

00Cr11Ni11MoTi 超高强不锈钢粗大晶粒遗传特性

林建军^{1,2} 杨卓越² 陈嘉砚² 卢德宏¹

(1 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 研究了 00Cr11Ni11MoTi 钢 1 150 °C 轧后原始粗大晶粒在 780 ~ 900 °C 固溶处理的遗传特征。结果表明, 该钢存在一个奥氏体重新形核、不再遗传粗大晶粒的临界温度 (A_c), 00Cr11Ni11MoTi 钢 A_c 在 870 ~ 900 °C, 远高于 A_f 相变点, 在 $A_f \sim A_c$ 加热均发生原始粗大晶粒遗传。 A_s (630 °C) ~ A_f (730 °C) 两相区预处理可使奥氏体重新形核的临界温度 (A_c) 降低, 但在 A_c 温度以上这种预处理没有明显的晶粒细化作用。

关键词 超高强不锈钢 晶粒遗传 临界温度 循环处理

Hereditary Feature of Coarse Grain of Ultra-High Strength Stainless Steel 00Cr11Ni11MoTi

Lin Jianjun^{1,2}, Yang Zhuoyue², Chen Jiayan² and Lu Dehong²

(1 Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Hereditary feature of original coarse grain of steel 00Cr11Ni11MoTi rolled at 1 150 °C and solid-solution treated at 780 ~ 900 °C has been studied. Results show that there is a critical temperature A_c for the steel, at which the austenite renews nucleation and the heredity of coarse grain do not carried out; the A_c of steel 00Cr11Ni11MoTi is 870 ~ 900 °C and higher than transformation point A_f , and with heating at $A_f \sim A_c$, the heredity of original coarse grain occurs. With pre-heat-treating in two-phase region A_s (630 °C) ~ A_f (730 °C), the critical temperature A_c to renew nucleation of austenite decreases, but it is not available to refine grain with pre-heat-treating at temperature higher than A_c .

Material Index Ultra-High Strength Stainless Steel, Grain Heredity, Critical Temperature, Cycling Treatment

粗大晶粒遗传是原始组织为马氏体或贝氏体等非平衡组织的合金钢, 在加热奥氏体化过程中一种常见的现象, 许多学者研究了这一现象的发生原因和规律^[1-3], Sadoyskiy 认为粗大晶粒遗传与原始组织状态和加热速度有关^[1]; Cao 等学者研究证实粗大晶粒遗传主要取向于化学成分, 即与淬透性有关, 淬透性越好越容易发生粗大晶粒遗传^[3]。由于粗大晶粒不仅降低钢的屈服强度, 而且又使冷脆转化温度升高。为了切断粗大晶粒遗传, 通常采取的相应措施有淬火加热前预处理^[3]、快速循环处理^[4]等。本文针对 00Cr11Ni11MoTi 超高强不锈钢热轧环件粗大晶粒的遗传特征进行了详细的研究, 得到了该钢的遗传特征和规律。

1 试验材料与方法

研究用材料为 00Cr11Ni11MoTi 超高强不锈钢, 通过“3 t 真空感应炉 + 真空自耗冶炼”双真空冶炼, 其化学成分见表 1。

冶炼坯经锻造开坯后高温轧制成外径 $\Phi 497$ mm、内径 $\Phi 437$ mm 的环件。轧环前坯料加热到

表 1 试验用钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steel / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Al
0.004	0.026	0.010	0.001 5	0.003 6	10.90	11.12	0.98	1.26	0.059

1 150 °C, 因快速轧制使终轧后的环件温度没有明显降低, 最终导致晶粒粗化, 平均晶粒尺寸 151 μm 。

为确定合理的热处理工艺, 首先用 Formastor-D 全自动相变测量仪测试了相变温度, 测试的相变温度分别为: $A_s = 630$ °C, $A_f = 730$ °C, $M_s = 80$ °C。在轧制环材上切取 10 mm \times 10 mm \times 20 mm 的试样, 这些试样经过 780、810、840、870、900 °C 1 h 空冷的固溶处理 (淬火), 以观察奥氏体晶粒变化, 所有的固溶处理均在空气介质电阻炉内加热, 空载加热到指定的固溶 (淬火) 温度后将试样放入炉内, 以确保试样加热速度基本一致。此外研究了在 $A_s \sim A_f$ 两相区预处理对晶粒遗传的影响。

2 实验结果与分析

2.1 粗大奥氏体晶粒遗传特性

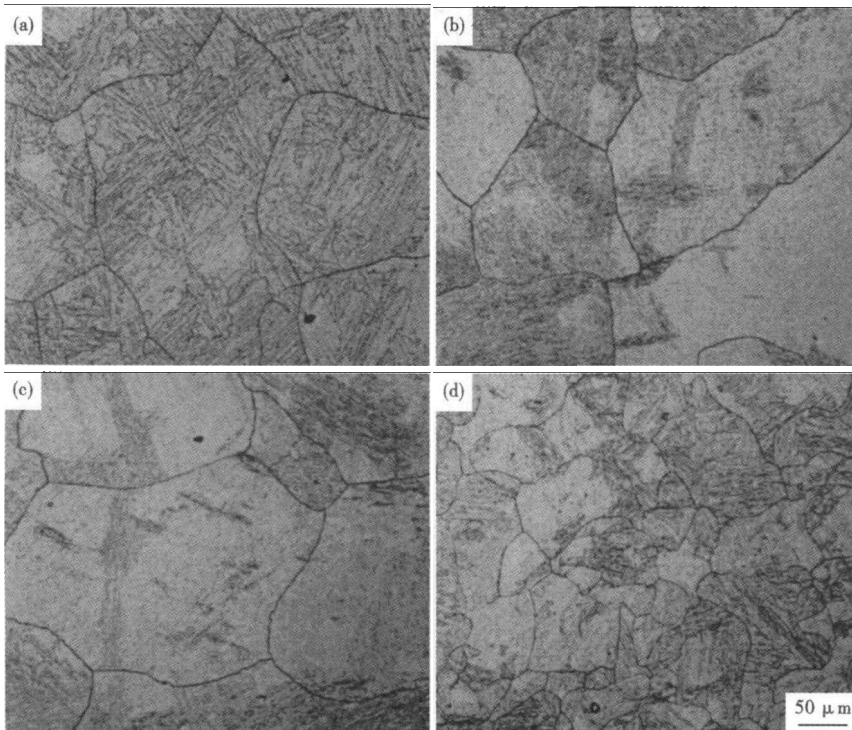


图 1 热轧(a)和 780 °C (b), 870 °C (c), 900 °C (d) 固溶处理 00Cr11Ni11MoTi 钢奥氏体晶粒形貌

Fig. 1 Morphology of austenite grain of steel 00Cr11Ni11MoTi hot-rolled (a) and solid-solution treated at 780 °C (b), 870 °C (c) and 900 °C (d)

780 ~ 900 °C 不同温度直接固溶处理(淬火)结果可以看出:780 ~ 870 °C 尽管固溶温度不同,但奥氏体晶粒尺寸相近,均遗传了原轧坯粗大奥氏体晶粒(图 1 和图 2),而 900 °C 固溶处理发生了奥氏体重新形核、长大,奥氏体晶粒明显细化。这一结果说明在 870 ~ 900 °C 必定存在一个临界温度(A_c),使得 00Cr11Ni11MoTi 超高强度不锈钢高于这一临界温度加热通过重新形核、长大奥氏体化;若低于这一临界温度,尽管高于相变温度 A_r (730 °C),但均

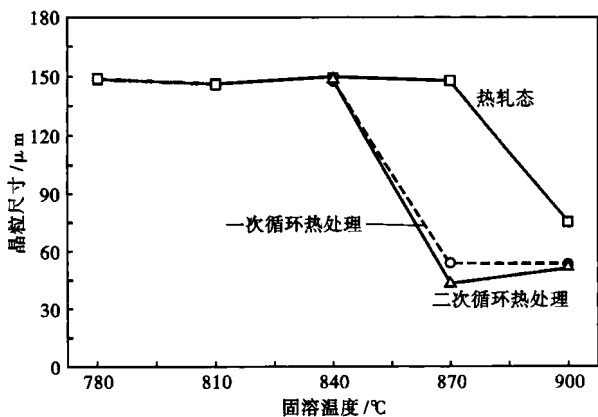


图 2 热处理对 00Cr11Ni11MoTi 钢奥氏体晶粒尺寸的影响
Fig. 2 Effect of heat treatment process on austenite grain size of steel 00Cr11Ni11MoTi

以非平衡方式发生奥氏体相变,使原始态的粗大晶粒重构,即发生原始粗大晶粒遗传。

2.2 预处理对粗大晶粒遗传的影响

切断粗大晶粒遗传、细化晶粒有许多方法,如低于 A_s 相变温度的高温回火^[3]、快速加热/冷却循环处理^[4]、在 $A_s \sim A_r$ 两相区加热预处理^[5]。低于 A_s 温度高温回火主要针对低、中合金的超高强度钢进行;而快速加热/冷却循环处理难以保证构件整个截面加热/冷却速度均匀,而且存在构件变形、甚至开裂的危险。为此,尝试了 Guo^[5] 等人在 13-8PH 不锈钢使用的方法,即在 $A_s \sim A_r$ 两相区预处理,结合相变点的测试结果,在最终固溶处理前增加 710 °C 2 h 空冷的预处理,最终的固溶处理温度选择

840、870、900 °C,将两相区预处理 + 最终的固溶处理称为一次循环(IQ),连续两次处理称为二次循环处理(IQIQ),相关的工艺参数见表 2。

表 2 试验钢预处理工艺
Table 2 Pre-heat-treatment process of test steel

编号	一次循环(空冷)		二次循环(空冷)					
	温度/°C	时间/h	温度/°C	时间/h				
840IQ	710 °C	2 h	840 °C	1 h				
840IQIQ	710 °C	2 h	840 °C	1 h	710 °C	2 h	840 °C	1 h
870IQ	710 °C	2 h	870 °C	1 h				
870IQIQ	710 °C	2 h	870 °C	1 h	710 °C	2 h	870 °C	1 h
900IQ	710 °C	2 h	900 °C	1 h				
900IQIQ	710 °C	2 h	900 °C	1 h	710 °C	2 h	900 °C	1 h

710 °C 2 h 预处理对最终粗大晶粒遗传的影响同样与最终固溶处理(淬火)温度有关,图 2 和图 3 所示 710 °C 2 h + 840 °C 1 h 一次循环处理、甚至二次循环处理也不能使奥氏体重新形核,仍遗传原始的粗大晶粒;而 710 °C 2 h + 870 °C 1 h 一次循环处理平均晶粒尺寸细化到 53 μm,二次循环处理后细化到 43 μm;由于 900 °C 1 h 直接固溶加热奥氏体重新形核(图 1d),因此增加 710 °C 2 h 预处理虽然也有晶粒细化作用,但作用相对较小(图 2,图 3e、f)。

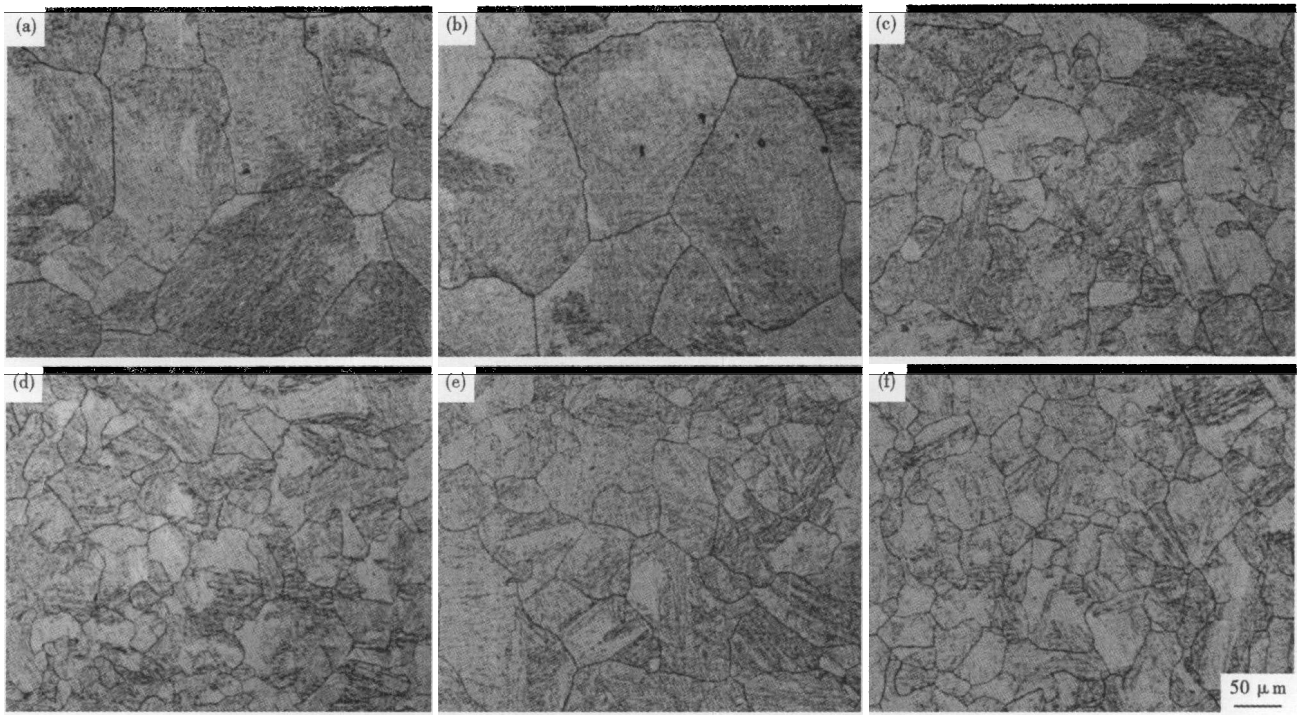


图 3 00Cr11Ni11MoTi 钢 710 °C 2 h 空冷预处理后不同温度固溶奥氏体晶粒尺寸:840 °C- (a) IQ, (b) IQIQ; 870 °C- (c) IQ, (d) IQIQ; 900 °C- (e) IQ, (f) IQIQ

Fig. 3 Austenite grain size of steel 00Cr11Ni11MoTi solid-solution-treated at different temperature after pretreatment 710 °C 2 h, air cooling: 840 °C- (a) IQ, (b) IQIQ; 870 °C- (c) IQ, (d) IQIQ; 900 °C- (e) IQ, (f) IQIQ

在 870 ~ 900 °C 存在一个临界温度 (A_c), 高于这一临界温度 00Cr11Ni11MoTi 不锈钢以重新形核、长大的方式进行奥氏体化, 上述“710 °C 2 h + 870 °C 1 h”循环处理晶粒比 870 °C 1 h 直接固溶处理显著细化的结果表明: 只有最终固溶处理温度接近于上述临界温度 (870 ~ 900 °C), “710 °C 2 h”预处理才起作用, “710 °C 2 h + 840 °C 1 h”循环处理结果证实最终固溶温度低于临界温度较多时, 即使进行 $A_s \sim A_f$ 两相区预处理也不能切断原始粗大晶粒遗传。

然而, 与 900 °C 1 h 直接固溶处理相比, “710 °C 2 h + 900 °C 1 h”一次、甚至二次循环后晶粒细化不显著, 因为 900 °C 已超过奥氏体重新形核、长大温度, 已不再遗传原始粗大晶粒, 从这一角度考虑, $A_s \sim A_f$ 两相区预处理实质上起到了降低重新形核、长大对应的临界温度的作用。

3 结论

(1) 00Cr11Ni11MoTi 超高强度不锈钢在远高于 A_f 点存在一个临界温度 (A_c), 高于这一温度奥氏体重新形核、不再遗传原始粗大晶粒, 这一温度在

870 ~ 900 °C, 在 $A_f \sim A_c$ 很宽的温度范围加热均发生原始粗大晶粒遗传。

(2) $A_s \sim A_f$ 两相区预处理使奥氏体重新形核的临界温度 (A_c) 降低, 因此在相当宽的温度范围这种预处理并没有切断原始粗大晶粒遗传的作用; 在 A_c 温度以上这种预处理也没有明显的晶粒细化作用。

参考文献

- 1 Sadovskiĭ V D. Structural Heredity in Steel. *Sov Phys Uspekhi*, 1982, 25(10):767
- 2 Yugai S S, Kleiner L M, Shatsov A A, et al. Structural Heredity in Low-Carbon Martensitic Steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 2004, 46(11-12):543
- 3 Cao W D, Lu X P. Duplex Treatment of High-Strength Steels. *Metalurgical Transactions A*, 1989, 20(9):1687
- 4 Grange R A. Strengthening Steel by Austenite Grain Refinement. *Transactions of the ASM*, 1966, 59:26
- 5 Guo Z, Sha W, Wilson E A, et al. Improving Toughness of PH13-8 Stainless Steel Through Intercritical Annealing. *ISIJ International*, 2003, 43(10):1622

林建军(1983-), 男, 硕士研究生, 超高强度钢研究。

收稿日期: 2009-09-22