

冷轧压下率和退火时间对 Ti - IF 深冲钢性能的影响

薛越¹, 尚秀廷¹, 高军¹, 韩玉龙², 樊立峰³

- (1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂, 内蒙古包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司制造部, 内蒙古包头 014010;
3. 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古呼和浩特 010000)

摘要:针对冷轧罩式退火厚规格深冲钢冲压性能不稳定现象,借助光学显微镜、X射线衍射仪、拉力试验机等设备,研究了冷轧压下率和退火时间对 Ti - IF 深冲钢冲压性能的影响。结果表明,提高冷轧压下率, r 值和抗拉强度呈增大趋势, n 值变化不明显; 延长退火时间, r 值呈增大趋势, 抗拉强度呈减小趋势, n 值变化不明显。根据试验结果进行了工艺优化, {111} 织构密度增强, 产品冲压性能改善明显。

关键词: Ti - IF 深冲钢 St14; 冷轧压下率; 退火时间; r 值; 织构

中图分类号: TG142.1⁺³

文献标识码: B

文章编号: 1009 - 5438(2022)01 - 0065 - 07

Influences of Cold Rolling Reduction Ratio and Annealing Time on Performances of Ti - IF Deep Drawing Steel

Xue Yue¹, Shang Xiu - ting¹, Gao Jun¹, Han Yu - long², Fan Li - feng³

- (1. CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Manufacturing Dept. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The influences of cold rolling reduction ratio and annealing time on the stamping performance of Ti - IF deep drawing steel are studied by means of such equipment as optical microscope, X - ray diffractometer and tensile tester aiming at the phenomenon that the stamping performance of cold rolled cover annealing thick deep drawing steel is unstable. The results showed that the r value and tensile strength tended to increase and change of n value was not obvious with the increase of cold rolled reduction ratio; r value increased, tensile strength decreased and change of n value was not obvious with the extension of annealing time. The process is optimized according to the test results so that density of {111} texture is enhanced and stamping performance of product is obviously improved.

Key words: Ti - IF deep drawing steel St14; cold rolling reduction ratio; annealing time; r value; texture

随着汽车工业的飞速发展,对汽车用钢板的质量要求也越来越高。对于车身大型复杂零件、车身深冲变形和多工序冲压成形的复杂结构件和内外表面件,如 A 柱加强板、保险杠、驾驶室地板、裙板等,要求材料具有良好的成形性能、表面性能、焊接性能和耐腐蚀性等。对于冷轧深冲钢(即 IF 钢)而言,具有优异的成形性能则更为重要^[1]。

包钢薄板厂 1 780 mm 冷轧罩退生产线生产的供汽车厂深冲钢 St14 厚规格产品(不小于 1.8 mm),延伸率、n 值、r 值等表征冲压性能的指标较低,影响深冲钢产品进一步市场开拓。r 值(塑性应变比)是材料强度各向异性的反映,体现板材抵抗变薄的能力。r 值越高,说明在成型过程中板材抵抗变薄的能力越强,在成型过程中不易破裂,影响到板材塑性的发挥,可用这个指数判断板材的成型性^[2-3]。为了保证深冲性能,需要 r 值不小于 2.0。对于深冲钢而言,最有利织构是 $\{111\} \langle hkl \rangle$,最不利织构是 $\{100\} \langle 110 \rangle$,这两种织构组分的比例严重影响 r 值的大小。

为了提高 r 值,就必须从平行于轧面的主要组分是 $\{111\} \langle 001 \rangle$ 的轧制织构中得到 $\{111\} \langle hkl \rangle$ 再

结晶织构^[4]。文章以成品厚度 1.8 mm Ti-IF 深冲钢 St14 钢卷为试验对象,研究了冷轧压下率和罩式退火炉退火时间对 Ti-IF 深冲钢 St14 冲压性能,尤其是对 r 值(塑性应变比)的影响规律。通过优化工艺制度,提高深冲钢产品冲压性能。

1 试验材料与工艺

研究采用 DDQ 级别的 Ti 系无间隙原子钢 St14,分别将厚度 4.5 mm、5.0 mm 和 5.5 mm 的热轧原料冷轧至 1.8 mm 冷硬卷,压下率分别为 60%、64%、67%。冷硬卷以 60 °C/h 的加热速度升温至 730 °C 进行罩式退火,保温时间分别为 12 h、15 h、18 h。

St14 化学成分如表 1 所示,热轧工艺制度如表 2 所示,酸轧、退火工艺如表 3 所示,退火温度升降制度如图 1 所示。每个工艺方案采用 3 卷进行试验。

借助奥林巴斯 GX51F 倒置式系统金相显微镜进行组织观察并采集图像;使用荷兰帕纳科公司生产的 X'Pert PRO MPD 型 X 射线衍射仪进行宏观织构检测,并计算取向分布函数 ODF;使用德国 ZWICK Z250 拉力试验机检测力学性能。

表 1 St14 的化学成分(质量分数)

| 牌号 | C | Si | Mn | P | S | Al _s | Ti |
|------|-------|-------|------|-------|-------|-----------------|-------|
| St14 | 0.002 | 0.006 | 0.15 | 0.010 | 0.003 | 0.060 | 0.060 |

表 2 热轧工艺制度

| 板坯加热时间 /min | 均热时间 /min | 出炉温度 /°C | 终轧温度 /°C | 卷取温度 /°C |
|----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| 180 ~ 240 | ≥30 | 1 210 ± 20 | 920 ± 20 | 720 ± 20 |

表 3 St14 冷轧及退火工艺方案

| 试样编号 | 冷轧压下率 /% | 退火温度 /°C | 退火时间 /h | 缓冷时间 /h |
|----------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 1 [#] | 60 | 730 | 12 | 6 |
| 2 [#] | 67 | 730 | 12 | 6 |
| 3 [#] | 60 | 730 | 15 | 6 |
| 4 [#] | 64 | 730 | 15 | 6 |
| 5 [#] | 67 | 730 | 15 | 6 |
| 6 [#] | 60 | 730 | 18 | 6 |

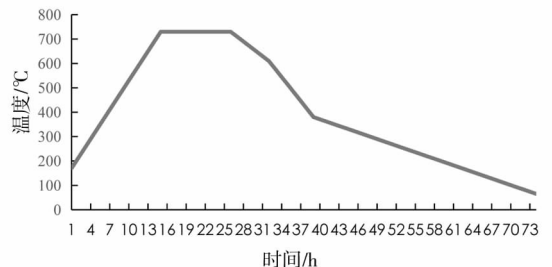


图 1 退火曲线

2 试验结果及分析

2.1 显微组织分析

为了研究退火时间对显微组织的影响,对冷轧压下率均为 60% 的 1[#]、3[#]、6[#] 进行金相组织分析,如图 2 所示。从金相组织看,退火时间 12 h 的 1[#] 样晶

粒度评级为 8 级,退火时间 15 h 的 3[#] 样晶粒度评级为 7 级,退火时间 18 h 的 6[#] 样晶粒度评级为 6.5 级。

采用 730 ℃、12~18 h 的罩式退火工艺,该温度对于超低碳深冲钢而言,达到再结晶退火温度以上,

且退火时间足够,得到的金相组织处于晶粒长大阶段。随着退火时间的延长,晶粒持续长大,晶粒度由 8 级增长至 6.5 级,符合深冲钢晶粒度范围。此过程中部分晶粒被周围其它晶粒吞并,逐渐变得粗大不均匀。

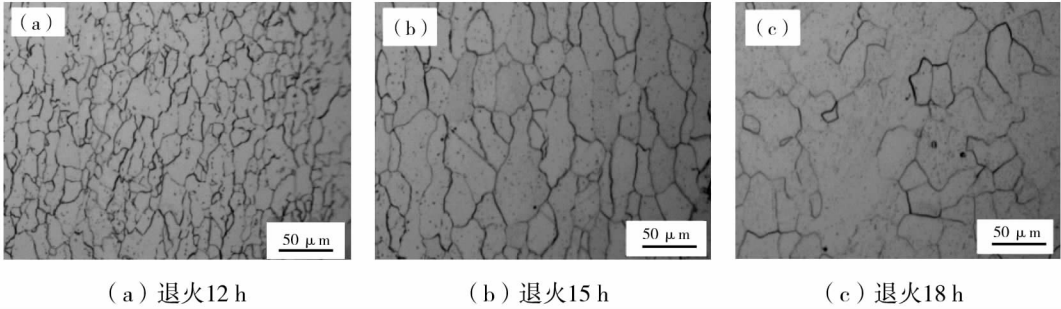


图2 冷轧压下率为 60% 时不同退火时间的金相组织

图 3 为退火时间为 15 h、冷轧压下率分别为 60%、64% 和 67% 时的退火金相组织,晶粒度等级分别为 7 级、7.5 级和 7.5 级,随着冷轧压下率的增加,晶粒尺寸略呈减小趋势。退火板组织主要取决于冷轧及退火过程,由于各试样是在同一制度下进行退火,因此冷轧压下率是造成组织特征不同的根本原因。冷轧薄板在退火过程中,随着加热温度的升高,将经历回复、再结晶和晶粒长大三个阶段,

再结晶过程的原动力主要是变形晶粒的畸变能,压下率越大则畸变能越高,再结晶越容易进行,同时变形越大,组织中位错等缺陷也越多,从而增加了再结晶的形核点,压下率越大的组织内再结晶晶粒越多,相应晶粒尺寸就越细小均匀^[5]。本试验受轧机总压下量的限制,压下率变化幅度较小,其晶粒尺寸随压下率增加呈细化趋势,但变化不显著。

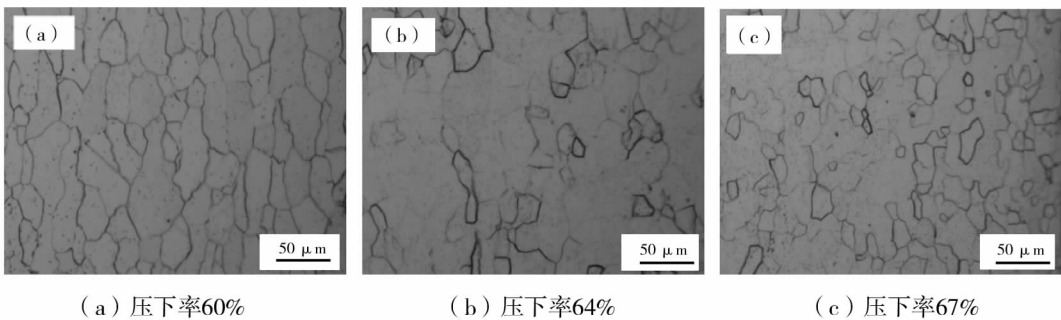


图3 退火时间为 15 h 不同冷轧压下率的金相组织

2.2 再结晶退火组织分析

图 4 为 Ti-IF 钢在压下率均为 60% 时,不同退火时间的组织 $\phi_2 = 45^\circ$ ODF 截面图。随着退火时间的增加,织构强度不断增加,当退火时间达到最长

18 h 时, γ 纤维织构织构密度最大值为 5.3,为三种退火时间中最大者,其 r 值亦为最大值 2.201。而退火时间在 12 h 时, γ 纤维织构织构密度最大值仅为 2.15,平均织构密度亦较低,相应 r 值为 1.642。

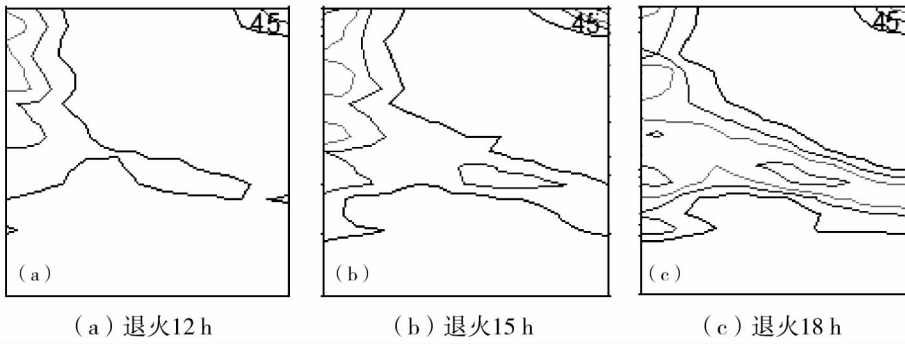


图 4 冷轧压下率 60%，不同退火时间的 $\phi_2 = 45^\circ$ ODF 组织(XRD)

图 5 为 Ti - IF 钢在退火时间为 15 h 时,不同压下率的组织 $\phi_2 = 45^\circ$ ODF 截面图,随着压下率的增大,织构强度不断增加,当压下率达到最大的 67% 时, γ 纤维织构织构密度最大值为 4.13,为三种退火

时间中最大者,其 r 值亦为最大值 2.153。而压下率为 60% 时, γ 纤维织构织构密度最大值仅为 2.45,相应 r 值为 1.96。

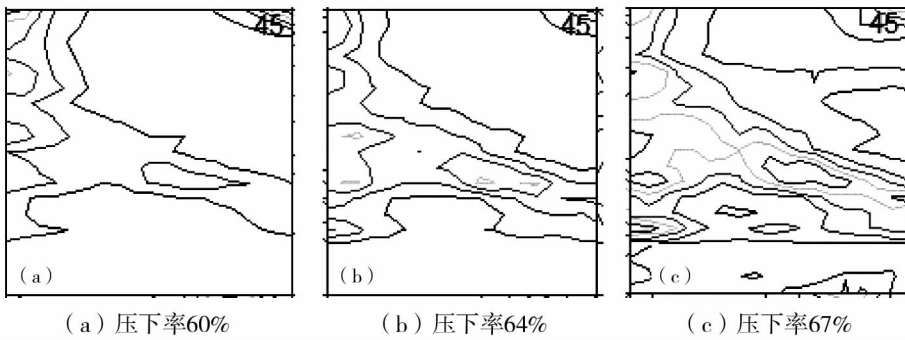


图 5 退火时间 15 h,不同冷轧压下率 $\phi_2 = 45^\circ$ ODF 组织(XRD)

图 6 和图 7 为 Ti - IF 钢在不同压下率和不同退火时间的退火组织的变化,定量地说明了 $\{100\}$ 、 $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构含量占比的变化。

10% ~ 15% 左右。随着压下率的增大, $\{112\}$ 织构先增多然后持平, $\{100\}$ 织构基本呈下降趋势, $\{111\}$ 织构由 20% 增加至 26%, 呈现明显的上升趋势,表明有利冲压织构占比随着压下率的增大而逐渐增多。

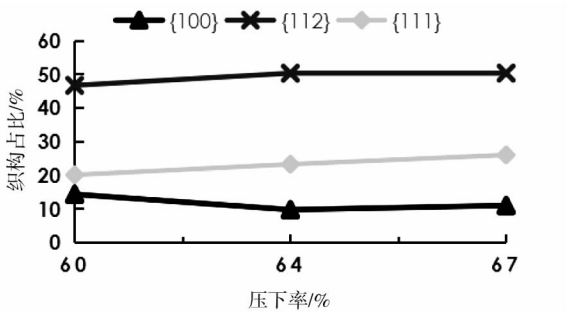


图 6 退火时间 12 h,不同压下率的织构占比

从图 6 中可以看出,在 3 个不同压下率条件下, $\{112\}$ 织构占比最多,达到 50% 左右,其次 $\{111\}$ 织构占比 20% ~ 30% 之间, $\{100\}$ 织构占比最少,在

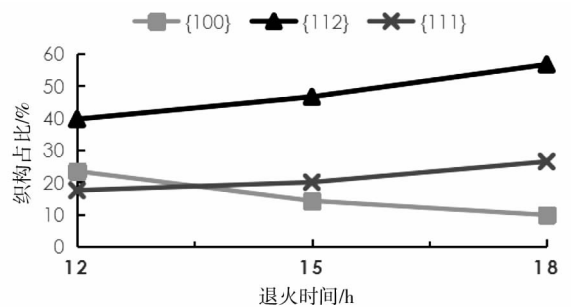


图 7 压下率 60%,不同退火时间的织构占比

从图 7 中可以看出,随着退火时间的增加, $\{100\}$ 织构占比递减, $\{111\}$ 和 $\{112\}$ 织构占比递增, $\{112\}$ 织构占比高于 $\{111\}$ 织构占比。 $\{111\}$ 取向的晶粒主要在再结晶过程中形成,依靠吞并 $\{100\}$ 取向的晶粒而长大。

图 8 和图 9 为 α 取向线上织构密度 f 随不同压下率、不同退火时间的变化规律。从图 8、图 9 可以

看出,在 α 取向线上,随着压下率增大、退火时间的增加, $\{111\} < 110 >$ 织构密度有所提高,而 $\{112\} < 110 >$ 织构密度随压下率的增大而下降,随退火时间的增加织构密度变化规律不显著; $\{100\} < 011 >$ 织构密度随压下率的增大、退火时间的增加均呈下降趋势。

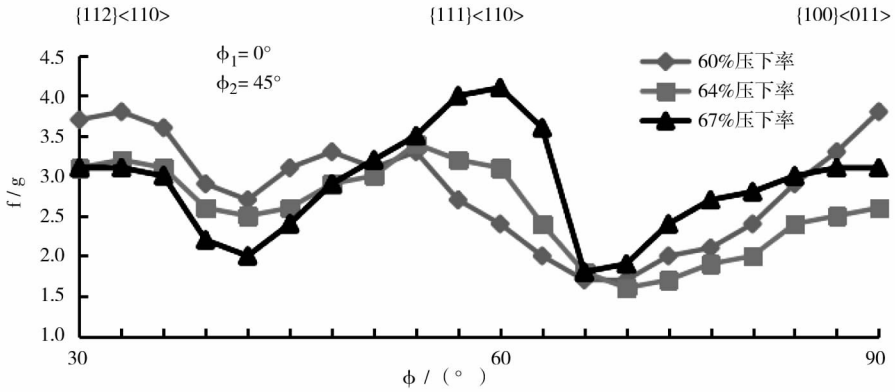


图 8 退火时间 12 h, α 取向线上不同压下率织构密度

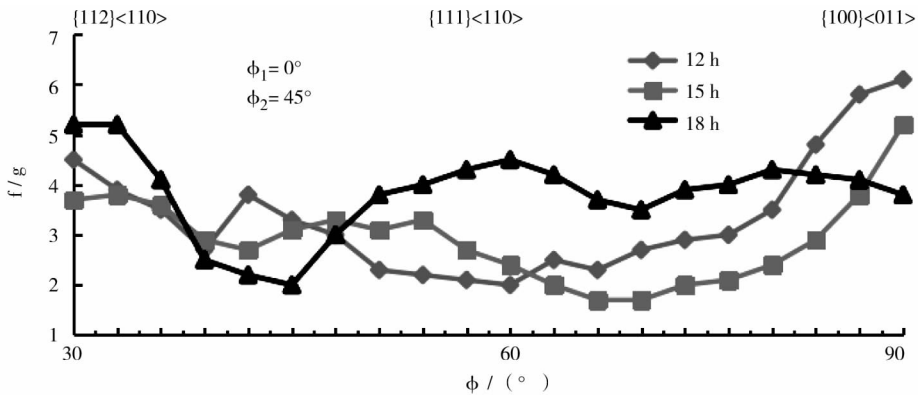


图 9 压下率 60%, α 取向线上不同退火时间织构密度

在 γ 取向线上,随着压下率的增大,如图 10, $\{111\} < 110 >$ 和 $\{111\} < 112 >$ 织构密度均有所提高,但 $\{111\} < 112 >$ 织构密度高于 $\{111\} < 110 >$ 织构密度;随着退火时间的增加,如图 11, $\{111\} < 110 >$ 和 $\{111\} < 112 >$ 织构密度也呈升高趋势,在保温 12 h 和 15 h 时, $\{111\} < 112 >$ 织构密度高于 $\{111\} < 110 >$ 织构密度,在保温 18 h 时, $\{111\} < 112 >$ 织构密度低于 $\{111\} < 110 >$ 织构密度。

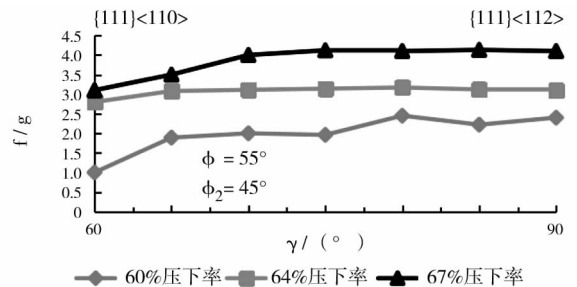


图 10 退火时间 12 h, γ 取向线上不同压下率织构密度分布

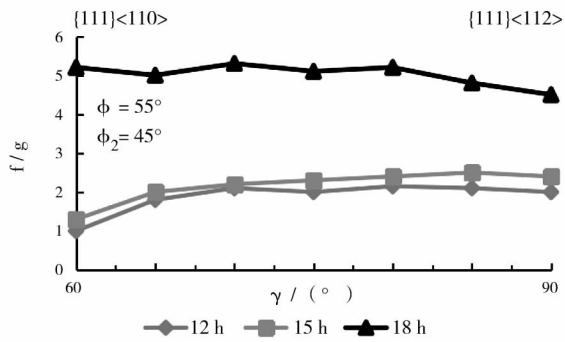


图 11 压下率 60%， γ 取向线上不同退火时间织构密度分布

2.3 力学性能分析与讨论

2.3.1 抗拉强度分析

St14 不同工艺制度力学性能如表 4 所示。从图 12 和图 13 可以看出，抗拉强度随冷轧压下率的增大呈上升趋势，随退火时间的延长呈下降趋势。冷轧压下率增加，冷硬带钢晶粒越破碎，形变晶粒贮存的畸变能变大，退火再结晶的形核点越多，进而再结晶的驱动力增加，冷轧压下率增大促使形核率增加，晶粒尺寸越小；在相同热轧工艺、相同冷轧压下率前提下，冷硬带钢原始晶粒度一致，随着退火时间的增加，晶粒得到进一步长大，大晶粒吞并相邻较小晶粒，晶粒度由 8 级上涨至 6 级。晶粒尺寸越小，晶间结合力越强，表现出抗拉强度越大，反之，抗拉强度越小。

表 4 St14 不同工艺制度的力学性能

| 试样编号 | 退火温度 /℃ | 退火时间 /h | 冷轧压下率 /% | 性能均值 | | | | |
|----------------|------------|------------|-------------|----------|----------|-------|----------|----------|
| | | | | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 延伸率/% | n_{90} | r_{90} |
| 1 [#] | 730 | 12 | 60 | 128 | 278 | 43.0 | 0.229 | 1.642 |
| 2 [#] | 730 | 12 | 67 | 124 | 280 | 45.0 | 0.237 | 1.870 |
| 3 [#] | 730 | 15 | 60 | 116 | 271 | 47.8 | 0.240 | 1.960 |
| 4 [#] | 730 | 15 | 64 | 117 | 272 | 43.7 | 0.223 | 2.120 |
| 5 [#] | 730 | 15 | 67 | 126 | 277 | 46.0 | 0.234 | 2.153 |
| 6 [#] | 730 | 18 | 60 | 130 | 266 | 44.0 | 0.237 | 2.201 |

注：试样标距长度 $L_0 = 80$ mm，试样宽度 $b = 20$ mm，取样方向为垂直于轧制方向。

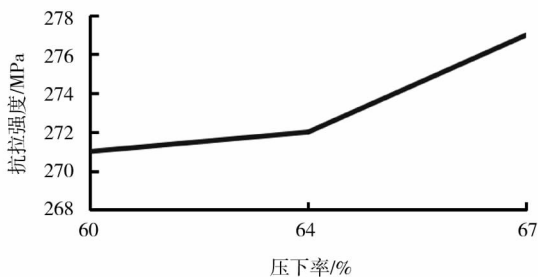


图 12 抗拉强度与压下率关系

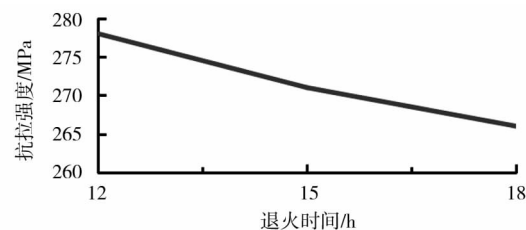


图 13 抗拉强度与退火时间关系

2.3.2 塑性应变比 r 值分析

大量研究表明，板材内的织构与 r 值有着密切的联系。对于 r 值高的材料而言，板材各晶粒的 $\{111\}$ 面大多平行于轧面，即材料具有强的 $\{111\}$ 型织构；而当板材各晶粒的 $\{100\}$ 面大多平行于轧面时，可使板材的 r 值降低。

在相同热轧工艺制度前提下，退火时采用一阶段加热模式，退火温度均加热到 730 ℃，分别进行 12 h 和 15 h 退火，对比相同退火时间、不同冷轧压下率对应的 r 值变化情况，见表 4。2[#] 样比 1[#] 样压下率提高 7 个百分点， r 值提高 0.228；3[#]、4[#]、5[#] 样随着冷轧压下率的递增， r 值整体呈上升趋势，4[#] 样较 3[#] 样压下率提高 4 个百分点， r 值提高 0.160，5[#] 样较 4[#] 样压下率提高 3 个百分点， r 值提高 0.033。

退火温度和退火时间固定不变，塑性应变比 r 值随冷轧压下率的增大呈增高趋势。研究表明，高冷轧压下率可以在钢中存储较多的畸变能，为后续

退火过程中的再结晶提供更大的驱动力,使再结晶温度降低,提高再结晶速度,有利于晶粒的择优分布,即 $\{111\}$ 织构密度增强,从而提高塑性应变比 r 值。

从表4可以看出, n 值随压下率、退火时间的变化不明显。在冷轧压下率为60%的情况下,1[#]、3[#]、6[#]样的退火时间分别为12 h、15 h、18 h,退火时间分别延长3 h, r 值呈上升趋势,3[#]样 r 值较1[#]样提高0.318,6[#]样 r 值较3[#]样提高0.241;冷轧压下率均为67%时,2[#]、5[#]样的退火时间分别为12 h、15 h,5[#]样退火时间较2[#]样延长3 h, r 值提高0.283。

随着退火时间的延长,再结晶过程充分进行,有利冲压织构 $\{111\}$ 逐渐吞并不利冲压织构 $\{100\}$, $\{111\}$ 织构密度增强,晶粒不断长大并逐渐均匀,这些都促进了冲压性能的提高,即 r 值的提高。织构变化趋势与力学性能的试验结果是一致的。随着冷轧压下率、退火时间的增加, α 取向线上和 γ 取向线上 $\{111\}$ 织构密度均增强。 α 取向线上和 γ 取向线上的 $\{111\}$ 织构密度均在保温18h时达到最大。说明在 $\{111\}$ 取向晶粒长大过程中, γ 纤维织构之间也发生相互转化,主要是 $\{111\} < 112 >$ 织构与 $\{111\} < 110 >$ 织构之间的转化。 $\{111\} < 110 >$ 会造成轧板横向冲压性能 r_{90} 特别好,但 r_0 较低,而 $\{111\} < 112 >$ 织构的特点相反,故两种织构相结合对冲压性能最好^[6],从图7和图10可以看到,在压下率60%、保温时间18 h时,可以获得最强的 $\{111\}$ 织构,即最大的 r_{90} 值;而保温时间12 h、压下率64%时拥有最小的 $\{111\} < 110 >$ 与 $\{111\} < 112 >$ 织构密度差,即 Δr 值较小。在实际生产中应综合考虑 r 值和 Δr 值的这两种因素,以确定最佳的冷轧压下率和退火温度。

3 结论

(1)随着退火时间的延长,晶粒度等级由8级增

长至6.5级,但晶粒尺寸不均匀性增加。

(2)在退火温度730℃且保温时间相同条件下,随冷轧压下率的提高, r 值、抗拉强度均呈增大趋势;在冷轧压下率相同条件下,随退火时间的延长, r 值呈增大趋势,抗拉强度呈减小趋势, n 值变化不明显。

(3)冷轧压下率的提高、保温时间的延长, $\{111\}$ 织构逐渐吞并 $\{100\}$ 织构, $\{111\}$ 织构密度增强,对最大压下率仅为67% St14厚规格产品(不小于1.8 mm),其主要织构仍以 $\{112\}$ 为主。

(4)在 $\{111\}$ 取向晶粒长大过程中, γ 纤维织构之间发生相互转化,主要是 $\{111\} < 112 >$ 织构与 $\{111\} < 110 >$ 织构之间的转化。

参 考 文 献

- [1] 康永林. 现代汽车板的质量控制与成形性[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.
- [2] 赵辉,王先进,王德城,等. 热轧工艺对IF钢析出物析出行为的影响[J]. 钢铁研究,1994,(1): 28-30.
- [3] 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):285-289.
- [4] 马全仓,毛卫民,杜磊,等. 不同织构组分对IF钢板 $r(\theta)$ 值起伏的影响[J]. 钢铁,2005,40(5):58-61.
- [5] 孟德亮,王川,仲海峰,等. 冷轧压下率对超低碳深冲钢再结晶退火组织与性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(9):127-129.
- [6] 杨平,李志超,毛卫民,等. 钢中 $\{111\} < 112 >$ 再结晶织构的形成[J]. 材料热处理学报,2009,30(3):46-52.