

超级不锈钢

叶舜发

一、超级不锈钢的基本概念

1、超级不锈钢的涵义

20 世纪末，国内外都试制了不锈钢的“超级”牌号。不同文献对超级不锈钢的定义不一，有的文献认为，高性能不锈钢也称超级不锈钢；有的文献认为，高合金不锈钢称为超级不锈钢；有的文献认为：超级不锈钢也包括高性能的、有特殊要求的一些合金含量较低的不锈钢，如超级 304H 铬镍奥氏体不锈钢等；有的文献认为，超级不锈钢指耐点蚀当量 PREN 值 ≥ 35 （铁素体不锈钢）或 ≥ 40 （奥氏体不锈钢和双相不锈钢）的高合金化高性能不锈钢；有的文献进一步认为，超级不锈钢还应包括超高洁净度、超高均匀性、特细组织、特高表面质量、优异的耐苛刻介质局部腐蚀性能、良好的工艺制造性能等涵义。

2、超级不锈钢的共同特点

- 具有比四大类不锈钢更精细的特殊成份设计；
- 具有超高结净度；
- 具有超高均匀性（成份、组织和性能）；
- 具有在苛刻环境中比四大类不锈钢更优异的性能；
- 具有良好的工艺制造性能；
- 具有高的性价比；

3、超级不锈钢的界定

■ 超级不锈钢是不锈钢中的一类，即 Cr 含量为 12-30%的铁基合金中的一类，超级不锈钢中必含 12%以上的 Cr，但 Cr 含量通常 $\leq 30\%$ ；

■ 超级不锈钢不属于铁镍基耐蚀合金，因铁镍基耐蚀合金的含 Ni 量 $> 30\%$ ， $Ni+Fe \geq 50\%$ ；所以对含 Ni 的超级不锈钢而言，含 Ni 量一定 $\leq 30\%$ ；

■ 超级不锈钢在苛刻环境中必须具有更优异的性能，如抗点蚀等局部腐蚀性能，以耐点蚀当量 $PREN = \%Cr + 3.3(\%Mo) + 16(\%N)$ 来表征。通常超级奥氏体不锈钢

和超级双相不锈钢的 PREN 应 \geq 40，超级铁素体不锈钢的 PREN 应 \geq 35。

对于特殊使用要求的超级不锈钢必须在关键性能的薄弱环节上有异常突破，如超级马氏体不锈钢必须是可焊接的“软马氏体不锈钢”；超级高温级奥氏体不锈钢必须突破 600℃以上、300bar 应力的蠕变问题等。

二、超级不锈钢的基本类型

超级不锈钢从不锈钢的四大基础类型出发，亦可分为超级奥氏体不锈钢、超级铁素体不锈钢、超级双相不锈钢和超级马氏体不锈钢四个大类。

1、超级奥氏体不锈钢

(1)在奥氏体不锈钢基础上的发展

奥氏体不锈钢具有无磁性，在很宽的温度范围内都有很高的强韧性，富于延展性，容易轧制和压缩等冷加工，能耐氯化性的腐蚀，含 Si 的奥氏体不锈钢耐氯化性酸的能力更强；含 Mo、Cu 等元素的奥氏体不锈钢还能耐稀硫酸、磷酸等还原性酸和甲酸、醋酸等有机酸的腐蚀；由于奥氏体不锈钢具有面心立方结构，不发生相变，易于焊接；奥氏体不锈钢一般没有冷脆转变温度，因此常作低温用钢。

但奥氏体不锈钢的缺点：应力腐蚀的敏感性，在含氯化物介质中不耐应力腐蚀，容易发生点蚀和缝隙腐蚀；不宜在 500℃-600℃以上温度长期使用，因为会发生蠕变，正是这二个缺点，促进了双相不锈钢和超级奥氏体不锈钢的发展。

(2)超级奥氏体不锈钢

■ 以耐点蚀当量 $PREN \geq 40$ 表征的高合金、高性能超级奥氏体不锈钢

通常指 20-26%Cr、18-30%Ni、3-7% Mo，并用 Cu ($\leq 4\%$)、N ($\leq 0.5\%$) 进一步合金化的超低碳、含超高洁净度、超高均匀性、耐点蚀当量 $PREN \geq 40$ 的高合金、高性能的奥氏体不锈钢；

基主要牌号及耐点蚀当量如：

00Cr20Ni18Mo6CuN (254SMO)：PREN=43；

00Cr21Ni25Mo6CuN：PREN=48.8；

00Cr25Ni25Mo6CuN：PREN=52.8；

00Cr24Ni22Mo7CuN (654 SMO)：PREN=56.1；

这类超级奥氏体不锈钢具有优良的综合性能，强度高，在氧化和还原介质中有优异的耐蚀性，耐海水腐蚀、耐各种氯化物介质均匀腐蚀和局部腐蚀，在硫酸和磷酸中有良好的耐蚀性。

主要用于造纸漂白设备，冷凝器管道，海水处理设备，高温海水热交换器，反向法脱盐生产设备，垃圾焚烧设备，电站废气脱硫设备，磷酸过滤器和混料部件，废硫酸浓缩设备，无污染制药设备及精细化工生产设备等。

■超超临界发电机组用超级奥氏体不锈钢。

这类超级奥氏体不锈钢具有优良的高温持久强度，抗烟气腐蚀、抗蒸气氧化性能好，强度高并综合性能优良，因此突破了不锈钢在 520℃-580℃ 以上温度长期使用会发生蠕变的性能关键，可满足参数为 605℃-650℃、压力 27-35MPa 的超超临界机组的使用要求，常用作超超临界机组直流锅炉过热器和再热器的管道。

2、超级铁素体不锈钢

(1)铁素体不锈钢基础上的发展

铁素体不锈钢与奥氏体不锈钢相比，具有节 Ni (铁素体不锈钢一般不含 Ni)、价格低、抗应力腐蚀性能好等优点，并且它具有很好的抗氧化性能，多用于制造大气、水蒸汽、水及气及氧化性酸腐蚀的零部件。

一般的铁素体不锈钢有冲击韧性差、焊后的塑性和耐蚀性差、对晶间腐蚀敏感、耐点蚀性能差等缺点，限制了它的广泛使用。为了克服这些缺点，通过加入各种元素特别是运用 AOD、VOD 等炉外精炼技术发展了高纯铁素体不锈钢和超级铁素体不锈钢。

(2)超级铁素体不锈钢

超级铁素体不锈钢通常指含 18-30% Cr、2-4% Mo、 $C+N \leq 250 \times 10^{-6}$ 及适量稳定化元素、超高洁净度、超高均匀性、耐点蚀当量 $PREN \geq 35$ 的高 Cr、高 Mo、超低 C+N 的高性能特殊铁素体不锈钢。

这类钢在热的氯离子溶液中具有极高的耐均匀腐蚀和局部腐蚀性能、低的韧—脆性转变温度、足够的焊接性及良好的综合性能。

其主要牌号及耐蚀当量如：

00Cr30Mo2 (447J1): PREN=36.6;

00Cr25Ni4Mo4Ti: PREN=38.2;

00Cr29Mo3Ti: PREN=38.9;

00Cr27Ni2Mo3.5Ti (Sea-Cure): PREN=39;

00Cr29Mo4Ti (AL29-4C): PREN=42.2;

00Cr29Mo4Ni2: PREN=42.2;

它们的耐苛刻介质腐蚀性能优良,如 00Cr30Mo2 (447J1) 在含氯化物溶液中耐点蚀、应力腐蚀、均匀腐蚀均优于 316、317 及 0Cr25Ni5Mo2N 钢,在 NaOH 和 醋酸中耐蚀性与纯 Ni 相当,在含 NaClO₃ 氧化剂的高温 NaOH 中优于高纯 Cr26Mo1 和纯 Ni,主要用于 NaOH 浓缩设备、烟气脱硫设备、火电厂冷凝器。

00Cr25Ni4Mo4Ti 在海水和含氯化物介质中有极好的耐点蚀、耐缝隙腐蚀性能,主要用于使用海水或其它含氯化物溶液的工厂,制造洗涤器、热交换器和冷凝器等设备。

3、超级双相不锈钢

(1)在双相不锈钢基础上的发展

双相不锈钢兼有奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢的特点,与奥氏体不锈钢相比,强度高且耐晶间腐蚀和耐氯化物应力腐蚀性能明显提高;与铁素体不锈钢比,塑性和韧性更高,无室温脆性,耐晶间腐蚀性能和焊接性能均显著提高;具有优良的耐点蚀等局部腐蚀性能,耐海水腐蚀、耐有机酸和其它特殊介质的腐蚀性能优良。

为了进一步提高双相不锈钢的性能,发展了耐苛刻介质局部腐蚀能力和焊接性能更好的超级双相不锈钢。

(2)超级双相不锈钢。

超级双相不锈钢通常指含 25-27% Cr、6.5-7.5% Ni、3-4% Mo、N≤0.3%,含适量 Cu、W、Si 等元素、超高洁净度、相比例精细控制、耐点蚀当量 PREN≥40 的高 Cr、高 Mo、高 N 的超低碳双相不锈钢。

这类钢比通常的双相不锈钢有更好的耐苛刻介质局部腐蚀的性能与更好的焊接性能。

其主要牌号与耐点蚀当量为：

00Cr25Ni7.5Mo3W2N：PREN=40；

00Cr25Ni6.5Mo3.5CuN：PREN=40.55；

00Cr25Ni7Mo3.5CuN (Zeron 100)：PREN=40.55；

00Cr25Ni7Mo3.5Cu1.5N：PREN=41.35；

00Cr25Ni7Mo4N：PREN=43；

00Cr27Ni7Mo3.5CuWN：PREN=43.35；

00Cr27Ni6.5Mo5N (2707HD)：PREN=49；

00Cr25Ni6.5Mo3.5CuN、

00Cr25Ni7Mo3.5CuN、

00Cr25Ni7Mo3.5WCuN、00Cr27Ni7Mo3.5CuWN 用于制造氯乙烯生产用塔、换热器、容器及氯氧反应器、HCl 冷却器、合成橡胶用聚合反应器、泵、管线等，化肥工业中硝酸生产冷却器、冷凝器、热浓硝酸用泵轴等，海洋石油开采的海底油气输送管线、海水管线、潜海水泵；

00Cr25Ni7Mo4N、00Cr25Ni7.5Mo4CuWN 用于含胺的碱溶液管线、海水热交换器、船用螺旋推进器和海底油气输送管道等；00Cr27Ni6.5Mo5N (2707HD) 是瑞典 Sanduir2007 年 3 月发布的特超级双相不锈钢，特别适用于苛刻的、酸性、含氯环境（推荐用于热海水），它可在苛刻环境下使用的热交换器承受更高的运行温度和更长的运行时间，保证设备运行可靠、安全和性能良好。

4、超级马氏体不锈钢

(1)在马氏体不锈钢基础上的发展

马氏体不锈钢是一类可通过热处理强化的不锈钢，与铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢相比，有更高的含 C 量，强度、硬度高和耐磨性好。但随着碳含量的增加，马氏体不锈钢的耐蚀性和塑性、韧性降低，焊接性能差，一般均不用作焊接件。由于这些缺点使马氏体不锈钢的使用受到限制，通常只用作制造对强度、硬度高和耐磨性要求高而对耐蚀性要求不太高的零部件和工具、刀具等。

为了克服这不足，20 世纪 50 年代末，瑞士为了改善水轮发电机叶轮的焊接性能，引入了软马氏体的概念，开发出一系列抗拉强度高，延展性好，焊接性能

得到改善的新合金，开拓了超级马氏体不锈钢的研制。

(2) 超级马氏体不锈钢

超级马氏体不锈钢通常指含 12-17% Cr、2-6.5% Ni 及 $\leq 2.5\%$ Mo、 $\leq 0.3\%$ Cu 元素的超低 C、超高洁净度、强韧性好、耐蚀性优于传统马氏体不锈钢，特别是焊接性能远远高于传统马氏体不锈钢的回火马氏体组织的“软”马氏体不锈钢。

这类含 C 量极低的超低 C 马氏体不锈钢，不仅保持了传统马氏体不锈钢强度高、耐磨性好的优点，还克服了传统马氏体不锈钢塑韧性差、耐蚀性差，特别是一般不能用作焊接件的缺点。

其主要牌号、含 C 量及耐点蚀当量为：

00Cr12Ni4.5Mo1.5Cu (X80 12Cr-4.5Ni-1.5Mo) : $\leq 0.02\%$ C, PREN=17;

00Cr13Ni4Mo1 (HP13Cr) : $\leq 0.03\%$ C, PREN=17;

00Cr12Ni4.5Mo1.5Cu1.5 (CRS : 95Ksi) : $\leq 0.02\%$ C, PREN=18.2;

00Cr16Ni5Mo1 (248SV) : $\leq 0.03\%$ C, PREN=19.3;

00Cr13Ni6Mo2Cu1.5 (CRS: 110Ksi) : $\leq 0.02\%$ C, PREN=19.6;

00Cr13Ni5Mo2N (D13-5-2-N) : $\leq 0.02\%$ C, PREN=20;

00Cr13Ni6Mo2.5Ti : $\leq 0.015\%$ C, PREN=21.2;

由于超级马氏体不锈钢比传统马氏体不锈钢在塑韧性、耐蚀性和焊接性能方面有明显改善，由于它的耐均匀腐蚀能力和耐点蚀能力优于传统马氏体不锈钢，由于它的强度比双相不锈钢高得多，因此海洋工程、石化装备、水力发电、采矿设备、食品工业、交通运输及高温纸浆设备等工业领域，都是超级马氏体不锈钢极具潜力的应用领域。

超级马氏体不锈钢价格比双相不锈钢低，所以在许多应用双相不锈钢的领域，特别是含 CO₂ 和 CO₂ 硫化氢介蚀的环境，采用超级马氏体不锈钢来取代部分双相不锈钢和超级双相不锈钢，在经济上要合算得多。

结语

超级不锈钢是一类针对原有不锈钢的不足，以克服这些不足而发展的不锈钢新品种、新牌号，来适应不锈钢应用的进一步需要，并不是代替原有的不锈钢，只在原有不锈钢不能满足应用需要时才来采用超级不锈钢。随着应用的扩大和介质环境的日益苛刻，超级不锈钢的发展和应用将进一步扩大。