

IF 钢罩式退火过程中再结晶组织与组织的演变

冯岩青^{1,2} 王福明¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 包钢技术中心,包头 014010)

摘要 研究了 IF 钢(/% : 0.005C, 0.02Si, 0.16Mn, 0.011P, 0.004S, 0.042Als, 0.061Ti, 0.003 1N) 0.8 mm 冷轧板在 500 ~ 800 °C 退火时的再结晶组织及组织,采用 X 射线衍射技术结合显微组织观察分析了 IF 钢罩式退火过程中 {111} 再结晶组织形成机制和显微组织演变规律。结果表明,随退火温度的升高,再结晶数量逐渐增多,640 °C 为实验钢实际再结晶温度,同时 {111} 再结晶组织强度亦逐渐增大, {111} 取向的晶粒主要在再结晶过程中形成,并在 {111} 取向晶粒长大过程中, γ 纤维组织之间也发生相互转化,主要由 {111} <112> 组织转变为 {111} <110> 组织。

关键词 IF 钢 退火 组织 再结晶 组织

A Study on Evolution of Recrystallization Structure and Textures in an IF Steel during Batch Annealing Process

Feng Yanqing^{1,2} and Wang Fuming¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technical Center, Baotou Iron and Steel Co Ltd, Baotou 014010)

Abstract The recrystallization structure and textures of an IF steel (/% : 0.005C, 0.02Si, 0.16Mn, 0.011P, 0.004S, 0.042Als, 0.061Ti, 0.003 1N) 0.8 mm cold-rolled sheet during annealing at 500 ~ 800 °C are studied and the forming mechanism of {111} recrystallization textures and evolution law of structure of IF steel during batch annealing process are analyzed by X-ray diffraction technique combined with microstructure observation. Results show that with increasing annealing temperature the recrystallized volume increases, the real recrystallization temperature of test steel is 640 °C, and with increasing annealing temperature the density of {111} recrystallized textures gradually increases, the {111} oriented grains mainly form during recrystallizing process and during growing process of the {111} oriented grains, the transfer between γ fiber textures occurs, it is mainly from {111} <112> texture transfers to {111} <110> texture.

Material Index IF Steel, Annealing, Structure, Recrystallization, Texture

无间隙原子(Interstitial Free)钢的特点是超低碳、微合金化、钢质纯净,由于具有优良的深冲性能,高的塑性应变比和高伸长率等特性,已在汽车工业上得到了广泛的应用^[1]。

IF 钢冷轧薄板的生产过程中,退火是较为关键的工艺环节。IF 钢冷轧后退火工序采用罩式退火工艺和连续退火工艺,满足各种规格的 IF 钢生产需要,退火过程中组织发生再结晶和退火组织等一系列变化,决定了 IF 钢深冲性能。因此,研究退火过程中钢组织、组织的变化规律,对提高 IF 钢的成形性能有着极为重要的实际意义。罩式炉退火是一个缓慢的连续加热过程,冷轧薄板的再结晶行为是在连续升温条件下进行的,而连续退火是在较快的升温速度下达到较高温度,仅保温几分钟后开始冷却,再结晶行为是在高温下用很短的时间快速完成的。

再结晶是金属材料最重要的物理冶金过程之一,再结晶退火也是工业上控制和改变金属材料组织、组织和性能的重要手段。薄板在退火过程中经历的回火、再结晶和晶粒长大 3 个过程都影响成品板

的性能,因而研究薄板退火过程的再结晶规律和测定再结晶组织对冷轧薄板生产具有重要的实际意义^[2]。

本文主要研究罩式退火过程中再结晶组织与组织演变规律,确定出该实验钢的再结晶温度,并研究随退火温度升高的过程中纤维组织的变化规律及组织的演变规律。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验用实际生产的 IF 钢冷硬钢板,冷硬板试样厚度为 0.8 mm。热轧及冷轧工艺参数为:加热炉保温温度(1 180 ± 15) °C、出炉温度(≥ 1 130 °C)、终轧温度(900 ± 15) °C、卷取温度(700 °C)、冷轧压下率 80%,化学成分如表 1。

1.2 实验过程

表 1 实验钢化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of test steel / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	N
0.005	0.02	0.16	0.011	0.004	0.042	0.061	0.003 1

本实验采用 RX2-8-10 型中温箱式电阻炉中进行。该箱式炉参数为:额定电压 380 V,额定功率 8 kW,额定温度 1 000 ℃。取冷轧板切成 20 mm × 20 mm(试样开缺口的一侧为轧向)的小块试样,其中升温速度通过设定由仪表自动控制。冷却方式均采用空冷,以保留钢中的再结晶组织。对处理后的试样进行显微维氏硬度测量、金相组织观察及织构测定。

退火实验具体工艺如图 1。试样采用两阶段升温,快速升温至 430 ℃,在 430 ~ 550 ℃ 以 80 ℃/h 升温,550 ℃ 以上以 35 ℃/h 随炉升温加热到不同退火温度后出炉空冷,退火温度分别为 500、550、600、620、640、660、680、700、720、800 ℃。

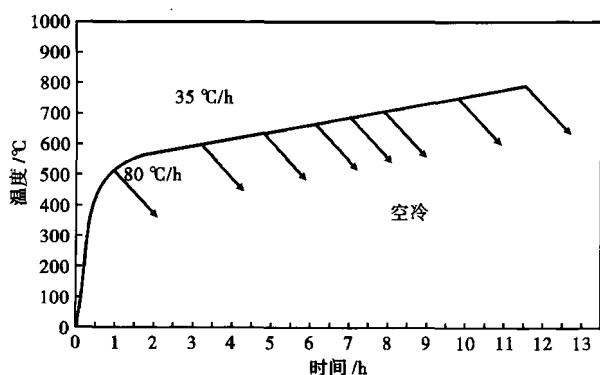


图 1 试验 IF 钢冷轧板的再结晶退火工艺

Fig. 1 Recrystallization annealing process of test IF steel cold-rolled sheet

1.3 检验方法

采用 HRS-150 数码维氏硬度计对处理后的试样进行硬度测量,每个试样测试 3 点。采用蔡斯光学显微镜对 Ti-IF 钢进行金相观察,试样抛光后采用 4% 的硝酸酒精侵蚀,观察试样平面为轧制试样纵截面(由轧向和法向构成的平面)。采用 X 射线衍射(XRD)方法对退火温度为 550、600、640、660、700、720、800 ℃ 的试样进行宏观织构的测量与分析,在退火板上截取 15 mm × 20 mm 的试样,用砂纸在轧面上打磨至厚度的 1/4 处,棉球蘸取硝酸酒精擦拭打磨后的试样磨面去应力,采用 X 射线衍射法对待测定表面测量 $\{110\}$ 、 $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 3 张不完整极图,然后计算出三维取向分布函数(ODF)。

2 实验结果与分析

2.1 再结晶过程纤维组织变化

再结晶退火后的硬度分布见图 2,由图 2 可以看出该钢板的再结晶过程明显的存在回复、再结晶

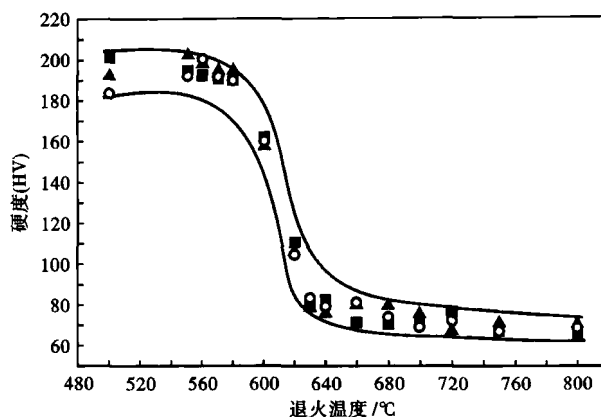


图 2 退火温度对试验 IF 钢冷轧板硬度的影响

Fig. 2 Effect of annealing temperature on hardness of test IF steel cold-rolled sheet

和晶粒长大 3 个阶段。

由图 2 可知,当温度高于 580 ℃ 时,钢板的硬度开始下降,当温度高于 600 ℃ 时,硬度急剧下降,说明此时钢板开始发生回复和再结晶过程;硬度值在 580 ~ 640 ℃ 下降很快,说明该温度区间内再结晶过程进行激烈,再结晶晶粒大量形核并长大;当温度超过 640 ℃ 后,曲线变得平稳,随温度的继续升高,硬度值下降不大,此时钢板内的冷加工组织已完全消除,晶粒已完成再结晶。以硬度下降一半作为该钢名义再结晶温度,则本次实验所测试样的名义再结晶温度为 620 ℃,实际再结晶温度为 640 ℃。

从图 3 中可以看出,500 ~ 600 ℃,退火板的组织形态与冷轧板组织基本相同,为沿轧向伸长的纤维状变形晶粒,基本没有再结晶形核,此阶段称之为回复阶段。温度升高到 620 ℃ 时,钢板内已有再结晶晶粒。温度继续升高到 680 ℃ 时,钢板内晶粒完成了再结晶,但此时的晶粒较细小,且不均匀,此阶段称为再结晶阶段。再结晶阶段中退火板组织形态发生了根本改变,变形晶粒完全被细小、等轴的晶粒取代。

当温度升高到 700 ~ 720 ℃ 时,晶粒继续长大,组织形态变化不大,此阶段称为晶粒长大阶段。从退火温度为 620 ~ 720 ℃ 的组织照片中可以看到,晶粒的形核是从腐蚀后颜色深的纤维处开始,在相同的腐蚀条件下,颜色深的晶粒取向储存变形能高于颜色浅的晶粒取向,该温度区域内晶粒形态不均匀且晶界模糊。而温度升至 800 ℃ 时,完成再结晶的晶粒变为等轴状,晶粒尺寸均匀化且晶界清晰。

2.2 再结晶过程织构的变化

图 4 为密度取向随退火温度变化的曲线,从 α 取向线(图 4a)上可以看出,随退火温度的升高,

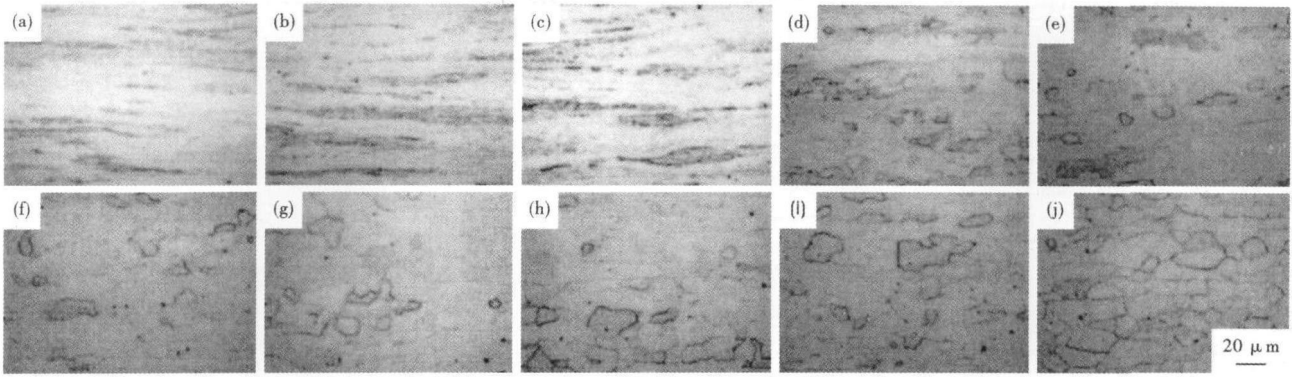


图 3 退火温度对试验 IF 钢冷轧板再结晶组织的影响, /°C : (a) 500; (b) 550; (c) 600; (d) 620; (e) 640; (f) 660; (g) 680; (h) 700; (i) 720; (j) 800

Fig. 3 Effect of annealing temperature on recrystallization structure of test IF steel cold-rolled sheet, /°C : (a) 500; (b) 550; (c) 600; (d) 620; (e) 640; (f) 660; (g) 680; (h) 700; (i) 720; (j) 800

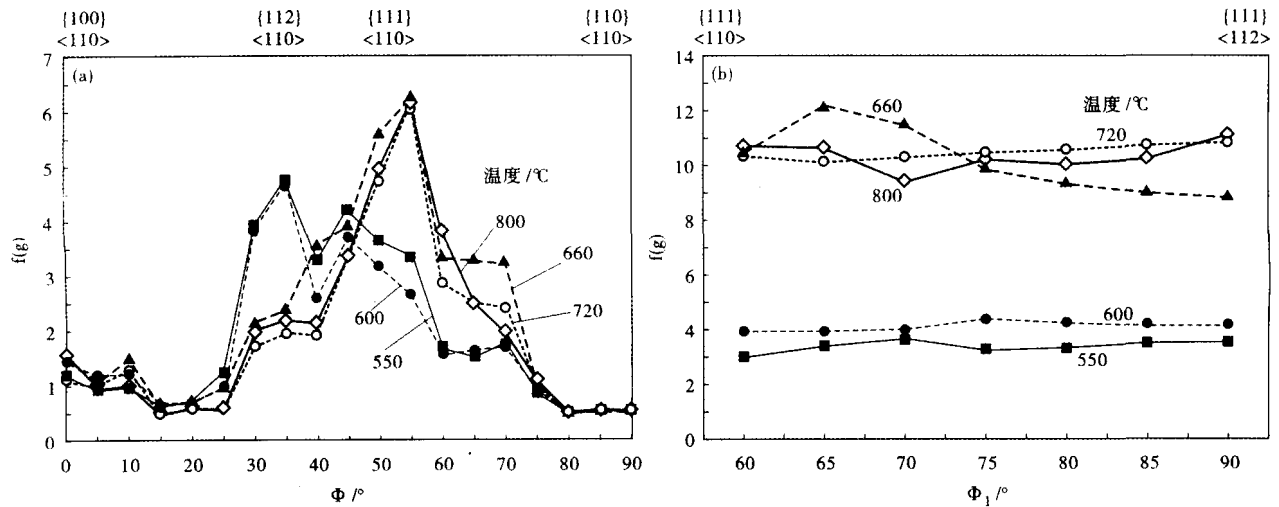


图 4 试验 IF 钢冷轧板密度取向随退火温度变化: (a) α 取向线; (b) γ 取向线

Fig. 4 Change of oriented intensity of test IF steel cold-rolled sheet with annealing temperature: (a) α oriented line; (b) γ oriented line

{100} <110> 织构取向密度变化不明显, 但 {111} <110> 织构强度逐渐增加, 同时 {112} <110> 织构强度不断降低, 即 α 纤维织构强度逐渐降低, {111} 织构强度逐渐升高。再结晶完成后 γ 纤维织构已占据主导地位, α 纤维织构已经比较弱了。图 4(b) 为 γ 取向线强度变化曲线, 同样可见再结晶初期 γ 纤维织构强度比较低, {111} 织构是随再结晶退火温度升高而逐渐增加的。

图 5 为不同退火温度恒 $\Phi = 45^\circ$ 的 ODF 截面图, 退火温度在 550 ~ 600 °C 时织构最大值出现在 {112} 织构位置处, 同时 {111} 织构密度较低, 随退火温度的升高, {112} 织构处密度降低, {111} 织构处密度逐渐增加, 即随再结晶过程的进行 {112} 织构取向晶粒不断减少并逐渐向 {111} 织构取向的晶粒转变。

在回复阶段, 如图 5(a) 所示, 试样中主要的织

构组分为 α 纤维织构, 强度值达到 5.459, 随保温温度的升高, 再结晶开始进行, γ 纤维织构的强度值由 550、600、640、660、700、720、800 °C 的 5.459、6.342、7.423、10.134、10.122、9.693 到 9.787, 如图 5(a) ~ (g)。可以看出, 当温度为 660 °C 时完成再结晶后随温度的升高 γ 纤维织构强度基本不变, 如图 5(d) ~ (g)。

从退火织构图中可以直观看出, 当温度高于 640 °C 时, 织构表现为强烈集中的 γ 纤维织构。再结晶组织的形成和发展是各种取向形成和生长的竞争过程, 冷轧 IF 钢再结晶退火后具有较强的 γ- {111} 纤维织构, γ- {111} 织构的形成机制观点主要有两种: 定向形核观点和选择生长观点。定向形核观点的研究者认为, IF 钢冷轧 γ- {111} 织构的形成经历了较为复杂的位错滑移过程, 使其具有较高的形变储能, 退火过程中, 这些高储能的晶粒将优先回

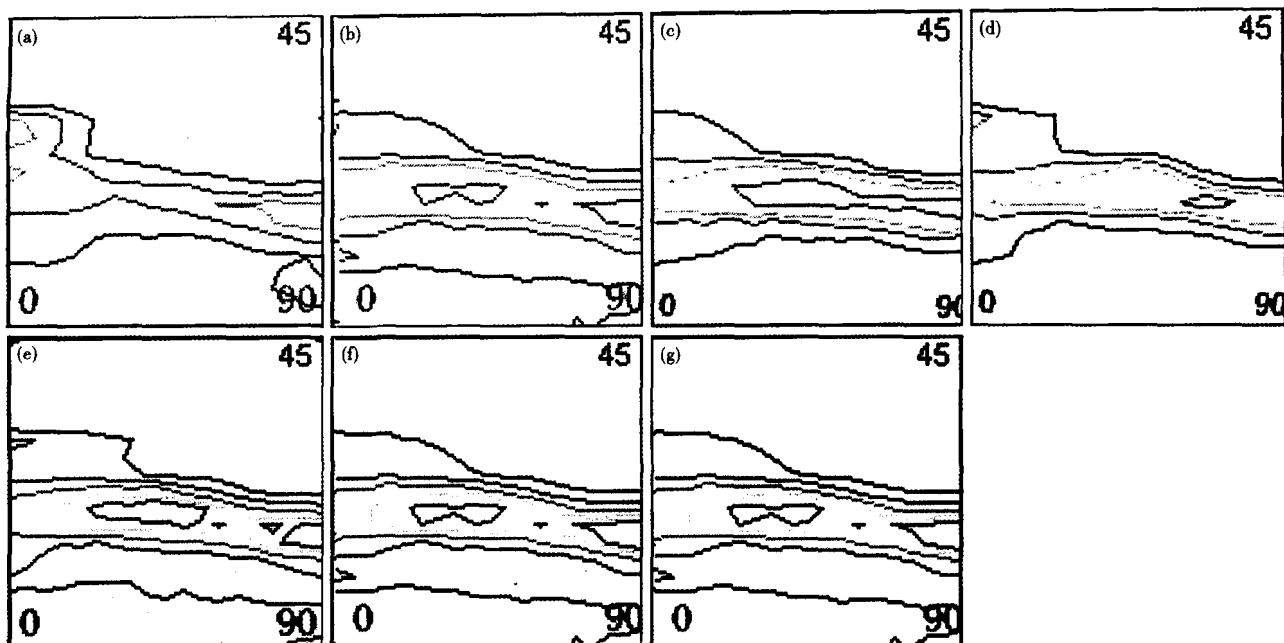


图 5 试验 IF 钢冷轧板 $\Phi_2 = 45^\circ$ 的 ODF(取向分布函数)截面图,退火温度/ $^\circ\text{C}$,最大织构密度:(a)550,5.459;(b)600,6.342;(c)640,7.423;(d)660,10.134;(e)700,10.122;(f)720,9.693;(g)800,9.787

Fig. 5 Orientation distribution function (ODF) sectional diagram of test IF steel cold-rolled sheet at $\Phi_2 = 45^\circ$, annealing temperature/ $^\circ\text{C}$, max texture intensity: (a) 550, 5.459; (b) 600, 6.342; (c) 640, 7.423; (d) 660, 10.134; (e) 700, 10.122; (f) 720, 9.693; (g) 800, 9.787

复并在原位形核,其后吞并其他取向的晶粒,使 γ - $\{111\}$ 织构加强;持选择生长观点的研究者认为,具有 γ - $\{111\}$ 取向的晶粒会优先长入 $\{112\}$ $\langle 110 \rangle$ 取向附近的形变基体,从而形成较强的 $\{111\}$ 再结晶织构^[3-7]。

3 结论

(1) 实验钢随炉升温的过程中,620 $^\circ\text{C}$ 为名义再结晶温度,该温度下硬度为冷硬板硬度的一半,640 $^\circ\text{C}$ 为实际再结晶温度,之后随退火温度的进一步提高,硬度下降不明显。

(2) 该 IF 钢中退火温度在 550 ~ 600 $^\circ\text{C}$ 时织构最大值出现在 $\{112\}$ 织构位置处,同时 $\{111\}$ 织构密度较低,随退火温度的升高, $\{112\}$ 织构处密度降低, $\{111\}$ 面织构处密度逐渐增加,即随再结晶过程的进行 $\{112\}$ 织构取向晶粒不断减少并逐渐向 $\{111\}$ 织构取向的晶粒转变,同时完成再结晶后随温度的升高 γ 纤维织构强度基本不变。

参考文献

- 1 李姚兵,周欢,苏岚,等. 超低碳 Ti + Nb-IF 钢组织与性能的研究[J]. 钢铁钒钛,2009,30(1):34- .
- 2 贺彤,刘沿东,蒋奇武,等. IF 钢冷轧及再结晶初期微观组织的 TEM 研究[J]. 材料与冶金学报,2007,6(4):285- .
- 3 于风云,王铁农,蒋奇武. 深冲 IF 钢再结晶 $\{111\}$ 纤维织构形成机制探讨[J]. 材料科学与工艺,2008,16(5):724-727.
- 4 Tes Y Y, Duggan B J. Orientation Imaging Microscopy Studies of Recrystallization in Interstitial Free Steel[J]. Metallurgical and Materials Transaction, 2006, A37:1055-1064.
- 5 Ghosh P, Ghosh C, Ray R K, et al. Precipitation Behavior and Texture Formation at Different Stages of Processing in an Interstitial Free High Strength Steel. Scripta Materialia, 2008, 59:276-278.
- 6 Ghosh P, Bhattacharya B, Ray R K. Comparative Study of Precipitation Behavior and Texture Formation in Cold Rolled-batch Annealed and Cold Rolled-continuous Annealed Interstitial Free High Strength Steels. Scripta Materialia, 2007, 56:657-660.
- 7 Ghosh P, Ray R K, Ghosh C, et al. Comparative Study of Precipitation Behavior and Texture Formation in Continuously Annealed Ti and Ti + Nb Added Interstitial-free High-strength Steels. Scripta Materialia, 2008, 58:939-942.

冯岩青(1977-),女,博士研究生,工程师,2002年西安工业大学毕业,板材产品研发。E-mail:fyq588@126.com

收稿日期:2012-06-2