

含氮马氏体不锈钢 420U6 冷轧板再结晶退火的热模拟试验

李筱^{1,2} 卫英慧^{1,3} 廉晓洁⁴ 卫争艳²

(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技术中心,太原 030003)

摘要 采用 Gleeble-3800 热模拟试验机并结合硬度法与金相法分别测定了压下率 66% 含氮马氏体不锈钢 420U6 的 1 mm 冷轧板定时条件下的再结晶温度和恒温条件下的再结晶时间,通过 Arrhenius 公式计算了试验钢的再结晶激活能。试验结果表明,当保温时间为 60 s 时,试验钢的再结晶温度为 664.2 °C;当退火温度为 780 °C 时,再结晶时间为 7.7 s;再结晶激活能 Q_r 为 145.3 kJ/mol。

关键词 含氮马氏体不锈钢 再结晶退火 冷轧 再结晶激活能 再结晶温度

Therm-Simulation Test on Recrystallization Annealing Process of Cold Rolled Plate of Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steel 420U6

Li Xiao^{1,2}, Wei Yinghui^{1,3}, Lian Xiaojie⁴ and Wei Zhengyan²

(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 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan 030003)

Abstract A 1 mm cold rolled plate of nitrogen bearing martensitic stainless steel 420U6 with reduction 66% was simulated-annealed by the Gleeble-3800 thermo-simulation machine, the recrystallization temperature under a constant holding time and the recrystallization time under a constant temperature were determined respectively by hardness method and metallographic examination, the recrystallization activation energy of the test steel was calculated according to Arrhenius equation. Test results showed that the recrystallization temperature in steel was 664.2 °C when holding time was 60 s; the recrystallization time in steel was 7.7 s when annealing temperature was 780 °C; and the calculated recrystallization activation energy Q_r was 145.3 kJ/mol.

Material Index Nitrogen Bearing Martensitic Stainless Steel, Recrystallization Annealing, Cold Rolling, Recrystallization Activation Energy, Recrystallization Temperature

马氏体不锈钢是一类可以通过热处理(通常采用淬火、回火)来调整其性能的不锈钢,因其所具有的高强度、高耐磨性及适当的耐腐蚀性能而被广泛应用于刀具、模具、医疗、石油化工、原子能等领域^[1-2]。马氏体不锈钢的主要合金化元素有铬元素和碳元素,其中铬含量通常为 12%~18%,碳含量一般为 0.1%~1.0%。铬的加入可以提高材料的耐腐蚀性能,而碳则可提高材料淬火后的硬度和耐磨性能。碳元素的负面作用是使材料易于析出 $Cr_{23}C_6$ 和 Cr_7C_3 等含铬碳化物从而降低马氏体不锈钢的耐腐蚀性能。对于马氏体不锈钢而言氮作为合金化元素具有很多有益的作用,如可提高马氏体不锈钢的强度、耐磨性能以及耐局部腐蚀性能等^[3]。含氮马氏体不锈钢所具有的优异的综合性能使其成为替代传统马氏体不锈钢的理想材料之一。

再结晶退火是指冷变形金属在加热条件下生成全新组织结构的过程^[4]。通过采用合理的再结晶

退火工艺可使冷轧后的含氮马氏体不锈钢获得均匀的等轴状再结晶组织,从而使材料具有适当的强度及优良的塑性,利于下游用户对冷轧含氮马氏体不锈钢的深加工(如剪切、深冲等)。本试验采用 Gleeble-3800 热模拟试验机对一种经过一定变形量冷轧后的含氮马氏体不锈钢 420U6 进行了定时和恒温两种退火试验,根据测得的硬度曲线确定了相应的再结晶温度与再结晶时间,并根据 Arrhenius 公式计算了再结晶激活能,为该钢种大生产冷轧卷板退火工艺的制定提供了参考。

1 材料与方法

试验材料为冷轧态的含氮马氏体不锈钢 420U6,其化学成分如表 1 所示。试验材料的生产工艺流程为:180 t AOD→180 t LF→连铸(连铸坯断面尺寸为 200 mm×1 240 mm)→板坯修磨→热连轧轧制→罩式退火炉退火(850 °C 保温 20 h)→酸洗→冷轧。冷轧前钢卷的厚度为 3.0 mm,冷轧态试样厚

表 1 含氮马氏体不锈钢 420U6 化学成分/%

Table 1 Chemical composition of nitrogen bearing martensitic stainless steel 420U6 /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	N
0.16	0.36	0.58	0.018	0.001	13.63	0.083

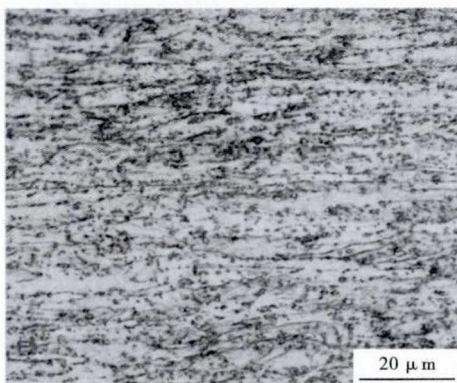


图 1 冷轧含氮马氏体不锈钢 420U6 组织形貌

Fig. 1 Morphology of optical structure of cold rolled nitrogen bearing martensitic stainless steel 420U6

度为 1.0 mm, 冷轧压下率为 66%。图 1 为冷轧态试样的金相组织。由图 1 所示, 冷轧态的 420U6 呈典型的纤维状, 其组织由铁素体基体及随机分布于其上的点状碳氮化物组成。

在等温退火过程中, 退火温度和等温退火时间符合 Arrhenius^[5,6] 公式:

$$\frac{1}{\tau} = Ae^{-\frac{Q_r}{RT}} \quad (1)$$

式中: τ - 保温时间/s; A - 系数/s⁻¹; R - 气体常数/[J · (mol · K)⁻¹]; Q_r - 再结晶激活能/(kJ · mol⁻¹); T - 退火温度/K。

为测定 420U6 钢的再结晶温度与再结晶时间, 在 Gleeble-3800 热模拟试验机上分别进行一次恒时变温试验与一次恒温变时试验。其中恒时变温试验是将保温时间设定为 60 s, 退火温度分别设置为 620、640、660、680、700、720、740、760、780、800、820 °C 共 11 个温度点。恒温变时试验是将退火温度设定为 780 °C, 保温时间分别设置为 15、30、45、60、75、90、105、120、135、150 s 共 10 个时间。试验结束后将试样取出并空冷至室温, 采用 LCR-500 型半自动维氏硬度计对不同状态的试样进行硬度检测, 并分别绘制出硬度与退火温度和保温时间之间的关系曲线。将冷轧态试样和完全软化试样的硬度差定义为 100%, 则硬度降低 50% 时所对应的温度和时间即为再结晶温度和再结晶时间^[7,8]。

结合公式(1), 将两组试验中测得的再结晶时间 τ_1 和 τ_2 及再结晶温度 T_1 和 T_2 分别代入下式中, 即可计算出该钢种的再结晶激活能 Q_r 和系数 A :

$$Q_r = \frac{R \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{\tau_1} e^{\frac{Q_r}{RT_1}} \quad (3)$$

采用 Leica DM4000 M LED 型光学显微镜沿截面轧制方向对冷轧态及不同退火态试样的金相组织进行观察。

2 结果与讨论

图 2(a) 为保温时间 60 s 时不同退火温度与硬度之间的关系。由图 2(a) 所示, 在退火温度从 620 °C 提高至 820 °C 的过程当中, 材料硬度逐渐降低, 其变化过程主要可分为 3 个阶段。第 1 阶段是 620 °C 至 660 °C, 在该温度范围内材料的 Hv5 硬度值维持在 229 ~ 242, 相较于冷轧态的硬度约下降了 16%。

由图 3(a) 可知, 当保温时间为 60 s 且退火温度为 620 °C 时, 材料的晶粒仍保留着冷轧后的纤维状, 但由于此时已发生了回复, 材料中的位错密度及空位等晶体缺陷已大量减少, 因此此时材料的硬度较冷轧态有了一定的下降。

由图 3(b) 可知, 当退火温度提高到 660 °C 后, 虽然晶粒仍以纤维状为主, 但在其中已可观察到少量细小的等轴晶, 说明此时材料已完成回复并已进入再结晶的形核阶段。由于此时组织仍以畸变的纤维状晶粒为主, 因此材料的硬度仍然较高。硬度变化的第 2 阶段是 660 °C 至 680 °C, 在该温度区间里材料的 Hv5 硬度值从 660 °C 的 229 大幅下降至 680 °C 的 162, 下降的幅度达到了 29%。

从图 3(c) 可知, 当退火温度提高至 680 °C 时, 材料已基本完成再结晶, 但此时仍有少量新生成的晶核, 因此此时晶粒尺寸尚不够均匀。由于此时材料的形变储能已基本全部释放, 且位错和空位等晶体缺陷也已基本消除, 因此材料的硬度大幅降低。硬度变化的第 3 阶段为 680 °C 至 820 °C, 在该温度区间内材料的硬度基本维持不变。

由图 3(d) 可知, 当退火温度为 820 °C 时, 晶粒已相互吞食并长大, 且晶粒尺寸较为均匀, 但晶粒尺寸长大并不显著。

图 2(b) 为退火温度为 780 °C 时不同保温时间与硬度之间的关系。由图 2(b) 所示, 随着保温时间

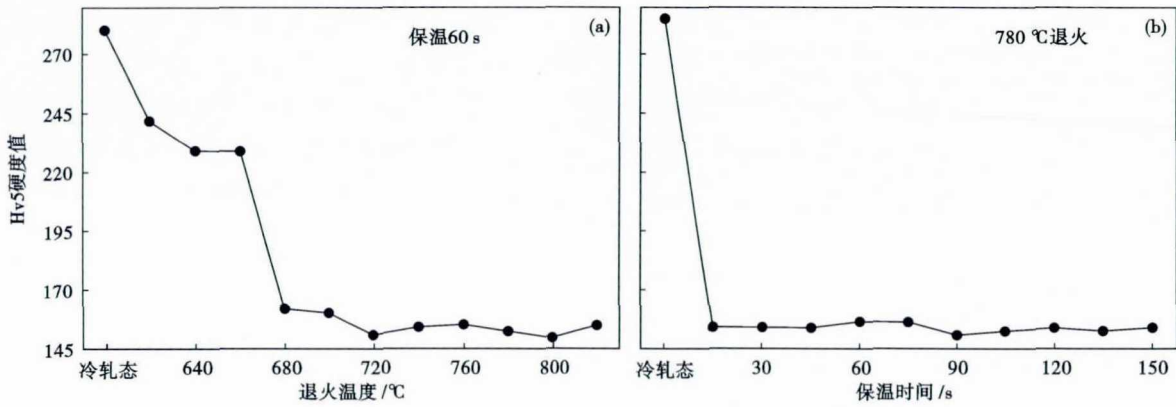


图 2 (a)退火温度及(b)保温时间对 420U6 试验钢 Hv5 硬度值的影响

Fig. 2 Effect of (a) annealing temperature and (b) holding time on Hv5 hardness value of test steel 420U6

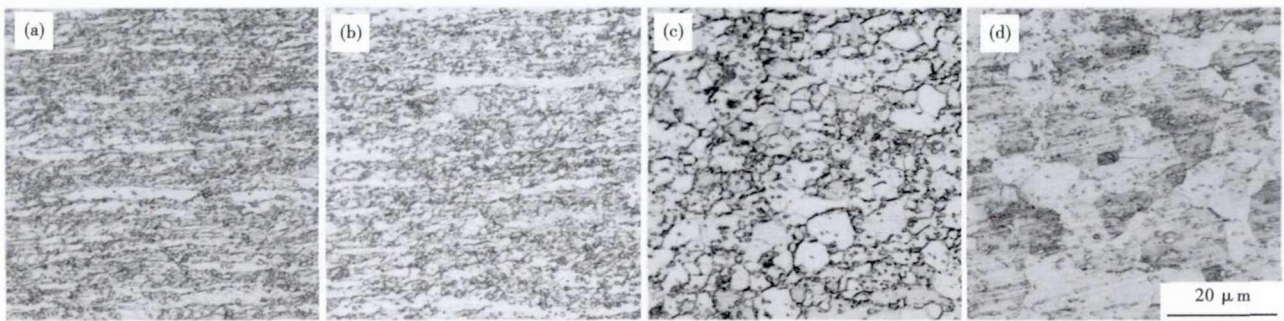


图 3 420U6 试验钢(a)620 °C、(b)660 °C、(c)680 °C和(d)820 °C 60 s 退火后的组织形貌

Fig. 3 Morphology of structure of test steel 420U6 annealed at (a) 620 °C, (b) 660 °C, (c) 680 °C and (d) 820 °C for 60 s

从 15 s 增长到 150 s,材料的 Hv5 硬度值基本维持在 150 ~ 155,且较冷轧态的硬度大幅下降了约 45%。

从图 4(a)可知,当退火温度为 780 °C 且保温时间为 15 s 时,材料即已基本完成再结晶,之后随着保温时间的进一步延长,晶粒缓慢长大,且晶粒尺寸的均匀化程度逐渐提高(图 4b~d)。由于保温 15 s 之后材料即已基本完成再结晶,且在随后的保温过程中组织变化不大,因此材料的硬度在 15 ~ 150 s 的保温过程中基本维持不变。在以上两组试验中,

再结晶之后的晶粒长大的过程中晶粒长大缓慢的一个重要原因是原始组织中随机分布的大量的点状碳氮化物,这些碳氮化物的存在降低了晶界的活动性,阻止了晶粒的长大,同时还会引起形变储能的增加从而提高形核率。

根据图 2(a)所示的硬度与退火温度之间的关系曲线,结合前述对再结晶温度的定义^[7-8],可知试验钢在保温时间为 60 s 时的再结晶温度范围在 660 ~ 680 °C,这与图 3(b,c)所显示的组织也相互吻合。对 660 ~ 680 °C 的硬度与温度的关系进行线

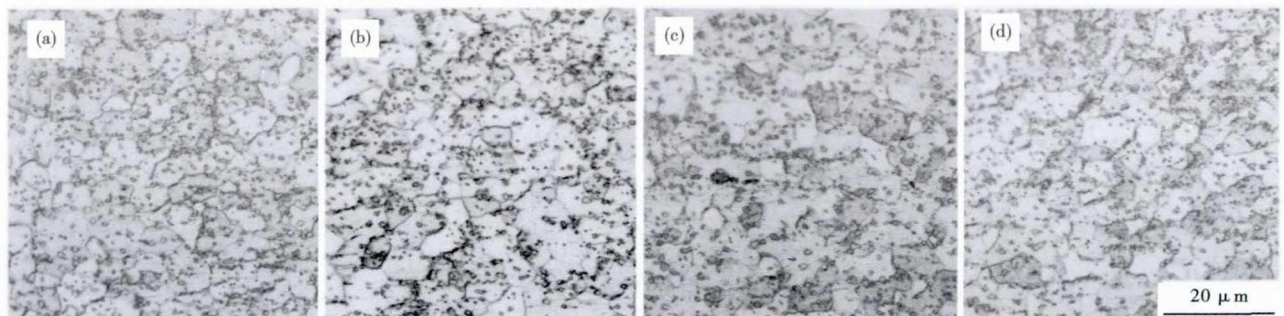


图 4 420U6 试验钢 780 °C (a)15 s、(b)45 s、(c)90 s 和 (d)150 s 退火的组织形貌

Fig. 4 Morphology of structure of test steel 420U6 annealed at 780 °C time for (a) 15 s, (b) 45 s, (c) 90 s and (d) 150 s

表 2 420U6 试验钢的再结晶激活能的计算条件和结果
Table 2 Calculation conditions and results of recrystallization activation energy of test steel 420U6

试验类型	再结晶温度 T/K	再结晶时间 τ/s	系数 A/s^{-1}	再结晶激活能 $Q_r/(kJ \cdot mol^{-1})$
定时	937.2	60	2.08×10^6	145.3
恒温	1 053	7.7	2.08×10^6	145.3

性插值可知试验钢在 60 s 定时条件下的再结晶温度为 664.2 ℃。根据图 2(b) 中的硬度与保温时间之间的关系曲线并采用相同的方法,可计算出试验钢在 780 ℃ 恒温条件下的再结晶时间为 7.7 s。将所得到的再结晶温度与再结晶时间代入公式(2)、(3)可计算出再结晶激活能与系数 A (见表 2)。

金属的再结晶过程除了受退火温度和保温时间的影响外,还与材料的成分、原始晶粒的大小、退火前的冷变形程度等密切相关。在材料的成分、冷变形率等条件类似的情况下,可利用表 2 中计算得到的 Q_r 和 A 值来预测不同退火温度或不同保温时间的再结晶时间和再结晶温度,从而为试验钢大生产冷轧卷板退火工艺的制定提供一定的理论依据。

3 结论

(1) 随着退火温度的升高和保温时间的延长,含氮马氏体不锈钢 420U6 冷轧板的硬度逐渐降低。当保温时间为 60 s 时,试验钢的再结晶温度为

664.2 ℃,当退火温度为 780 ℃ 时,再结晶时间为 7.7 s。

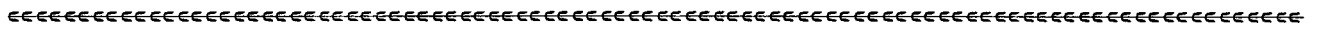
(2) 在本试验条件下,根据测得的再结晶温度和再结晶时间及 Arrhenius 公式可计算出试验钢的再结晶激活能 Q_r 为 145.3 kJ/mol。

参考文献

[1] 白鹤,王伯健. 马氏体不锈钢成分、工艺和耐蚀性的进展[J]. 特殊钢,2009,30(2):30-33.
 [2] 秦斌. 热处理对马氏体不锈钢 5Cr15MoV 冷轧退火板组织和性能的影响[J]. 特殊钢,2011,32(2):66-68.
 [3] Seifert M, Siebert S and Huth S, et al. New Developments in Martensitic Stainless Steels Containing C + N [J]. Steel Research International, 2015, 86 (12): 1508-1516.
 [4] 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,1994:29-32.
 [5] 盖伊 AG,郝仑 JJ. 物理冶金原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981:152.
 [6] 包永千. 金属学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1986:201.
 [7] 王作成,王先进,韦柯. 退火条件对高强度 IF 钢性能的影响[J]. 山东工业大学学报,1999,29(3):246-251.
 [8] 马衍伟,王先进,李惠琴,等. 退火工艺对超深冲 Nb + Ti-IF 钢性能的影响[J]. 金属热处理学报,1998,19(1):16-20.

李 筱(1981-),男,博士研究生,高级工程师,2004 年西安建筑科技大学(本科)毕业,不锈钢研发。
 E-mail:Lixiao_sgpv@163.com

收稿日期:2018-09-12



“讲文明树新风”公益广告

绿色环保
 爱我家园