说,上式中 σ_1 和 V_1 分别为马氏体的强度和其在合金中体积含量, σ_2 和 V_2 为残余奥氏体的强度和其体积含量。因马氏体强度高于奥氏体强度,经上式指导,如果增加马氏体含量,合金总的强度会逐渐增加,这与文献^[14]中报道吻合。因此可以通过增加塑性变形量诱发更多的马氏体以获得更高的合金强度。

图 2 给出了合金固溶态和冷变形后的 X 射线衍射图。发现固溶态合金主要为奥氏体组织,但在 $2\theta=45.80^\circ$ 发现铁素体 α 的最强峰 (111)。说明原始组织含有少量铁素体。301 是一种亚稳态奥氏体钢,仅含有 7% 的奥氏体稳定元素 Ni,不能全部将合金组织转变为奥氏体,按照镍铬当量计算公示得到合金 Cr 当量 =18.9,而 Ni 当量 =12.1。Hammond 对于变形奥氏体不锈钢给出了预测铁素体含量图^[15],从 Hammond 图中可以看出在上述镍铬当量合金的室温组织应含有 5% 左右的铁素体。固溶态合金组织主要是奥氏体 (γ) 及少量的铁素体 (α),在冷轧塑性变形时应力诱发部分奥氏体 (γ) 转变为 α' 和 ε 马氏体组织, α' 相对 ε 占绝大多数。奥氏体 (γ) 是顺磁相,而 α' 马氏体和铁素体 (α) 是铁磁相, α' 和 α 两者的结构差别不大,在 X-射线衍射中很难区分。

稳定奥氏体不锈钢在室温变形并无马氏体转变,但也有加工硬化效应,这主要是晶粒细化,晶格扭曲和位错密度增大所造成。而亚稳奥氏体不锈钢的加工硬化主要归结于马氏体相的生成,由于马氏体硬而脆,强度高于奥氏体,随着冷变形过程应力诱发马氏体体积的增加,合金整体强度提高、塑性降低。此外,合金冷变形过程中晶粒细化,晶格扭曲和位错密度增大也会导致合金的加工硬化,这对合金强度的提高也有一定的贡献,晶粒细化和晶格扭曲导致垂直轧制方向产生较多晶界和位错也是沿不同轧制方向(平行/垂直)性能差异的主要原因。按照 GB8362-87 标准计算不同冷轧压下率对应的应变马氏体含量,结果如图 3 所示。从图中可以看出合金中马氏体含量随

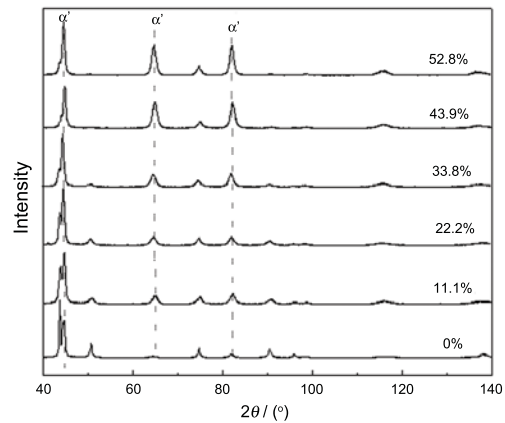


图 2 301Mo 不锈钢固溶态和冷变形态的 X 射线衍射图

Fig.2 Diffraction patterns of 301Mo steel strip at solution annealing and cold rolling conditions

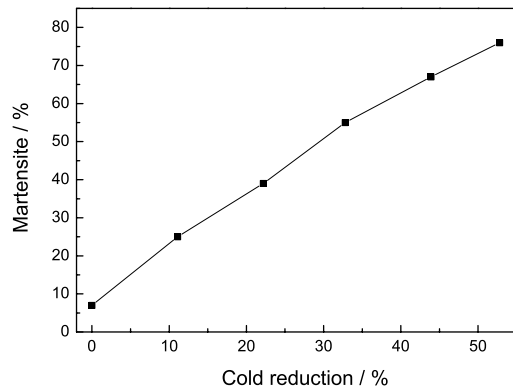


图 3 冷轧压下率与应力诱导马氏体含量的关系

Fig.3 Effect of cold rolling on the strain-induced martensite content

压下率的增加而线性增加,这也说明了合金的强化主要和形变诱导马氏体直接相关。

图 4a-4c 表明,变形前后合金的显微组织随冷轧压下率增加,晶粒沿着变形方向被拉长,由多面体变为扁平形或长条形,当变形量较大时,晶粒逐渐拉长成纤维状。同时,研究表明^[7],在冷变形过程中,随变形量的增加,各晶粒的滑移方向都向主变形方向转动,逐渐使多晶体中原来位向互不相同的各个晶体在空间上呈现大致相同的取向。此外部分奥氏体组织转变为板条状马氏体组织(图 4d)。由于 301 不锈钢碳含量为 0.13%,在 0.3% 以下,形成的马氏体组织基本上是由许多相互平行的板条组成的板条束。

Mo 是稳定铁素体相并扩大铁素体相区的元素,随着不锈钢中 Mo 含量的增加,奥氏体形成元素(Ni、N、Mn 等)的含量也要相应提高,以保持钢中铁素体与奥氏体形成元素之间的平衡。Mo 对奥氏体不锈钢的强化作用不显著,因此当铬镍奥氏体不锈钢保持单一的奥氏体组织且无金属间相析出时,Mo 的

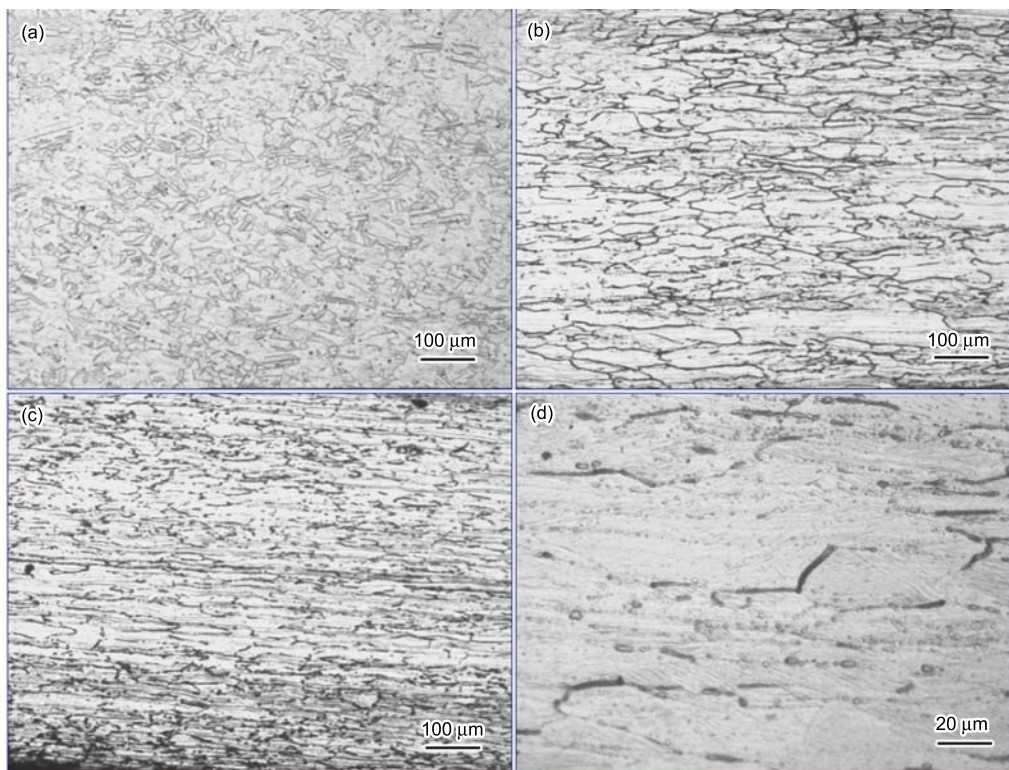


图 4 固溶态和不同压下率下 301Mo 冷轧板材的显微组织

Fig.4 Optical micrographs of 301Mo at solution annealing and cold rolling. (a) Solution annealing, (b)39% thickness reduction, (c) 50% thickness reduction, (d) 50% thickness reduction (acicular martensite)

表 2 301Mo 不锈钢冷轧实验过程

Table 2 Rolling schedule for cold rolling of 301Mo stainless steel strip

Strip thickness/mm	1.80	1.60	1.40	1.21	1.01	0.84
Rolling reduction /%	0	11.1	22.2	32.8	43.9	52.8

表 3 AISI 301 不锈钢板材的拉伸性能^[15]

Table 3 The tensile properties of 301 stainless steel in reference

Rolling reduction/%	Rolling direction	YS/MPa	UTS/MPa	EL/%
0	vertical	226	666	68
0	parallel	226	666	68
25	vertical	851	1170	17
25	parallel	872	1133	24
45	vertical	1205	1605	7
45	parallel	1372	1544	7

加入对其室温力学性能影响不大。但随着 Mo 含量的增加, 钢的高温强度提高, 持久、蠕变等性能也获得较大改善, 所以含 Mo 不锈钢常在高温使用。通过本文合金和表 3 中文献给出的 301 合金冷加工强度、塑性^[15]的对比发现, 添加 0.8% 的 Mo 对合金的室温拉伸强度仅有小幅的提高, 强度提高约 100 MPa, 而塑性没有大的变化。

3 结 论

含 0.8% 的 301 亚稳态不锈钢在冷轧变形过程中, 合金产生强化, 塑性下降。压下率约 50% 条件下, 抗拉强度可达到 1700 MPa 左右, 延伸率则下降到 6.5%。

合金的屈服强度、抗拉强度和显微硬度与压下

率呈线性关系,这种强化与形变过程应力诱发马氏体密切相关。随变形量的增加,马氏体含量也随之线性增加,在50%压下率下,合金组织中马氏体体积含量约为75%。

添加0.8%的Mo对301合金力学性能没有大的影响,室温拉伸强度小幅提高约100MPa,塑性没有降低。

参 考 文 献

- 1 S.G.Chowdhury, S.Das, P.K.De, Cold rolling behaviour and textural evolution in AISI 316L, *Acta Materialia*, **53**, 3951(2005)
- 2 B.R.Kumara, A.K.Singh, B.Mahato, P.K.De, N.R.Bandyopadhyay, D.K.Bhattacharya, Deformation-induced transformation textures in metastable austenitic stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, **429**, 205(2006)
- 3 V.Tsakiris, D.V.Edmonds, Martensite and deformation twinning in austenitic steels, *Mater. Sci. Eng. A*, **273-275**, 430(1999)
- 4 V.Mertinger, E.Nagy, F.Tranta, J.Solyom, Strain-induced martensitic transformation in textured austenitic stainless steels, *Mater. Sci. Eng. A*, **481-482**, 718(2008)
- 5 M.Milad, N.Zreiba, F.Elhalouani, C.Baradai, The effect of cold work on structure and properties of AISI 304 stainless steel, *J. Mater. Proc. Tech.*, **203**, 80(2008)
- 6 S.M.Tavres, D.Gunderov, V.Stolyarov, J.M.Neto, Phase transformation induced by severe plastic deformation in the AISI 304L stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A*, **358**, 32(2003)
- 7 K.G.Brickner, Stainless steels for room and cryogenic temperatures in selection of stainless steels, American Society for Metals (Metals Park, Ohio, 1968)p.24
- 8 LIU Wei, LI Qiang, JIAO Dezhi, ZHENG Yi, LI Guoping, Deformation and strain hardening behaviors of austenitic cold rolled 301L stainless steels, *Acta Metall. Sin.*, **44**, 775(2008)
(刘伟,李强,焦德志,郑毅,李国平,冷轧301L奥氏体不锈钢的变形和应变硬化行为,金属学报, **44**, 775(2008))
- 9 LU Shiyang, ZHANG Tingkai, YANG Changqiang, KANG Xifan, WANG Xi, *Stainless Steels* (Beijing, Atomic Energy Press, 1995) p.198
(陆世英,张廷凯,杨长强,康喜范,王熙,不锈钢(北京,原子能出版社,1995) p.198)
- 10 L.Pegueta, B.Malki, B.Baroux, Influence of cold working on the pitting corrosion resistance of stainless steels, *Corr. Sci.*, **49**, 1933(2007)
- 11 M.Amitava, P.K.Srivastava, P.K.Bhattacharya, D.K.Jiles, Ferromagnetic properties of deformation-induced martensite transformation in AISI 304 stainless steel, *Metall. Trans.*, **35A**, 599(2004)
- 12 J.P.Bressanelli, A.Moskowitz, Effect of strain rate, temperature and composition on tensile properties of metastable austenitic stainless steels, *Trans. ASM*, **59**, 223(1966)
- 13 G.L.Huang, D.K.Matlock, G.Krauss, Martensite formation, strain rate sensitivity, and deformation behavior of type 304 stainless steels sheet, *Metall. Trans.*, **20A**, 1239(1989)
- 14 R.G.Davies, C.L.Magee, Influence of austenite and martensite strength of martensite morphology, *Metall. Trans.*, **2**, 1939(1971)
- 15 WANG Lipin trans., *Source Book on Stainless Steels* (Taiyuan Steel Company, 1985) p.15
(王丽萍译,不锈钢资料手册,上册(太原钢铁公司编译,1985年) p.15)