

# SUS630 的冷加工性能改善

## ——接近 SUS XM7 水平

(中信微合金化技术中心)

SUS630 (17-4PH) 的耐蚀性几乎和 304 不锈钢同等, 但强度高。因此在船舶 (包括海域)、化工设备等得到广泛应用。

由于商用 SUS630 钢固溶状态硬度高 (HRC33~36) 冷加工性能欠佳, 一般采用过时效处理后冷加工或者热加工成形。半成品尚需在保护气氛下无氧化固溶处理 (ST) 因而导致表面质量下降, 后道工序, 成本增高。因此, 应用范围受到限制, 改善加工性能十分必要。

改善 ST 态的冷加工性能, 降低 C N 可降低 ST 态硬度, 是有效的方法, 但又不能降低最佳时效力

学性能。为此, 保持适量的 Nb N 保持原有的时效硬化特性是重要的。合金化技术是细化晶粒技术、溶度积原理以及粗化温度的关系  $\lg[(\%Nb+\%N)]=-1700/T_g+11.2$  的最佳应用是加工、热处理主要技术关键

### 1、C N Nb 对峰值时效性能的影响

所谓峰值时效是指标准的时效硬化处理 H900 即  $753K \times 14.4KS$  AC。这是最佳时效强化处理制度。试验钢的化学成分如表 1, A~F C 变化, G~K N, Nb 变化。热锻成  $\phi 20$  后试料。在溶度积图  $\lg[Nb][C]=-7900/T+3.43$ ,  $T=1313K$  时的位置如图 1。

表 1 试验钢的化学成分

钢	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	N	C+N
A	0.002	0.35	0.9	0.024	0.001	3.51	4.89	16.01	0.24	0.002	0.004
B	0.005	0.16	0.96	0.021	0.007	3.2	4.77	15.48	0.18	0.019	0.024
C	0.009	0.15	0.94	0.025	0.001	3.33	4.91	15.6	0.22	0.013	0.022
D	0.015	0.15	0.94	0.024	0.001	3.31	4.88	15.59	0.22	0.015	0.03
E	0.029	0.15	0.94	0.025	0.001	3.31	4.89	15.64	0.21	0.013	0.042
F	0.054	0.29	0.9	0.03	0.004	3.34	4.09	15.67	0.22	0.021	0.075
G	0.009	0.15	0.95	0.025	0.001	3.35	4.87	15.63	0.21	0.019	0.028
H	0.01	0.15	1.01	0.024	0.002	3.35	4.86	15.64	0.22	0.032	0.042
I	0.009	0.15	0.95	0.027	0.001	3.32	4.94	15.7	0.1	0.014	0.023
J	0.009	0.15	0.94	0.026	0.002	3.35	4.96	15.65	0.4	0.006	0.015
K	0.008	0.16	0.94	0.026	0.001	3.39	4.85	15.61	0.42	0.02	0.028
L	0.05	0.25	0.92	0.033	0.002	3.21	4.16	15.78	0.33	0.025	0.075

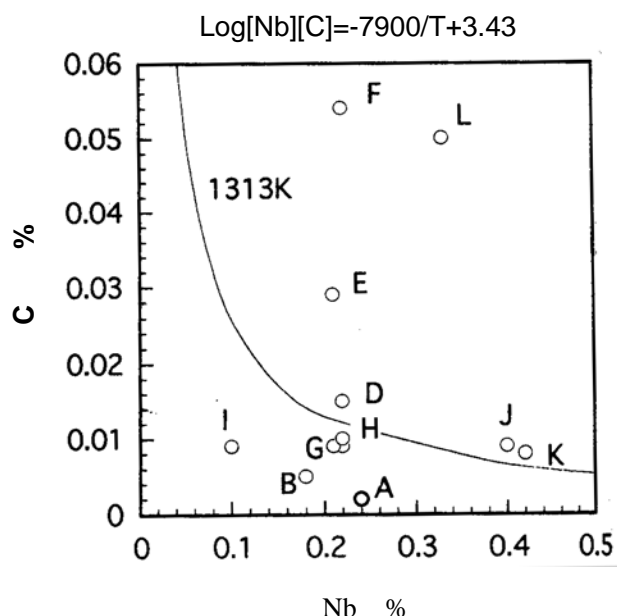


Fig.1.Position of experimental steels in NbC Solubility curve at 1313K.

图 1 试验钢的 1313K 的 NbC 溶度积曲线

图中曲线是 1313K 的 NbC 溶解度线，位于右上方的钢在该温度下 NbC 有沉淀产生，而左下方呈固溶态。

其中 L 钢为工业商用钢，在此研究中做比较钢。

#### 1.1 热锻后 1313K × 1.8KS 油淬晶粒度与 Nb

(CN) 的溶度积的关系

根据 Hall-petch 公式，强度、硬度与晶粒度有线性关系，即晶粒度越大，强度、硬度越高。马氏体时效钢 17-4PH 强韧性还与 H900 时效处理时的析出物的量和分布有关，均匀、细小、高度弥散分布，且析出量多时强化效果越佳。

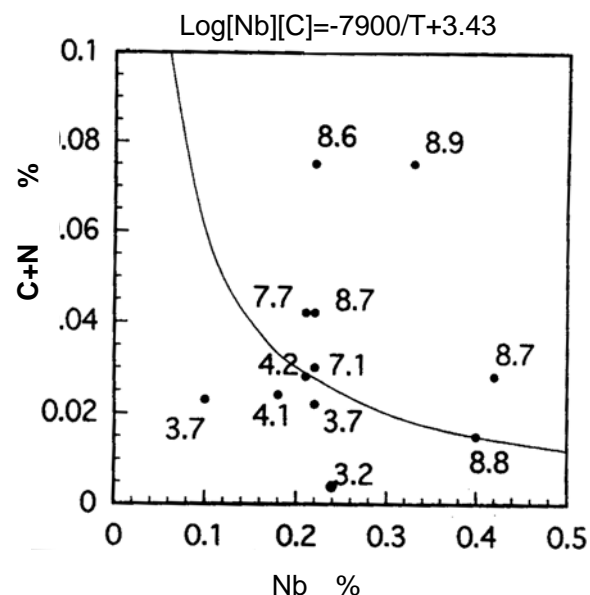


Fig.2.Grain size number(JIS) of experimental Steels in solution treatment at 1313K.

图 2 试验钢 1313K 固溶处理的晶粒度

表 2 沉淀物与沉淀量

钢	C	N	Nb	沉淀物	沉淀量
A	0.002	0.002	0.24	-	0
C	0.009	0.013	0.22	Nb(C,N)	0.05
D	0.015	0.015	0.22	Nb(C,N)	0.13
E	0.029	0.013	0.21	Nb(C,N)	0.22
G	0.009	0.019	0.21	Nb(C,N)	0.11
H	0.01	0.032	0.22	Nb(C,N),NbCrN	0.24
I	0.009	0.014	0.1	-	0.03
J	0.009	0.006	0.4	Nb(C,N),NbCrN,(Fe,Nb)6C	0.18
K	0.008	0.02	0.42	Nb(C,N),NbCrN,(Fe,Nb)6C	0.28

图 2 示出 1313K 固溶处理后的 C+N 和 Nb 与晶粒度关系。1313K 时溶度积  $[Nb][C+N]=0.006$ 。图 1 中的钢位置与图 2 中晶粒度相应。以  $[Nb] \times [C+N]=0.006$  为界。晶粒度的分布成 2 个区域，之一是 Nb 量和 C+N 量少的钢晶粒度 3-4 级的粗晶区；之二是 Nb 量和 C+N 量多的钢晶粒度 7 级以上的细晶区。以  $[Nb] \times [C+N]=0.006$  为界。只要  $[Nb]$

$[C+N]>0.006$  就进入细晶区。表 2 是沉淀析出物的分析结果。和图 2 对照细晶区的细析物出多。粗晶区析出物少。A 钢析出物为 0，晶粒最大 3.2 级。

#### 1.2 析出物的百分率与晶粒度关系。

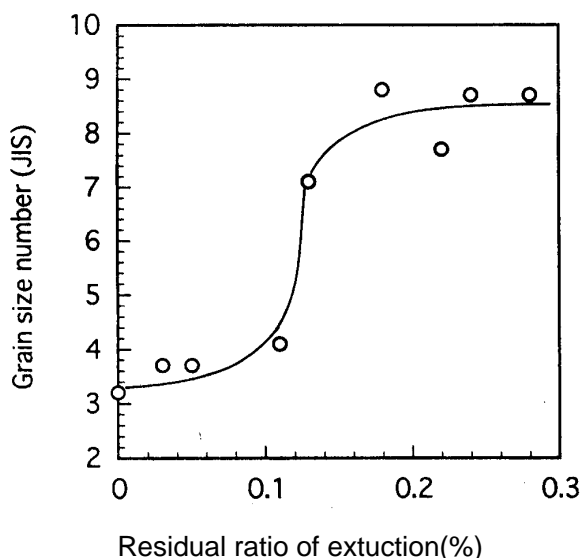


Fig.3.Relation between grain size number(JIS)  
And residual ratio of extraction  
图3 析出物量同晶粒的关系

细化晶粒的析出物的量存在临界量,如图3示,需要大于 0.12%。也就是说抑制晶粒长大需要有足够的析出量。

### 1.3 固溶温度与晶粒度的关系。

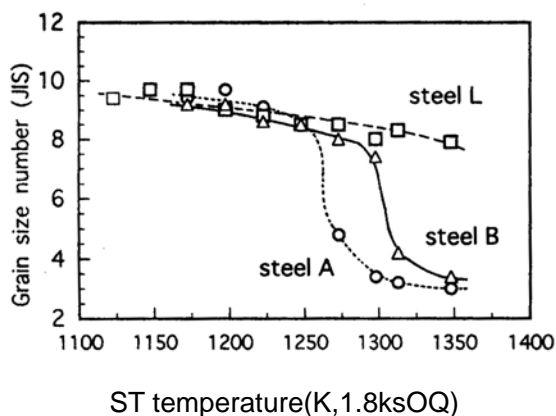


Fig.4. Influence of solution treated temperature  
on grain size number(JIS).

图4 固溶处理温度对晶粒度影响

图4示出 A、B、L 钢的晶粒度与固溶处理温度曲线显示出 A 钢的晶粒粗化温度为 1248K, B 钢为 1298K。

现在定义  $T_g$  为晶粒粗化温度。从图3、4看出,  $T_g$  与钢中未溶解的沉淀物量和固溶处理温度有关。

按 A、B 钢的 C+N, Nb 及其粗化温度可确定  $\lg\{[Nb][C+N]\} = -a/T_g + b$  中的 a, b 常量得

$$\lg\{[Nb][C+N]\} = -17600/T_g + 11.2 \dots \dots (1)$$

公式(1)表明固溶温度低于  $T_g$  可得细粒组织  
高于  $T_g$  为粗晶组织。

2.4 固溶处理 (ST) 的硬度、冷压性能 2.1 5T 材的硬度。

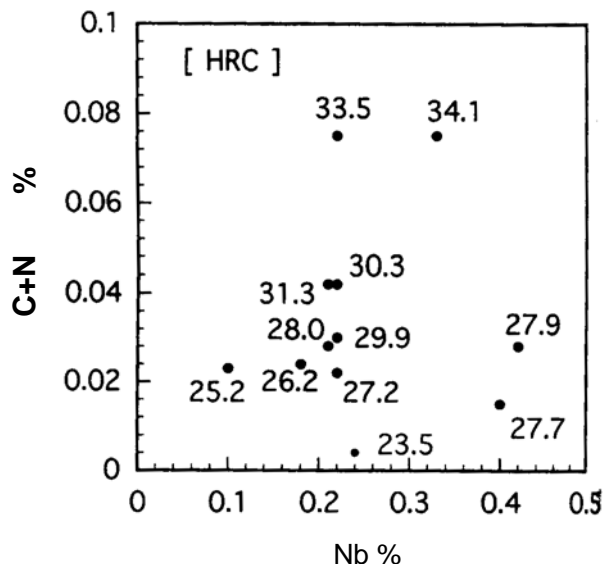


Fig.5.Hardness of experimental steels in solution  
Treatment at 1313K.

图5 试验钢 1313K 固溶处理的硬度

从图5看商品 L 钢的硬度 HRC34.1 反相 C+N 少的 A 钢 (0.004%) HRC 为 23.5 低 10 个单位。

C、N、Nb 晶粒度对固溶处理后的硬度的影响进行了多重因子回归分析结果如表3所示。

表3 固溶处理硬度多重回归分析结果 ( $R=0.92$ )

判 据	特定变量	回归系数	标准化偏导部回归
Hardness [HRC]		21.8	0
	× C %	219.6	0.79
	× N %	116	0.41
	× Nb %	3.1	0.16
	× #Gs(JIS)	0.2	0.22

C 的作用最大为 N 的两倍。其次是 Nb 和晶粒度。降低硬度的最有效的做法是降低 C 含量。

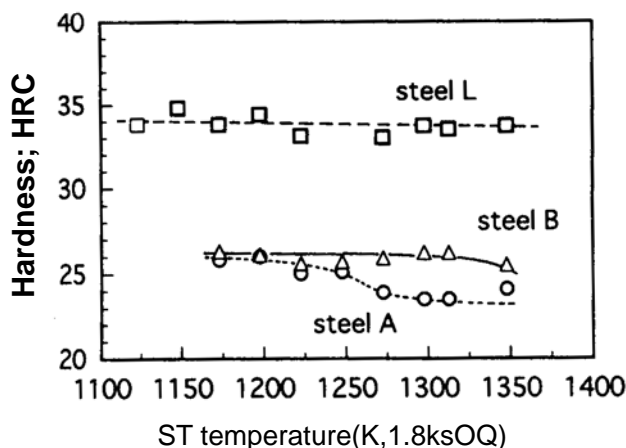


Fig.6. Influence of solution treated temperature On hardness of steel A,B and F.

图 6 A 钢、B 钢和 F 钢固溶处理温度对硬度的影响

图 6 示出 A 钢、B 钢、L 钢的 ST 处理温度的变化对硬度的影响。参看图 4 温度对晶粒度影响是显著的。然而晶粒度对硬度的影响是比较小的。L 钢和 B 钢 HRC 对固溶温度不敏感，只有 C 0.004% 的 A 钢硬度在 1250K 开始显著下降。

## 2.2 压缩性能

硬度是比较小变形范围内的评价加工性能指标。临界冷镦率与 C 含量的关系如图 7 所示。从 0.01-0.06C 的变化冷镦率的变化是强烈的，随着 C 的提高冷镦率的急剧的降低。图 7 中的括弧数据是 N 量，N 对冷镦率没有影响。所以改善冷加工性能降低 C 量是最有效的。

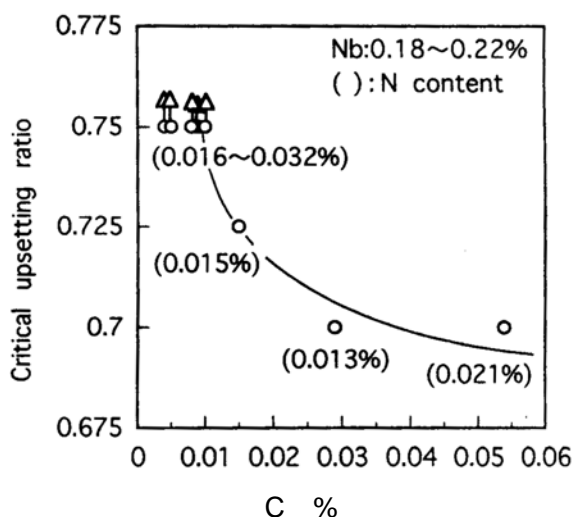


Fig.7. Influence of C,N contents on critical upsettingRatio in upsetting test with sticking friction.

图 7 C, N 含量对临界压缩率的影响

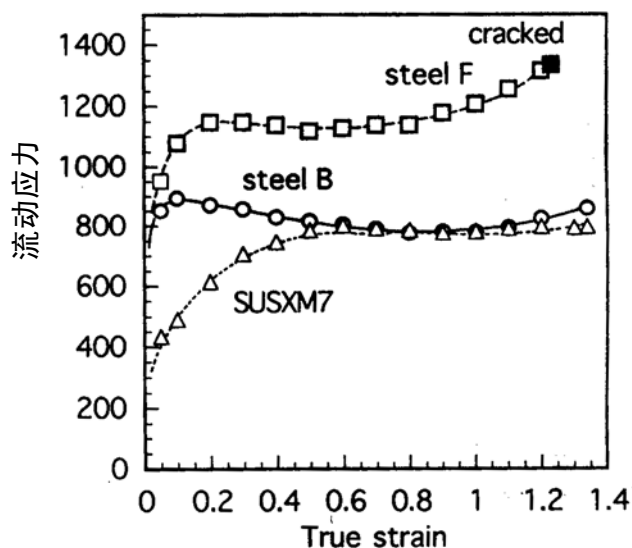


Fig.8 Stress-strain curves in upsetting test with Sticking friction.

图 8 冷镦试验的应力应变曲线

图 8 示出钢 F、钢 B 和典型的冷加工钢 SUSXM7 的冷镦试验时流变应力与应变曲线。0.005%C 的钢 B 在变形初期其变形抗力比 SUSXM7 高，当应变到 0.6 后的高应变区和 SUSXM7 有同等的变形抗力。

## 2.3 H900 时效处理的拉伸性能

不同 C N 含量钢的拉伸试验结果如图 9。钢 A 和钢 L 的拉伸断口如图 10。

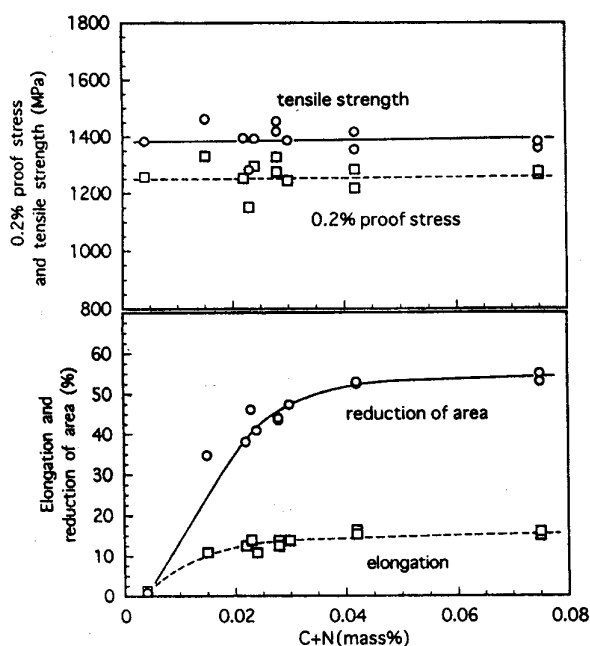


Fig.9.Influence of C+N contents on tensileProperties in peak age.

图 9 C+N 对 H900 处理拉伸性能的影响

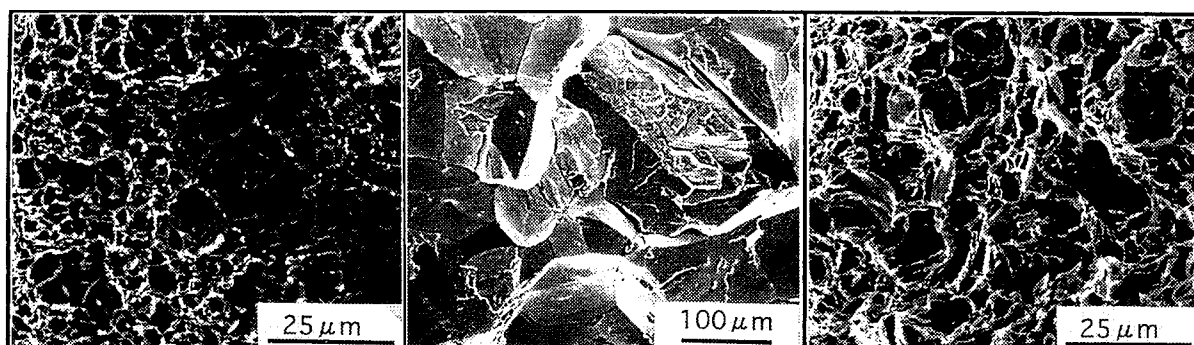


Fig.10.SEM images of fracture surface  
Of tensile specimen in peak age.

图 10 H900 拉伸样的断口

从图 9 看到与往常的随着 C 含量的增高强度上升而延性下降的趋势不同的拉伸性能；抗张强度水平基本同一水平而延性和面缩呈抛物线增长；C+N 低于 0.04% 反而减少。特别是 0.004% (C+N) 的 A 钢延伸率和面缩只有 1%。强度数据在 C+N 低于 0.04% 后呈分散性。

少量 C、N 有改善“晶界结构”作用，而极少的 C、N 晶界缺陷增多，晶界延性劣化。拉伸断口分析指出钢 A ST 1313K× 1.8KS 油冷后的 H900 处理的断口是粗大的解理，EL:1.3%，RA:0.8%。

ST 1223K× 1.8KS 油冷后的 H900 处理细小的韧窝断口，EL:14.8%，KA 52.4%。钢 F 同样是 1313K ST 处理但延性良好。这是由于不同的溶度积其晶粒粗化温度不同的结果。

#### 4、结论

最大限度的降低 C 量，加入适量的 N、Nb 可保持 SUS630 (17-4PH) 的 H900 的强度性能，而固溶处理后的冷加工性能接近于 SUSXM7。这样的 SUS630 钢可望扩大应用领域。

技术要点：

1、固溶温度按  $g[(\%Nb+\%N)]=-1700/T_g+11.2$  计算低于  $T_g$ ；

2、降低固溶状态的硬度，降低 C 效果最大，效果为降 N 的 2 倍，晶粒度和 Nb 的作用小；

3、和商用钢 (0.05C、0.021N) 相比 0.005C 的 SUS630 钢的变形抗力降低 20%，在应变率超过 0.6 时与 SUSXM7 相近。

4、临界冷锻变形量随 C 含量的升高而明显下降。N 含量对此无影响，但升高了变形能；

5、C、N 的变化对强度性能无影响，延性指标

随 C+N 的降低而下降；这是 Nb 的碳氮化物量减少晶粒粗化后，时效处理晶界延性劣化 的结果。

#### 5、应用例

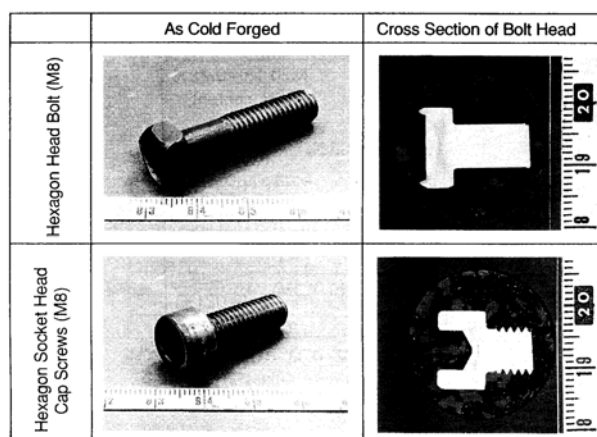


Fig.11 Examples of cold forged fasteners of 17-4PH

图 11 应用例冷锻紧固件

#### 参考文献

- 1) 电气制钢 V01.67 No.2
- 2) CBMM Round Table Conference on “Metallurgical Behavior of Alloying Elementg in Stainless Steel” 1996 . Tokyo.