

低碳 Cr-Mo 系深冲双相钢组织与织构演变

Microstructure and Texture Evolution of Low-carbon
Cr-Mo Deep Drawing Dual-phase Steel

汪志刚, 赵征志, 赵爱民, 叶洁云, 程俊业, 黄 耀

(北京科技大学 冶金工程研究院, 北京 100083)

WANG Zhi-gang, ZHAO Zheng-zhi, ZHAO Ai-min,

YE Jie-yun, CHENG Jun-ye, HUANG Yao

(Research Institute of Metallurgy Engineering, University of
Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

摘要: 通过组织观察以及 TEM 与 XRD 技术研究了低碳 Cr-Mo 系深冲双相钢组织与织构演变规律。结果表明:奥氏体未再结晶区终轧有利于形成 $\{112\}\langle 111\rangle$ 织构,冷轧过程中 $\{001\}\langle 110\rangle$, $\{112\}\langle 110\rangle$ 与 $\{223\}\langle 110\rangle$ 织构稳定增加,退火过程中形成有利于深冲性能的 $\langle 111\rangle//\text{ND}$ 以及 $\{554\}\langle 225\rangle$ 与 $\{332\}\langle 113\rangle$ 织构;820℃ 与 860℃ 临界区退火后 γ 纤维织构密度差异较小,但是高温退火增大 $\{111\}\langle 110\rangle$ 与 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构的取向密度差值,归因于贝氏体中的固溶碳以及贝氏体相变时的变体选择;高温卷取能诱发热轧板中 Mo 基碳化物粒子析出,并在退火保温过程中回溶,既能发展再结晶织构,又能促进第二相形成。

关键词: 深冲双相钢;显微组织;力学性能;织构; r 值

中图分类号: TG115.2;TG142.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)12-0089-06

Abstract: Microstructure and texture evolution of low-carbon Cr-Mo deep drawing dual-phase steel were investigated by using microstructure observation, TEM and XRD. The results show that, the finish-rolling process conducted in austenite no-recrystallization zone promoted the formation of $\{112\}\langle 111\rangle$ component. The intensity of $\{001\}\langle 110\rangle$, $\{112\}\langle 110\rangle$ and $\{223\}\langle 110\rangle$ orientations were steadily enhanced during cold rolling. The formation of sharper $\langle 111\rangle//\text{ND}$, $\{554\}\langle 225\rangle$ and $\{332\}\langle 113\rangle$ textures during annealing was favorable to improve the deep draw-ability of dual-phase steel. When intercritical annealed at 820℃ and 860℃, the intensity of γ -fibre was slightly different. The difference of intensity between $\{111\}\langle 110\rangle$ and $\{111\}\langle 112\rangle$ texture tended to increase at high-temperature annealing, causing by the solution-carbon of bainite and the variant selection from austenite to bainite. The high-temperature coiling process induced precipitation of Mo-based carbide in hot-rolled strips, and re-dissolution during the holding stage in annealing process, which not only facilitated the formation of recrystallization textures, but also improved the second phase transformation.

Key words: deep drawing dual-phase steel;microstructure;mechanical property;texture; r value

近些年来,冷轧双相钢在汽车用钢中被广泛使用,软的铁素体基体与硬质马氏体相在双相钢的变形协调与强塑性增加过程中发挥着显著作用,其优异的力学性能表现在高的初始加工硬化率、低屈强比、最佳的强塑性配合以及非时效性等^[1]。然而,双相钢的深冲性能较差,其塑性应变比(r 值)一般小于 1.1,难以满足乘用车外板以及冲压性能要求较高的覆盖件的生产^[2]。W. B. Hutchinson^[3]与赵镶^[4]指出如果铁素体基体中存在大量的固溶碳,将会阻碍钢中有利织构

$\langle 111\rangle//\text{ND}$ 的发展,而且在变形或再结晶过程中,硬质第二相易使相邻的软相发生不均匀变形而导致随机取向的产生。通过在临界区退火前增加预退火工艺可以改善双相钢的深冲性能,然而投资成本较高^[5]。利用连续退火工艺生产超深冲双相钢,国内外相关报道较少,对于其织构控制机理仍需进一步探索与研究。

实验室设计了 C-Mn-Cr-Mo 系双相钢,力求通过一系列织构控制手段,如高温终轧、高温卷取和添加低

温固 C 的合金元素等,达到优化双相钢织构,提高其深冲性能的目的。本工作利用 SEM 与彩色金相技术分析了热轧板与退火板的组织形貌,并测试了力学性能,揭示了热轧与退火工艺对于织构演变的影响。观察第二相粒子的析出行为,分析其对再结晶织构的影响。采用 XRD 检测技术研究了从热轧到冷轧再到热处理过程中织构的演变规律。

1 实验材料及方法

实验用钢采用 50kg 真空感应炉冶炼成铸锭,具体化学成分如表 1 所示(质量分数/%)。利用热膨胀仪测得加热过程中的静态相变点温度 A_{c1} (奥氏体转变开始)与 A_{c3} (奥氏体转变结束)温度分别为 789℃ 与 926℃。铸锭锻造成规格为 130mm×100mm×30mm 的钢坯再加热到 1200℃ 保温 2h 进行热轧,开轧温度 1150℃,终轧温度设定在 T_{nr} (奥氏体未再结晶温度)与 A_{r3} (铁素体相变开始温度)之间,为 910℃,热轧经 5 道次轧到 4mm 厚,水冷到 700℃ 后入炉保温 2h 随炉冷。热轧板冷轧到 1.2mm 厚,沿轧向切割成 220mm×70mm 的试样在 CCT-AY-II 型连续退火模拟器上进行连续退火实验,将试样以 10℃/s 分别加热到 800、820、840℃ 和 860℃ 保温 80s 后,先以 5℃/s 缓冷到 700℃,再以 45℃/s 快冷到室温。实验工艺示意图如图 1 所示。

选用 Leprea 试剂对退火板试样进行彩色染色,并

表 1 实验钢的化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of tested steel(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S	Als	Cr	Mo	Fe
0.019	0.048	1.500	0.015	0.007	0.310	0.110	0.250	Bal

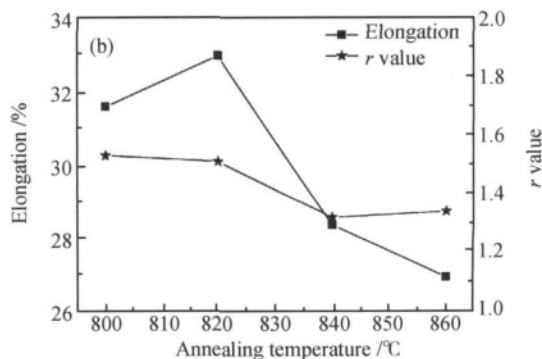
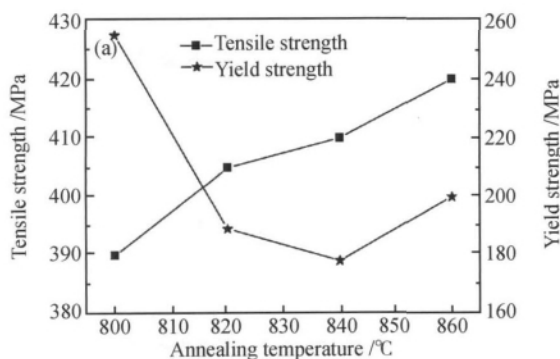


图 2 不同退火温度下实验钢的力学性能 (a)抗拉强度与屈服强度;(b)伸长率与 r 值

Fig. 2 The mechanical properties of tested steels at different annealed temperatures

(a)tensile strength and yield strength;(b)elongation and r value

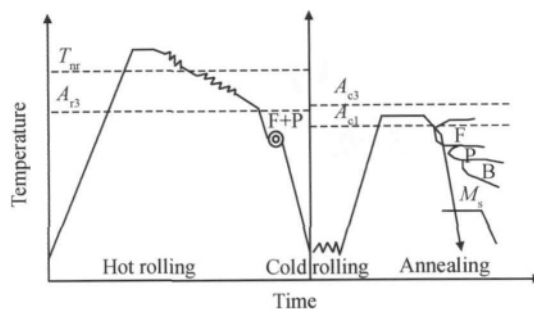


图 1 实验钢制备工艺示意图

Fig. 1 The experimental process schematic diagram of tested steels

采用光学显微镜与 ZEISS SUPRA55 型场发射扫描电镜观察显微结构,并结合 Image-pro-plus 软件统计平均晶粒尺寸与体积分数;利用薄膜复型萃取技术制取热轧板析出观察试样,并在 HT-800 型透射电镜上观察析出粒子形貌与分布位置;XRD 织构测试在 D5000 型 X 射线织构分析仪上进行,热轧板、冷轧板与退火板织构测量位置为距离试样表面 1/4 厚处,通过扫描 $\{110\}$, $\{200\}$ 和 $\{211\}$ 不完整极图来计算取向密度分布函数图(ODF),结果以恒 $\varphi_2 = 45^\circ$ 截面图表示;室温拉伸实验在 MTS810 上进行。

2 结果与分析

2.1 组织性能表征

图 2 给出了实验钢在不同退火温度下的主要力学性能结果,从图 2(a)看出,随着退火温度的上升,抗拉强度逐渐增加,屈服强度呈下降的趋势,高温退火时略有上升。图 2(b)反映出伸长率与 r 值均随退火温度的上升有下降的趋势。820℃ 退火时能够得到综合性能优异的深冲双相钢,其抗拉强度大于 400MPa,伸长率超过 32%, r 值达到 1.5。

图 3 为经 Leprea 试剂着色后退火板的组织形貌, 低温退火时铁素体基体上附着细小的亮白色岛状马氏体相(图 3(a), (b)), 高温退火时马氏体量减少, 硬质相主要为较大颗粒的贝氏体相(图 3(c), (d))。800℃ 与 820℃ 退火时马氏体的体积分数约占 1.6%, 铁素体晶粒的平均晶粒直径约为 21μm, 840℃ 和 860℃ 退火后得到的铁素体晶粒更加均匀, 贝氏体体积分数约占 7.2%。随着退火温度的升高, 奥氏体晶粒变大且体积

分数增多, 合金元素与 C 扩散更均匀, 同时平均 C 含量会下降, 导致过冷奥氏体的淬透性降低, 从而在冷却过程中较易相变为贝氏体组织^[6]。随着硬质相体积分数的增多, 且晶粒尺寸的均匀化程度增高, 双相钢抗拉强度增加(图 2(a)), 然而, 当硬质相由均匀细小的马氏体相变为较大尺寸的贝氏体相时, 两相之间的变形协调能力会下降, 导致其伸长率呈下降趋势(图 2(b))。

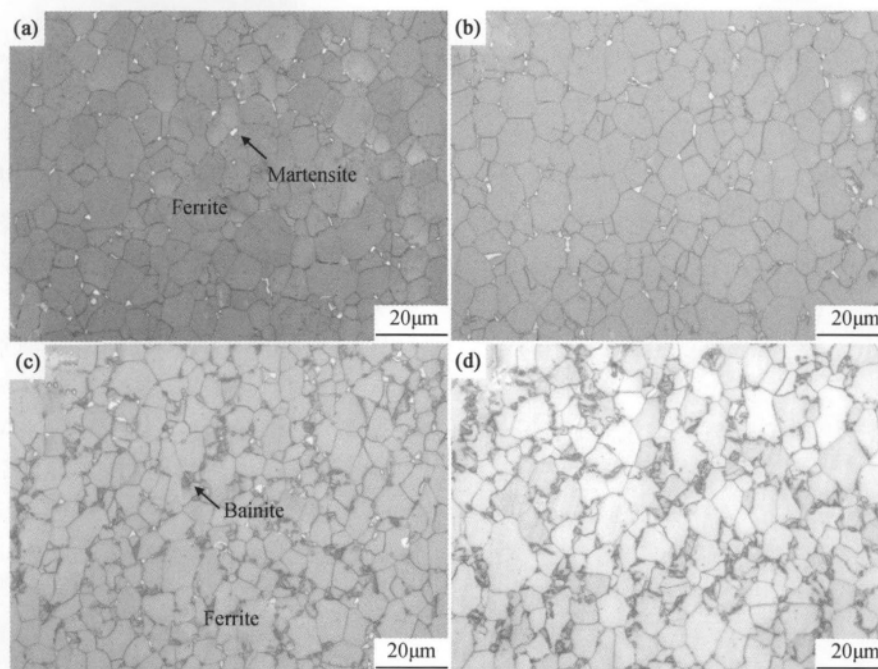


图 3 不同温度下退火板的组织形貌 (a)800℃; (b)820℃; (c)840℃; (d)860℃

Fig. 3 Microstructures of annealed sheets at different temperatures (a)800℃; (b)820℃; (c)840℃; (d)860℃

实验钢中 Mo 的添加是优化热轧板与退火组织的又一重要举措。碳氮化物第二相粒子的析出可以有效减少铁素体基体中的固溶 C, 从而发展〈111〉//ND 织构^[7,8]。热轧板中观察到沿铁素体晶界及晶内有纳米级的粒子析出, 能谱结果表明该析出为 Mo 基碳化物, 其中 Cu 峰是由于萃取复型的铜网所致(图 4)。该类第二相粒子的析出不仅可以提高热轧板与退火板的力学性能, 更重要的是可以减少后续退火过程中铁素体再结晶时固溶 C 对织构的不利影响。利用 JMatpro-v5 软件计算实验钢中 $M_{23}C_6$ 与 $M_{23}C_6$ 型粒子析出的静态热力学曲线, 结果如图 5 所示, 当温度升到 670℃ 时, 两种碳化物粒子均可完全回溶, 从而向奥氏体中充分排 C, 提高其淬透性。可以看出, 在铁素体完成再结晶前, 部分 C 原子是被 Mo 与 Cr 固定住的, 有利于〈111〉//ND 再结晶织构充分发展, 而在退火保温阶段, 该类第二相粒子的回溶适时提供了一定量的 C 原子, 保证最终形成了一定量的

马氏体相。

2.2 织构演变规律

R. K. Ray 和 J. Jonas^[9-11]指出热轧过程中奥氏体与铁素体的再结晶织构、形变织构, 以及奥氏体在相变过程中的变体选择都会对后续的冷轧板和退火板织构产生一定影响。本工作中, 热轧采用奥氏体未再结晶区(T_{nr} 以下)精轧, 奥氏体来不及发生再结晶, 主要形成形变织构, 如黄铜织构($\{110\}\langle112\rangle$), 铜型织构($\{112\}\langle111\rangle$), S 织构($\{123\}\langle634\rangle$), 以及较弱的立方织构($\{001\}\langle110\rangle$), 这些织构部分会遗传到热轧板中^[9], 如图 6(a) 所示。热轧板中形成的 γ 纤维织构($\langle111\rangle$ //ND), 主要是因为奥氏体在相变成为铁素体和珠光体过程中产生的变体选择, Butron-Guillen 等人^[12]总结出母相奥氏体与新相铁素体之间满足 K-S 关系的 24 种变体选择($\{111\}_{fcc} // \{110\}_{bcc}$, $\langle110\rangle_{fcc} // \langle111\rangle_{bcc}$), 铁素体中的〈111〉〈110〉与〈111〉〈112〉织构分别由奥氏体中的高斯织构($\{110\}\langle001\rangle$)与黄铜织构

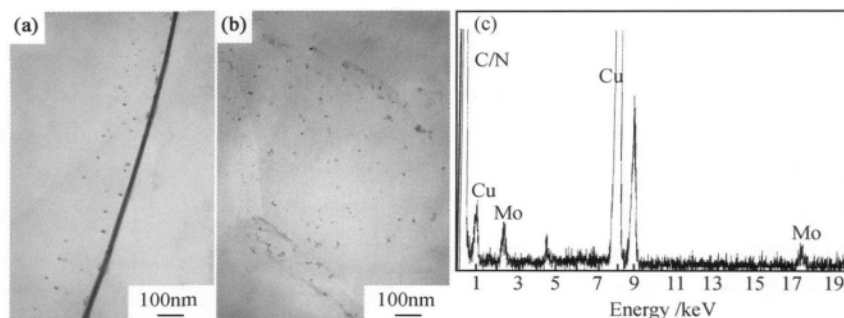


图 4 热轧板中析出的 Mo_2C 粒子 (a)晶界析出;(b)晶内析出;(c)能谱

Fig. 4 The precipitation of Mo_2C in hot-rolled plate (a)along grain boundary;(b)intra-granular ferrite;(c)energy spectrum

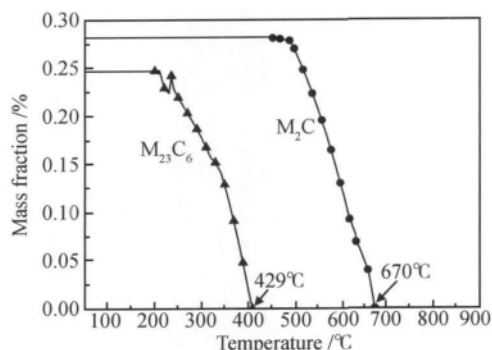


图 5 M_2C 与 M_{23}C_6 型粒子的析出热力学曲线

Fig. 5 The thermodynamic curves of M_2C and M_{23}C_6 precipitation

演变而来。经冷轧后,立方织构与 $\{001\}\langle 110\rangle-\{223\}\langle 110\rangle$ 组分明显增强,同时 γ 纤维织构最高强度也由热轧板的 9.6 增加 12.4(图 6(b))。图 6(c),(d)反映出 γ 纤维织构经退火后达到最强,820°C 与 860°C 退火后试样的织构强度差异不大,分别为 14.4 与 14.7。较为明显的是 820°C 时有较弱的高斯织构产生。高斯织构属于一种剪切织构,在冷轧和退火过程中易在剪切带或变形带位置形核长大。与 820°C 相比,860°C 退火时试样的铁素体晶粒更加均匀,且试样中第二相为贝氏体,在变形和再结晶过程中更不易产生剪切带或变形带,因此高温退火可以减弱高斯织构^[13]。

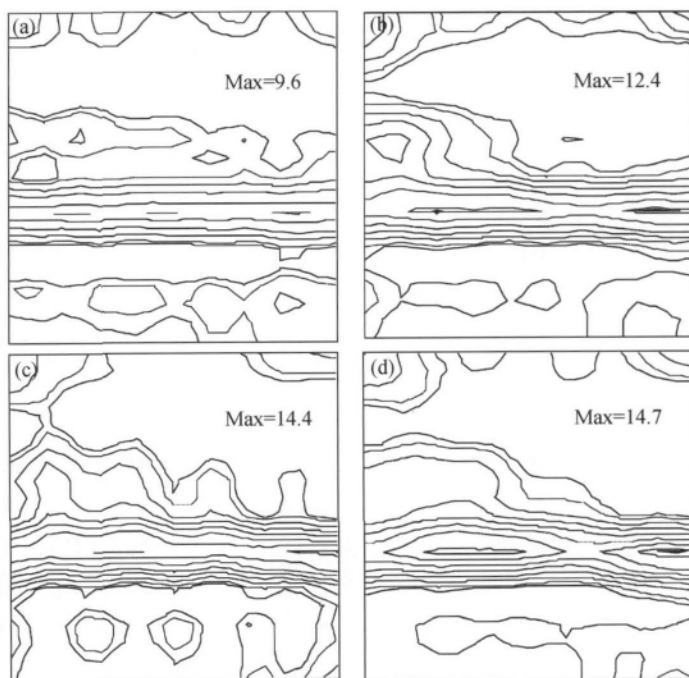


图 6 实验钢板织构的 $\varphi_2=45^\circ$ 的 ODF 截面图 (a)热轧板;(b)冷轧板;(c)820°C 退火板;(d)860°C 退火板

Fig. 6 The $\varphi_2=45^\circ$ section ODF textures of experimental steel sheets

(a)hot-rolled plate;(b)cold-rolled plate;(c)annealed at 820°C;(d)annealed at 860°C

为了更充分地说明从热轧板到退火板织构的演变

规律,图 7 给出了不同工艺下 α 取向线、 γ 取向线与 ϵ

取向线上的组织变化规律。图 7(a) 表明, $\{001\}\langle 110 \rangle$, $\{112\}\langle 110 \rangle$ 与 $\{223\}\langle 110 \rangle$ 取向, 经冷轧后明显增强, 该结果与 Inagaki^[13] 的研究一致, 说明铁素体在冷轧过程中, 晶粒会沿着某条路径发生转动, 即 $\{001\}\langle 100 \rangle \rightarrow \{001\}\langle 110 \rangle \rightarrow \{113\}\langle 110 \rangle \rightarrow \{112\}\langle 110 \rangle \rightarrow \{223\}\langle 110 \rangle$ 取向转动, $\{001\}\langle 110 \rangle - \{223\}\langle 110 \rangle$ 组分在冷轧中之所以成为稳定取向, 是因为它们晶粒的平均取向差 (GAM) 随应变的增加程度远小于 γ 纤维组织^[14], GAM 值越小晶粒越不易发生转动。图 7(b) 表明热轧板中的铜型组织 ($\{112\}\langle 111 \rangle$) 强度经冷轧后明显降低, 退火后完全消失, 这是因为 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 取向在冷轧中会转变为 $\{113\}\langle 110 \rangle$ 取向, 且在一定精轧温度下还会转变为 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 与 $\{223\}\langle 110 \rangle$ 取向^[9]。另外, $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{554\}\langle 225 \rangle$ 以及 $\{332\}\langle 113 \rangle$ 取向经冷轧与退火后显著增强, 这是因为硬质相周围的软相在变形过程中很容易形成剪切带和变形带, 这些变形能较高的地方将成为 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 晶粒优先形核的部位^[15]。Barrent 提出的取向生长理论认为与原晶粒间

符合一定取向关系的新晶粒会优先生长, 如形变组织 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 与再结晶组织 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 之间存在 $\langle 110 \rangle$ 27° 关系的高迁移率, 因此冷轧板中较高密度 $\{112\}\langle 110 \rangle$ 取向会在退火后形成高密度的 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 取向^[10]。关于 $\{332\}\langle 113 \rangle$ 与 $\{554\}\langle 225 \rangle$ 取向的形成, 可以归结为, 一方面, 由于热轧板中形成的黄铜组织 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 经变体选择而形成, 并在冷轧中被稳定增加, 另一方面, 高密度的 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 取向晶粒可以通过“原位”方式在其 20° 的切变带内形成 $\{554\}\langle 225 \rangle$ 取向^[16]。从 r 值表征结果来看, $\{554\}\langle 225 \rangle$ 与 $\{332\}\langle 113 \rangle$ 取向有利于改善双相钢的深冲性能。从图 7(c) 中可以看出, 从热轧板到退火板, γ 纤维组织强度依次增加。退火过程中再结晶组织的形成与冷轧形变储能有关, 研究表明^[10], 不同取向晶粒的形变储能的分布关系为: $E_{\{110\}\langle 001 \rangle} < E_{\{001\}\langle 110 \rangle} < E_{\{111\}\langle 112 \rangle} < E_{\{111\}\langle 110 \rangle} < E_{\{110\}\langle 110 \rangle}$, $\{110\}$ 晶粒虽然储能大, 但是数量少, 最终的再结晶组织是形成最快、数量最多的 $\{111\}$ 组分占优势, 因此退火后, γ 纤维组织会逐渐吞噬 α 纤维组织而得到充分发展。

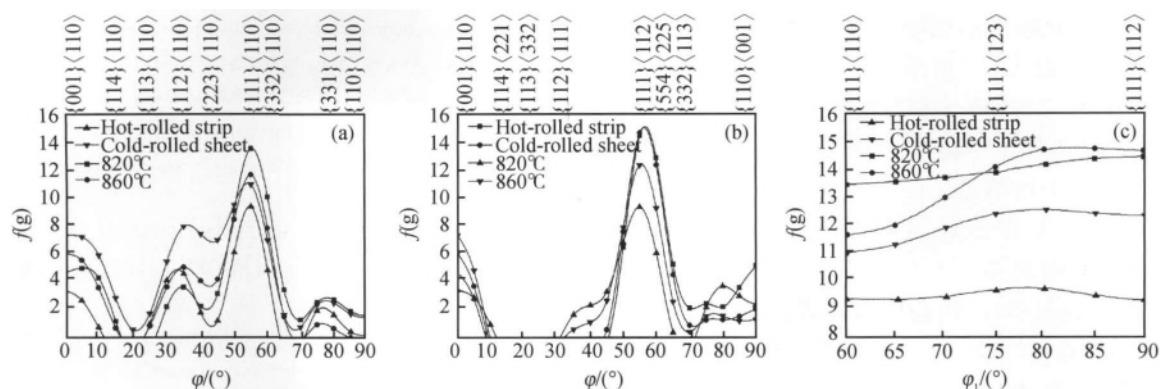


图 7 不同工艺下的取向分布图 (a)沿 α 取向线; (b)沿 ϵ 取向线; (c)沿 γ 取向线

Fig. 7 Distribution of oriented line density during different process (a) α orientation line; (b) ϵ orientation line; (c) γ orientation line

值得注意的是, 退火温度从 820°C 到 860°C , $\{111\}\langle 110 \rangle$ 取向明显降低, $\{111\}\langle 110 \rangle$ 与 $\{111\}\langle 112 \rangle$ 取向密度差值增大。这可能会导致双相钢的平面异性指数 (Δr) 值增大, 冲压过程中很容易出现制耳^[16]。对于 γ 纤维组织在临界区退火中的发展, 主要与两个方面因素有关, 一是原铁素体基体中已经形核的 $\{111\}$ 取向晶粒的选择生长, 另一个是非 $\{111\}$ 取向晶粒在相变过程中的定向形核^[17]。为了探究两种退火温度下 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 取向的分布原因, 利用纳米压痕仪表征了不同退火温度下铁素体基体的纳米硬度与弹性模量, 因为该两性能参数可以间接反映出不同组织的组织差异, 这与组织中的固溶 C 含量有关^[18]。测试结果如图 8 所示。 820°C 退火后试样的硬度与弹性模量分别为 226.8 GPa 与 1.99 GPa , 860°C 时为 238.9 GPa 与

2.02 GPa , 两退火温度下试样的铁素体基体的性能差别不大, 而且从图 6(c), (d) 也可看出两种温度下的 γ 纤维组织密度最大值也非常接近。因此说明两种不同程度的奥氏体化过程对于铁素体基体的性能影响较小, 相变过程中非 $\{111\}$ 取向晶粒的转变对于 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 取向密度的变化会产生更大的影响。 860°C 退火时, 奥氏体向贝氏体转变, 符合 Bain 关系的变体^[19], 即 $\{001\}\gamma // \{001\}_{\text{bainite}}$, $\{100\}\gamma // \{110\}_{\text{bainite}}$, 该变体选择区别于马氏体相变 (K-S 关系), 它不利于 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 取向晶粒的形核, E. Emadoddin^[20] 等研究 TRIP 钢的相变组织得出, 更高温度的临界区退火会产生更复杂的变体选择, 对 γ 纤维组织的发展带来不利影响。赵镶等^[4] 指出当 C 含量超过 $20 \times 10^{-4} \%$ (质量分数) 时, C 对 $\{111\}\langle 110 \rangle$ 取向晶粒生长的阻碍作用

远远大于对 $\{111\}\langle 112\rangle$ 取向的影响,与 820°C 退火时得到的少量的细小的马氏体相比, 860°C 退火时较多的

富 C 贝氏体相对 $\{111\}\langle 110\rangle$ 织构的发展会有更强的抑制作用。

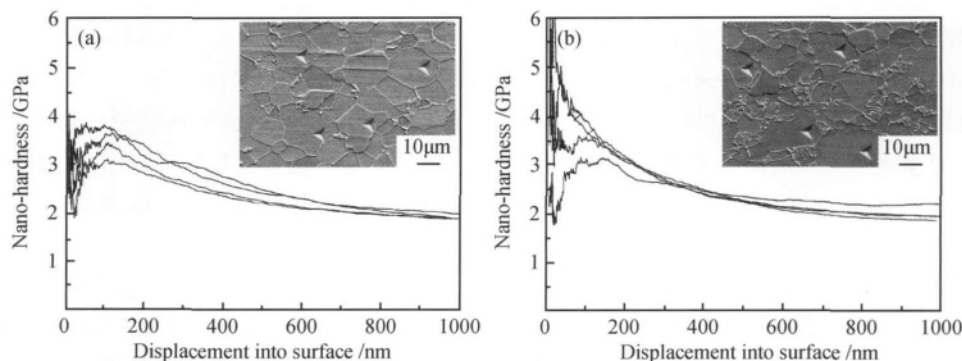


图 8 不同退火温度下的纳米压痕结果 (a) 820°C ; (b) 860°C

Fig. 8 Results of nano-indentation with different annealed temperatures (a) 820°C ; (b) 860°C

3 结论

(1) 实验室成功制备了铁素体加马氏体双相组织的深冲钢,随着退火温度上升,马氏体量减少,贝氏体量逐渐增多,抗拉强度明显增加,伸长率和 r 值呈下降趋势。经 820°C 退火,双相钢组织中铁素体平均晶粒尺寸约为 $21\mu\text{m}$,马氏体体积分数为 1.6% ,其抗拉强度大于 400MPa ,伸长率超过 30% , r 值达到 1.5 。

(2) 奥氏体未再结晶区终轧有利于形成铜型织构 ($\{112\}\langle 111\rangle$),并在冷轧过程中会向 $\{001\}\langle 110\rangle$ - $\{223\}\langle 110\rangle$ 织构转变,退火后消失。退火过程中, $\{001\}\langle 110\rangle$ - $\{223\}\langle 110\rangle$ 织构明显减弱,且形成强烈的 $\langle 111\rangle//\text{ND}$, $\{554\}\langle 225\rangle$ 与 $\{332\}\langle 113\rangle$ 织构。高温退火能减弱高斯织构 ($\{110\}\langle 001\rangle$),但会增大 $\langle 111\rangle$ 与 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构的取向密度差值。

(3) 高温卷取有利于钢中 Mo 基碳化物析出,并在退火过程中表现出低温析出高温固溶特性,充分发展了 $\langle 111\rangle//\text{ND}$ 织构,并促进一定量马氏体相的形成。

参考文献

- [1] 康永林. 新一代汽车用先进高强钢的成形与应用[J]. 钢铁, 2010, 45(8): 1-6.
- [2] HAN S H, CHOI S H, CHOI J K, et al. Effect of hot-rolling processing on texture and r -value of annealed dual-phase steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(7-8): 1686-1694.
- [3] HUTCHINSON W B. Development and control of annealing textures in low-carbon steels[J]. International Materials Reviews, 1984, 29(1): 25-42.
- [4] 赵骧, 閔史江, 伊藤邦夫, 等. 高纯超低碳深冲钢板的固溶碳含量对再结晶 γ 织构的影响[J]. 金属学报, 1995, 31(6): 262-265.
- [5] HU H. Studies on the development of high-strength dual-phase

steel sheets with high r_m values[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1982, 13(7): 1257-1262.

- [6] 马鸣图, 吴宝荣. 双相钢的物理与冶金[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [7] KANG J Y, LEE H C, HAN S H. Effect of Al and Mo on the textures and microstructures of dual phase steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 530(15): 183-190.
- [8] YOSHIDA H, OKUDA K, KAWABE H, et al. Effect of niobium addition on the texture formation of high strength cold-rolled low carbon steel sheets[J]. Materials Science Forum, 2007, 558-559: 425-430.
- [9] RAY R K, JONAS J J, BUTRON-GUILLEN M P, et al. Transformation textures in steels[J]. ISIJ International, 1994, 34(12): 927-942.
- [10] RAY R K, JONAS J J. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steel[J]. International Materials Reviews, 1994, 39(4): 129-172.
- [11] RAY R K. Orientation distribution function analysis of texture in a dual-phase steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 1986, 77: 169-174.
- [12] BUTRON-GUILLEN M P, JONAS J J, RAY R K. Effect of austenite pancaking on texture formation in a plain carbon and a Nb microalloyed steel[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1994, 42(11): 3615-3627.
- [13] INAGAKI H. Fundamental aspect of texture formation in low carbon steel[J]. ISIJ International, 1994, 34(4): 313-321.
- [14] KANG J Y, BACROIX B, REGLE H, et al. Effect of deformation mode and grain orientation on misorientation development in a body-centered cubic steel[J]. Acta Materialia, 2007, 55(15): 4935-4946.
- [15] NAGATAKI Y, HOSOYA Y. Origin of the recrystallization texture formation in an interstitial free steel[J]. ISIJ International, 1996, 36(4): 451-460.
- [16] 杨平, 李志超, 毛卫民, 等. 钢中 $\{111\}\langle 112\rangle$ 再结晶织构的形成[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 46-52.

(下转第 101 页)

- potential of alkanethiol self-assembled monolayers with different chain lengths on a gold substrate[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2010, 26(8): 2211—2216.
- [32] 郑文娟. 铜、铁表面组装磷酸酯类缓蚀功能分子膜实验技术和研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [33] 刘星辉, 唐东升, 曾春来, 等. 化学气相沉积法制备氧化锡自组装纳米结构[J]. *物理化学学报*, 2007, 23(3): 361—366.
- [34] 唐丽娜. 铜、Q235 钢表面自组装缓蚀功能膜的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008.
- [35] 杨武, 裴奔, 郭昊, 等. 十二羟基硬脂酸的醇溶液浸泡金属片引发的超疏水性[J]. *西北师范大学学报*, 2011, (3): 54—59.
- [36] 张蕊. 甲基咪唑等含氮杂环缓蚀剂在金属表面自组装膜构效关系的研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2010.
- [37] YANG Hai-feng, FENG Jie, LIU Yan-li, et al. Self-assembled monolayers of inositol hexaphosphate on the roughened surface of an iron electrode: investigation by surface-enhanced Raman scatterings spectroscopy [J]. *Jornal of Raman Spectroscopy*, 2005, 36(8): 824—828.
- [38] 李道华, 叶向荣, 忻新泉, 等. 用 XPS 和 AES 研究 MoS_4^{2-} 在钢铁表面的配位化学反应[J]. *西昌师专学报*, 1998, (1): 34—37.
- [39] 柴成文, 路民旭. 改性咪唑啉缓蚀剂对碳钢 CO_2 腐蚀产物膜形貌和力学性能的影响[J]. *材料工程*, 2007, (1): 29—33.
- [40] ZHANG Jun, QIAO Gui-min, HU Song-qing, et al. Theoretical evaluation of corrosion inhibition performance of imidazoline compounds with different hydrophilic groups [J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(1): 147—152.
- [41] PAN Yong, ZHAO Jian-jun, LIU Wei-wei, et al. Study of SAW DMMP sensor by self-assembled method [J]. *Chemical Sensors*, 2004, 24(2): 46—50.
- [42] 孔德生, 万立骏, 陈慎豪, 等. 电化学 STM 技术在金属腐蚀科学中的应用及研究进展[J]. *化学进展*, 2004, (3): 16—21.
- [43] BHANDARI HEMA, CHOUDHARY VEENA, DHAWAN S K, et al. Influence of self-doped poly(aniline-co-4-amino-3-hydroxy-naphthalene-1-sulfonic acid) on corrosion inhibition behaviour of iron in acidic medium[J]. *Synthetic Metals*, 2011, 161(9—10): 753—762.
- [44] QU Jun-e, GUO Xing-peng, ZHANG Jin-zhi, et al. Electrochemical behavior and micro adhesive force characteristic of corrosion inhibition film [J]. *Acta Phys-Chim Sin*, 2008, 24(8): 1507—1612.
- [45] 吴玲. 铂纳米粒子的制备及其在铁电极表面自组装的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [46] ZHANG Zhe, CHEN Shen-hao, LI Yan-hui, et al. A study of the inhibition of iron corrosion by imidazole and its derivatives self-assembled films [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(2): 291—300.
- [47] OLEG SKLYAR, THOMAS H, TREUTLER, et al. The geometry of nanometer-sized electrodes and its influence on electrolytic currents and metal deposition processes in scanning tunneling and scanning gelectrochemical microscopy[J]. *Surface Science*, 2005, 597(1—3): 181—195.
- [48] SOUZA F S DE, SPINELLI A. Caffeic acid as a green corrosion inhibitor for mild steel [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(3): 642—649.
- 收稿日期: 2011-12-14; 修订日期: 2012-06-10
- 作者简介: 王海人(1966—), 男, 硕士, 教授, 从事材料腐蚀与防护、材料表面技术与工程方面教学科研工作. 联系地址: 武汉市武昌区学院路 11 号湖北大学材料科学与工程学院(430062), E-mail: 278192571@qq.com, whr9999@sina.com
- 通讯作者: 郭兴蓬, 教授, 联系地址: 湖北省武汉市珞瑜路 1037 号华中科技大学化学与化工学院(430074), E-mail: whr9999whr@163.com
- *****
- (上接第 94 页)
- [17] KLINKENBERG C, RAABE D, LUCKE K. Influence of intercritical annealing on the texture formation in low-carbon steel strips[J]. *Steel Research*, 1993, 64(5): 262—266.
- [18] DANIEL D, SAVOIE J, JONAS J J. Texture induced by tension and deep drawing in low carbon and extra low carbon steel sheets [J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1993, 41(6): 1905—1920.
- [19] HUTCHINSON W B, REDE L, LINDH E, et al. Texture in hot rolled austenite and resulting transformation products[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 257(1): 9—17.
- [20] EMADODDIN E, AKBARZADEH A, DANESHI G. Effect of cold rolling reduction and intercritical annealing temperature on the bulk texture of two TRIP-aid steel sheets[J]. *Journal of Materials Process Technology*, 2008, 203(1—3): 293—300.
- 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50904006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-10-001A)
- 收稿日期: 2012-03-12; 修订日期: 2012-07-18
- 作者简介: 汪志刚(1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 超深冲双相钢织构演变与组织性能优化, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学冶金工程研究院(100083), E-mail: wzgang2008cn@163.com
- 通讯作者: 赵征志(1977—), 男, 副研究员, 研究方向: 先进汽车用钢和薄板坯连铸连轧, 联系地址: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学冶金工程研究院科技楼 703(100083), E-mail: zhaozhzhi@ustb.edu.cn