

退火工艺对铁素体不锈钢 SUS410L 热轧钢板组织和性能的影响

李筱^{1,2} 卫英慧^{1,3} 卫争艳² 苏莹⁴

(1 太原理工大学材料与工程学院,太原 030024;2 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;3 太原科技大学,太原 030024;4 山西太钢不锈钢股份有限公司冷轧厂,太原 030003)

摘要 研究了不同退火温度和保温时间对 SUS410L 热轧态钢板再结晶行为和力学性能的影响。试验结果表明,当保温温度为 700 °C 时,保温 480 min 后 SUS410L 热轧钢板仍未完成再结晶。当保温温度为 750 °C 和 800 °C 时分别于 120 min 和 30 min 基本完成再结晶,晶粒在之后的保温时间里逐步长大。为避免退火过程中出现马氏体而降低材料的延伸率,退火温度 ≤ 800 °C。材料的力学性能与热处理后的再结晶程度密切相关。当保温温度为 750 °C 且保温时间为 480 min 时可获得最佳的综合机械性能:延伸率 38%,HRB 硬度值 67,屈服强度 236 MPa,抗拉强度 441 MPa。

关键词 铁素体不锈钢 SUS410L 热轧 再结晶退火 延伸率 组织

Effect of Anneal Process on Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Ferritic Stainless Steel SUS410L

Li Xiao^{1,2}, Wei Yinghui^{1,3}, Wei Zhengyan² and Su Ying⁴

(1 School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024; 2 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron and Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003; 3 Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024; 4 Cold Rolling Mill, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract Effect of annealing temperature and holding time on the recrystallization behaviour and mechanical properties of hot rolled stainless steel SUS410L was investigated. Results showed that the hot rolled plate SUS410L did not complete the recrystallization process when annealing temperature was 700 °C and holding time was 480 min. The recrystallization completion time for annealing temperatures of 750 °C and 800 °C were 120 min and 30 min respectively, grains gradually grew bigger after the completion of recrystallization. To avoid the formation of martensite which decreases the elongation of the material, annealing temperature should not be higher than 800 °C. Mechanical properties of the material were closely correlated with the recrystallization level. Annealing temperature of 750 °C and holding time of 480 min led to the best comprehensive mechanical properties: elongation of 38%, HRB hardness of 67, yield strength of 236 MPa and tensile strength of 441 MPa.

Material Index Ferritic Stainless Steel SUS410L, Hot Rolled, Recrystallization Annealing, Elongation, Microstructure

铁素体不锈钢是指铬含量在 11% ~ 30%, 具有体心立方晶体结构, 在使用状态下以铁素体组织为主的不锈钢^[1]。该类不锈钢具有优异的耐局部腐蚀性能, 但由于 C、N 等间隙元素的存在恶化了这类不锈钢的韧性、耐晶间腐蚀性能和焊接性能。在铁素体不锈钢中 SUS410L 的铬含量较低, 且严格控制其中的碳、氮含量, 因此该钢种具有适宜的耐腐蚀性能、优良的加工性能和焊接性能且价格低廉, 被广泛应用于冷藏集装箱、餐具制作等领域^[2-3]。

SUS410L 的热轧卷板通常被用于制作冷藏集装箱的框架结构或筋板材料, 为满足其加工性能, 用户要求热轧卷原料的延伸率 ≥ 22%。铁素体不锈钢在加热和保温时晶粒易于长大^[4], 从而降低材料的强度和延伸率, 因此退火时加热温度不易过高且保温

时间不易过长。但若加热温度过低且保温时间过短, 热轧态的晶粒不易回复和再结晶, 从而导致延伸率过低, 无法满足用户要求。在实验室采用不同的退火温度和时间对热轧态 SUS410L 不锈钢进行了退火处理, 研究了该钢种热轧态钢板的再结晶规律, 从而为制定现场罩式炉退火工艺提供参考。

1 试验材料与试验方法

试验钢的化学成分见表 1。试验材料采用厚度为 3.5 mm 的热轧态 SUS410L 不锈钢, 热轧过程总变形率约为 98%。试验材料的生产工艺流程为: 180 t 转炉 → 180 t AOD → 180 t LF → 连铸 (连铸坯断面尺寸为 200 mm × 1 260 mm) → 板坯修磨 → 热连轧轧制 → 卷曲。

表 1 SUS410L 钢热轧板化学成分/%

Table 1 Chemical composition of the hot rolled plate of steel SUS410L/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	N
0.017	0.32	0.23	0.019	0.001	11.96	0.019

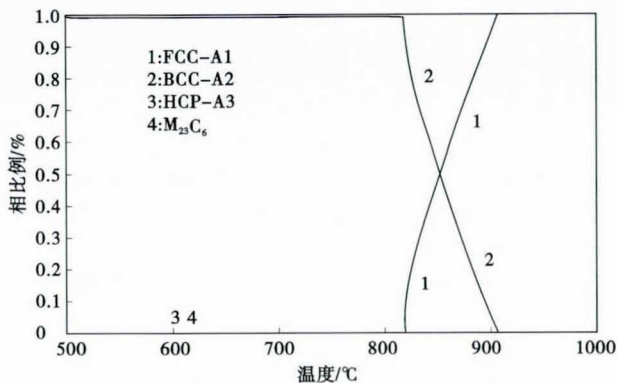


图 1 采用 Thermo-Calc 计算的 SUS410L 钢的相图

Fig. 1 Phase diagram of steel SUS410L calculated by Thermo-Calc

在箱式电阻炉 (SX3-8-13) 中对热轧态钢板进行不同温度和不同时间的热处理试验。图 1 为采用 Thermo-Calc 计算得到的 SUS410L 不锈钢相图, 由图 1 可知该钢种的 A_{c1} 大约为 $815\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此当退火温度高于 $815\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就会产生奥氏体相, 这些奥氏体相在随后的空冷过程中将转变成为马氏体组织从而恶化材料的塑性。另一方面, 若退火温度过低, 将使再结晶的时间过度延长, 将严重占用现场罩式退火炉的产能。鉴于上述原因, 故选取 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 三个温度点作为保温温度, 在每个温度下分别保温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行退火试验, 保温结束后直接将试样取出并空冷至室温。

试验结束后采用 Leica DM4000 M LED 光学显微镜对部分退火态试样在沿着轧制方向的纵向截面上的组织进行观察。在 WE-30 型液压压力试验机上进行室温拉伸试验, 拉伸试样的标距为 50 mm , 平行部分的宽度为 25 mm 。采用 LV700AT 型全自动洛氏硬度计对不同退火态试样的硬度进行检测。

2 结果与讨论

2.1 再结晶过程中的组织转变

SUS410L 热轧态钢板及其经过不同热处理工艺退火后各试样的光学显微照片见图 2。从图 2(a) 中可以看出, 热轧态组织呈典型的纤维状, 该组织以铁素体为主同时含有少量马氏体, 在铁素体和马氏体当中均存在大量位错、空位等晶体缺陷。当退火温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 随着保温时间从 30 min 提高至 480 min (见图 2(b~d)), 组织形貌仍以热轧态的竹

节状为主, 但组织中出现了部分再结晶现象, 且再结晶比例随着保温时间的延长而逐渐提高, 同时马氏体在逐渐分解。这说明在这一退火阶段组织的变化以回复为主, 位错和空位等晶体缺陷大量减少, 形变储能得到释放。通常铁素体不锈钢具有较高的层错能^[5], 因此在回复阶段位错易于借助攀移和交滑移作出较大调整, 从而释放较多储存能, 并表现出较强的回复过程^[6]。另外, 在该阶段所形成的等轴晶优先在变形量大的区域和晶界处形核, 这是因为这些区域具有较高的储能, 更有利于快速形核, 同时晶界附近通常富集有 C、Cr 等溶质原子, 利于富 Cr 的铁素体形核。对于具有较高层错能并经过大幅度变形的铁素体不锈钢而言, 其形核机制为亚晶生长, 即回复后的亚晶晶粒通过吞并相邻晶粒聚集长大, 长大后的亚晶晶粒间具有较大的位向差从而使亚晶界易于迁移, 这种能够迁移的亚晶晶粒就成为再结晶晶核^[7]。

当退火温度提高到 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 保温 30 min 后组织形貌仍以竹节状为主, 但此时已可明显观察到少量等轴晶 (图 2e), 且其再结晶比例高于 $700\text{ }^{\circ}\text{C} \times 30\text{ min}$ 退火后的组织 (图 2b)。这说明更高的退火温度加快了热轧态试样中空位和位错的迁移速度, 从而加速了回复的进程, 并使材料提前进入了再结晶阶段。当保温时间增长到 120 min 时 (图 2f), 纤维状组织已基本消失, 再结晶基本完成。当保温时间继续延长至 240 min (图 2g) 和 480 min (图 2h) 时, 晶粒随着时间的延长而长大, 且晶粒尺寸更为均匀, 但晶粒长大的幅度并不显著。当退火温度提高至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 保温 30 min (图 2i) 时组织虽仍保留有热轧态竹节状的痕迹, 但此时已基本完成再结晶, 可见该温度可大幅减小再结晶时间。随着退火时间的继续延长, 晶粒尺寸逐步提高 (图 2(j~l))。

综上所述, 在退火温度从 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 提高至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程当中, 再结晶的孕育期和再结晶完成所用的时间均大幅缩短, 这是由于再结晶的形核和再结晶过程是由热激活决定的, 所以温度的升高会大幅减少再结晶完成所需的时间。在 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 再结晶完成之后的晶粒长大阶段, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时晶粒长大的速度更快, 说明温度的提高对晶粒长大的作用更为显著。

2.2 力学性能

SUS410L 热轧态钢板及经过不同热处理工艺退火后的力学性能见图 3。当退火温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在保温时间从 30 min 延长至 240 min 的过程中延伸率

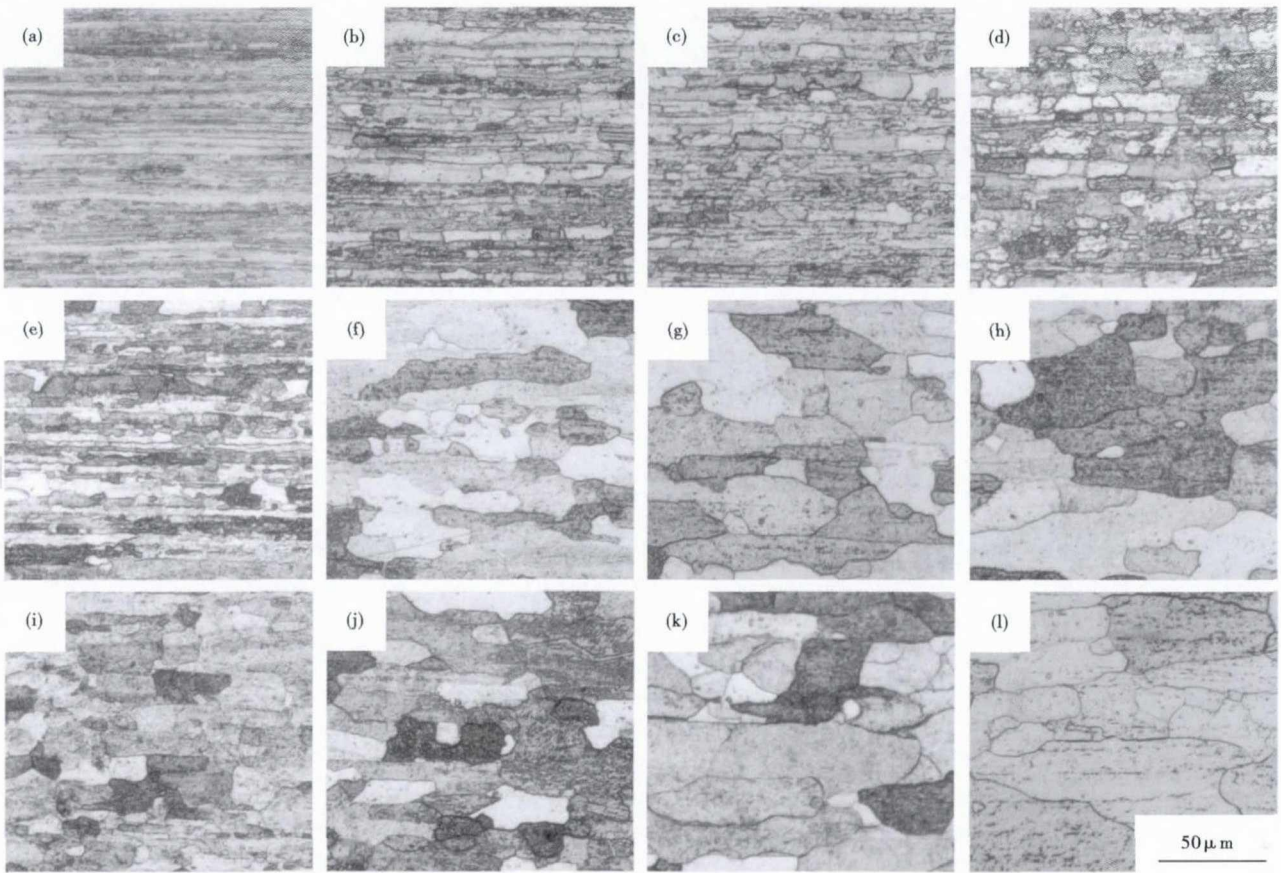


图2 SUS410L 不锈钢的光学显微照片;(a)热轧态;经(b)700 °C,30 min;(c)700 °C,240 min;(d)700 °C,480 min;(e)750 °C,30 min;(f)750 °C,120 min;(g)750 °C,240 min;(h)750 °C,480 min;(i)800 °C,30 min;(j)800 °C,120 min;(k)800 °C,240 min 和(l)800 °C,480 min 退火

Fig.2 Optical micrographs of stainless steel SUS410L : (a) hot rolled, (b) 700 °C, 30 min; (c) 700 °C, 240 min; (d) 700 °C, 480 min; (e) 750 °C, 30 min; (f) 750 °C, 120 min; (g) 750 °C, 240 min; (h) 750 °C, 480 min; (i) 800 °C, 30 min; (j) 800 °C, 120 min; (k) 800 °C, 240 min and (l) 800 °C, 480 min annealed

与热轧态试样的基本一致(在20%~21.5%),当保温时间提高到480 min时,延伸率则大幅提高到27%(图3a)。此外,当退火温度为700 °C时,随着保温时间从30 min延长至480 min,硬度、屈服强度和抗拉强度均缓慢降低(图3(b~d)),分别从热轧态的92.5 HRB、468 MPa和709 MPa下降到480 min的81 HRB、344 MPa和480 MPa。由图2(b~d)可知,在700 °C保温的不同时间里,材料均处于回复或再结晶的初始阶段。在此阶段空位和位错密度等晶体缺陷虽大幅降低且马氏体也已基本分解,但组织整体仍保留热轧时的竹节状,故材料的强度和硬度小幅下降,而延伸率则基本不变。但当保温时间提高到480 min时,由于等轴晶比例已有明显提高,故此时材料获得了较高的延伸率。

当退火温度为750 °C时,在保温时间从30 min延长至120 min的过程中延伸率由热轧态的20%缓慢增长至24%,而在保温时间继续增长到480 min

的过程中,延伸率则出现了快速增长,在480 min时达到了38%(图3a)。另外,当退火温度为750 °C时,随保温时间的延长,硬度、屈服强度和抗拉强度均持续降低(图3(b~d)),480 min时其值分别降低到67 HRB、236 MPa和441 MPa。由图2(e~h)可知,在750 °C保温且保温时间不超过120 min时,材料处于再结晶形核和晶核长大阶段,故延伸率增长较慢。当保温时间超过120 min后,材料已完成再结晶并且处于晶粒长大的阶段,同时晶粒并未严重粗化,故延伸率快速提高,而强度与硬度则持续下降。

当退火温度为800 °C且保温时间为60 min时,延伸率仅为22%。而当保温时间达到120 min时,延伸率则迅速提高至35%,之后随保温时间的增加延伸率基本保持不变(图3a)。此外,当退火温度为800 °C时,随时间的延长硬度基本维持在65 HRB左右(图3b)。而屈服强度和抗拉强度在保温120 min

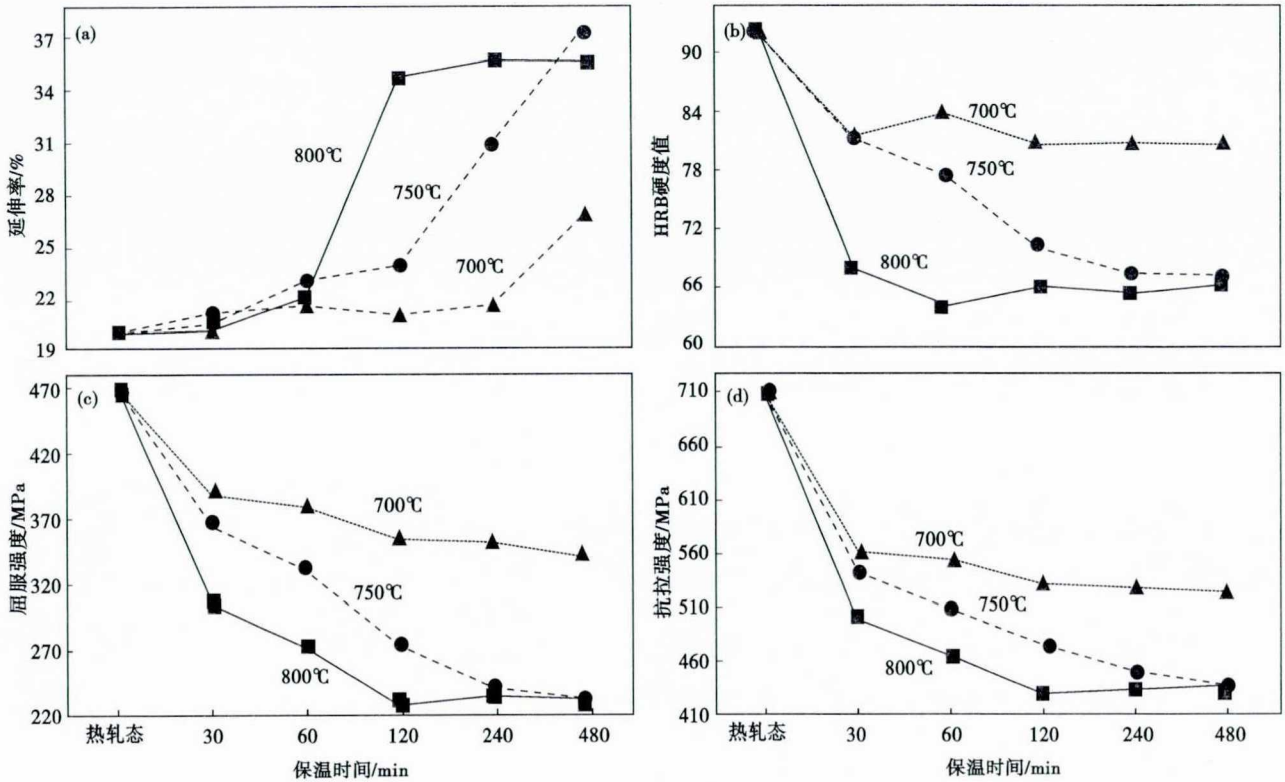


图 3 退火温度和时间对热轧态 SUS410L 不锈钢 (a) 延伸率、(b) 硬度、(c) 屈服强度和 (d) 抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of annealing temperature and holding time on (a) elongation, (b) hardness, (c) yield strength and (d) tensile strength of hot rolled stainless steel SUS410L

时分别下降到 232 MPa 和 433 MPa, 之后基本保持不变(图 3(c,d))。由图 2(i) 可知, 当退火温度为 800 °C 且保温 30 min 时, 材料即已基本完成再结晶, 空位、位错等晶体缺陷已大幅降低, 但由于其中仍保留有热轧态竹节状的痕迹, 因此此时材料的强度和硬度相较于热轧态大幅下降而延伸率则基本不变。当保温时间继续延长, 晶粒长大, 竹节状组织完全消失, 材料延伸率得到明显提高而强度、硬度则基本稳定。

3 结论

(1) 在退火温度从 700 °C 提高至 800 °C 的过程

当中, 随温度的提高再结晶孕育期和再结晶完成所用时间均大幅缩短。当保温温度为 700 °C 时, 保温 480 min 后仍未完成再结晶。当保温温度为 750 °C 和 800 °C 时分别于 120 min 和 30 min 基本完成再结晶, 在之后的保温时间里晶粒逐渐长大。

(2) SUS410L 热轧钢板的延伸率、硬度和强度与热处理后的再结晶程度密切相关。在本试验条件中, 当保温温度为 750 °C 且保温时间为 480 min 时可获得最佳的机械性能: 延伸率 38%, HRB 硬度值 67, 屈服强度 236 MPa, 抗拉强度为 441 MPa。

参考文献

[1] 陆世英, 张廷凯, 杨长强, 等. 不锈钢[M]. 北京: 原子能出版社, 1998: 77-78.
 [2] 杨永超, 王明涛, 白晋钢, 等. SUS410L 不锈钢 3 mm 热轧带卷退火工艺的优化[J]. 特殊钢, 2016, 37(2): 41-43.
 [3] 杜海宪, 刘圣磊, 戴科栋. SUS410L 不锈钢冷轧 APC 退火工艺优化[J]. 宝钢技术, 2015(5): 70-73.
 [4] 藤田辉夫. 不锈钢的热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 101-102.
 [5] 王 凯. 基于红外热像法的金属高周疲劳性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013: 41-42.
 [6] 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业

出版社, 1994: 40-43.
 [7] 侯增寿, 卢光熙. 金属学原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990: 201-203.

李 筱 (1981-) 男, 博士研究生 (太原理工大学), 高级工程师, 2004 年西安建筑科技大学 (本科) 毕业, 不锈钢研究和开发。E-mail: lixiao-sgpv@163.com

收稿日期: 2018-10-11