

全国锅炉压力容器标准化技术委员会 组织编写

# 压力容器用 不锈钢

YALI RONGQIYONG  
BUXIUGANG

黄嘉琥 主编



新华出版社

全国锅炉压力容器标准化技术委员会 组织编写

# 压力容器用 不锈钢

YALIRONGQIYONG  
BUXIUGANG

黄嘉琥 主编

新华出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

压力容器用不锈钢 / 黄嘉琥著, ——北京: 新华出版社, 2015.12  
ISBN 978-7-5166-2243-8

I. ①压… II. ①黄… III. ①不锈钢—压力容器 IV. ①TH490.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 296217 号

## 压力容器用不锈钢

---

主 编: 黄嘉琥

责任编辑: 刘广军 白 玉

特约编辑: 胡若莹 常 敬

曹晓霞 刘淑香

出版发行: 新华出版社

网 址: <http://www.xinhupub.com>

<http://press.xinhuanet.com>

地 址: 北京石景山区京原路 8 号

邮 编: 100043

经 销: 新华书店

印 刷: 北京市庆全新光印刷有限公司

开 本: 880mm×1230mm 1/16

印 张: 19

字 数: 415 千字

版 次: 2015 年 12 月第一版

印 次: 2015 年 12 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5166-2243-8

定 价: 120.00 元

---

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 1 不锈钢概述                      | 1  |
| 1.1 不锈钢的定义                   | 1  |
| 1.2 不锈钢与耐热钢的交叉               | 2  |
| 1.3 不锈钢与铁镍基合金的界别             | 3  |
| 1.4 不锈钢的分类                   | 4  |
| 1.5 不锈钢牌号标示方法                | 7  |
| 1.6 不锈钢的主要技术进展               | 11 |
| 2 不锈钢的合金化                    | 12 |
| 2.1 不锈钢中的合金元素                | 12 |
| 2.2 合金元素在不锈钢中的存在形式之一——单质     | 12 |
| 2.3 合金元素在不锈钢中的存在形式之二——固溶体    | 12 |
| 2.4 合金元素在不锈钢中的存在形式之三——非金属化合物 | 16 |
| 2.5 合金元素在不锈钢中的存在形式之四——金属间化合物 | 18 |
| 2.6 合金元素对不锈钢基体组织的影响          | 20 |
| 2.7 合金元素对不锈钢性能的影响            | 22 |
| 3 压力容器用不锈钢                   | 30 |
| 3.1 压力容器用不锈钢的概念              | 30 |
| 3.2 压力容器用不锈钢的特点              | 31 |
| 3.3 主要的压力容器标准中应用的不锈钢         | 35 |
| 4 含氮不锈钢                      | 48 |
| 4.1 含氮不锈钢的发展                 | 48 |
| 4.2 氮在不锈钢中的溶解度与含量            | 48 |
| 4.3 不锈钢按氮含量的分类               | 51 |
| 4.4 压力容器用含氮不锈钢现状             | 53 |
| 4.5 氮对不锈钢性能的影响               | 55 |
| 4.6 氮对不锈钢组织的影响               | 58 |
| 4.7 不锈钢压力容器宜多用含氮钢            | 61 |

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| <b>5 双相不锈钢</b>                                    | 63  |
| 5.1 双相不锈钢概述                                       | 63  |
| 5.2 双相不锈钢的组织                                      | 69  |
| 5.3 双相不锈钢的力学性能                                    | 73  |
| 5.4 双相不锈钢的耐均匀腐蚀性能                                 | 85  |
| 5.5 双相不锈钢的耐晶间腐蚀性能                                 | 88  |
| 5.6 双相不锈钢的耐应力腐蚀性能                                 | 100 |
| 5.7 双相不锈钢的耐点蚀与缝隙腐蚀性能                              | 112 |
| 5.8 双相不锈钢焊接接头相比例的控制                               | 120 |
| 5.9 不锈钢压力容器宜更多地应用双相不锈钢                            | 122 |
| <b>6 超级不锈钢</b>                                    | 123 |
| 6.1 不锈钢综合耐蚀性的定量标示                                 | 123 |
| 6.2 超级不锈钢概述                                       | 126 |
| 6.3 压力容器用超级不锈钢                                    | 138 |
| <b>7 低温用不锈钢</b>                                   | 142 |
| 7.1 类型特点                                          | 142 |
| 7.2 性能要求                                          | 145 |
| 7.3 低温韧性的影响因素                                     | 147 |
| 7.4 牌号成分                                          | 160 |
| 7.5 低温检验                                          | 167 |
| <b>8 专用铬镍奥氏体不锈钢</b>                               | 174 |
| 8.1 高纯奥氏体不锈钢                                      | 174 |
| 8.2 高硅的铬镍奥氏体不锈钢                                   | 176 |
| 8.3 尿素级奥氏体不锈钢                                     | 181 |
| 8.4 双牌号不锈钢                                        | 182 |
| 8.5 超超临界电站锅炉管用不锈钢                                 | 184 |
| <b>参考文献</b>                                       | 185 |
| <b>附录 A 不锈钢相关标准目录</b>                             | 186 |
| <b>附录 B 压力容器用奥氏体不锈钢 <math>R_{P1.0}</math> 数据集</b> | 191 |
| <b>附录 C 不锈钢和镍合金在腐蚀介质中的等腐蚀曲线图</b>                  | 247 |



# 1 不锈钢概述

## 1.1 不锈钢的定义

不锈钢为耐腐蚀钢，最重要的性能为耐腐蚀性能。铬加入铁中随铬含量提高，耐蚀性也随之提高。问题在于铁中含有多少铬含量以上才能称其为不锈钢，铬在体心立方晶格的铁中可以无限溶解。塔曼（Tammann）在研究固溶体合金的耐腐蚀性能时指出：在某些固溶体中，将较稳定的 A 组分加入到较活泼的 B 组分中时，若 A 量达到  $n/8$  克分子时，固溶体的耐腐蚀性能会有有一个急剧变化，这就是著名的塔曼定律，或称  $n/8$  定律。对于铁-铬合金而言， $n$  值为 1 和 2，当  $n=1$  时，铬含量应为 11.7%；当  $n=2$  时，铬含量应为 23.4%。这种腐蚀性的突变也与合金的其他组分及腐蚀介质有关。因而铬含量引起耐蚀性突变的第一拐点可在 11.7%左右，第二拐点可在 23.4%左右，铬含量当然应当稍高于拐点较为合算。因此低铬不锈钢的名义铬含量常为 13%，高铬不锈钢的名义铬含量常为 25%。中铬不锈钢（铬含量 17%~20%）则和钝化膜的非晶态等有关，与塔曼定律无关。

合金成分最低的铬不锈钢至少应在室温大气中不生锈才能称为不锈钢。图 1-1 为低碳铬钢的铬含量对在大气中的失重的影响。图 1-2 及图 1-3 为铬含量对在稀硝酸及海水中腐蚀的影响。由图 1-1~图 1-3 可见，铬钢在腐蚀性较弱的介质中，产生耐腐蚀性突然提高的铬含量的第一拐点大约在 10.5%~12%左右。在现行各国的不锈钢标准中有少数铬不锈钢牌号的化学成分规定中将铬含量的下限定为 10.5%，如中国的 06Cr11Ti，美国的 409，ISO 的 X2CrNi12，EN 的 X6CrNiTi12（1.4516），日本的 SUS409LTP 等。

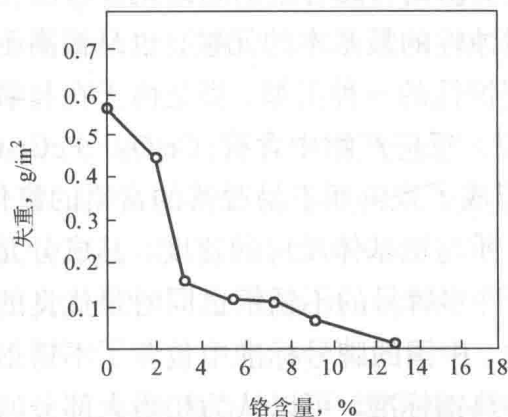


图 1-1 低碳钢中的铬含量对在大气中 52 个月腐蚀失重的影响

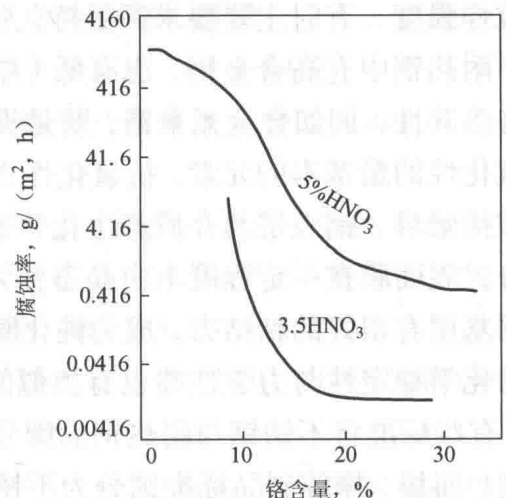


图 1-2 钢中铬含量对室温稀硝酸中腐蚀率的影响

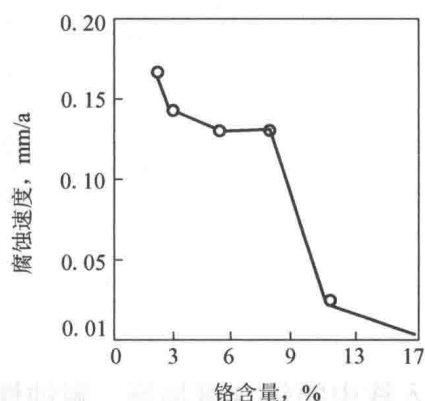


图 1-3 铬钢的铬含量对在海水  
中腐蚀速度的影响

GB/T 20878—2007《不锈钢和耐热钢 牌号及化学成分》、ASTM A941-06a《钢、不锈钢、相关合金及铁合金的有关术语清单》、EN10088-1: 2005《不锈钢清单》以及 ISO/DIS 15510: 2008《不锈钢——化学成分》等主要标准中均明确规定：不锈钢为  $\text{Cr} \geq 10.5\%$ ， $\text{C} \leq 1.2\%$  的钢。因为  $\text{Cr} \geq 10.5\%$  后，钢在大气中的耐蚀性才能产生一个突变，从容易生锈变为不易生锈，成为不锈钢（图 1-1）。在弱腐蚀介质中也可有类似规律（图 1-2 及图 1-3），因而将不锈钢的铬含量下限定为 10.5%。但铬为铁素体形成元素，当铬钢中铬含量提高时必须相应提高奥氏体形成元素碳才能在高温获得奥氏体组织，快冷后得到马氏体不锈钢。马氏体不锈钢一般控制铬含量不超过 19%，相应控制其碳含量不超过 1.2%。其他不锈钢类的碳含量均低于 0.3%。

习惯上将钢中的合金元素名义含量的总量低于 10% 的钢称为低合金钢（名义含量的总量为 5%~10% 的钢也可称为中合金钢），高于 10% 的钢称为高合金钢。不锈钢属于高合金钢。

## 1.2 不锈钢与耐热钢的交叉

GB/T 20878—2007 为包含了不锈钢和耐热钢的牌号与化学成分的标准。中国自 1952 年首次发布不锈钢和耐热钢标准以来，没有单独制定不锈钢和耐热钢的牌号标准，牌号与化学成分均主要分别按照不锈钢棒材和耐热钢棒材标准。

GB/T 20878—2007 是中国首个不锈钢与耐热钢的共同牌号标准，标准中对不锈钢定义为：以不锈、耐蚀性为主要特性，且  $\text{Cr} \geq 10.5\%$ ， $\text{C} \leq 1.2\%$  的钢。对耐热钢的定义为：在高温下具有良好的化学稳定性或较高强度的钢。实际上对耐热钢的合金元素并没有定量规定。常将耐热钢的性能分为抗氧化不起皮钢和热强钢，热强性能中有时主要要求高温短时拉伸强度，有时主要要求高温持久强度和高温蠕变强度等高温长时拉伸强度。

耐热钢中有高合金钢，也有低（中）合金钢。不锈钢与高合金的耐热钢在合金化上常有许多共性，例如合金元素铬，既是提高不锈钢耐蚀性的最基本的元素，也是提高耐热钢抗氧化性的最基本的元素。抗氧化性实际上也是耐蚀性的一种类型，都是由于在与氧化性介质接触后，钢表层与介质产生化学或电化学反应，反应产物中含有  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  等组分，表面膜在一定程度上由晶态变为非晶态，形成了致密而不易脱落的富铬的氧化膜，与钢基层有很好的粘结力，成为钝化膜，阻滞了介质与钢基体反应的速度。其成分元素对钢的化学稳定性与力学性能也有类似的作用。因此许多牌号的不锈钢也同时是优良的耐热钢，有些标准将不锈钢与耐热钢的牌号都包含在内。中国的牌号标准中包含了不锈钢和耐热钢，而板、棒等制品标准则分为不锈钢标准和耐热钢标准。可以认为相当大部分的不锈钢牌号与高合金耐热钢牌号是相互交叉的，或是相互重复的。有时称为不锈耐热钢。

GB/T 20878—2007 中总共 143 个不锈钢牌号和耐热钢牌号，有 5 个牌号铬含量下限

为 5%~10%，1 个牌号 158Cr12MoV (S46110) 碳含量 1.45%~1.70%，应为耐热钢，不属于不锈钢。其他 138 个牌号只标明部分牌号可作耐热钢使用，并不明确标明任一牌号属于不锈钢还是耐热钢，或两者均可。

ASTM A959—2009《压力加工不锈钢经协调的标准牌号成分》中说明，该标准中列入 UNS 中的所有不锈钢牌号 220 个，但没有列入铬含量下限低于 10.5% 的耐热钢牌号。在标准中，与  $C \leq 0.08\%$  的普通级牌号 304、309、309Cb、310、310Cb、316、321、347、348 牌号相对应，列出了在 540℃ 以上高温用的奥氏体 H 级牌号 304H、309H、309Hcb、310H、316H、321H、347H、348H，其碳含量 0.04%~0.10%，要求晶粒度 7 级或更粗，H 级应属耐热型不锈钢。

EN 10088-1: 1995 亦为不锈钢牌号标准，但将共 160 个牌号按应用特性分为耐腐蚀钢、耐热钢及抗蠕变钢三类。标准中说明，X10CrAlSi7 (1.4713) 铬含量为 6.0%~8.0%，属铁素体耐热钢，另有 5 个牌号 (1.4903、1.4905、1.4911、1.4913、1.4922) 为马氏体抗蠕变钢，铬含量下限为 8%~10%，均低于 10.5%。按规定，这 6 个牌号应属低(中)合金耐热钢。

ISO/DIS 15510: 2008 不锈钢牌号标准中共 188 个牌号，均为  $Cr \geq 10.5\%$ ， $C \leq 1.2\%$ ，实际上也包括了不锈钢和高合金耐热钢牌号。

### 1.3 不锈钢与铁镍基合金的界别

在不锈钢的定义中，只对铬含量下限和碳含量上限作了限制。不锈钢中应用最多的应为铬镍奥氏体不锈钢，镍为必不可少的合金元素。按镍含量分类， $Ni \geq 99\%$  为纯镍，镍含量 99%~50% 为镍基合金，镍含量低于 50% 而又比较高时为铁镍基合金(美国称为镍-铁-铬合金)。镍基合金与铁镍基合金统称镍合金(镍含量高于其他合金元素)。铬镍奥氏体不锈钢中的镍含量应低于铁镍基合金。从铬镍奥氏体不锈钢，到铁镍基合金、到镍基合金、到纯镍，应为合金中镍含量逐渐提高的过程。问题在于铬镍奥氏体不锈钢与铁镍基合金之间，镍含量应有一个明显的界别。某镍含量以上为铁镍基合金(或镍合金)，该镍含量以下则为铬镍奥氏体不锈钢，即铬镍奥氏体不锈钢的镍含量应有一个上限值。由于在不锈钢中铬镍奥氏体不锈钢中的镍含量最高，铬镍奥氏体不锈钢的镍含量上限即为不锈钢的镍含量上限。

GB/T 15007—2008《耐蚀合金牌号》(指耐蚀镍合金)标准中规定，含镍 30%~50%，且镍与铁之和  $\geq 60\%$  的合金为铁镍基合金。意即镍含量低于 30% 的合金不能称为铁镍基合金，应为不锈钢。GB/T 20878—2007 中只有 1 个牌号 12Cr16Ni35 (S33010) 为耐热钢，镍含量为 33.00%~37.00% 外，其他牌号的镍含量上限均  $\leq 27\%$ ，说明中国不锈钢确实  $Ni \leq 30\%$ 。

在美国金属和合金统一数字编号系统 (UNS) 中，SXXXXX 为不锈钢和耐热钢，NXXXXX 为镍及镍合金。N08XXX 为镍含量低于 50% 的镍-铁-铬合金，镍-铁-铬合金中不仅包括镍合金 30%~50% 的合金，还包括镍含量虽低于 30%，但在合金中镍含量却高于





除铁外的其他合金含量，仍将其作为 N08XXX。例如 N08904，简称 904L。相当于中国牌号 015Cr21Ni26Mo5Cu2 (S31782 或 S39042)，此牌号在中国应为不锈钢，美国则为镍-铁-铬合金（属镍合金）。此外，在 ASTM A959-09 及其他不锈钢标准中除列有 SXXXXX 的不锈钢和耐热钢牌号外，还将镍合金标准中所列的 N08XXX 镍-铁-铬牌号中的 8 个牌号 N08020、N08367、N08700、N08800、N08810、N08811、N08904 及 N08926 也作为不锈钢列于标准中。而中国 GB/T 20878—2007 只将  $Ni \leq 30\%$  的 904L 列作不锈钢， $Ni > 30\%$  的牌号则列为铁镍基合金。

ISO/DIS 15510: 2008 的 188 个牌号中，14 个牌号为 N08XXX 的镍铁铬合金，174 个牌号为 SXXXXX 不锈钢和耐热钢，其中只有 1 个牌号 X6NiCrSiNCe35-25 (S35396) 属典型的耐热钢，其镍含量 34.0% ~ 36.0%。其他 173 个牌号镍含量均低于 28%。

可见中国不锈钢的概念为  $Ni \leq 30\%$  的牌号，不包括含镍 30% ~ 50% 的铁镍基合金。而美、欧、ISO 不锈钢标准中却包括了部分含镍 30% ~ 50% 的镍-铁-铬合金，概念是有区别的。

## 1.4 不锈钢的分类

不锈钢可按组织、合金成分、性能及应用等分别分类。

### 1.4.1 不锈钢按组织结构分类

不锈钢按组织结构分类是最重要的分类，所有不锈钢标准中都将不锈钢的牌号按组织结构分类列出。除俄罗斯标准外，ISO、EN 及各主要国家的标准中均将不锈钢按组织结构分为铁素体不锈钢、奥氏体不锈钢、铁素体-奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢及沉淀硬化不锈钢共五类。仅俄罗斯标准中未列沉淀硬化不锈钢，而增列了马氏体-铁素体不锈钢及奥氏体-马氏体不锈钢共六类。不锈钢按组织结构分类既与牌号成分有关，也与状态有关，只按不锈钢在常温时的组织结构确定类型，不包括高温时的组织类型。现对五种类型分述如下：

#### (1) 铁素体不锈钢

退火状态下常温基体的晶体结构主要为体心立方晶格的铁素体组织。有时某些牌号也含有少量的体心立方和体心四方的马氏体组织，一般作为非热处理强化不锈钢。

#### (2) 奥氏体不锈钢

固溶处理状态下常温基体的晶体结构主要为面心立方晶格的奥氏体组织。有的牌号中可含有少量（如低于 15%）的铁素体组织，称为亚稳定奥氏体不锈钢，在低温下或冷变形后部分奥氏体会转变为马氏体。奥氏体不锈钢的应用量可占不锈钢的 70%。压力容器用不锈钢的应用量中，奥氏体不锈钢占 90% 以上。奥氏体不锈钢可分铬镍不锈钢（300 系）和铬锰不锈钢（200 系）两类。现代不锈钢压力容器只用铬镍奥氏体不锈钢，很少用铬锰奥氏体不锈钢。

#### (3) 奥氏体-铁素体（双相）不锈钢

固溶处理状态常温时兼有奥氏体与铁素体两相组织，两相体积各占一半时具有最佳的

综合性能, 较少相的最低量不得低于规定量。对最低量较少相的规定各国标准规定得并不一致: GB 为 15%、ISO 为 20%、ASTM 为 25%、EN 为 30%。

#### (4) 马氏体不锈钢

适当的热处理高温时组织基本上为奥氏体, 冷却后相变为马氏体。碳含量较高时为体心四方晶格, 碳含量较低时可为体心立方晶格, 属热处理强化不锈钢。可分为 Cr13 型和 Cr18 型两类。可为铬不锈钢, 也可为铬镍不锈钢, 压力容器用得很少。

#### (5) 沉淀硬化不锈钢

未经沉淀硬化热处理前, 室温时可为奥氏体、马氏体或铁素体组织。经适当的沉淀硬化热处理, 基体中可析出碳化物、金属间化合物等析出相使钢强化和硬化。主要可分为马氏体沉淀硬化不锈钢、半奥氏体沉淀硬化不锈钢及奥氏体沉淀硬化不锈钢。属热处理强化不锈钢, 压力容器用的很少, 主要用于非焊件如高强度耐蚀螺栓等。

### 1.4.2 不锈钢按主要特征元素分类

(1) 按主要特征元素铬、镍、锰分类, 可分为铬不锈钢(400系)、铬镍不锈钢(300系)、铬锰(镍、氮)不锈钢(200系)。铬镍不锈钢多为奥氏体不锈钢和奥氏体-铁素体(双相)不锈钢, 也有马氏体不锈钢。铬不锈钢多为铁素体不锈钢和马氏体不锈钢。铬锰(镍、氮)不锈钢为节镍奥氏体不锈钢, 其锰含量多为 4%~19%;

(2) 中国早期的不锈钢标准 YB10-59 和 GB 1220—1975 中, 将铬的名义含量约为 13% 的牌号称为不锈钢, 镍含量超过 17% 的牌号称为耐酸钢, 两者统称为不锈钢耐酸钢, 简称为不锈钢。1989 年以后的标准中没有再用耐酸钢的名称;

(3) EN 13445: 2009 欧盟压力容器标准中将铬镍奥氏体不锈钢按铬含量分为两类, 一为  $\text{Cr} \leq 19\%$  (8·1 亚组), 一为  $\text{Cr} > 19\%$  (8·2 亚组);

(4) 一般将铁素体不锈钢按铬含量分为 3 种类型: 铬含量 10.5%~15% 为低铬型、16%~22% 为中铬型、23%~32% 为高铬型。铁素体不锈钢中在  $\text{Cr} > 15\%$  时才可能析出  $\alpha'$  相, 产生“475℃脆性”。低铬型铁素体不锈钢, 如 405 (中国牌号 06Cr13, 称为马氏体不锈钢) 不会产生“475℃脆性”;

(5) EN 10027《钢的命名系统 第 2 部分: 数字系统》中将耐腐蚀及耐热不锈钢牌号按镍含量分为  $\text{Ni} < 2.5\%$  及  $\text{Ni} \geq 2.5\%$  两类;

(6) 碳对不锈钢的耐晶间腐蚀性能及高温强度影响较大。按中国的习惯,  $\text{C} \leq 0.08\%$  称为低碳级不锈钢;  $\text{C} \leq 0.03\%$  称为超低碳级不锈钢;  $\text{C} \leq 0.01\%$  称为极低碳级不锈钢 (按 GB/T 221—2000 “钢铁产品牌号表示方法” 标准)。美国标准中则将  $\text{C} \leq 0.03\%$  称为低碳级 (L 级),  $\text{C} \leq 0.08\%$  称为一般级, 将 304H、309H、310H、316H、321H、347H、348H, 碳含量为 0.04%~0.10%, 800H 为 0.05%~0.10%, 碳含量均规定了上、下限, 称为 H 型高温用奥氏体铬镍不锈钢。要求检测其平均晶粒度按 ASTM E112 为 7 级或更粗。L 级等奥氏体不锈钢为非 H 级;

(7) 氮在不锈钢中的普遍且大量应用是近十多年不锈钢领域的重大进展, 特别是奥氏体不锈钢和双相不锈钢均普遍用氮进行合金化, 进入了现代不锈钢时代。不锈钢中  $\text{N} \leq 0.04\%$  为非含氮钢,  $> 0.04\%$  为含氮钢。奥氏体不锈钢中,  $\text{N} 0.05\% \sim 0.10\%$  (或 0.11%) 为

控氮型不锈钢；0.10%~0.4%为中氮型不锈钢； $N \geq 0.4\%$ （或0.6%）为高氮型不锈钢；

（8）按耐点蚀当量  $PRE = Cr + 3.3Mo + 16N$  计，奥氏体不锈钢和双相不锈钢  $PRE \geq 40$  为超级（super）奥氏体不锈钢和超级双相不锈钢；双相不锈钢的  $PRE \geq 45$  为超特级（hyper）双相不锈钢；铁素体不锈钢  $PRE \geq 35$  为超级铁素体不锈钢；

（9）铁素体不锈钢中的碳和氮的总含量应尽量低， $(C+N) \leq 0.015\%$  称为高纯级铁素体不锈钢； $(C+N) \leq 0.025\%$  称为超低碳氮铁素体不锈钢； $(C+N)$  为 0.03%~0.08% 为低碳级铁素体不锈钢；

（10）奥氏体不锈钢和铁素体不锈钢中加入足以稳定碳和氮的钛和（或）铌称为稳定化不锈钢；不含钛和（或）铌的牌号为非稳定化不锈钢；

（11）不锈钢中钼含量不超过 0.5% 称为无钼钢； $Mo \leq 4\%$  为低钼钢；钼含量 4%~8% 为高钼钢；

（12）不锈钢中硅含量低于 1% 作为杂质对待；奥氏体不锈钢中硅含量低于 4% 为含硅不锈钢； $> 4\%$  为高硅不锈钢；

（13）奥氏体不锈钢中含铜 1%~4% 为含铜奥氏体不锈钢；

（14）奥氏体不锈钢中硫含量为 0.15%~0.35% 时称为易切削不锈钢；

（15）铬镍奥氏体不锈钢中一般杂质元素或有害元素的含量，C 为 0.03%~0.08%， $Si < 1\%$ ， $Mn < 2\%$ ， $S < 0.03\%$ ， $P < 0.045\%$ 。降低这些元素的含量，如  $C < 0.01\%$ ， $Si < 0.1\%$ ， $Mn < 0.5\%$ ， $P < 0.01\%$ ， $S < 0.01\%$ ，称为高纯奥氏体不锈钢，可明显提高在硝酸等腐蚀介质中的耐蚀性能；

（16）双相不锈钢可按合金含量高低及 PRE 值高低分为五类：第一类为低合金型，代表牌号为 UNS S32304，典型 PRE 值 24~26；第二类为中合金型，代表牌号为 UNS S31803、UNS S32205，典型 PRE 32~37；第三类为高合金型，代表牌号为 UNS S31260、PRE 38~39；第四类为超级双相钢，代表牌号为 UNS S32760、UNS S32750， $PRE \geq 40$ ；第五类为特超级双相不锈钢，代表牌号为 UNS S33207、 $PRE \geq 45$ 。另有经济型双相不锈钢，铬含量多为 21%~23%，超低碳、低钼、低镍，经济性好，宜代替 18-8 型奥氏体不锈钢；

（17）按双相不锈钢发展的历史，主要由 PRE 与氮含量确定了四代双相不锈钢。第一代 1970 年前研制，不含氮；第二代 1971 年~1989 年研制，氮含量 0.1%~0.25%；第三代 1990 年~1999 年研制，氮含量 0.25%~0.35%， $PRE > 40$ ；第四代 2000 年后研制，氮含量 0.30%~0.6%， $PRE > 45$ 。第二、三、四代双相不锈钢称为现代双相不锈钢。有时也将经济型双相不锈钢称为第四代双相不锈钢的一种类型。

### 1.4.3 不锈钢按应用性能分类

（1）EN 10088-1：2005 不锈钢牌号标准中将不锈钢按应用性能分为三类。一为耐腐蚀钢，分别在各种腐蚀性介质中具有一定的耐蚀性能；二为耐热钢，主要在  $> 550^\circ\text{C}$  的气相和燃烧物中有良好的抗氧化性、抗硫侵蚀性；三为抗蠕变钢，在  $> 500^\circ\text{C}$  时，在应力作用下具有良好的抗蠕变性能。标准中未将低温用奥氏体不锈钢单列为一类，低温奥氏体不锈钢主要从耐腐蚀奥氏体不锈钢的牌号中选取；

（2）在一些典型的腐蚀介质中有好的耐蚀性的钢类：如硝酸级不锈钢、抗强氧化性

酸用不锈钢、硫酸用不锈钢、尿素级不锈钢、海水用不锈钢、磷酸用不锈钢；

(3) 一些专门应用场合用不锈钢，如压力容器用不锈钢、超临界锅炉用不锈钢(管)、核用不锈钢、建筑用不锈钢、装饰用不锈钢(光亮级)、炊具餐具用不锈钢、高强不锈钢、低温用不锈钢、无磁不锈钢、彩色不锈钢；

(4) 按耐局部腐蚀性能有耐应力腐蚀不锈钢、耐点蚀和缝隙腐蚀不锈钢、耐腐蚀疲劳用不锈钢、耐磨蚀不锈钢、耐选择性腐蚀不锈钢等；

(5) 具有某些制造工艺性能的不锈钢。如易切削不锈钢、低冷成形硬化倾向的不锈钢(如含铜的铬镍奥氏体不锈钢)等；

(6) 奥氏体不锈钢中大部分常用的铬镍奥氏体不锈钢从固溶处理的高温快冷到室温所获得的奥氏体基体组织都是亚稳定型的，在低温或冷变形时，其中一部分或大部分奥氏体会转变为马氏体，提高强度降低塑性和韧性。典型牌号如 301 (12Cr17Ni7)，称为亚稳定型奥氏体不锈钢。305 (10Cr18Ni12) 等含有较高的奥氏体形成元素，室温以上的冷变形不会形成马氏体，称为稳定型奥氏体不锈钢；

(7) 304、316 的  $C \leq 0.08\%$ ，耐晶间腐蚀性能较差，而  $R_{p0.2} \geq 205\text{MPa}$ ；304L、316L 的  $C \leq 0.03\%$ ，耐晶间腐蚀性能较好，但  $R_{p0.2} \geq 170\text{MPa}$ 。将 304L 和 316L 的氮含量控制为  $0.06\% \sim 0.12\%$  成为控氮级，既保持了超低碳的良好的耐晶间腐蚀性能，又能达到  $R_{p0.2} \geq 205\text{MPa}$ ，使室温的许用应力值提高了约 20%。常将这样的控氮型 304L 和 316L 称为“双牌号”，即耐晶间腐蚀性能达到 304L、316L 的水平，同时许用应力值达到了 304、316 的水平。这种“双牌号”已在中、美、日、法等国工程中应用。

## 1.5 不锈钢牌号标示方法

### 1.5.1 中国牌号标示方法

中国不锈钢采用两种牌号标示方法。一为按 GB/T 17616—1998《钢铁及合金牌号统一数字代号体系》采用统一数字代号 SXXXXX。S1XXXX 为铁素体不锈钢，S2XXXX 为双相不锈钢，S3XXXX 为奥氏体不锈钢，S4XXXX 为马氏体不锈钢，S5XXXX 为沉淀硬化不锈钢。另一种牌号表示方法基本按 GB/T 221—2000《钢铁产品牌号表示方法》用主要合金元素符号及其百分含量的平均值(取整数，不用百分号)来表示。在 GB/T 20878—2007 标准中牌号的碳含量表示法没有按 GB/T 221—2000 的规定，分别用两位数字或三位数字置于牌号之首表示碳含量，取决于标准中的碳含量只有上限而无下限，或有上限及下限以及碳含量的高低不同，有不同的表示方法，见表 1-1。

要注意中、美在化学成分基本相同时，中国的统一数字代号 SXXXXX 和美国 UNS SXXXXX 的阿拉伯数字大部分都不相同。





表 1-1 GB/T 20878—2007 中不锈钢牌号的碳含量标示方法

| 标准碳含量的上下限 | 只有上限，没有下限         |     |                   |    |                   |    | 有上限，有下限      |     |
|-----------|-------------------|-----|-------------------|----|-------------------|----|--------------|-----|
| 标准碳含量 %   | ≤0.03             |     | > 0.03 ~ 0.01     |    | > 0.01 ~ 0.20     |    |              |     |
| 碳含量标示数字   | 碳含量上限 × 3/4 × 100 |     | 碳含量上限 × 3/4 × 100 |    | 碳含量上限 × 4/5 × 100 |    | 上下限平均值 × 100 |     |
| 标示数字位数    | 三位数字              |     | 二位数字              |    | 二位数字              |    | 二位或三位数字      |     |
| 举例        | 碳含量 %，≤           | 标示  | 碳含量 %，≤           | 标示 | 碳含量 %，≤           | 标示 | 碳含量 %        | 标示  |
|           | 0.01              | 008 | 0.04              | 03 | 0.12              | 10 | 0.04 ~ 0.10  | 07  |
|           | 0.02              | 015 | 0.05              | 04 | 0.15              | 12 | 0.09 ~ 0.14  | 12  |
|           | 0.025             | 019 | 0.07              | 05 | 0.18              | 14 | 0.10 ~ 0.15  | 12  |
|           | 0.03              | 022 | 0.08              | 06 | 0.20              | 16 | 0.08 ~ 0.18  | 13  |
|           |                   |     | 0.09              | 07 | 0.25              | 20 | 0.10 ~ 0.16  | 13  |
|           |                   |     |                   |    |                   |    | 0.95 ~ 1.20  | 108 |

中国不锈（耐蚀）铸钢的牌号按 GB/T 5613—1995《铸钢牌号表示方法》标示，如 ZG07Cr19Ni9，ZG 为“铸钢”汉语拼音的首个字母，两位阿拉伯数字表示碳含量，碳含量只有上限时，取上限的一万倍，碳含量有上限和下限时取其平均值的一万倍。后为主要合金元素符号及其含量（100 倍）。

1.5.2 美国牌号标示方法

美国不锈钢标准中主要采用 UNS 统一数字系统的牌号表示方法，UNS SXXXXXX 表示不锈耐热钢，不锈钢标准中也列一些镍铁铬合金，因而也列有 UNS N08XXX 牌号。不锈铸钢用 UNS J9XXXXX 牌号。UNS SXXXXXX 5 位数字中第 1 位数字表示不锈钢类型，铬镍奥氏体钢多为 3，也有 1 和 6；节镍的铬锰奥氏体钢为 2；铬镍双相不锈钢为 3；铁素体钢多为 4，也有 1 和 3；马氏体钢为 4，也有 6；沉淀硬化不锈钢有 1、3、4、6。

美国不锈钢标准中部分 UNS 牌号同时还标明类型（Type），原为 AISI（美国钢铁协会）的 3 位数标示方法，第 1 位数表示钢的类型。2XX 表示铬锰镍氮奥氏体钢，3XX 表示铬镍奥氏体钢和双相钢，4XX 为铁素体钢和马氏体钢，6XX 为沉淀硬化不锈钢。也有少数牌号用 XM-XX，4 位数等标示。由于 304、316、317、321、348、309、310、405、430 等 AISI 老牌号已长期使用，至今各国已将其作为习惯用牌号。但在正规场合美国牌号主要采用 UNS 牌号。

1.5.3 日本牌号标示方法

日本不锈钢牌号按日本工业标准（JIS）的方法 SUS XXX 标示，3 位阿拉伯数字基本采用美国 AISI XXX 的数字。改型牌号可加 J<sub>1</sub>、J<sub>2</sub> 表示。必要时牌号后可加大写的英文字母表示材料形状，如 HP 为热轧板，CP 为冷轧板，B 为热轧棒，F 为锻件，TP 为配管，TB 为换热管。



SCSXX 为不锈钢铸件, 阿拉伯数字为 1 位数或 2 位数。耐热钢牌号用 SUHXXX 或 SUHXX 标示。

#### 1.5.4 欧盟牌号标示方法

EN 不锈钢牌号采用两种标示方法。一为数字编号方法, 一为用合金成分与含量标示的牌号。数字编号方法按 EN 10027-2《钢的命名系统——第 2 部分: 数字系统》规定, 实际上与德国 DIN 17007 系统的数字材料号表示方法相似。不锈钢用 1XXXX 表示, “1”为钢, 1.40XX~1.49XX 为不锈钢。EN 不锈钢数字编号的分类见表 1-2。

按成分含量的牌号标示方法与德国 DIN 17006 系统的牌号标示方法相似, 也与 ISO 的牌号相近。

表 1-2 EN 不锈钢的数字编号的分类

| 合金元素   | 耐腐蚀钢类  |        |        |        |                  | 耐热钢类   |        | 抗蠕变钢类  |
|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|
|        | 1.40XX | 1.41XX | 1.43XX | 1.44XX | 1.45XX<br>1.46XX | 1.47XX | 1.48XX | 1.49XX |
| 镍含量/%  | <2.5   | <2.5   | ≥2.5   | ≥2.5   |                  | <2.5   | ≥2.5   |        |
| 有无钼    | 无      | 有      | 无      | 有      |                  |        |        |        |
| 有无特殊元素 | 无      | 无      | 无      | 无      | Ti、Nb、Cu 等       |        |        |        |

钢牌号开始冠以字母“X”表示为高合金钢。其后用阿拉伯数字表示碳含量, 当碳含量只有上限没有下限时, 按表 1-3 标示碳含量。

表 1-3 标准碳含量只有上限时, EN 标示碳含量的数字

| 标示碳含量数          | 1              | 2              | 3                     | 4    | 5                    | 6    | 7    | 8    | 10   | 12   | 15   |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------------|------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| 标准碳含量上限<br>%, ≤ | 0.015<br>0.020 | 0.025<br>0.030 | 0.04<br>0.05<br>0.035 | 0.06 | 0.06<br>0.07<br>0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.10 | 0.12 | 0.15 | 0.20 |

如果标准碳含量有上限和下限时, 应取其平均值取整, 按其 1 万倍的两位数或三位数标示碳含量。

碳含量的标示后, 用化学成分英文字母及其含量(100 倍)数字表示牌号。如 X2CrNiMo17-12-2(1.4404) 相当于美国的 316L。

按规定, 欧盟各国的不锈钢标准均应采用 EN 标准的牌号, 因此欧盟其他各国的牌号标示方法不再介绍。

#### 1.5.5 俄罗斯牌号标示方法

不锈钢和耐热钢牌号用主要合金元素俄文缩写字母及其含量平均值(100 倍)标示, 前面用两位阿拉伯数字标示碳含量。碳含量仅有上限时用上限, 有上限和下限时用平均值, 取含量的 1 万倍标示。俄文缩写字母表示的合金元素为: X 铬、H 镍、M 钼、Γ 锰、Д 铜、C 硅、A 氮、T 钛、B 铌、Ю 铝、B 钨等。



1.5.6 国际标准牌号标示方法

国际标准不锈钢牌号的标示方法类似采用了德国、欧盟按成分含量的标示方法，如 304L 相应牌号为 X2CrNi18-9。“X”表示高合金钢，其后用阿拉伯数字表示碳含量。当碳含量只有上限没有下限时，按表 1-4 标示碳含量。当碳含量有上、下限时，按其平均值取整后一百倍的数字标示。合金主要元素列出后，分别取整标示百分含量。

表 1-4 ISO 牌号中碳含量标示数字标示的碳含量上限

| 碳含量上限<br>%，≤ | 碳含量<br>标示数 | 相同碳含量，<br>不同标示数的说明          | 碳含量上限<br>%，≤ | 碳含量<br>标示数 | 相同碳含量，<br>不同标示数的说明                                           |
|--------------|------------|-----------------------------|--------------|------------|--------------------------------------------------------------|
| 0.01         | 1          |                             | 0.08         | 4          | 沉淀硬化钢                                                        |
| 0.02         | 1          |                             |              | 5          | 铁素体钢<br>X5CrNiMoTi15-2<br>奥氏体钢 X5CrNi19-9 及<br>X5CrMo17-12-2 |
| 0.025        | 2          |                             |              |            |                                                              |
| 0.03         | 2          |                             |              |            |                                                              |
| 0.035        | 3          |                             |              | 6          | 其他奥氏体钢，双相钢                                                   |
| 0.04         | 2          | 奥氏体钢 Mn > 4%，双相钢            | 0.09         | 7          |                                                              |
|              | 3          | 奥氏体钢 Mn≤2.5%                | 0.10         | 5          | 铁素体钢 X5CrAl19-3                                              |
| 0.05         | 3          |                             |              | 8          | 奥氏体钢，沉淀硬化钢                                                   |
| 0.06         | 4          |                             | 0.12         | 10         |                                                              |
| 0.07         | 4          | 高镍牌号<br>X4NiCrCuMo35-20-4-3 | 0.15         | 8          | 高镍奥氏体钢<br>X8NiCr35-16<br>马氏体钢 X8CrPb13                       |
|              | 5          | 非高镍牌号                       |              | 10         | X10CrNi25-21                                                 |
|              |            |                             |              | 12         | 18 铬奥氏体钢                                                     |
|              |            |                             |              | 0.20       |                                                              |

在 ISO/DIS 15510—2008 “不锈钢——化学成分”标准中，还分别按 ASTM 的 UNS 数字牌号及 EN 的数字牌号在后面加上两位数字，成为 UNS-ISO 数字牌号及 EN-ISO 数字牌号，如 X2CrNi18-9 的 UNS-ISO 数字牌号为 S30490，EN-ISO 数字牌号为 1.430790。后加两位数字的含义见表 1-5。

表 1-5 ISO 数字牌号后面两位数字的含义

| 后两位数 | 含义      | 后两位数 | 含义      | 后两位数 | 含义             | 后两位数 | 含义     |
|------|---------|------|---------|------|----------------|------|--------|
| 90   | 低碳      | 95   | 低碳，增氮、钼 | 70   | 加钛             | 75   | 低碳，加铜  |
| 91   | 低碳，增镍   | 96   | 常规碳     | 71   | 加铌             | 76   | 常规碳，加铜 |
| 92   | 低碳，增钼   | 97   | 常规碳，增钼  | 72   | 加铈、铝、<br>硅、硒或铅 | 77   | 其他     |
| 93   | 低碳，增钼、镍 | 98   | 常规碳，增氮  | 73   | 高碳，增镍          | 78   | 其他     |
| 94   | 低碳，增氮   | 99   | 高碳      | 74   | 加硫             | 79   | 其他     |

## 1.6 不锈钢的主要技术进展

不锈钢的发明与应用已超过百年历史。在技术上取得了很大进展：

- (1) 不锈钢的合金化进行了系统研究；
- (2) 对不锈钢的晶间腐蚀机制进行了深入研究，采用低碳、稳定化、热处理及晶间腐蚀的标准检验等措施较好地控制了晶间腐蚀失效事故；
- (3) 采用了炉外精炼、连续铸锭及森吉米尔多辊式精轧机，被称为冶金工艺和设备的三大突破技术；
- (4) 进一步发现了氮在奥氏体不锈钢和双相不锈钢中的重要作用，发展了含氮不锈钢，成为现代奥氏体不锈钢和现代双相不锈钢的基础；
- (5) 发展了低碳、氮的高纯铁素体不锈钢，及用钛和铌的双稳定化铁素体不锈钢；
- (6) 耐点蚀当量 PRE (Pitting Resistance Equivalent)  $=Cr+3.3Mo+16N$  已被 ASTM 和 GB、EN 不锈钢标准所确认。不仅用于评定耐点蚀性能，而且也在多数场合用于按化学成分来相对定量评定不锈钢的综合耐蚀性。并据此发展与应用了超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢及超级铁素体不锈钢等，具有更高的耐蚀性能；
- (7) 发展与应用了高性能的耐高温、耐低温及高强度等不锈钢。



## 2 不锈钢的合金化

### 2.1 不锈钢中的合金元素

不锈钢亦为铁合金,为获得不锈钢所需要的组织和性能,钢中除含 Fe 外,还常控制一定含量范围的金属元素 Cr、Ni、Mo、Mn、Cu、W、Al、Ti、Nb、V、Ce 等及非金属元素 C、N、Si 等。还含有多数情况为有害金属元素 Pb、Sn、Bi、Te 等及有害非金属元素 S、P、H、O、As 等。在不锈钢标准中对主要的合金元素含量进行了具体规定,一种是规定了含量上限和下限的范围,例如对 Cr 含量必须规定上限和下限。有时对部分合金元素只规定上限,如 P 只规定上限。多数情况下,对 S、Si、Mn、C 等大多只规定上限。对没有规定含量的成分也应按惯例控制在很低的含量。 $C \geq 0.04\%$  时,规定碳含量一般取两位小数, $C \leq 0.03\%$  时,规定碳含量一般取三位小数。碳含量只规定上限时,常为  $C \leq 0.08\%$ 、 $C \leq 0.030\%$ 、 $C \leq 0.020\%$  及  $C \leq 0.010\%$ 。除高锰钢外,锰含量只规定上限, $Mn \leq 2.00\%$  或  $Mn \leq 1.00\%$ 。除含硅或高硅钢外,硅含量只规定上限,板、管  $Si \leq 0.75\%$ ,锻件与长材  $Si \leq 1.00\%$ 。铬的上下限范围多为 2%,也有 3%。镍的上下限范围多不大于 3%。钼的上下限范围多不大于 1%。合金元素在不锈钢中的存在形式有单质、固溶体、非金属化合物及金属间化合物等。

### 2.2 合金元素在不锈钢中的存在形式之一——单质

对于不锈钢而言,合金元素以单质形式存在时一般都对不锈钢的性能起有害作用,如铅(Pb)、锡(Sn)、锑(Te)、铋(Bi)、砷(As)等,熔点低,在不锈钢中的固溶度小,与不锈钢的热膨胀系数的差别大。凝固时常在晶界和相界偏析,降低结合力,热应力大,热成形时易裂,易产生“热脆”。按铅当量 $= [Pb] + 1.65[Bi] + 0.53[Te] + 0.26[Sb] + 0.020[Sn] + 0.013[As]$ 计。18-8 不锈钢的“热脆”临界铅当量应低于 0.0084%,才能满足性能要求。因此应尽量避免熔炼不锈钢所用炉料中含有这些有害元素,并带入钢中。实际上在不锈钢的正常生产中一般不会产生这种现象。

### 2.3 合金元素在不锈钢中的存在形式之二——固溶体

合金元素固溶于基体中使固溶体合金化是提高不锈钢性能的最重要的措施。人为地在不锈钢中加入或控制某些合金元素并固溶于基体中,目的当然是为了提高不锈钢的性能。有时溶入某些合金元素对提高某些性能是有利的,但可能对另外的性能会起不利影响,因此必须按照对主要性能的要求来选用不同合金元素及其含量的不锈钢牌号,并充分考虑合