

# 铌在不锈钢中的应用

王俊琴 刘云霞

(太原钢铁(集团)有限公司, 山西太原 030003)

**摘要** 铌是不锈钢中的重要合金元素。本文重点介绍了铌和铌在不锈钢中的应用, 以及铌与 Ti、Cu、Mo、N 的复合应用。

**关键词** 铌 不锈钢 应用

## The Application of Nb in Stainless Steel

Wang Junqin Liu Yunxia

**Abstract** Niobium is an important element in the stainless steel. This paper has described the element niobium and its application in stainless steel, as well as the compound usage of Nb with the elements Ti, Mo, Cu and N in the stainless steel.

**Key Words** Niobium, Stainless Steel, Application

### 1 前言

铌是不锈钢中的重要合金元素之一, 其用量仅次于钼。尤其在高温领域的耐热不锈钢中, 铌可部分的代替价格昂贵的钼。20/25Nb 奥氏体不锈钢、AISI 347 等含铌不锈钢早已经得到普及应用。近年来开发出的最具代表性的钢种是广泛用于汽车发动机排气系统的 Ti 和 Nb 双稳定化的 409 型铁素体不锈钢, 以及广泛应用于厨具、家电和医疗领域的 Nb 和 Cu 的复合化 430 型铁素体抗菌不锈钢。中国已成为世界上最大的不锈钢消费国, 但是在含铌铁素体不锈钢开发方面还几乎是空白。以下主要论述铌在不锈钢中的应用。

### 2 不锈钢中的铌

铌既是一种强铁素体形成元素, 又是强碳、氮化物形成元素。在长时间受热时易于形成金属间化合物。铌在不锈钢中的作用主要取决于铌的存在形式。铌在不锈钢中的存在形式有自由铌, 铌的碳、氮化物和金属间化合物。

#### 2.1 固溶铌对不锈钢组织的影响

铌的铬当量数经常定为 0.5。在估计铌对相比例(铁素体)的影响时, 除考虑化学成分中的铌外, 还必须计算铌的碳、氮化物所消耗的 C、N 的铬当量数和化合物中的 Nb, 从而采用有效铌含量。其中:

$$\text{奥氏体不锈钢中的有效铌含量} (\%) = \text{Nb\%} - 8[(C\% - 0.03) + N_2\%]$$

#### 2.2 不锈钢中铌的碳、氮化物

铌的碳、氮化物有 NbC、NbN 和 Nb(CN), 其中 NbN 比 NbC 更稳定; 它们的含量决定于钢种和温度及 [C+N][Nb] 溶度积。公式如下:

$$\log[Nb][C] = -9350/T + 4.55$$

(18Cr-13Ni 钢)

$$\log[Nb][C] = -8350/T + 4.07$$

(20Cr-25Ni 钢)

$$\log[Nb][C] = -7900/T + 3.43$$

(17-4PH)

$$\log[Nb][N] = -11600/T + 4.84$$

(含 N 钢)

$$\log[Nb][C+6/7N] = -6750/T + 3.21$$

(考虑 C、N 含量)

$$\log[Nb][C] = -9.1$$

(990°C 17-25Cr钢)

### 2.3 金属间化合物

不锈钢中镍的金属间化合物：常见的有 $\text{FeNb}$   $\sigma$ -相、 $\text{Fe}_2\text{Nb}$  拉维斯相，不常见的有 G 相、M 相和  $\gamma'$  相。

1)  $\sigma$ -相可用电子空位浓度  $N_v$  预测，公式如下：

$$N_v = 0.66Ni + 1.71Co + 2.66Fe + 4.66(Cr + Mo + W) + 5.66V + 6.66Zr + 10.66Nb$$

可见 Nb 的系数最大，当  $N_v > 2.52$  时出现  $\sigma$ -相。但碳氮化物的铌对  $\sigma$  的生成是不活泼的。

2)  $\text{Fe}_2\text{Nb}$  拉维斯相是在含有铌的铁素体和奥氏体钢中生成的普通金属间化合物，这种相是密排六角结构，有很宽的溶解度和成分范围。

3) 在耐热钢中过比 Nb 量长时间会形成  $\text{Fe}_2\text{Nb}$  拉维斯相；在铁素体不锈钢的生产过程中还要利用  $\text{Fe}_2\text{Nb}$  的析出控制冷轧板的晶粒度。

4) Nb 与 C、N 化合时，在高温合金中常形成以  $\text{Ni}_3\text{Nb}$  型为基础、具有四方形结构的  $\gamma'$  相。

### 3 铌在不锈钢中的作用

#### 3.1 铌对室温力学性能的影响

铌的原子半径是 2.94 埃，比钢中普通置换合金元素的任何一个都大，有最大的强化作用。在许多钢种中都通过添加铌来提高钢的强度。

#### 3.2 铌对高温力学性能的影响

##### 1) 铌对铁素体不锈钢高温强度的影响

固溶铌可有效改善高温强度，如图 1 所示。合金元素对铁素体不锈钢高温屈服强度的影响中 Nb 作用最大，Ti 最小。

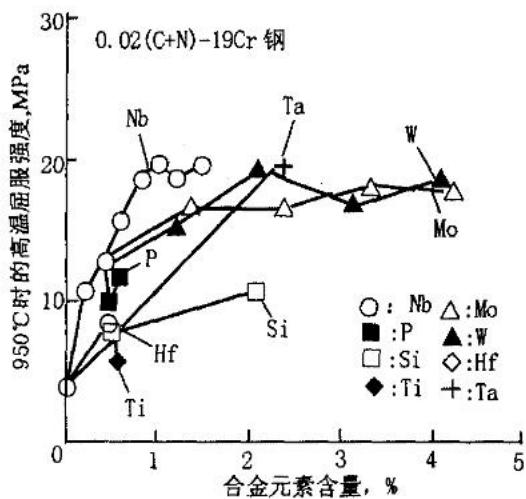


图 1 铌对铁素体不锈钢高温屈服强度的影响

#### 2) 铌对高温蠕变强度的影响

如图 2 所示，蠕变破断时间随 Nb 含量的增加直线上升，并且 0.1% 和 1% 的 Nb 作用相等，所以微量铌对不锈钢高温蠕变强度有良好效果。固溶铌和 NbC 对蠕变性能的影响机理不同，固溶铌是以固溶强化为机制，而 NbC 则在蠕变过程中以阻止蠕变滑动为机制。

#### 3.3 铌对碳的稳定作用

##### 1) 铌可提高钢的耐晶间腐蚀性能

在图 3 中可见，当 Nb/C = 8~10 时，不发生晶间腐蚀。这是因为用 Nb 稳定化的钢经过固溶或稳定化处理后，钢中的碳全部形成 NbC，避免了在低温回火时生成  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  而产生的晶界贫铬区，也就提高了钢的耐晶间腐蚀性能。

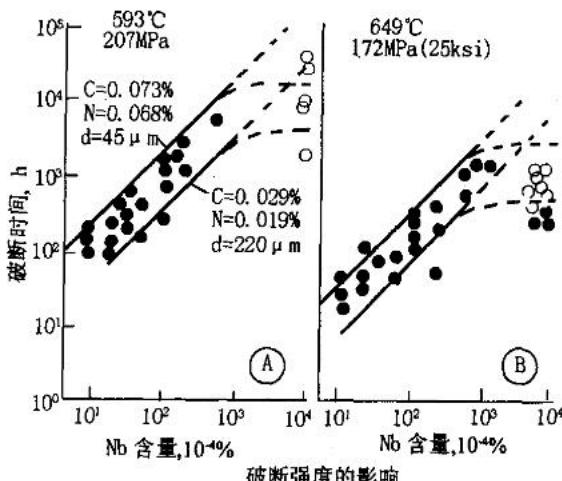


图 2 加微量铌对奥氏体不锈钢蠕变性能的影响

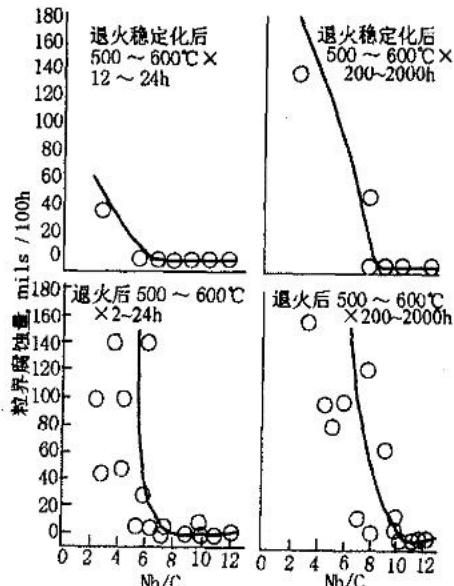


图 3 不同热处理的 18-8 不锈钢的晶间腐蚀和 Nb/C 比的关系

## 2) 钨可改善钢的耐蚀性

马氏体不锈钢中加入铌，能够将钢中铬的有效含量保留在基体中，从而改善了钢的耐蚀性；同时铌可有效提高点蚀电位。

## 3) 铌对铁素体不锈钢耐 $\text{Cl}^-$ 离子点腐蚀性能的影响

如图 4 所示，通过对 NAR 160Cu-Nb 铁素体不锈钢耐大气腐蚀试验表明，当 Nb 含量（质量分数）在 0%~0.4% 之间时，点蚀电位随 Nb 含量增加而升高；加 0.4%Nb 后达饱和。所以，一般耐海洋大气腐蚀的建筑用铁素体不锈钢中的铌含量大约在 0.4 量级。

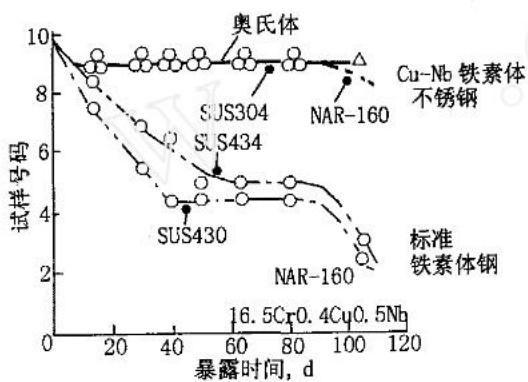


图 4 光亮退火试样的大气暴露试验

## 3.4 铌的细化晶粒作用

1) 如表 1 所示，铌是细化晶粒效果最大的元素之一。

表 1 合金元素对奥氏体晶粒度的影响

元素	效果
C	0.05%~0.1% 在下限侧细化晶粒效果大
Si	< 0.2% 有细化作用，> 0.2% 粗化大
Mn	< 1.5% 略有细化作用，> 1.5% 无作用
Cu	< 1.0% 没有细化作用，3% 有细化作用
Cr	< 9% 有细化效果，可能是 Cr-N 的效果
Mo	< 1% 略有细化作用
TNbZrAlV	以微细析出物的形式细化效果最大

在热加工过程中，奥氏体无相变细化晶粒的技术，而是利用 NbC、Nb(CN) 在热加工中的析出溶解规律，析出物质点的“钉扎”原理阻止晶界移动，和溶质铌原子的拖曳作用，阻止再结晶，细化晶粒。

## 2) 马氏体不锈钢是利用 Nb 细化晶粒来产

生高的韧性和较低的冲击转变温度。

3) 铁素体不锈钢是从纯净和超纯净炼钢工艺发展起来的，纯净的结果晶粒更加粗大化，所以细化晶粒是铁素体不锈钢的实用化所必须的。

## 3.5 铌对铁素体不锈钢深冲性能的影响

加铌是赋予铁素体不锈钢良好深冲性的最有效的方法之一。改善该性能所需的铌的数量与碳和氮的含量有关。含有适量铌的铁素体不锈钢具有良好的平均  $r$  值。

## 3.7 铌对马氏体不锈钢 $A_{\text{c}1}$ 、 $A_{\text{c}3}$ 、 $M_s$ 影响

1% 的 Nb 可使  $A_{\text{c}1}$  温度提高 100°C；1% 的 Nb 可使  $A_{\text{c}3}$  温度提高 190°C；1% 的 Nb 可使  $M_s$  温度降低 25°C。

## 4 Nb 与 Ti、Cu、Mo、N 等的复合应用

### 4.1 Nb 与 Ti 的双稳定化

1) 物理冶金基础：Ti 在高温时效过程中抑制大颗粒的  $(\text{Fe}_3\text{Nb}_3)$  形成，增加固溶体中的 Nb 含量，而 Ti 形成细小  $(\text{Ti}, \text{Nb})$  (CN)。

2) 机理：双稳定化是利用 TN 在高温更稳定，一般 TN 在液相就形成了。当钢中 N 形成 TN 后 NbC 就更稳定了，从而使钢中的 C、N 受双重稳定化，对消除 C、N 原子的有害作用更为有利。

$$\text{稳定性} = (\text{Ti}/6 + \text{Nb}/8)/(C + N)$$

当稳定性 = 1 时就达到最佳稳定效果所需的最低  $\text{Ti}, \text{Nb}$  含量。

3) 作用：双稳定化可改善表面性状，提高成型性、可焊性、抗蠕变性、抗氧化性以及耐蚀性能（如图 5 所示）。

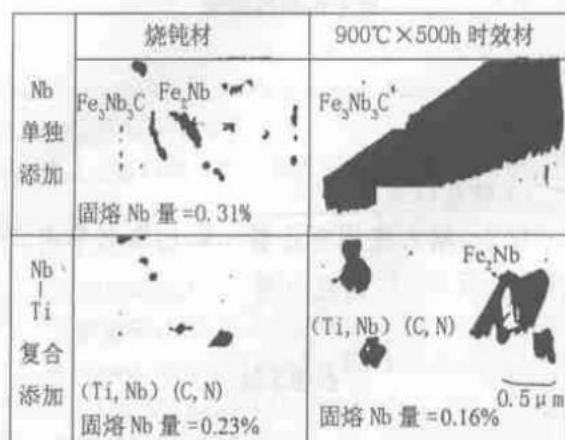


图 5 单加 Nb 和 Ti-Nb 复合钢在 900°C 时效时析出物和固溶体 Nb 的变化

#### 4.2 Nb、Cu 复合应用

1) Nb、Cu 复合应用可改善钢的成形性能, 生产抗菌不锈钢, 生产无皱纹钢。

2) Cu 和 Nb 对钢的成形性能的影响如图 6、7 可见: Cu 在 0.4%~0.6% 之间时, 四个成形性能指标为最佳; Nb 的在 0.4%~0.6% 之间时, 三个成形性能指标为最佳。

#### 4.3 Nb 代 Mo 的作用

在耐高温的用途中, Nb 的作用 20 倍于 Mo, 并可代替价格昂贵的 Mo。

#### 4.4 Nb 与 N 的复合应用

304 型不锈钢应用最广, 产量最高。但在有些用途中, 强度偏低、耐蚀性也不尽人意。通过加

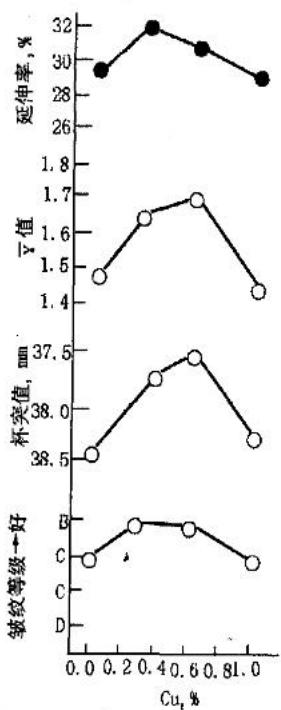


图 6 Cu 对 LC-17Cr-0.5Cu 钢的成形性能的影响

(上接第 11 页)

的前提下, 增大使用变压器实际功率对节电、节能有利。

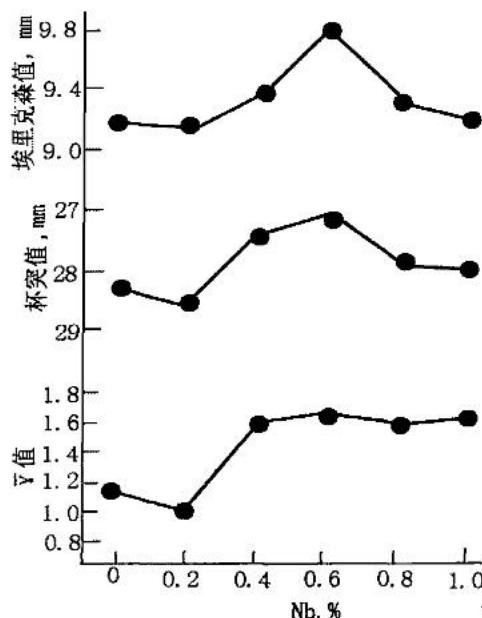


图 7 Nb 对 LC-17Cr-0.5Cu 钢的成形性能影响

Nb 稳定碳、氮, 使其焊接性能、强度、耐疲劳性均得到提高。

#### 参考文献

- 孟繁茂等. 现代不锈钢中的铌和含铌不锈钢. 1997 年中信美国钢铁公司(北京)
- 李尚诣等. 铌资源开发应用技术. 冶金工业出版社, 1991: P750
- 郝伟宏译. 太钢译文. 1998, (3): P83

(2003 年 12 月 22 日收稿)

责任编辑 王丽娟

- 李隆盛. 铸钢及熔炼. 机械工业出版社, 1981: 157~166
- 栾心汗等. 电弧炉炼钢碳化硅白渣工艺的脱氧与脱硫. 铸造技术, 1994 (4): 29~31
- 包尔纳茨基. 炼钢过程的物理化学基础. 冶金工业出版社, 1981: 204~213

#### 参考文献

(2004 年 2 月 24 日收稿)

责任编辑 傅冬梅

1 李隆盛. 铸钢及熔炼. 机械工业出版社, 1981: 157~166