

# Effect of Heat Treatment Process on Mechanical Properties of 441 Stainless Steel

Xuecai Chen, Danghui Yu

Gansu Dongxing Aluminum Industry Co., Ltd, Jiayuguan Gansu  
Email: wg10310918@163.com

Received: May 22<sup>nd</sup>, 2017; accepted: Jun. 24<sup>th</sup>, 2017; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In this paper, in order to improve the bulging performance of 441 stainless steel tube and avoid the cold tube bulging cracking, the effect of annealing process parameters on hardness, elongation and strength of 441 stainless steel cold bending pipe have been studied. The best annealing process of 441 stainless steel cold bending pipe have been obtained. Lower or higher than 850 °C, hardness of materials are increases, elongation and strength are reduced. Insulation time can only reduce the hardness and do not have any effect on elongation and strength. Slow cooling (air cooling) after annealing results in more second phase precipitation, which decrease the elongation compared to water cooling.

## Keywords

Heat Treatment, Mechanical Performance, Microstructure

---

# 热处理工艺对441不锈钢力学性能的影响

陈学才, 余党会

甘肃东兴铝业有限公司, 甘肃 嘉峪关  
Email: wg10310918@163.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月24日; 发布日期: 2017年6月27日

---

## 摘 要

为了改善441不锈钢管冷弯部位的胀形性能, 避免冷弯管的胀形开裂。本文研究441不锈钢冷弯管的退

火工艺参数对硬度、伸长率和强度的影响, 获得了441不锈钢冷弯管的最佳退火工艺。低于或高于850℃退火, 材料的硬度都升高, 伸长率和强度都降低; 保温时间的延长只能降低硬度, 对伸长率和强度没有帮助。退火后慢冷(空冷)导致更多的第二相析出, 与水冷相比伸长率较低。

## 关键词

热处理, 力学性能, 显微组织

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 汽车尾气排放已经成为全球气温变暖和空气污染的罪魁祸首之一, 为了降低发动机排气的污染程度, 需要提高发动机的排气温度大约到 900℃。由于直接与发动机出气口接连, 发动机排气歧管反复地接触高温气氛, 需要具备抗氧化性能、热稳定性、冷加工性能及焊接性能[1] [2]。

AISI 型号 441 不锈钢具有高温抗氧化性能好、热膨胀系数小等特点, 可制作在高温下工作的零件, 能满足发动机排气歧管的要求, 大量使用于发汽车电机排球系统中。441 不锈钢含铬 18%左右, 是 Ti、Nb 稳定的铁素体不锈钢, Nb, Ti 元素的添加可以提高抗应力腐蚀性能和起到固溶强化作用, 但也会导致诸如 Nb (C,N)和 Ti (C,N)和 Fe<sub>2</sub>Nb 等沉积相, 这些沉积相会降低 441 不锈钢的塑性[3] [4]。

为了提高 441 不锈钢的性能, 本文将 441 不锈钢进行退火处理, 系统地研究退火工艺对 441 不锈钢硬度和伸长率的影响, 分析退火工艺对显微组织和力学性能的影响, 期望最大程度的提高 441 不锈钢的力学性能, 以扩大其使用范围。

## 2. 实验

实验材料厚度为 1.5 mm 的 441 不锈钢管, 冷弯 90°, 表 1 为 441 不锈钢管成分表。

441 不锈钢属于铁素体不锈钢, 根据铁素体不锈钢的特性制定 441 不锈钢的热处理工艺, 铁素体不锈钢在 370℃~540℃会产生脆化现象, 不锈钢的强度、硬度增加, 塑性、韧性明显下降, 耐腐蚀性能显著降低, 在 475℃时性能降低的最为明显, 因此为了避免力学性能的恶化, 本文中选取的实验温度均高于 700℃。

本论文中热处理温度分别为 700℃、750℃、800℃、850℃和 900℃, 保温时间分别为 30 min、60 min、120 min、150 min 和 180 min。热处理后采用扫描电镜观察显微组织变化, 采用拉伸试验机进行力学性能测试。

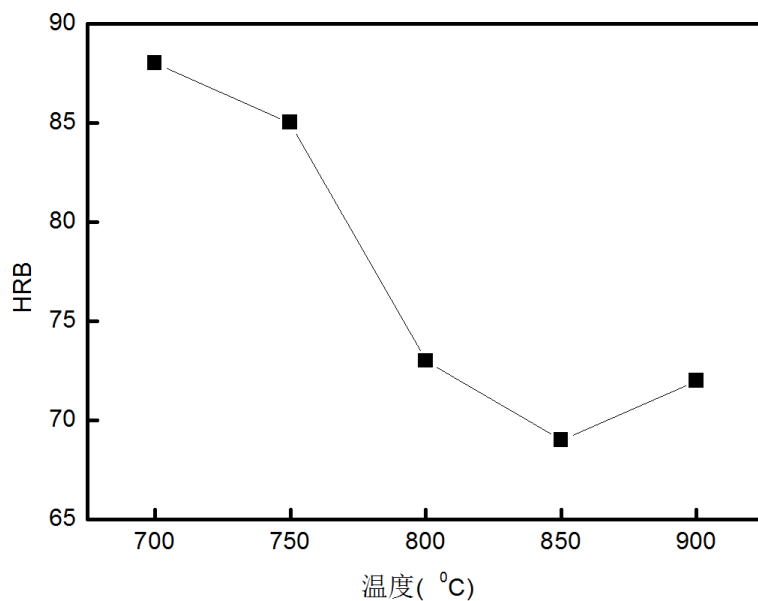
## 3. 结果与分析

图 1 所示为保温时间 180 min, 水冷, 不同退火温度下的 441 不锈钢硬度变化曲线。从图 1 可知, 随着退火温度从 700℃升高到 900℃, 硬度从 HRB 88 先降低到 HRB 69, 然后再上升, 但都明显低于 441 不锈钢冷变形的 HRB 93 硬度值。这个主要是因为低于 850℃的温度退火 441 不锈钢会析出硬质相, 而高于 850℃退火则会使得晶粒度增大导致材料硬化。

图 2 所示为保温时间 180 min, 水冷, 不同退火温度下的 441 不锈钢应力应变曲线。从图中可以看出, 经热处理以后 441 不锈钢的屈服强度均有所下降, 且随热处理温度的升高而逐渐降低, 尽管如此, 伸长

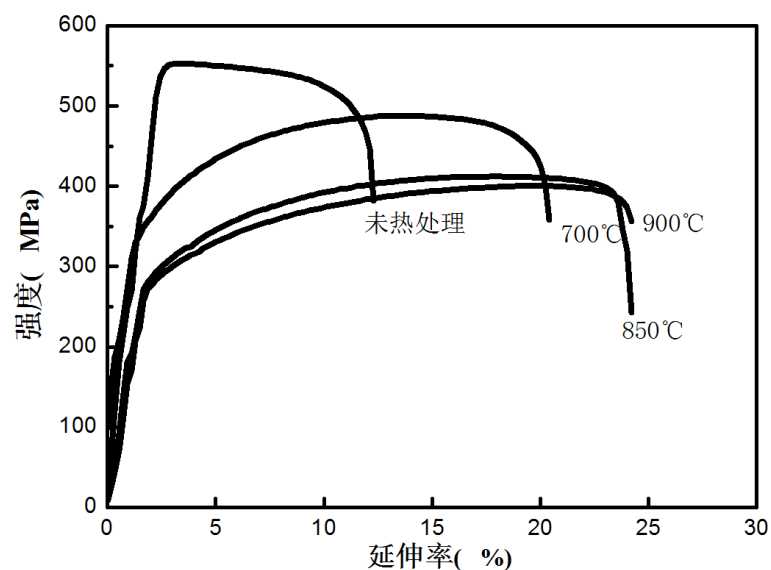
**Table 1.** Composition of 441 stainless steel  
**表 1.** 441 不锈钢的化学成分

C	Mn	P	S	Si	Cr
0.03%	1.0%	0.04%	0.015%	1.0%	17.5%~18.5%



**Figure 1.** Change of hardness varies with the annealing temperature (holding time 180 min, water cooling)

**图 1.** 硬度随着退火温度变化的曲线(保温 180 min, 水冷)



**Figure 2.** Stress-strain curves with the different annealing temperature (holding time 180 min, water cooling)

**图 2.** 不同退火温度下的应力应变曲线(保温 180 min, 水冷)

率随热处理温度的升高而逐渐升高, 当温度为 850°C 时, 伸长率达到最大约为 28%。M.P. Sello 研究[5]认为低于 850°C 退火 441 不锈钢析出的叶夫相是导致材料冲击韧性降低的主要原因, 因此低于 850°C 退火

441 不锈钢伸长率降低, 主要原因是叶夫相等第二相的析出。晶粒度随着退火温度的升高逐渐长大, 如图 3 所示, 850℃退火的晶粒度大约 80 μm, 900℃退火晶粒度增大到 100 μm 左右, 高于 850℃退火时叶夫相和晶粒长大同时存在, 其中晶粒长大已经成为材料脆化的主要原因。

退火温度为 850℃, 水冷, 不同保温时间对硬度的影响如图 4 所示。从图 3 可知, 退火的保温温度从 30 分钟延长到 180 分钟, 441 不锈钢的硬度从 HBR 77 降低到 HRB 69, 这些硬度范围也明显低于未热处理的硬度值。

保温时间 180 分钟, 水冷, 不同保温时间下的应力应变曲线如图 5 所示。从图中可以看出随保温时间从 30 min 到 180 min, 伸长率保持在 28% 左右, 变化不大。保温时间从 30 min 增加到 180 min, 保温时间对 441 不锈钢的伸长率影响不大, 此外, 保温时间从 30 min 增加到 180 min, 441 不锈钢的强度没有变化。上述结果可知, 保温时间对 441 不锈钢的伸长率和强度没有任何帮助。

图 6 是不同保温时间的金相组织(850℃退火后水冷), 从图 6 可知, 晶粒度随着保温时间的增加逐渐

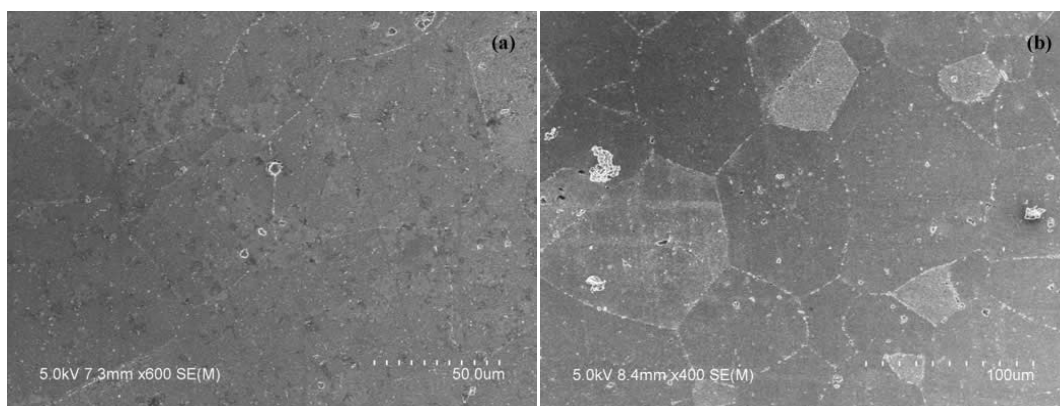


Figure 3. Microstructure of 441 stainless steel with the different annealing temperature (holding time 180 min, water cooling); (a) 850℃; (b) 900℃

图 3. 不同退火温度对金相组织的影响(保温 180min, 水冷); (a) 850℃; (b) 900℃

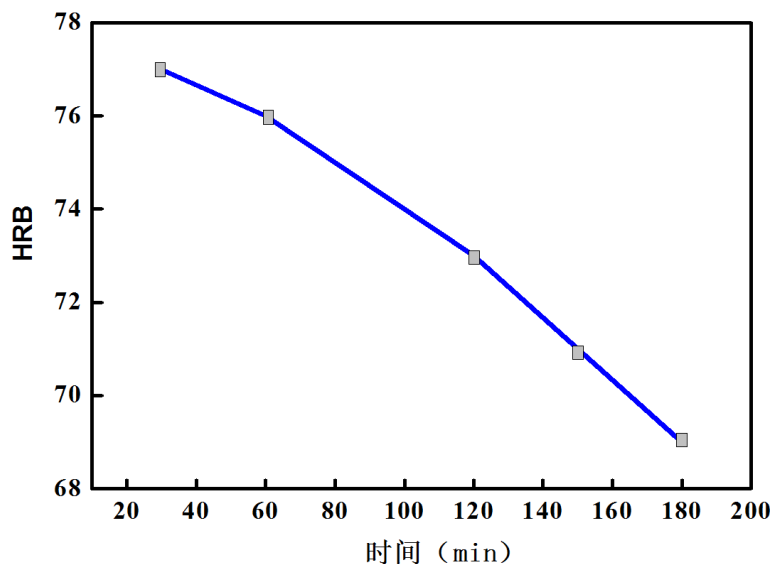


Figure 4. Change of hardness varies with the holding time (annealing temperature 850℃, water cooling)

图 4. 硬度随着保温时间变化的曲线(退火温度 850℃, 水冷)

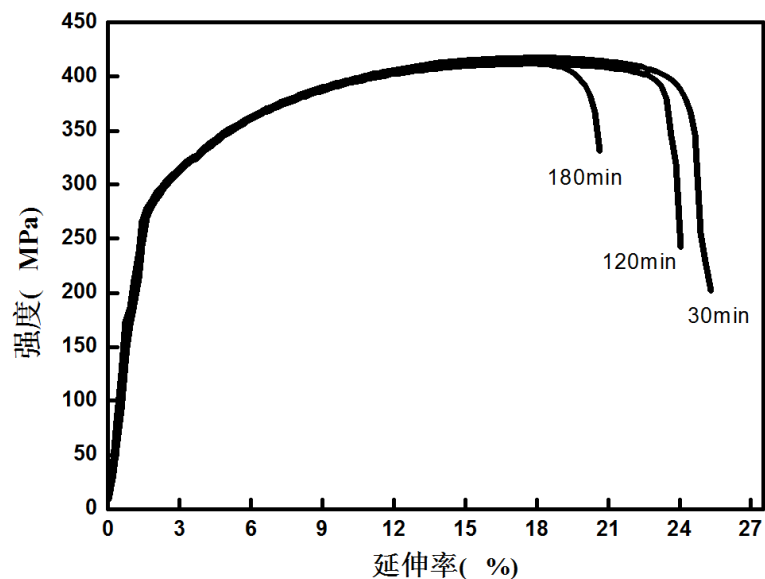


Figure 5. Stress-strain curves with the different holding time (holding time 180 min, water cooling)

图 5. 不同保温时间下的应力应变曲线(保温 180 min, 水冷)

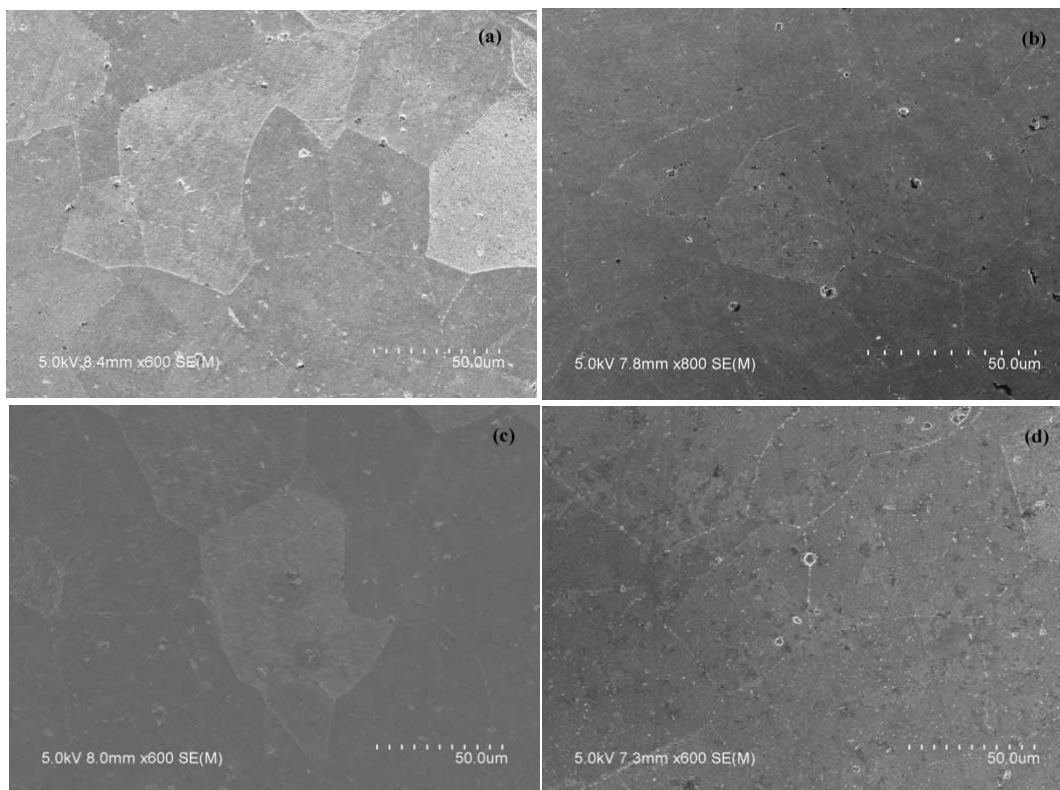


Figure 6. Microstructure of 441 stainless steel with the different holding time (annealing temperature 850°C, water cooling): (a) 30 min; (b) 60 min; (c) 150 min; (d) 180 min;

图 6. 不同保温时间对金相组织的影响(退火温度 850°C, 水冷): (a) 30 min; (b) 60 min; (c) 150 min; (d) 180 min

长大, 从 40 μm 长大到 80 μm。随着保温时间的增加, 晶粒度从 40 μm 长大到 80 μm, 材料硬度降低, 伸

长率基本保持在 28% 左右及强度基本没有变化, 因此, 晶粒度从 40  $\mu\text{m}$  到 80  $\mu\text{m}$  范围内变化只降低了硬度, 但并不影响材料的伸长率和强度。

#### 4. 结论

本文采用金相显微镜和拉伸试验机研究退火工艺对 441 不锈钢组织和力学性能的影响, 得到以下结论:

- 1) 随着退火温度从 700 $^{\circ}\text{C}$  升高到 900 $^{\circ}\text{C}$ , 硬度先降低再升高, 在 850 $^{\circ}\text{C}$  降到最低; 延伸率在 850 $^{\circ}\text{C}$  达到最大值;
- 2) 随着保温时间从 30 min 增加到 180 min, 硬度逐渐降低; 延伸率保持在 28% 左右, 强度未发生明显变化;
- 3) 441 不锈钢冷弯管的最佳退火工艺为: 保温温度 850 $^{\circ}\text{C}$ , 保温 3 h 后水冷。

#### 参考文献 (References)

- [1] 毕洪运. 汽车排气系统用铁素体不锈钢的应用及腐蚀时效评价[J]. 宝钢技术, 2010(2): 7-15.
- [2] Fujita, N. (2003) Changes of Microstructures and High Temperature Properties during High Temperature Service of Niobium Added Ferritic Stainless Steels. *Materials Science and Engineering A*, **351**, 272-281.
- [3] 孟繁茂, 付俊岩. 现代含铌不锈钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 262-264.
- [4] 王伟明, 李鑫, 毕洪运, 方徽源. 汽车排气系统高温端用 441 铁素体不锈钢研制[J]. 世界钢铁, 2012(2): 42-45.
- [5] Sello, M.P. and Stumpf, W.E. (2011) Laves Phase Precipitation and Its Transformation Kinetics in the Ferritic Stainless Steel Type AISI 441. *Materials Science and Engineering A*, **528**, 1840-1847.

#### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)