

异步热轧对低合金钢显微组织及力学性能的影响

利成宁, 袁国, 康健, 王国栋

(东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 分别采用同步热轧及异速比为 1.2 的异步热轧对低合金钢进行热轧, 研究异步热轧对低合金钢显微组织及力学性能的影响机制。结果表明, 与同步热轧相比, 异步热轧可显著促进低合金钢奥氏体/铁素体相变, 提高热轧钢板厚度方向的组织均匀性。同步热轧工艺下, 钢板表层为细晶铁素体层, 厚度 1/4 或 1/2 处组织为粗大的贝氏体。异步热轧工艺下, 钢板板厚方向主要为均匀的铁素体组织。两种热轧条件下, 实验钢的抗拉强度和延伸率相当, 分别为 710 ~ 718 MPa 和 20%。采用异步热轧代替同步热轧后, 实验钢的屈服强度由 526 MPa 提高至 561 MPa。这主要是由于同步热轧的钢板相变强化占主导, 而异步热轧的钢板细晶强化相对较强。

关 键 词: 异步热轧; 同步热轧; 低合金钢; 组织均匀性; 力学性能; 强化机制

中图分类号: TG 142.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)07-0941-05

Effect of Asymmetric Hot Rolling on Microstructure and Mechanical Properties in Low Alloy Steel

LI Cheng-ning, YUAN Guo, KANG Jian, WANG Guo-dong

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: YUAN Guo, E-mail: yuanguo@ral.neu.edu.cn)

Abstract: The effects of asymmetric hot rolling on the microstructure and mechanical properties of low alloy steel were investigated when the symmetric hot rolling and asymmetric hot rolling with roll velocity ratio of 1.2 were applied to the steel. The results show that asymmetric hot rolling can promote the austenite/ferrite transformation significantly and improve the microstructure uniformity along thickness direction of the steel strip. After the symmetric hot rolling process, the microstructure at the surface of the steel strip was fine ferrite layer and was coarse bainite at the thickness of 1/4 or 1/2. However, the microstructure through the thickness of the steel was the uniform ferrite after asymmetric hot rolling process. The tensile strength and elongation of the steel after these two rolling processes respectively, were very close, which were about 710 ~ 718 MPa and 20%. After replacing the symmetric hot rolling process by the asymmetric one, the yield strength of the steel increased from 526 MPa to 561 MPa. The main reason is that the transformation strengthening is dominant in a symmetric hot-rolled steel, but grain refinement is more prominent for asymmetric hot-rolled steel.

Key words: asymmetric hot rolling; symmetric hot rolling; low alloy steel; microstructure uniformity; mechanical property; strengthening mechanism

与常规同步轧制相比, 异步轧制具有更低的轧制力, 可降低生产能耗、减少轧制道次、增强轧薄能力等^[1-3]。因此, 自异步轧制提出以来, 受到了广泛的关注。在异步轧制过程中, 上下轧辊存在线速度差, 轧件处于搓轧状态, 从而形成特有的

“搓轧区”^[4-5]。在搓轧区内, 除了压缩变形之外, 轧件还会受到剪切变形, 因此钢板的总变形量较大, 对轧件的显微组织、织构及力学性能产生显著影响^[6-8]。

目前, 异步轧制主要应用于冷轧或少量特殊

用途金属的生产中. 已有学者在 Al 合金、Al - Mg 合金、电工钢、奥氏体钢及高锰钢的研究与开发中采用异步轧制, 并取得良好效果^[7, 9-11]. 然而, 异步轧制在用途广泛且用量巨大的低合金钢(特别是热轧低合金钢)中的应用研究却相对较少, 其对低合金钢组织演变及力学性能的影响机制尚不明确. 另外, 目前异步轧制主要是通过异径来实现, 对于同径异步轧制的研究较少. 同径异步轧机可实现同步及多级异速比的轧制, 具有柔性轧制的潜力. 为此, 本文对低合金钢进行同步及同径异步热轧处理, 分析和讨论了同径异步热轧对低合金钢组织演变行为和力学性能的影响机制.

1 实验材料和实验方法

实验用钢为工业用低合金钢板, 原始厚度为 20 mm, 化学成分(质量分数, %)为: C 0.14, Si 0.45, Mn 1.7, Cu + Cr + Ni + Mo ≤ 0.85 及 Nb + V + Ti ≤ 0.12. 实验前先将钢坯切成 200 mm × 100 mm × 20 mm 的坯料, 然后置于箱式电阻炉中加热至 1 200 ℃保温 2 h. 热轧前, 先将钢坯空冷至 910 ℃, 然后在可调异速比的 φ400 二辊异步热轧机组上进行热轧, 轧制规程为 20 mm—12 mm—6 mm, 终轧温度为 890 ℃, 轧制速度为 60 m/min. 为了研究异步热轧工艺对实验钢组织性能的影响, 分别采用 1.2 及 1.0(即同步轧制)的两种异速比进行热轧. 热轧后的钢板直接空冷至室温.

热轧实验完成后, 在热轧钢板板宽的 1/4 处切取金相试样, 经研磨、抛光后用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀 10 s, 然后使用 ZEISS 光学显微镜进行组织观察. 另外, 在钢板宽度的 1/4 处沿轧制方向切取矩形横截面的拉伸试样, 试样宽度为 12.5 mm, 原始标距为 50 mm. 室温拉伸试验在 CMT5105 - SANS 微机控制电子万能实验机上进行, 拉伸速率为 3 mm/min.

2 实验结果

2.1 显微组织

图 1 为本实验工艺条件下, 通过同步热轧获得的低合金钢板厚度方向的组织分布情况. 由图 1a 的显微组织可知, 沿着钢板厚度方向, 晶粒度分布极其不均匀. 板面附近处的组织与其他区域组织差异显著, 出现厚度约为 0.6 mm 的表面细晶层. 该表面细晶层由细小等轴的铁素体晶粒构成, 平均晶粒尺寸约为 1.5 μm, 如图 1b 所示. 除了表层的细晶层外, 其他区域的组织较为粗大. 厚度 1/4 处的组织几乎由粒状贝氏体构成, 即在贝氏体铁素体基体上分布着大量的岛状或粒状第二相(图 1c). 另外, 在晶界处零散分布着极少量的铁素体晶粒. 厚度 1/2 处的金相显微组织见图 1d, 其组织由粒状贝氏体构成, 贝氏体块较为粗大, 且几乎观察不到铁素体晶粒.

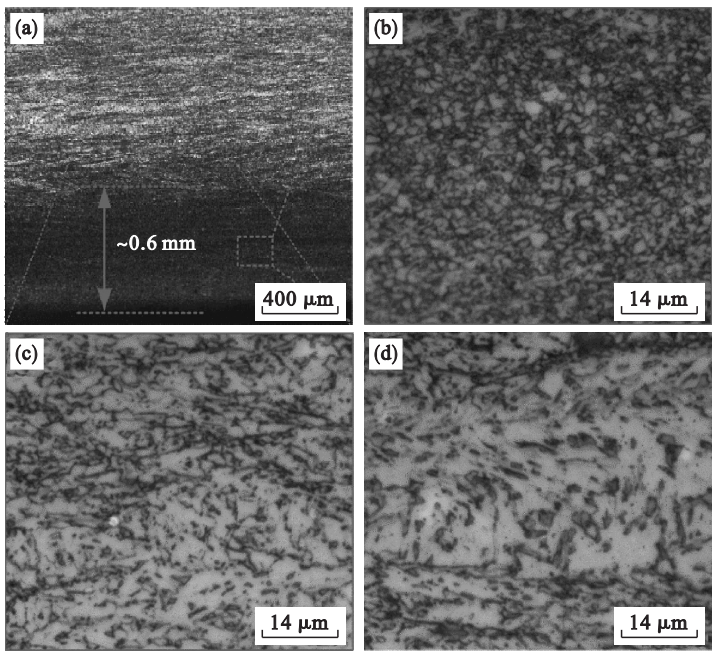


图 1 同步热轧条件下低合金钢显微组织
Fig. 1 Microstructure of the low alloy steel obtained after symmetric hot rolling process
(a)—低倍下显微组织; (b)—板面附近处; (c)—厚度 1/4 处; (d)—厚度 1/2 处.

由异步热轧获得的低合金钢板厚度方向组织分布情况如图 2 所示. 由图 2a 的显微组织可知, 与同步热轧相比, 由异步热轧获得的低合金钢厚度方向显微组织较为均匀, 低倍下的金相显微组织未出现明显的表面细晶层. 板面附近处的组织主要由铁素体构成, 在铁素体晶界处分布少量的岛状或粒状第二相, 平均晶粒尺寸比同步热轧大,

约为 2 μm , 如图 2b 所示. 由图 2c 及图 2d 可知, 实验钢板厚度 1/4 及 1/2 处的显微组织与板面附近处的显微组织相似, 主要由铁素体构成, 在铁素体晶界处分布少量的岛状及粒状物. 由此可见与同步热轧相比, 异步热轧有利于提高热轧钢板厚度方向的组织均匀性.

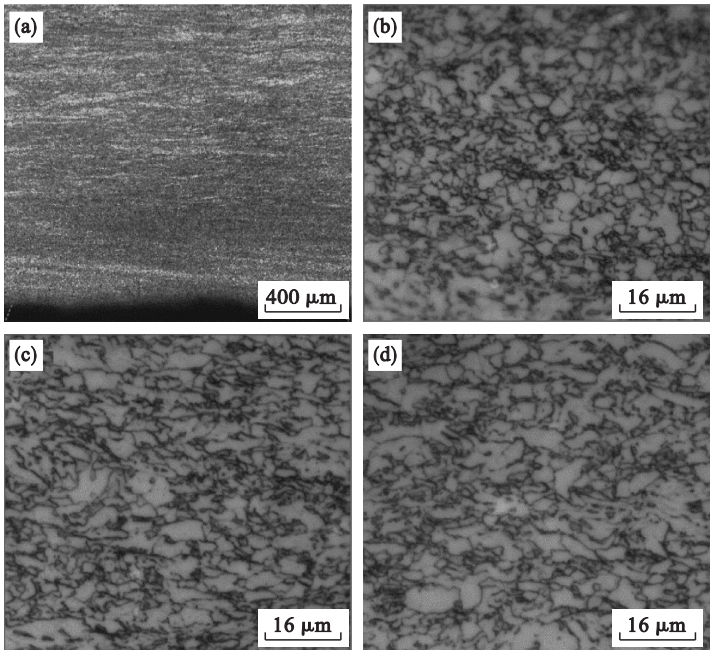


图 2 异步热轧条件下低合金钢显微组织
Fig. 2 Microstructure of the low alloy steel obtained after asymmetric hot rolling process
(a)—低倍下显微组织; (b)—板面附近处; (c)—厚度 1/4 处; (d)—厚度 1/2 处.

2.2 力学性能

实验钢拉伸过程中的应力 - 应变曲线如图 3 所示. 两种工艺条件下, 实验钢的拉伸曲线均表现出连续屈服特征. 如表 1 所示, 两种工艺条件下, 实验钢的抗拉强度无显著差别, 分别为 710, 718 MPa, 而且二者的断后延伸率均为 20%. 但是, 异步热轧可明显提高低合金钢的屈服强度. 采用异步热轧, 实验钢的屈服强度可由同步热轧的 526 MPa 提高到 561 MPa.

由上文分析可知, 同步热轧钢板除了表面细晶层外, 其组织均以粗大的贝氏体为主; 但是, 异步热轧钢板从板面至厚度的 1/2 处, 组织较为均匀, 均以细小的铁素体为主, 同时含有少量的贝氏体组织. 对于同步热轧钢板, 粗大的贝氏体组织具有较强的相变强化作用和相对弱的细晶强化作用. 相变强化在获得高的抗拉强度的同时, 可降低屈服强度, 因此可降低实验钢的屈强比. 对于异步热轧的钢板, 其均匀细小的铁素体具有较强的细

晶强化作用和相对弱的相变强化作用. 一般认为, 细晶强化对屈服强度的贡献增量明显高于对抗拉强度的贡献增量. 因而, 通过细晶强化作用强化的钢板, 往往具有相对高的屈强比.

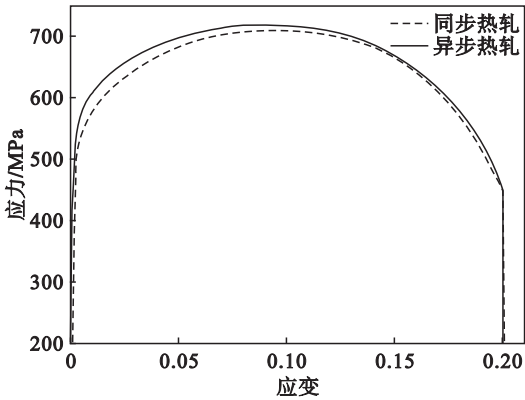


图 3 实验钢拉伸应力 - 应变曲线
Fig. 3 Tensile stress-strain curves of the experimental steel

表 1 实验钢力学性能
Table 1 Mechanical properties of the experimental steel

工艺	屈服强度	抗拉强度	屈强比	延伸率
	MPa	MPa		%
同步热轧	526	710	0.74	20
异步热轧	561	718	0.78	20

3 讨 论

有研究指出,异步轧制可细化奥氏体钢的晶粒尺寸,尤其是细化钢板芯部组织,从而提高钢板厚度方向组织的均匀性^[9]. 其作用机理在于,异步轧制时钢板将受到附加的剪切变形,由同步热轧的单项压缩变形转化为同时受到压缩变形及剪切变形的共同作用,导致等效应变增大. 大的等效应变使奥氏体发生了充分的再结晶,通过再结晶实现奥氏体晶粒的细化. 与同步热轧相比,异步热轧的变形可渗透至钢板芯部,促进芯部奥氏体再结晶,细化芯部组织,提高厚度方向的均匀性.

由图 1 和图 2 可知,本实验条件下,异步热轧也可改善低合金钢厚度方向的组织均匀性,但其均匀化机制不同于上述奥氏体钢的均匀化机制. 由公式^[12]: $\theta_{nr} = 887 + 463w(C) + 6445w(Nb) - 644w(Nb)^{1/2} + 732w(V) - 230w(V)^{1/2} + 890 \times w(Ti) + 363w(Al) - 357w(Si)$, 可估算得实验钢的再结晶温度(θ_{nr})约为 1 130 ℃. 因此在 910 ~ 890 ℃ 范围热轧时,实验钢处于未再结晶区,异步热轧难以通过再结晶机制实现组织细化及均匀化. 在未再结晶区,通过热轧可获得具有“饼形”结构及大量变形带的硬化奥氏体,提高相变形核点. 而且,未再结晶热轧还可提高形变储能,从而提高奥氏体/铁素体相变驱动力. 对于本实验钢,同步热轧条件下,总的等效应变相对较小,而且变形无法渗透至钢板芯部,因此仅钢板表层可发生奥氏体/铁素体相变. 而其他区域(特别是板厚芯部)无法实现有效的铁素体相变,因此芯部为贝氏体,最终形成厚度方向上表面为细小铁素体、芯部为贝氏体的不均匀组织(如图 1 所示). 与同步热轧相比,异步热轧因具有更大的等效应变,使相变驱动力提高,促进奥氏体/铁素体相变. 尤其是异步热轧可使变形渗透至钢板芯部,使得厚度方向上由表面至芯部均可发生奥氏体/铁素体相变,获得厚度方向上均匀的组织. 由图 2 可知,异步热轧时钢板表层晶粒尺寸与芯部的晶粒尺寸差异不显著,且略大于同步热轧时的表层晶粒尺寸. 其可能的原因在于,异步热轧提高相变驱动力,提高铁素体相

变温度,而高温下形成的铁素体更易于长大.

4 结 论

1) 在未再结晶区的异步热轧可提高等效应变,使变形向钢板芯部渗透. 因而,异步热轧可显著促进低合金钢铁素体相变. 在轧后空冷过程中,热轧钢板由板面至厚度的 1/2 处均可发生奥氏体/铁素体相变,提高厚度方向的组织均匀性.

2) 同步热轧和异步热轧条件下,实验钢的抗拉强度及延伸率相当,抗拉强度 710 ~ 718 MPa,延伸率 20%. 同步热轧的实验钢通过贝氏体的相变强化,屈服强度较低,为 526 MPa; 异步热轧的实验钢,主要通过铁素体的细晶强化,屈服强度提高到 561 MPa.

参考文献:

[1] 孙蓓泉,戴辉,唐荻. 异步轧制技术发展概况及其应用前景[J]. 鞍钢技术,2009(5):1-6.
(Sun Ji-quan,Dai Hui,Tang Di. Development survey and its application prospect of asynchronous rolling technology[J]. *Angang Technology*,2009(5):1-6.)

[2] Salimi M,Kadhodaei M. Slab analysis of asymmetrical sheet rolling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004,150:215-222.

[3] Gao H,Chen G. Asymmetrical cold rolling realized on plain mill for steel sheet by larser-textured rolls[J]. *Iron and Steel*,1998,33(3):63-66.

[4] Chen S,An Y G,Lahaije C. Toughness improvement in hot rolled HSLA steel plates through asymmetric rolling[J]. *Materials Science and Engineering A*,2015,625:374-379.

[5] Chen S,Butler J,Melzer S. Effect of asymmetric hot rolling on texture, microstructure and magnetic properties in a non-grain oriented electrical steel[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*,2014,368:342-352.

[6] Salvatori I,Lubrano M,Petrone E,et al. Metallurgical impact of hot asymmetric rolling on grain refinement[C]// Proceedings of the International Conference on New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steel. Buenos Aires; Minerals, Metals & Materials Society,2008:1097-1109.

[7] Jin H,Lloyd D J. Effect of a duplex grain size on the tensile ductility of an ultra-fine grained Al-Mg alloy, AA5754, produced by asymmetric rolling and annealing[J]. *Scripta Materialia*,2004,50(10):1319-1323.

[8] 裴伟,沙玉辉,赵瑞清,等. 异步轧制无取向硅钢的再结晶组织演变[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012,33(9):1261-1265.
(Pei Wei,Sha Yu-hui,Zhao Rui-qing,et al. Recrystallization texture development in asymmetrically rolled non-oriented silicon steel[J]. *Journal of Northeastern University (Natural*

Science),2012,33(9):1261 – 1265.)

[9] Liu J, Kawalla R. Influence of asymmetric hot rolling on microstructure and rolling force with austenitic steel [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2012,22 (2);504 – 511.

[10] Fu B, Fu L M, Wang H R, et al. Microstructures and deformation behavior of nano-grained and ultrafine-grained high-Mn austenitic steel fabricated by asymmetric-symmetric rolling [C]//6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation. Bristol: IOP Publishing Ltd, 2014:1 – 9.

[11] Zuo F Q, Jiang J H, Shan A D, et al. Shear deformation and grain refinement in pure Al by asymmetric rolling [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,2008,18 (4);774 – 777.

[12] Boratto F, Barbosa R, Yue S, et al. Effect of chemical composition on critical temperature of microalloyed steels [C]//International Conference on Physical Metallurgy of Processing of Steels and Other Metals. Tokyo: Iron and Steel Institctie of Japan,1988:393 – 390.



(上接第 926 页)

[6] Bader B W, Kolda T G. Algorithm 862: MATLAB tensor classes for fast algorithm prototyping[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*,2006,32(4):635 – 653.

[7] Acar E, Dunlavy D M, Kolda T G. A scalable optimization approach for fitting canonical tensor decompositions [J]. *Journal of Chemometrics*,2011,25(2):67 – 86.

[8] Chi E C, Kolda T G. On tensors, sparsity, and nonnegative factorizations [J]. *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*,2012,33(4):1272 – 1299.

[9] Jackson J E. A user’ s guide to principal components [D]. New York: John Wiley & Sons,1991.

[10] Lu H, Plataniotis K N, Venetsanopoulos A N. MPCA: multilinear principal component analysis of tensor objects [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*,2008,19 (1): 18 – 39.

[11] Mourao-Miranda J, Reynaud E, McGlone F, et al. The impact of temporal compression and space selection on SVM analysis of single-subject and multi-subject fMRI data [J]. *NeuroImage*,2006,33(4):1055 – 1065.

[12] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*,2011,2(3):1 – 27.

[13] Wang W, Zhang X, Gombault S. Constructing attribute weights from computer audit data for effective intrusion detection [J]. *Journal of Systems and Software*, 2009, 82 (12):1974 – 1981.

[14] Soma T, Momose T, Takahashi M, et al. Usefulness of extent analysis for statistical parametric mapping with asymmetry index using inter-ictal FGD-PET in mesial temporal lobe epilepsy [J]. *Annals of Nuclear Medicine*, 2012, 26 (4): 319 – 326.

[15] Goubran M, Mirsattari S. Detection of temporal lobe epilepsy using support vector machines in multi-parametric quantitative MR imaging [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*,2015,41:14 – 28.