

国内外铁素体轧制的研究和应用

徐光 徐楚韶* 赵嘉蓉

(武汉科技大学, 武汉 430081; *重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要 超薄热轧带钢 (< 1.2 mm) 的铁素体轧制 (低温轧制) 能显著节约能源和降低生产成本。当前迅速发展的薄板坯连铸连轧技术为铁素体轧制的发展与应用创造了良好的条件。已采用铁素体温轧工艺的钢板为低碳钢薄板和微合金化钢薄板。总结了铁素体轧制时流动应力, 再结晶, 轧后产品组织和性能的研究现状和铁素体轧制的应用情况。

关键词 薄带 铁素体轧制 流动应力 再结晶 组织和性能

Research and Application of Ferrite Rolling at Home and Abroad

Xu Guang, Xu Chushao* and Zhao Jiarong

(School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

*Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract Ferrite rolling - warm rolling for < 1.2 mm extra-thin hot rolling strip can save energy and decrease production cost. Current quick development of thin slab continuous casting and rolling technology contributes a good condition to develop and apply the ferrite rolling. The low carbon steel thin sheet and microalloying steel thin sheet have been produced by ferrite - warm rolling process. The research status of flow stress, recrystallization, microstructure and properties of ferrite rolled products, and application situation of ferrite rolling are summarized in this paper.

Material Index Thin Strip, Ferrite Rolling, Flow Stress, Recrystallization, Structure and Properties

近年来, 由于超薄热轧带钢 (< 1.2 mm) 的铁素体轧制越来越受到国内外钢铁企业的重视, 因此, 对铁素体热轧 (低温轧制) 的研究也受到科研人员的重视。目前, 国外已对铁素体轧制有关的内容进行了比较完善的研究。

1 国外铁素体轧制研究现状

20世纪70年代中期比利时的 Appell^[1] 教授首先进行铁素体区轧制 (Warm Rolling or Ferrite Rolling) 的研究, 他研究了几种碳钢在铁素体温区控轧的可行性; 同期, 日本的 Hayashi 等人在日本住友金属公司进行了用铁素体区热轧工艺生产深冲钢板的实验^[2]。

20世纪90年代起, 许多国家的研究人员对与铁素体轧制有关的课题进行了大量的研究^[3-19]。

1.1 流动应力

温轧 (Warm Rolling) 时金属的物理冶金学行为与热轧有较大的不同, 轧制之前和轧制过程中, 轧件会发生奥氏体→铁素体相变, 这种相变对轧制过程中和轧后的轧件冶金行为都有重要的影

响。铁素体的变形和再结晶是温轧过程必然的物理冶金学现象^[4]。精确的预报给定轧制条件下的流动应力对于正确的设定、生产出尺寸精确的轧件是十分必要的。

流动应力随温度变化的规律见图1^[5]。该图反映了变形温度对低碳钢 (Low Carbon, LC) 和超低碳无间隙原子钢 (Interstitial Free Steel, IF) 流动应力的影响。LC钢的化学成分 (%) 为: 0.048C, 0.24Mn, 0.047Al, 36×10^{-4} N。IF钢的化学成分为 36×10^{-6} C, 0.12% Mn, 0.032% Al, 26×10^{-6} N。图1右边的峰值说明相变的开始, LC钢左边的峰值说明产生了动态应变老化 (DSA)。

低温轧制时, 金属组织中铁素体所占比例对流动应力也有影响^[6-9]。图2为LC钢750℃变形时, 铁素体组织对流动应力的影响^[6]。

1.2 再结晶

目前提出的铁素体轧制软化机理有两种: (1) 在铁素体区较高的温度下变形时, 动态软化机理是动态回复 (Dynamic Recovery, DRC)^[4,10]; (2) 软化机理是动态再结晶 (Dynamic Recrystallization,

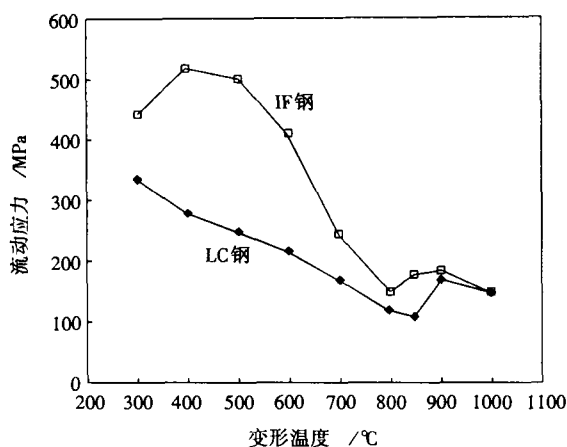


图 1 变形温度对低碳(LC)钢和无间隙原子(IF)钢流动应力的影响

Fig.1 Effect of deformation temperature on flow stress of low carbon steel and interstitial free steel

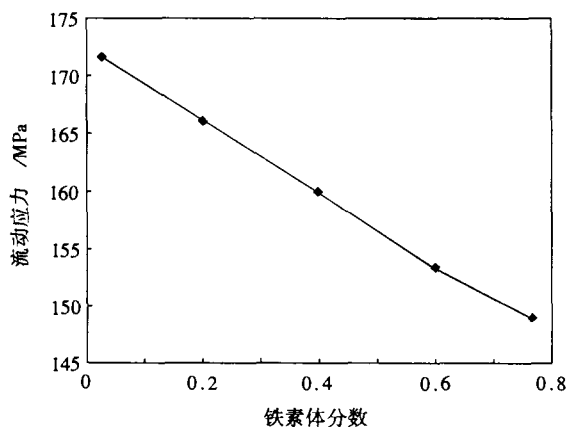


图 2 750 °C 铁素体分数对 LC 钢流动应力的影响

Fig. 2 Effect of ferrite fraction on flow stress in a low carbon steel at 750 °C

DRX)^[11-14]。

铁素体轧制条件下的再结晶动力学模型研究的不多,但已有的研究说明,在高温铁素体区轧制时,将出现再结晶现象。在研究了 LC 钢和 IF 钢变形速度对 50%再结晶时间的影响^[15,16],表明在 800 °C 以上轧制时,两个钢种都将发生道次间的再结晶。如果不考虑 AlN 沉淀的影响,LC 钢 50%再结晶粗略的模型为:

$$t_{50} = 6 \times 10^{-13} d_0^{1.5} \varepsilon_p^{-1.5} Z^{-0.3} \exp\left(\frac{245\,000}{RT_{\alpha}}\right)$$

式中: d_0 -原始晶粒尺寸/ μm ; ε_p -平面应变(Plane Strain); Z -Zener-Hollomon 参数; T_{α} -绝对再结晶温度。

该式可用于 0.06% 铝镇静 LC 钢(Al-killed LC Steel)的再结晶。然而,这方面还须进一步的深入研究,必须考虑 AlN 沉淀的影响。还须指出的是,如果在铁素体和奥氏体两相区进行热加工,而铁素体百分数又比较低的情况下,铁素体和奥氏体两相区的相互作用对回复动力学有重要的影响。

在 840 °C 进行铁素体轧制时,发生动态再结晶;在较低的温度下进行铁素体轧制时,软化机理是动态回复^[18]。对 IF 钢冷轧后退火时的再结晶已经做了大量的研究。但是,对于铁素体区温轧时的物理冶金行为则研究的很少^[7]。

IF 钢在奥氏体区变形时呈现出典型的加工硬化和动态回复,而在铁素体区变形时,由于溶解的 Nb 阻止动态回复,变形较小时,由于不可移动位错的增加,就会引起流动应力的迅速、近似线性的增加。对于奥氏体区轧制,主要的软化过程是数秒内所发生的静态再结晶(Static Recrystallization),而对于铁素体区轧制,软化主要是回复引起的^[9]。在铁素体区精轧时,发生动态再结晶和随后的亚动态再结晶,并 1~3 μm 的超细铁素体晶粒(Ultrafine Ferrite Grain)^[11,12,17]。

IF 钢在铁素体区大变形后,产生细小的等轴晶粒,这种细小的等轴晶粒产生于由显微带发展而来的亚晶结构^[13,19-21]。

可以看出,关于铁素体轧制时的软化机理目前还没有一个统一的、公认的理论。

1.3 铁素体轧制产品组织和性能

深冲-深拉用热轧薄带的铁素体轧制工艺和性能已有较多研究^[22-29]。

对 6 道次 CSP 生产工艺低温轧制富 Nb Ti-Nb IF 钢和贫 Nb Ti-Nb IF 钢过程中的轧件显微组织的研究表明^[7],发现对于富 Nb Ti-Nb IF 钢,当变形温度在 800 °C 以上时,得到的组织为准等轴晶粒(Quasi-equiaxed Grain);当变形温度在 700 °C 以下时,组织结构特征是变形带(Deformation Band);当变形温度在 700 °C 以下时,在显微组织中出现准等轴晶粒簇(Quasi-equiaxed Grain Cluster)。而对于贫 Nb Ti-Nb IF 钢,即使变形温度低至 650 °C,组织特征仍然是准等轴晶粒。

IF 钢热加工温度分别为: 500, 600, 700, 770, 840, 950 °C 热连轧模拟试验得出^[19]: 变形温度较低时(500, 600 °C),变形后出现亚晶粒,变形温度为 700 °C 和 770 °C 时,也出现类似的微结构,但未

给出关于亚晶粒出现的精确的机理。变形温度为 840 °C 时,最终的组织为等轴晶粒,说明动态再结晶的影响。变形温度为 950 °C 时,最终的组织为大晶粒,说明静态再结晶的影响。在铁素体区温度范围内,随变形温度降低,强度指标增加(图 3)^[19],而塑性指标降低。

此外,Kaspar 教授等人进行了用铁素体加工

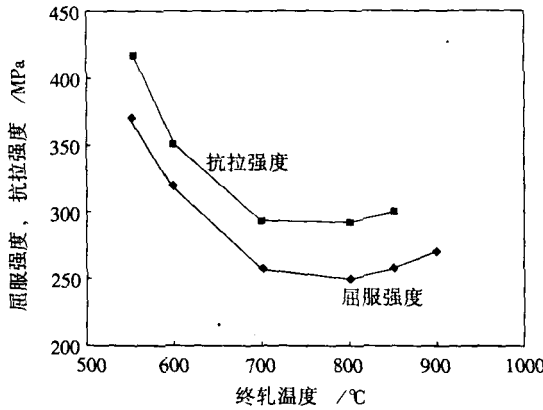


图 3 终轧温度对 IF 钢屈服强度和拉伸强度的影响
Fig.3 Effect of finishing temperature on yield strength and tensile strength of IF steel

工艺生产深冲钢板的研究^[22-27]。Leroy 教授等人也进行过有关铁素体轧制方面的研究^[28,29]。

2 国内研究现状

国内对铁素体轧制工艺的介绍和研究起步较晚^[30-33],近年来进行了铁素体轧制数字模型^[33-35]、IF 钢铁素体轧制后静态软化特性^[35,36]和铁素体轧制的流动应力的研究^[37],进行铁素体轧制时模型的修正,引入温度修正系数和再结晶修正系数,并对奥氏体轧制力模型进行了修正,以适应铁素体轧制的工艺条件,提高轧制压力预报模型精度^[34]。

3 铁素体轧制的应用

根据国外的研究结果,铁素体轧制工艺适用于低碳钢、超低碳钢和含 Nb、Ti、Cr、B 等合金元素的超低碳钢的生产,已经研究过的钢种化学成分见表 1^[7,18,19,38]。

关于铁素体轧制在工业生产中的应用情况,20 世纪 80 年代末,比利时钢铁研究中心成功地研究开发了铁素体低温热轧工艺,并将这种新工

表 1 铁素体轧制实验钢种化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of experiment steel grades for ferrite rolling / %

类别	C	Mn	Al	N	Ti	B	Cr	P	Nb
LC	0.020	0.12	0.048	0.0067	< 0.001	< 0.001	0.07	0.004	-
LC(Cr)	0.037	0.35	0.036	0.0012	< 0.001	< 0.001	0.48	< 0.001	-
LC(Cr, B)	0.034	0.33	0.028	0.0018	< 0.001	0.045	0.52	< 0.001	-
LC(Cr, B, Ti)	0.040	0.33	0.022	0.0045	0.014	0.0036	0.51	< 0.001	-
ULC(Nb, Ti)	0.003	0.17	0.027	0.0029	0.035	-	0.029	-	0.035
ULC(Nb, Ti)	0.003	0.18	0.054	0.0018	0.018	-	0.020	0.003	0.020
ULC(Ti)	0.006	0.19	0.040	0.0050	0.100	-	-	0.005	-

艺成功地应用于比利时的 Cockerill Sambre 钢厂,进行铁素体轧制工业化生产,目的是生产超薄规格(1.0 mm 以下)、具有良好深冲性能的热轧带钢,以取代部分冷轧产品。从那时起,该厂采用铁素体轧制工艺(低温轧制)生产的带钢不断增加,现在生产总量已经超过 300 万 t,年产量已经达到 50 万 t 的规模^[39]。

美国 LTV 钢公司于 1993 年开始了铁素体区热轧的工业试验并取得了工业化生产的成功经验;意大利 Arvedi 钢公司的 ISP 薄板坯连铸连轧机组采用铁素体轧制工艺生产的超薄规格热轧板卷具有与传统冷轧退火产品相当的组织 and 性能。其他如德国的 TKS 和 EKO、墨西哥的 HYLISA、泰

国的 NSM 等企业也都已采用铁素体轧制工艺进行工业化生产,并取得良好的经济效益^[30]。

国内目前只有宝钢 2 050 mm 热连轧机采用了铁素体轧制工艺,主要用于生产 IF 钢^[35]。唐钢也探讨了在薄板连铸连轧生产线进行铁素体轧制的可能性^[31],攀钢进行了铁素体区轧制工艺试验^[37]。但都没有形成规模生产。

近十多年来建成的 30 多条薄板坯连铸连轧生产线中,已部分采用了铁素体轧制工艺,特别是近年来建成或在建的第 2 代的薄板坯连铸连轧生产线无一例外都采用或预留了铁素体轧制工艺,如我国唐钢的 FTSR 机组、马钢和涟钢的 CSP 机组等。

4 结语

铁素体轧制(低温轧制)的研究和应用表明,该技术在 < 1.2 mm 的低碳钢和微合金化钢超薄热

轧带卷的生产中具有明显的节约能源和降低成本的优势,有相应装备条件的钢铁企业将逐步采用这一轧制技术。

参考文献

- Appell B. Ferrite Rolling. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1978(2):197
- Hayashi C, Okamoto T. Manufacture of Deep-drawing Sheet by Warm Rolling. *Sheet Metal Industries*, 1978(11):1234
- Barnert M R, Jonas J J. Influence of Ferrite Rolling Temperature on Microstructure and Texture in Deformed Low C and IF Steel. *ISIJ International*, 1997, 37(7):697
- Barnett M R and Jonas J J. Distinctive Aspects of the Physical Metallurgy of Warm Rolling. *ISIJ International*, 1999, 39(9):856
- Grossheim H, Schotten K and Bleck W. J. *Materials Process. Technol.*, 1996, 60, 609
- Satio Y. *Trans. Iron and Steel Institute of Japan*, 1987, 27, 419
- Huang C, Hawbolt E B, Chen X, et al. Flow Stress Modeling and Warm Rolling Simulation Behavior of Two Ti-Nb Interstitial-Free Steels in the Ferrite Region. *Acta Mater.* 2001, 49(8):1445
- Pan Y and Lenard J G. *Steel Research*, 1994, 65(6):248
- Bleck W. Processing, Properties and Fabrication of Ultra-Low-Carbon Steels. *ISS Continuing Education*. Indianapolis, IN, 1997, 3
- Doherty R D, Hughes D A, Humphreys F J, et al. *Materials of Science and Engineering*, 1997, A238, 219
- Najafi-Zadeh, Yue S and Jonas J J. Influence of Hot Strip Rolling Parameters on Austenite Recrystallization in Interstitial Free Steels. *ISIJ International*, 1992, 32(2):213
- Najafi-Zadeh A, Jonas J J and Yue S. *Metall. Trans. A*, 1992, 23A, 2607
- Matsubara Y, Tsuji N and Saito Y. *International Conference on Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials(THERMEC'97)*, ed. By T. Chandra and T. Sakai, TMS-AIME, Warrendale, PA, 1997, 654
- Baczynski J and Jonas J J. *Metall. Trans. A*, 1998, 29A, 447
- Cetlin P R, Yue S, Jonas J J, et al. *Metall. Trans. A*, 1993, 24A, 1543
- Langner H, Bleck W and Greisert C. *Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties*, 1, ed. By W. Bleck, Verlag Mainz, Aachen, 1998, 301
- Najafi-Zadeh A, Jonas J J and Yue S. *Mater. Sci. Forum*, 1993, 113, 441
- Cetlin P R, Yue S and Jonas J J. Simulated Rod Rolling of Interstitial Free Steels. *ISIJ International*, 1993, 38(4):488
- Akbari G H, Sellars C M and Whiteman J A. Microstructural Development during Warm Rolling of an IF Steel. *Acta Mater.* 1997, 45(12):5047
- Belyahov A, Kaibyshev R and Sakai T. *Metall. Mater. Trans. A*, 1998, 29A, 161
- Timokhina I B, Nosenkov A I, Humphreys A O, et al. Effect of Alloying Elements on the Microstructure and Texture of Warm Rolled Steels. *ISIJ International*, 2004, 717
- Tomitz A and Kaspar R. Deep-drawable Sheet of Steel Produced as Hot Strip by Ferritic Rolling. In: *Euromat*, 1999, 7:94
- Tomitz A and Kaspar R. Deep-drawable Thin-gauge Hot Strip of Steel as a Substitution for Cold Strip. *ISIJ Int.* 2000, 9, 927
- Kaspar R and Köthe A. *Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften* eines Neuen Mikrolegierten Schmiedestahls Mit Ferrit-Bainit/Martensit-Gefüge. In *Schlußbericht, VDEh-Gesellschaft für Förderung der Eisenforschung mbH, Düsseldorf* 2000, 1
- Kaspar R and Tomitz A. Ferritic Rolling to Produce Deep-drawable Hot Strips of Steel. In: *Proc. Metal 2000, May 2000, Ostrava, Czech Republic*.
- Kaspar R, Tosal-Martinez L, Richter J, et al. Eigenschaftspotential Von Mikrolegierten Stählen für Gesenkschmieden. *Stahl u. Eisen*, 2000, 10:95
- Kaspar R and Tomitz A. Ferritic Rolling in the Thin Slab Direct Rolling Technology. *Intern. Conf. on Thermomechanical Processing of Steels*, London 2000, 2:607
- Leroy V, Depaape A, Herman J C. Ferritic Hot Rolling of Thin Gauge Hot Strips: Processing and Properties. *International Symposium Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties*, RWTH, Aachen, Germany, March 30 - April 1, 1998, Proceedings pp.51
- Herman J C, Leroy V. Ferritic Hot Rolling and the Potential for Hot Rolled and Cold Rolled Products. *The Future of Flat Rolled Production*, Chicago, June 11, 1995, 2:6
- 毛新平. 薄板坯连铸连轧铁素体轧制工艺. *钢铁*, 2004, 39(5):71
- 陈礼斌, 李 芬, 齐长发. 薄板连铸连轧生产线中铁素体轧制工艺描述. *中国冶金*, 2003, 66(5):135
- 刘正东, 杨 钢, 房 昕, 等. 铁素体区热轧的研究与应用. *轧钢*, 2002, 19(2):37
- 刘正东, 董 瀚, 干 勇. 基于 CSP 铁素体轧制的数学模型. 2002 年广州连铸连轧国际会议论文集, 2002, 319
- 赵 昆, 何晓明, 吴景晖, 等. 铁素体轧制力模型的改进. *轧钢*, 2000, 17(2):8, 16
- 赵 昆, 王昭东, 吴景晖, 等. IF 钢铁素体区热变形后的静态软化行为. *钢铁研究学报*, 1999, 11(4):18
- 王昭东, 何晓明, 赵 昆, 等. Ti-IF 钢铁素体区热变形行为研究和 Zener-Hollomon 参数方程的建立. *材料科学与工艺*, 2000, 8(4):6
- 左 军. 超低碳钢热金属变形抗力研究及工业应用. *四川冶金*, 2002(3):7
- Mphreys A O, Lin D S, Totoghinezhad M R, et al. Effect of Chromium and Boron Additions on the Warm Rolling Behavior of Low Carbon Steels. *ISIJ International*, 2002, 42:52
- Neutjens J, De Ball J B, Harlet Ph, et al. The Use of Ferritic Rolling for the Production of Soft Steel Grades and Tin Plate Can Body Applications. *41ST MWSP CONF. PROC.*, ISS, 1999, VOL. XXXVII, 963.

徐 光(1961-),男,教授,1982年北京科技大学毕业,1987年武汉科技大学研究生毕业。从事金属加工工艺和组织性能研究。