

# 马氏体不锈钢



# 1 目录

- 1 引言
- 2 听听怎样看待马氏体不锈钢
- 3 “重新发现马氏体不锈钢”
  - 高性能工程钢
  - 优秀的工具钢
  - 可持续发展的不锈钢
  - 价格更加稳定的不锈钢
  - 马氏体产品组
  - 高质量马氏体
  - 良好的切削加工性能降低了成本
  - 磁性和耐腐蚀性
  - 完美地符合规格要求
- 4 耐腐蚀性
  - 不锈钢之所以不生锈，是因为其中含有铬
  - 抗点蚀能力
  - 应力腐蚀致裂（04-1至04-3）（04-1 至 04-3）
  - 抗氧化能力
  - 改良的马氏体不锈钢
  - 避免腐蚀
  - 等级钢材的选择
  - 经验之谈
  - 生命周期成本核算：非常宝贵的指南
- 5 物理性能
- 6 需要高强度和高耐腐蚀性的应用
  - 强度
  - 抗冲击能力
  - 部分应用示例
- 7 需要高耐磨性和高耐腐蚀性的应用
  - 马氏体不锈钢接近工具钢
  - 应用内容
- 8 防腐蚀和防蠕变应用
- 9 制造
  - 热处理
  - 回火
  - 析出硬化
  - 切削加工
  - 焊接
- 10 参考资料
- 11 附件
  - 附件1：马氏体不锈钢英国标准
  - 附件2：马氏体不锈钢美国标准
  - 附件3：常用EN标准等级钢材分析
  - 附件4：抗蠕变EN10302标准等级钢材分析
  - 附件5：常用ASTM/AISI标准等级钢材分析
  - 附件6：不同等级钢材之间的对应性
  - 附件6：不同等级钢材之间的对应性（续）
  - 附件7：马氏体不锈钢的物理性能（EN 10088-1: 2005标准）
  - 附件8：石油生产中使用的马氏体不锈钢
  - 附件9：EN 10088-3:2014-12标准提供的部分热处理马氏体钢材在室温条件下的机械性能
  - 附件10a：EN 10088-3标准提供的马氏体不锈钢热处理工艺建议
  - 附件10b：EN 10088-3 Standard提供的马氏体析出硬化防腐蚀钢材热处理工艺建议

## 2 引言



TIM COLLINS  
秘书长

2007年，国际不锈钢论坛和国际铬协会共同发布了《铁素体解决方案》，旨在推动产品系列日益扩大、在技术上和商业上都具有竞争力的铁素体不锈钢的产品应用开发。继该手册取得成功之后，人们的目光又被吸引到另一种低调但却同样用途广泛的不锈钢产品系列，即：马氏体不锈钢。

马氏体不锈钢具有优秀的强度重量比、强大的耐腐蚀能力，尤其还具有优良的硬度，它的用途很广泛，其中最为人熟知的是用作保持刃口锋利的刀钢。

为给马氏体不锈钢的发展提供合适的环境，我们有必要研究当前和潜在的产品应用，提供马氏体不锈钢的技术介绍，以及提供那些曾经使用过马氏体不锈钢的当前生产企业做出的证言，他们才是谈论马氏体不锈钢价值的权威。

我们要感谢国际不锈钢论坛长材产品委员会主席Thiery Cremailh以及各委

员会成员，感谢他们为这本手册的成功出版所提供的想法和做出的贡献。另外，我们还要感谢广大会员的支持和贡献，我们要尤其感谢Bernard Heritier，他为书中使用的核心案例和图片，规划、编写和整理了必要的资源。另外，我们还要特别感谢国际知名的、受人尊敬的技术专家Jacques Charles博士，他非常热心地同意校订草稿，并且提出意见和指导。最后，我们还要感谢Jo Claes，感谢她对本手册做出的设计以及印刷筹备工作。

我们把这本手册推荐给生产企业、贸易商以及最终用户，我们希望这本手册能够帮助他们开拓市场。

Tim Collins  
秘书长  
国际不锈钢论坛  
布鲁塞尔

### 3 听听怎样看待马氏体不锈钢

Sara Nubicella  
集团采购类目经理  
戴博水泵公司，意大利



戴博水泵公司生产大型立式水泵。水泵开机后，泵轴必须能够承受大扭力。因此，我们选择使用具有高机械性能的AISI 420B钢材。

另外，我们还生产热水循环泵。这种泵的泵轴必须具有非常好的耐磨性。AISI 420C提供了我们需要的最佳性能。

Roberto Arcos Perez  
技术经理 (C至)  
阿科斯海诺斯公司，西班牙阿尔巴塞特



阿科斯刀具是在西班牙采用高品质的马氏体不锈钢生产的，不同厚度、不同形状（平板或卷材）和不同化学成分的马氏体不锈钢，我们都使用过。通过硬化和回火等热处理工艺，刀锋可以获得优异的切割力和耐久性。马氏体不锈钢具有高耐蚀性，使其轻松满足国际刀具标准ISO8442-1的要求。

Pascale Sol-Bruchon  
总经理  
鲁塞隆·杜马斯·萨巴蒂尔，法国梯也尔

我们为专业人士和知名厨师生产高质量刀具。我们选择EN 1.4116 +N，这是一种马氏体不锈钢等级，其中添加的氮化物带来了出色的性能，比如，高硬度、高耐腐蚀性等。我们的刀具性能优秀，使用寿命长，并且即使经过多次打磨，也能保持优秀的切割性能。

Takayuki Osakabe  
ME业务单元设计分部总经理  
雅马哈发动机有限公司，日本静冈



我们雅马哈发动机公司有多个产品用到不锈钢。特别是，超过半数的雅马哈外置发动机使用马氏体不锈钢。由于发动机长时间在水上使用，因此要具有高耐腐蚀性能。另外，由于发动机要在恶劣的环境条件下长期使用，例如，渔业和运输业，因此高耐久性也十分重要。为达到这种高可靠性，我们相信马氏体所是最适合的材料。未来，我们将继续使用不锈钢来满足我们严格的质量标准，为客户提供绝对可靠的产品。

Masahito Watanabe

总裁

吉田金属工业公司，日本新潟



从1960年起，我们生产的厨刀的刀身全部使用马氏体不锈钢。为了长时间保持刃口锋利，马氏体不锈钢必不可少。尽管马氏体不锈钢硬度高，加工难度大，但是我们公司反复进行产品研发，在1983年生产出刀把和刀身一体化的全不锈钢厨刀。由于刀把与刀身之间没有缝隙，因此我们的产品卫生性能高，因此受到客户的高度赞誉。另外，我们还生产全马氏体不锈钢锻制厨刀。许多客户都对我们厨刀的锋利度和设计表示满意，只是有时候，我们也会收到客人关于刀具生锈的投诉。人们有一些误解，这些误解是关于使用上的问题，例如，使用洗碗机清洗，不锈钢就

不应该生锈。我正在考虑使用耐腐蚀性更强的马氏体不锈钢，改良我们的产品。

## 4 “重新发现马氏体不锈钢”

这个不锈钢家族值得我们重新评估，因为它提供的性能组合往往被我们低估：

### 高性能工程钢

马氏体不锈钢的机械性能可以媲美工程结构钢，不仅如此，它还提供广受欢迎的、从中等到良好的耐腐蚀能力。

工程结构钢的用户可能会优先考虑这些性能，而不是表面处理；表面处理不仅昂贵，而且会造成回收问题，并且一旦涂层被破坏或磨损，表面处理就会表现低效的一面。不仅如此，相对于低合金不锈钢，马氏体不锈钢更加容易焊接和热处理。

### 优秀的工具钢

耐磨性能不仅仅与硬度相关。在许多案例中，例如，携带颗粒物的液体，侵蚀和腐蚀过程共同造成磨损。高碳马氏体不锈钢综合了高硬度和高耐腐蚀性，是许多应用的最佳解决方案。

### 可持续发展的不锈钢

马氏体不锈钢通常含有12%至17%的铬，以及0%至5%的镍。较低的镍含量（相对于奥氏体不锈钢）带来另一个优势——材料成本因此降低。

像其他不锈钢产品家族一样，马氏体不锈钢也提供了低维护性和长使用寿命，以及优秀的回收率。



## 价格更加稳定的不锈钢

除了铁之外，不锈钢的主要成分是铬和镍。历史上，铬的价格相对稳定，因此马氏体不锈钢和铁素体不锈钢的价格也相对稳定。

也因此，马氏体不锈钢提供了良好的价格稳定性——这是许多用户的一项核心需求。

## 马氏体产品组 (03-1, 03-2)

马氏体不锈钢含有超过10.5%的铬，其机械性能可以通过热处理工序来调整，这与工程钢相同。

马氏体不锈钢分为4个子类（存在部分重叠）。

1. **铁铬碳钢**：这个子类最早投入使用，目前在工程应用和耐磨应用中仍有广泛使用。
2. **镍钢**：镍代替了钢中的部分碳。相对于前一个子类，这个子类提供了更高的韧性，尤其是低温韧性。铬含量越高，耐腐蚀能力越强。在第1个和第2个子类中添加钼，可以进一步改善耐腐蚀能力。
3. **析出硬化不锈钢**：提供最佳的强度与韧性组合。
4. **抗蠕变不锈钢**：不同于第1个子类，这个子类含有约11%的铬，另外还添加了钴、铌、钒和硼，增加了高温强度和抗蠕变能力（最高温度650° C）。

许多标准都把马氏体不锈钢和其他不锈钢家族（奥氏体、铁素体以及双相）放在一起。

这些标准通常与产品外形相关。

附件1和附件2分别列出了主要的EN标准和ASTM标准。另外，还有针对特定行业和/或应用的其他标准。

### 分组 1

1a 工程  
 铬：10.5-13%  
 碳：0.1-0.4%  
 典型等级  
 ASTM：410, 420  
 EN：4006, 4021, 4034

#### 1b 耐磨性能

铬：13-17%  
 碳：0.4-1.0%  
 典型等级：  
 ASTM：440A/B/C  
 EN：4125

### 分组 2

铬：13-17%  
 镍：2-5%  
 碳：<0.2%  
 典型等级  
 ASTM：431  
 EN：4057, 4313, 4418

### 分组 3

铬：15-17%  
 镍：3-5%  
 铜：3-5%  
 铌  
 碳：<0.1%  
 典型等级：  
 ASTM：631  
 （17-4PH, 15-5PH）  
 EN 1.4542, 1.4545, 1.4534, 1.4594, 1.4596

### 分组 4

铬：10.5-12%  
 碳：<0.1-0.25%  
 钼：0.8-1.5%  
 添加了钴、铌、钒、硼  
 典型等级  
 4913, 4923

## 令人钦佩的参照应用

在马氏体不锈钢的成功故事中，有三个典型的、极端苛刻的应用表现突出。

- 航空应用，要求材料具备高强度、高刚度、高可靠性以及高耐腐蚀性。电渣重熔（ESR）工艺，允许按照材料的顶级性能进行使用。
- 发电行业，抗蠕变不锈钢让蒸汽发生器和蒸汽轮机能够在约650° C高温下连续运行。今天的大部分电能都由蒸汽轮机生产，而蒸汽轮机使用的能源则来自化石燃料、生物质以及核裂变，因此抗蠕变不锈钢具有的这个能力尤其重要。
- 石油和天然气的开采。今天，在中等温度条件以及中等二氧化碳及硫化氢压力条件下，13铬不锈钢得到广泛使用。目前正在开发抗应力腐蚀致裂（SCC）和抗硫化物应力致裂（SSC）能力更高的新等级钢材，未来的

新等级钢材将能弥和马氏体不锈钢与更高成本的高耐腐蚀性双相不锈钢之间的差距。

## 高质量马氏体

为进一步提高马氏体不锈钢的质量和性能，相关研发工作正在紧锣密鼓地进行。其中最突出的可能是冲击性能的提高。由于工艺改善，我们现在能够在-60°C环境下使用部分马氏体不锈钢，这使得马氏体不锈钢能够适合非常寒冷气候条件下的建设和施工。今天，为满足客户需求，生产企业极大地增加了等级钢材/性能的范围和多元化，并且往往与客户合作完成。

## 良好的切削加工性能降低了成本

高速切削等级钢材（EN1.4005和1.4029）已经存在了较长时间，但是这种钢材的耐腐蚀性有所降低。今天，钙处理马氏体不锈钢得到广泛应用。这不仅带来了切削加工性能的大幅提高（使用硬钢合金工具），而且耐腐蚀能力又不会显著降低。因此，在切削成本占部件成本较高比例的情况下，马氏体不锈钢的这个优势非常有吸引力。汽车行业等已经看到这个潜力，这些等级钢材在汽车行业得到广泛应用。

大部分马氏体家族在退火条件下都比较柔软，因此易于切削。不过，析出

硬化马氏体家族在退火条件下却硬度较高。尽管可以切削，但如果工序复杂，可以通过热处理降低硬度。

## 磁性和耐腐蚀性

人们存在一个广泛的误解：有磁性的不锈钢不是真正的不锈钢，因为这种不锈钢会像碳钢一样生锈。这是无稽之谈。单就原子结构而言，有些不锈钢具有磁性，有些则没有。耐腐蚀能力不是因为原子结构，而是因为化学成分——尤其是铬含量。磁性与此无关。

## 完美地符合规格要求

在需要高硬度或高强度的场合，马氏体家族往往会被选择。应用方式所需要的耐腐蚀能力要与合金材料所提供的耐腐蚀能力相匹配，这一点很重要。应当注意的是，在硬化条件下，标准马氏体合金的耐腐蚀能力是最高的——通常情况下，不应在退火条件（柔软条件）下使用。部分马氏体不锈钢的耐腐蚀能力几乎与AISI 304相当。有时候，由于使用中的合理妥协，可以适当降低耐腐蚀能力，例如，建议最终用户定期清洁产品表面。在食品加工行业，对于有高硬度要求刀具，这是标准操作。

在对马氏体不锈钢进行经济分析时，热处理工序的成本必须考虑在内。



## 马氏体特殊资料卡

1. 在室温条件下具有**高机械性能**，其机械性能高于奥氏体、铁素体和双相不锈钢，与工程结构钢相似。
2. 达到高碳等级钢材所具有的高**硬度和高耐磨性能**
3. 含有钴、钒、铌、钨、硼的等级钢材具有**良好的抗蠕变能力**
4. **韧性**高于钛和铝合金，与其他钢材相似
5. 具有**中等到良好的耐腐蚀能力**（奥氏体的耐腐蚀能力从良好到优秀）
6. **磁性**（包括软磁等级钢材）
7. **热导率**是奥氏体不锈钢的两倍
8. **热膨胀率**是奥氏体不锈钢的2/3
9. 除高速切削等级钢材外，还有**改良了切削加工能力的等级钢材**

## 5 耐腐蚀性

### 不锈钢之所以不生锈，是因为其中含有铬

所有钢材都会受到腐蚀，只是程度不一。不过，由于不锈钢中含有铬，因此其耐腐蚀能力要优于碳钢。铬是不锈钢耐腐蚀的关键元素。

不锈钢的耐腐蚀能力更多地取决于化学成分，而不是微观结构。

含镍的马氏体不锈钢之所以具有更好的耐腐蚀能力，是因为其中可以含有更多的铬和/或钼。这个不锈钢等级钢材家族可以分为四个子类：

第1类马氏体不锈钢最适合非恶劣性环境条件，例如，室内（马氏体不锈钢不能接触水，或者需要定期擦干），或者可以接受部分表面腐蚀的室外。在该背景条件下，这类马氏体不锈钢的使用寿命要长于碳钢。

第2类和第3类马氏体不锈钢的耐腐蚀能力优于第1类。在非恶劣性环境条件下，在与水接触的背景下，这两类马氏体不锈钢能够发挥耐腐蚀作用。

第4类马氏体不锈钢的耐腐蚀能力与第1类相似，但通常用于高温蒸汽环境，还有少量用于高温汽车行业应用。

### 改良抗点蚀当量数 (PREN)

- 抗点蚀当量数 (PREN) 是在含有氯化物的环境下，对不锈钢的相对耐腐蚀性进行计量的一个标准。抗点蚀当量数越高，不锈钢抗局部腐蚀的能力越强。对于奥氏体不锈钢， $PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N$ 。
- 不过，对于马氏体不锈钢，部分铬却可能被绑定到碳化物，从而降低了钝化膜可以使用的铬量。
- 阿普拉姆公司建议使用以下公式，该公式在本文件通用。

$$PREN = \%Cr + 3.3\%Mo + 16\%N - 5\%C$$

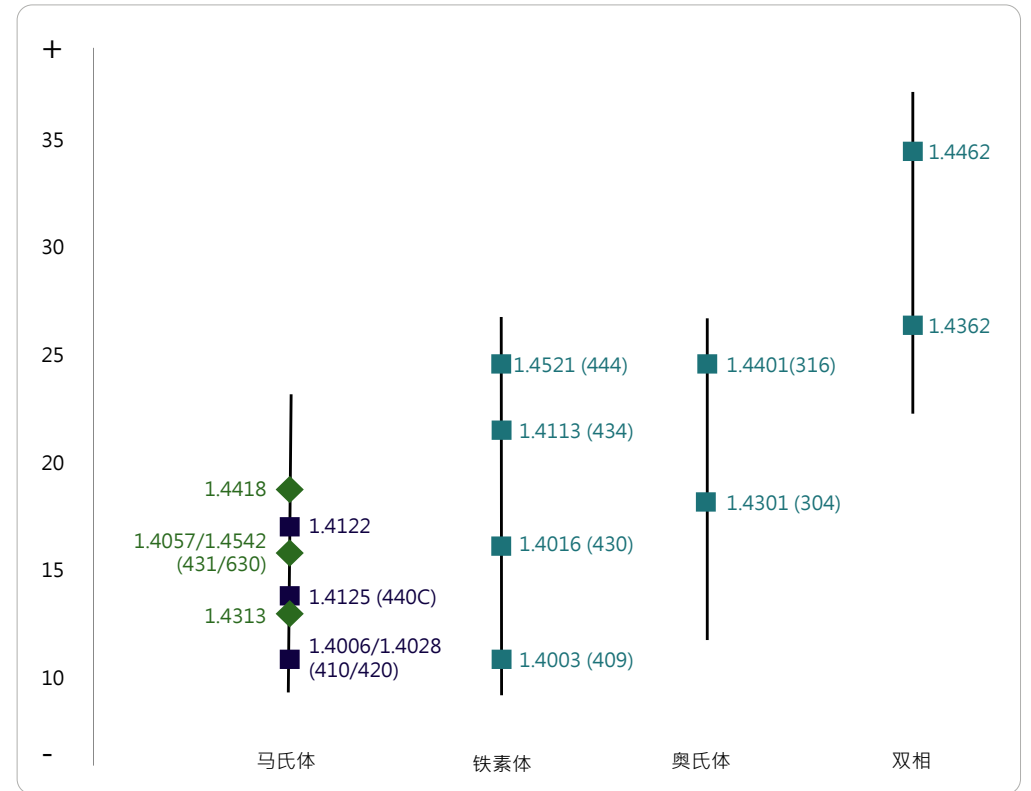


图1 根据阿普拉姆PREN公式计算的部分等级钢材抗点蚀能力

## 抗点蚀能力

通过比较马氏体家族与奥氏体304的耐腐蚀性能，可以清晰地看到铬与钼发挥的关键作用，并且含镍的304奥氏体不锈钢的耐腐蚀能力与部分马氏体不锈钢相当（如图1所示）。

## 应力腐蚀致裂（04-1至04-3）

当环境条件（例如，氯化物、硫化氢、氢气的增加）与应力（无论是外力应力，还是残余应力，还是二者都有）的共同作用形成一系列以下事件时，可能发生应力腐蚀致裂：

- i) 发生点蚀
- ii) 从点蚀初始点发生开裂
- iii) 然后，裂缝以穿晶或晶内模式，在金属内部传播。
- iv) 金属失效

关于硫化氢条件下马氏体不锈钢的使用指南，可以参见NACE MR0175标准/ISO 15156标准（另请参见附件8）。石油开采行业是必须考虑应力腐蚀致裂

的一个熟知应用（后文将详细介绍）。

在其他应用下，应力腐蚀致裂的屈服强度水平不大可能低于600兆帕。无论任何处理动作，只要没有采取避免渗氢的预防措施，只要压力达到1000兆帕以上，都有可能发生应力腐蚀致裂。航空行业已经制定相关规范，确保不会出现应力腐蚀致裂风险。

## 抗氧化能力

不同于上述两种腐蚀，高温氧化作用会在温度升高的情况下发生。当加热不锈钢时，其中含有的铬会在不锈钢表面形成氧化铬保护层，阻止发生进一步氧化。这层氧化皮与金属基质拥有不同的热膨胀性能，这会影晌氧化皮的稳定性，尤其是在频繁发生热循环的使用条件下。氧化皮的热膨胀系数很低，而不锈钢的热膨胀系统很高，从而形成过多的氧化皮；当不锈钢冷却收缩时，氧化皮会碎裂。由于马氏体不锈钢的热膨胀系数较低，因此相对于奥氏体合金，马氏体不锈钢的氧化皮并不易于发生高温碎裂。只要氧化皮不发生碎裂，就不会发生新的氧化作用。

抗蠕变马氏体不锈钢的设计最高使用温度高达650°C：蒸汽发生器、涡轮机叶片、汽车进气阀以及其他组件都可使用。

## 改良的马氏体不锈钢

近几年来，市场上出对了一些新的等级钢材，其中大部分都拥有专利技术。因此，这些新等级钢材还没有被纳入现有标准。

- 现在，含有氮添加剂的马氏体开始被我们接受（04-4至04-6）。如PREN公式所示，氮能够极大改善抗点蚀能力。另外，氮还能改善机械性能，是跟镍一样的奥氏体稳定剂。通过添加氮以及减少碳和镍，这会带来性能更好、成本更低的不锈钢。不过，在固化过程中，无论是在钢水中，还是在 $\delta$ 铁素体相中，氮的溶解度都比较低，这是一个问题。目前使用的PESR工艺（高氮压下电渣重熔工艺）可以提高氮含量至0.4%。使用传统AOD工艺生产的等级钢材，含氮量较低。图2（来源：尤基泰克公司）所示为在淬火回火条件下，马氏体不锈钢EN 1.4116在添加0.1%的氮后，带来的点蚀电位改善情况。阿普拉姆公司报告称，马氏体不锈钢EN 1.4060（0.35%碳、16%铬、0.15%氮）的点蚀电位值改善幅度更大（470mV）。今天，这种不锈钢的典型应用包括刀具、滚珠轴承等。
- 超级13铬和17铬专利不锈钢的开发，是为了面向石油生产行业，提高不锈钢的抗应力腐蚀致裂能力和抗硫化物应力致裂能力（04-7至04-8）。典型分析用例是13%铬5%镍2%钼不锈钢（瓦卢雷克公司）和17%铬5%镍2.5%钼2.5%铜不锈钢（新日铁住金株式会社）。这些用例具有高耐腐蚀能力（PREN=20）、高机械性能（屈服强度在760兆帕以上，抗张强度极限在860兆帕以上）以及良好的焊接能力，这些能力将扩展马氏体在未来的应用范围。

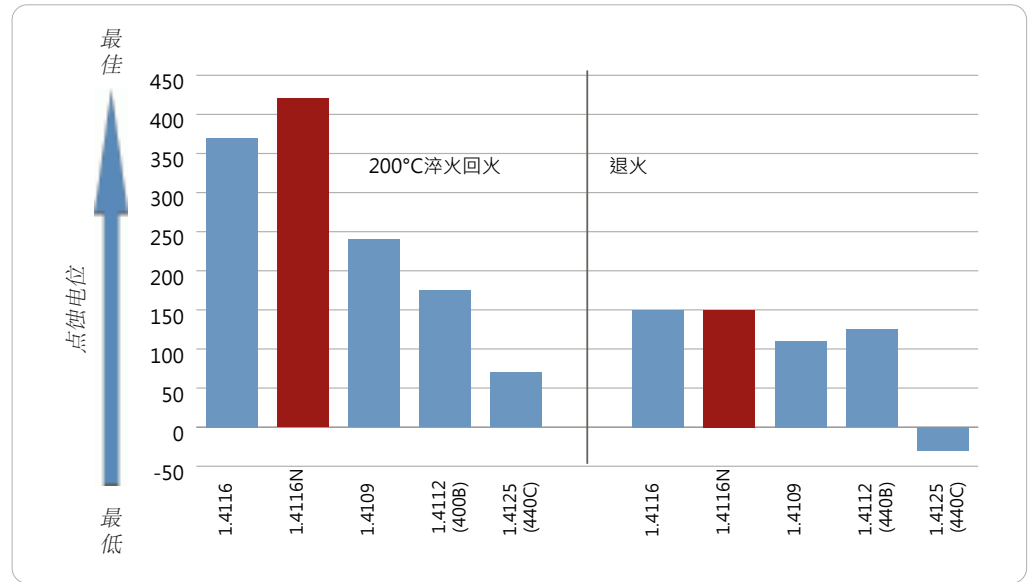


图2 NaCl 0.02M + pH6.6-23 °C条件下的抗点蚀能力

## 避免腐蚀

不锈钢的钝化层需要氧来保持稳定。在临界点，金属沉积物的堆积可以剥夺钢中的氧，从而导致裂隙腐蚀。通过适当的设计，可以极大降低裂隙腐蚀的发生率。

当pH值到达低临界值时（低pH值 = 高酸性），腐蚀发生。

点蚀是另一种经常发生的腐蚀形式，其特征是钝化层的局部破损。造成点蚀的原因通常是氯化物和/或硫化物（工业、沿海以及海洋环境下都能可存在）。为防止发生点蚀，需要选择一种具有足够耐腐蚀能力的不锈钢（参见图1）。当高应力水平与恶劣环境条件同时出现时，可能发生应力腐蚀致裂。我们建议您寻求专家意见。对于某些应用，部分局部腐蚀（点蚀）是可以接受的。

## 等级钢材的选择

马氏体不锈钢可用于中等腐蚀程度的大气环境。在选择适当的等级钢材时，应当仔细考虑所有使用条件参数。如果在某个应用环境下，轻微的、局部的表面锈蚀（点蚀）等无关紧要，则低成本不锈钢很可能是正确的选择。

## 经验之谈

如果环境恶劣，则选择铬含量和/或钼含量较高的等级钢材。避免选择表面粗糙的等级钢材——选择粗糙度值（Ra）较低的、表面光洁的等级钢材。避免选择有裂隙状几何外形的等级钢材。

### 腐蚀的风险因素

- 嵌入颗粒物
- 表面沉积物
- 表面缺陷
- 结构断层
- 盐度（盐区、海水等）
- 温度升高
- 高酸性条件（强酸）

### 腐蚀的预防因素

- 干净的表面
- 平滑的表面
- 预先钝化处理的表面
- 表面老化
- 洗涤效应（例如，下雨）
- 提高铬含量
- 氧化条件（氧气——不可过强）



## 生命周期成本核算：非常宝贵的指南

对潜在应用进行生命周期成本核算，其价值无可估量。成本核算经常会揭示出，虽然一般被认为不锈钢是高成本解决方案，但从长期来看，不锈钢却是一个低成本解决方案。不锈钢具有耐腐蚀性，这意味着不锈钢的使用寿命较长、需要的维护程度较低、转售的价值较大、外观更好看等。图3所示为石油行业的一个案例（04-9）。（04-9）。

虽然马氏体已经被部分行业广泛采用，但却仍然处在“被发现”的阶段。尽管如此，对于这种精细化钢材，业已证明的无数应用将会继续带来大量令人兴奋的新应用。

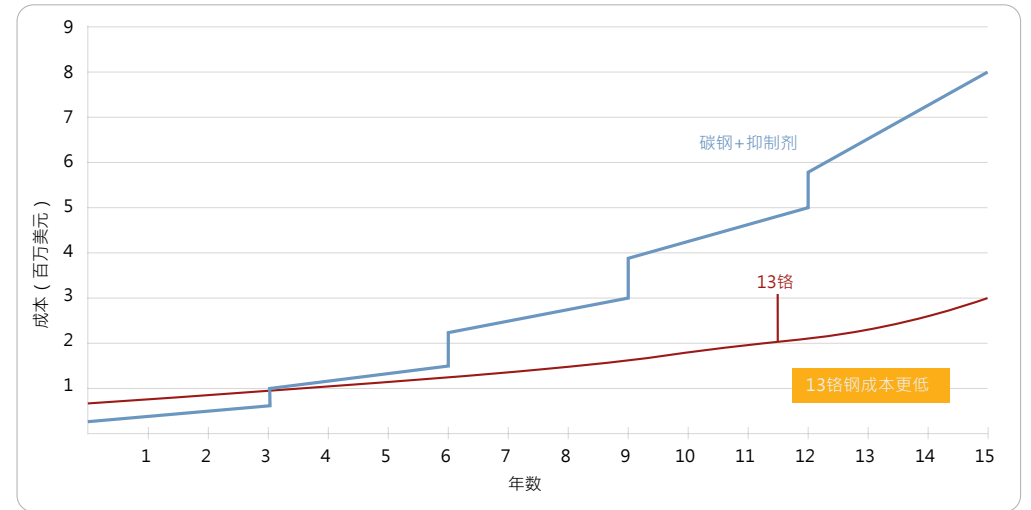


图3 在二氧化碳湿井条件下，碳钢+抑制剂（+大修）与13%铬钢的成本时间比较  
来源：瓦卢雷克公司

## 6 物理性能

金属合金的物理性能涉及它的导热性、导电性、胀缩性等。

部分常见马氏体不锈钢的性能参数列于表1。想要查看更完整的数值信息，参见附件7。

马氏体属于铁磁体。

马氏体还有其他优于奥氏体的能力。

例如，马氏体的热导率非常高。这意味着，马氏体能够高效地传播热量——这使得马氏体非常适合作为蒸汽发生器使用的热交换器（钢管或钢板）等应用。

马氏体不锈钢的热膨胀系数与碳钢相似，但远低于奥氏体不锈钢。因此，马氏体加热时的变形率很小。最后，钢材（包括马氏体不锈钢）的杨氏模数（用于计算弹性负载构件变形量的模数）要高于铝或钛的合金。当除了强度和耐腐蚀性，最大变形量也很关键时（“刚度关键性设计”），马氏体不锈钢可能是首选（例如，航空业应用）。

英国标准用词	EN	AISI	杨氏模数, 20° C, 吉帕	20° C至100° C之间的平均热膨胀系数 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> 。	热导率, 20° C W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	比热容量, 20° C J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	电阻率 10 <sup>-6</sup> Ω.m
X12Cr13	1.4006						
X12CrS13	1.4005	410	215	10.5	30	460	0.60
X15Cr13	1.4024						
X30Cr13	1.4028	420	215	10.5	30	460	0.65
X33CrS13	1.4029	420F	215	10.5	30	460	0.55
X46Cr13	1.4034		215	10.5	30	460	0.55
X50CrMoV15	1.4116		215	10.5	30	460	0.65
X39CrMo17-1	1.4122		215	10.4	15	430	0.80
X105CrMo17	1.4125	440C	215	10.4	15	430	0.80
X90CrMoV18	1.4112	440B	215	10.4	15	430	0.80
X17CrNi16-2	1.4057	431	215	10.0	25	460	0.70
X3CrNiMo13-4	1.4313		200	10.5	25	430	0.60
X4CrNiMo16-5-1	1.4418		195	10.3	30	430	0.80
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	630	200	10.9	30	500	0.71
X19CrMoNbVN11-1	1.4913		216	10.5	24	460	
X22CrMoV12-1	1.4923		216	10.5	24	460	
奥氏体	1.4301	304	200	16	15	500	0.72
碳钢			215	12	50	460	0.22

表1 部分常见马氏体不锈钢等级的物理性能。

## 7 需要高强度和高耐腐蚀性的应用

### 强度

就强度而言，最常见等级钢材的典型化学成分如表2所示。想要全面了解相关标准，请参见附件1和附件2。

不同于其他不锈钢家族，马氏体不锈钢的强度可以通过热处理工艺进行

调整（参见第9章），这一点与工程钢很相似。然后，设计者就可根据相关应用，选择最适合的强度。

相关标准为每个等级钢材都提供了几个等级的机械性能，从最低级（完全退火）到最高级（淬火回火）。在热处理条件下（淬火回火），部分常见等级钢材的最小屈服强度列于表3。想要查看完整列表，请参见附件9。

AISI	EN	碳	铬	镍	钼	其他
410	1.4006	0.12	12.5			
416	1.4005	0.12	13.00			S= 0.25
420	1.4021	0.2	13.00			
420	1.4028	0.3	13.00			
420F	1.4029	0.28	12.75			
420	1.4031	0.39	13.5			
	1.4034	0.46	13.5			
	1.4035	0.46	13.25			S= 0.25
430F	1.4104	0.14	16.5		0.4	S= 0.25
431	1.4057	0.17	16.00	2.00		
	1.4313		13.00	4.00	0.5	N ≥ 0.02
	1.4418		16.00	5.00	1.15	N ≥ 0.02
630	1.4542		16.00	4.00		5碳 ≤ 钨 ≤ 0.45 铜 = 4.00

表2 EN 10088-1标准提供的部分常见等级钢材的平均化学成分。附件3、4、5分别提供完整清单。

EN	AISI	最小屈服应力 (兆帕)
1.4006	410	450
1.4021	420	600
1.4028	420	650
1.4031	420	650
1.4034		650
1.4057	431	700
1.4313		800
1.4418		700
1.4542	630	1000

表3 EN 10088-3标准提供的常用马氏体不锈钢的最小屈服应力值。

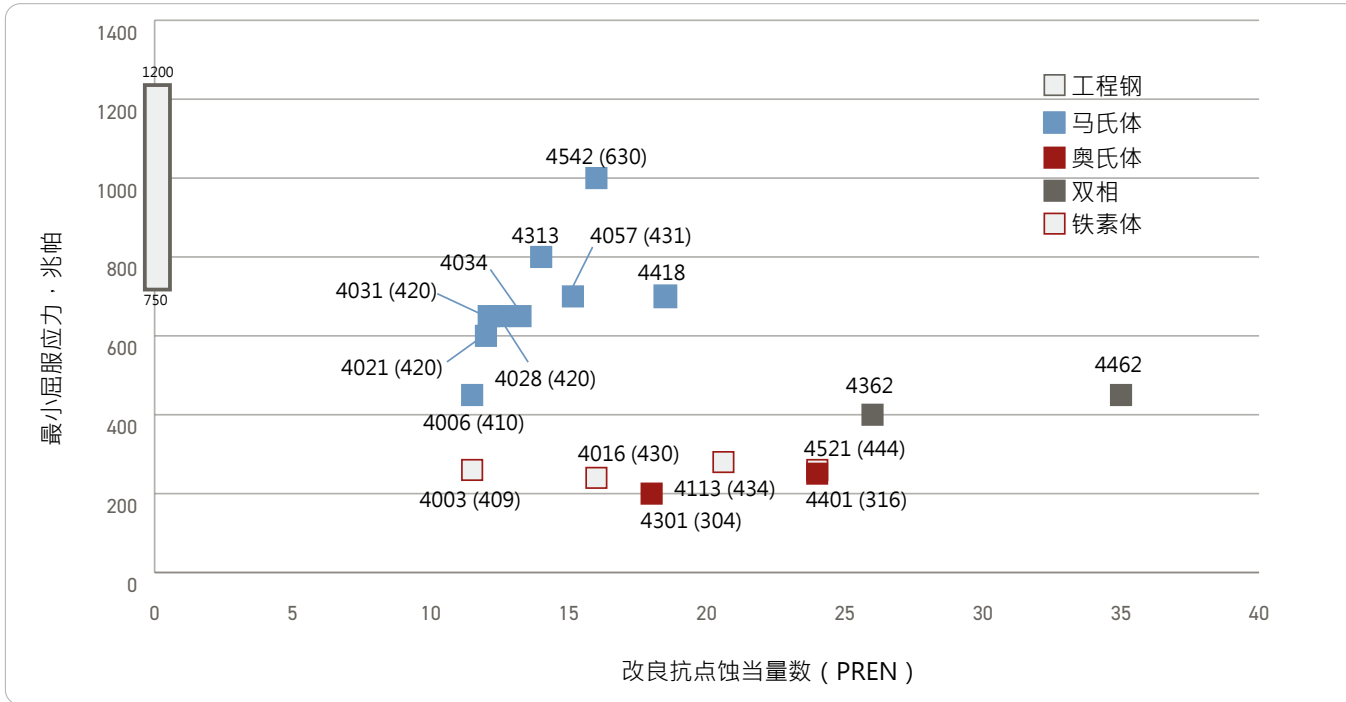


图 4 最小屈服强度与抗点蚀能力的比较  
 说明：不锈钢的机械性能参数（马氏体处于热处理状态）来自EN 10088-3: 2014标准。工程钢的机械性能参数来自EN 10083-3: 2007标准

图4所示为部分常见马氏体不锈钢的最小屈服强度与耐腐蚀性，以及与工程钢（无耐腐蚀能力）、铁素体、奥氏体、双相不锈钢的比较。

在某些情况下，马氏体不锈钢的强度水平与工程钢相当，其耐腐蚀性接近著名的奥氏体不锈钢 EN 1.4301 (AISI 304) (06-1)。

在耐腐蚀能力方面，EN 1.4542 (17/4 PH) 和 EN 1.4418尤其具有吸引力。

## 抗冲击能力

当前标准规定的最低抗冲击值，远低于今天大部分生产企业的保证值。这是因为在很大程度上，抗冲击能力以及从韧性断裂到脆性断裂之间的转变温度 (DBTT\*) 取决于加工方式和技术诀窍。(06-2)

如图5所示，DBTT值随着残余磷和晶体粒径的变化而变化\*。实践中，部分马氏体可以在  $-60^{\circ}\text{C}$  低温条件下使用，但这要与供应商进行核实。

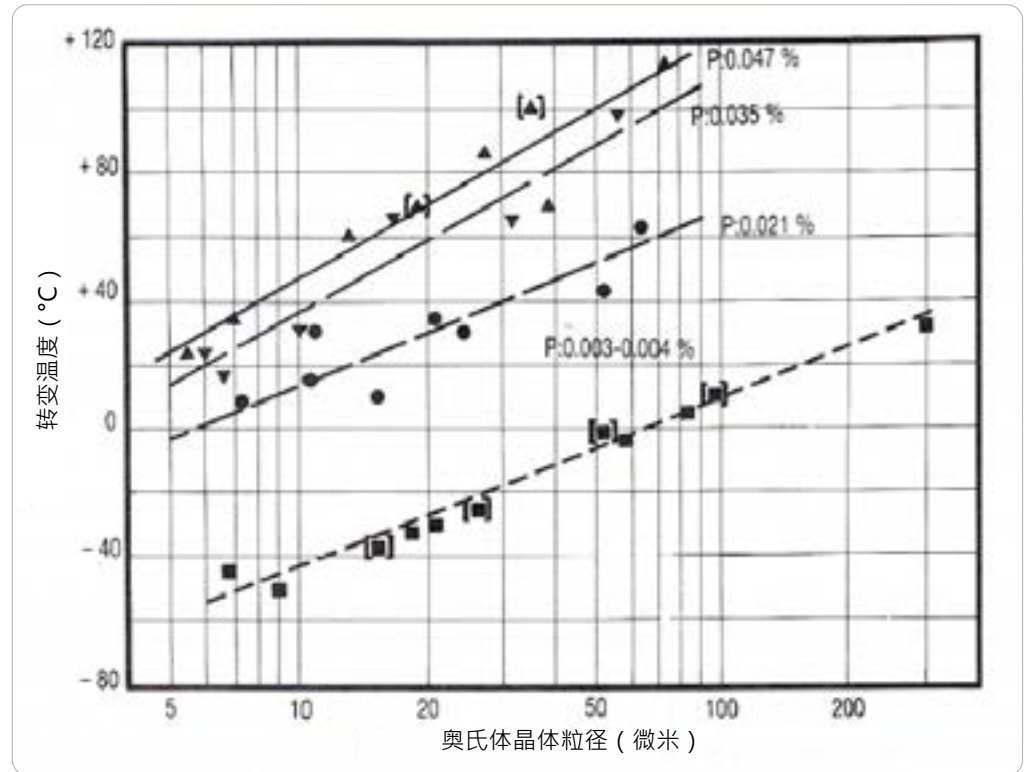
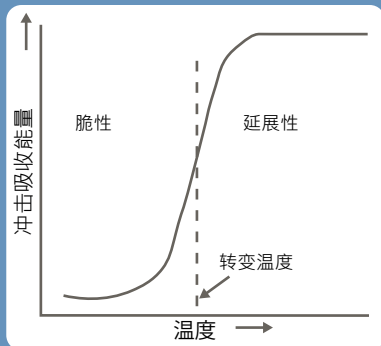


图5 0.2%碳13%铬马氏体不锈钢的韧性断裂与脆性断裂性能随残余磷和晶体粒径的变化情况。

\*这里指在热处理中的“奥氏体化”环节，钢材的微观结构（粒径）（参见第9章）

## 转变温度

除了奥氏体，所有钢材都会随着温度的降低而脆化。发生这一变化时的温度被称为“从韧性到脆性转变温度” (DBTT)。





## 部分应用示例

### 汽车行业

马氏体不锈钢应用广泛，其中存在一些共通之处：

- 高机械性能
- 对汽油或外部环境具有一定耐腐蚀能力
- 关键部件

其中包括：

- 电机轴（1.4021、1.4034、1.4029等）
- 喷油泵组件
- 常见铁路部件（1.4057、1.4418）
- 传感器（1.4542等）
- 进气阀（1.4718）
- 高温螺栓（1.4923）

供应商一方面要满足行业需求，一方面还要保持成本的竞争力。



进气阀：  
EN 1.4718等级钢材



喷油泵外壳：  
EN 1.4418等级钢材

供图：德国不锈钢厂



电机轴



传感器

### 石油天然气行业

#### 石油钻探：泥浆马达

#### 石油钻探：泥浆马达

泥浆马达的动力部分将高压钻液的液压动力，转变成为钻头使用的机械动力。动力部分有两个组件：一个螺旋状转子和一个定子。这意味着提供旋转动力的是螺杆式正排量泥浆马达。通过增加线性泥浆马达的级数，可以增加对“高性能动力段”的动力输出。

转子使用耐腐蚀不锈钢EN 1.4542（AISI 630 17-4PH）制成。定子是一段冷拉热处理钢管，内侧粘结模制弹性体化合物。

泥浆马达允许进行定向钻进，可以是纵向，也可是横向，从而能够提高石油开采率。

#### 石油生产

根据耐腐蚀性等级需求的不同，油管（即：将石油运出油井的管道）的制作材料有碳钢、马氏体不锈钢、双相不锈钢，甚至镍基合金。相关国际标准规定了选材原则（参见附件8）。

马氏体不锈钢适合甜性（二氧化碳）环境；而在这种环境下，标准碳钢和低合金钢将会产生局部腐蚀（也被称为“台面腐蚀”或“金钱癣”）。

几年前，13%铬马氏体（EN 1.4006 - AISI 410）几乎是唯一可用的马氏体不

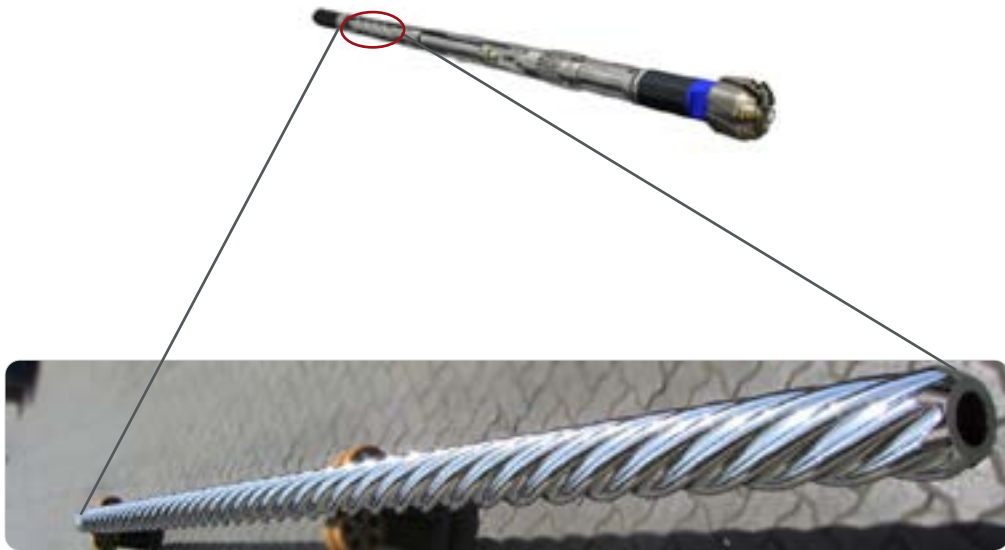
锈钢；现在，新的（专利）马氏体等级钢材（通常被称为S13铬和S17铬超级马氏体）使用越来越普遍，新等级钢材在温度范围、硫化氢含量以及氯化物浓度方面扩大了应用范围，从而弥合了13铬不锈钢与双相不锈钢之间的性能差距。

#### 成本

马氏体不锈钢管的成本只有双相不锈钢的二分之一，更是只有高镍合金的四分之一到十分之一。

另外，使用13铬钢管的成本可能更低，比使用带抑制剂的碳钢/低合金钢更符合成本效益。

对于海上作业中的管道应用，13铬钢管尤其具有吸引力；在这些应用中，作业空间有限，并且返工成本很高。



泥浆马达转子部分



石油生产中使用的马氏体不锈钢

## 建筑设计、建设及施工

### 钢筋

在日本根津神社桥的重建项目中，选用的是410不锈钢筋。作为混凝土构造的加固材料，这种钢筋具有耐久性。

之所以选择410不锈钢，而没有选择奥氏体不锈钢，是因为410不锈钢具有较低的热膨胀性能和较低的成本。



使用410不锈钢筋建造的根津神社桥

供图：JSSA

### 自攻螺丝



S自攻螺丝的设计主要为钻透簿板材，螺钉头和螺杆的类型有很多。自攻螺丝的一个主要特征是自攻钉头，这是自攻螺钉用来钻孔的部分。特殊形状的屑槽会清除钻孔周围的铁屑，让螺丝可以攻入。

410不锈钢是最受欢迎的材料之一。这种钢材经过热处理之后，会形成恰当的成型性能和良好的尖头硬度。

### 航空行业

高强度马氏体不锈钢，尤其是EN 1.4542（AISI 630）系列不锈钢，是航空行业的常用材料，应用非常广泛，液压系统、起落架、传动轴、作动器、紧固器等都有使用。



反应器环，经过压延和焊接后，再按照紧公差进行切削加工，用于空客A320-330、波音737、747、777、787

供图：意大利不锈钢协会





一架客机的引擎。  
供图：意大利不锈钢协会



起落架组件：等级钢材：  
EN:1.4548 (AISI 630) 重熔钢；以及  
EN:1.4545 (AMS 5659、ASTM 564)。  
供图：Iconos。

## 机械工程

现在，游船、作业船、交通艇、拖网渔船、引航船、巡逻船都有使用船轴（将引擎扭力传送给螺旋桨）和舵轴。

船轴和舵轴都要求相关材料具备适应其应用环境的高强度和高耐腐蚀性。EN 1.4542 (AISI 630) 和EN 1.4418是经常和双相不锈钢以及高氮奥氏体不锈钢共同使用的的不锈钢等级。



马氏体不锈钢被用于泵身、叶轮和泵轴、阀体、阀杆等，另外还有管件、食品行业挤压机、螺栓、光刻设备、传送带系统等。



离心泵



潜水泵  
电机轴/泵轴、叶轮、套筒由AISI 420 (EN 1.4028) 不锈钢制成。



阀杆



离心泵轴



阀杆

EN 1.4542 (AISI 630) 级不锈钢具有高屈服强度、高杨氏模数以及高耐腐蚀性，是测力传感器等特定应用的理想材料。



测力传感器  
供图: AS科技公司



目前正在推广马氏体不锈钢的自行车车架应用。由于马氏体的强度/比重比率，其制成的车架组件的重量几乎可以媲美钛合金TA6V与铝合金7075 - T6。

另外，马氏体还被用于一些高强度应用，例如，要求高强度和高耐腐蚀性的航海五金件和登山设备。



马氏体不锈钢制成的钢管组合式车架，[KVA不锈钢公司](#)生产的EN 1.4006 (AISI 410) 或1.4542 (AISI 630) 等级不锈钢。这些等级不锈钢还因为其高强度和高耐腐蚀性，被用于航海设备。



航海五金件。  
带固定钩眼的热轧锻造弹簧钩。AISI 630 (EN 1.4542) 等级钢材  
供图：法国[维扎德公司](#)



登山和冰上攀爬用冰镐，镐尖使用锻造不锈钢制成。镐尖被设计成切割工具一样锋利。这能确保优秀的岩石抓握能力和有效的穿冰能力。  
供图：[Petzl SARL](#)。

## 8 需要高耐磨性和高耐腐蚀性的应用

### 马氏体不锈钢接近工具钢

要获得高耐磨性，就要提供高硬度；不仅如此，许多应用还要求高耐腐蚀性，例如，刀具、食品加工行业切削工具、需要注入摩擦性/腐蚀性聚合物的工具、湿磨工具等。

经过200-300°C温度下调质后（参见第9章），马氏体不锈钢的硬度水平可以达到60HRc。如图6所示，这个硬度接近工具钢。根据ISO EN 4597标准，12%铬以上工具钢的平均成分分析结果如表4所示。

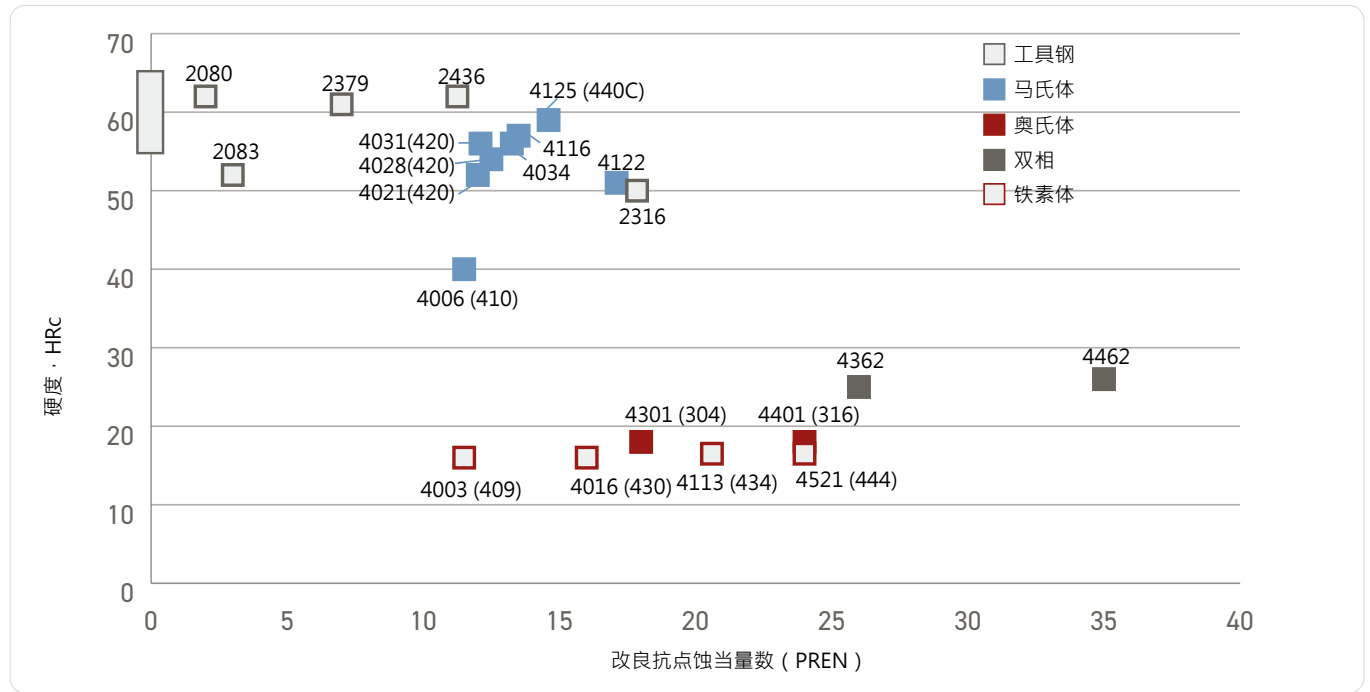


图6 硬度与耐腐蚀性  
说明：虽然PREN的超范围使用会带来不准确性，但是公平地讲，高碳高铬工具钢的价值在于其处于不锈钢与非不锈钢的中间位置。

名称	EN	AISI	碳	铬	钼	V	W
X155CrMoV12-1	1.2379	D2	1.5	12	0.85	0.85	
X210Cr12	1.2080	D3	2.05	12			
X210CrW12	1.2436	D6	2.15	12			0.7
X42Cr3	1.2083	420	0.39	13.5			
X36CrMo17	1.2316	-	0.39	16.5	1.05		

表4 EN-ISO 4597:2000标准提供的不锈工具钢典型分析结果。

## 应用内容

### 刀具和切割工具

这是马氏体不锈钢最为人熟知的用途之一。

餐刀的生产工艺并不统一。有的首先从钢板上割出刀身，然后成型，最后通常使用铆钉固定刀把。这种刀具并不昂贵。要制作更高质量的刀具，首先要进行锻造，然后再热处理和抛光，刀身和刀把使用的是同一块钢材。1.4028 (AISI 420) 级不锈钢被经常用到。顶级质量的餐刀由两部分组成，一是经过锻造、热处理以及抛光的刀身，一是由不同材料（例如，银）制成的刀把。制作刀身的马氏体不锈钢往往是EN 1.4122或1.4116。这两个等级的不锈钢提供了高硬度和高耐腐蚀性。

对于家庭使用而言，非常锋利的餐刀可能带来危险。刀刃部分设置的微锯齿，在保证使用者的安全与提供良好的切割性能之间实现了最佳妥协。

要获得镜面光洁度，钢材就不能有任何硬性夹杂物，否则会形成所谓“彗尾”的抛光缺陷。另外，其他非金属夹杂物（例如，硫化锰）也必须尽量减少，因为这些非金属夹杂物可能造成点蚀。刀具钢经过加工后，要保证高洁净度，即：不存在非金属夹杂物。

切割工具在外科手术刀、家用搅拌机、工作用刀、食品加工、娱乐活动等都有使用。



正广公司出品的大马士革刀，使用特种钢刀芯和SUS410不锈钢包层。供图：JSSA。



专业切割刀，使用0.5%碳和13%铬马氏体不锈钢制成，经过锻造和热处理后，硬度达到55HRC。供图：Sabatier-K。

### 专业刀具

作为专业刀具，首先需要的是良好的、高效率的切割性能，其次需要降低重复性应变损伤的风险。当刀具的切割性能较低时，会发生重复性应变损伤风险。此时，持刀者要施加更大的切割力量，最终造成肌肉和关节的损伤。这种损伤有些类似于网球运动员的“网球肘”。

切割测试表明，刀具切割性能涉及以下几个因素：

- 硬度（硬度越高，切割性能越好）
- 微观结构（细粒尺寸，以及少量的、布局良好的碳化物）
- 正确磨刀

最适合该应用的材料之一是EN 1.4116级不锈钢



使用大马士革刀身和雪松木柄的小折刀。  
供图: [Laguiole](#)



两件套高品质餐刀



马氏体不锈钢制成的剃须刀



搅拌机刀片

## 耐磨用途

许多用途都要涉及相关材料对侵蚀/腐蚀的耐受性，即，可能含有固体颗粒物的液体所造成的腐蚀。

我们不仅需要硬度，还需要一定的耐腐蚀性，因此马氏体不锈钢是一种首选材料。



440C不锈钢制成的高压喷水枪喷嘴

水电站使用的佩尔顿铸造水轮机和弗朗西斯水轮机经常使用马氏体不锈钢 EN 1.4313 (ASTM CA6NM) 制造。这个等级的不锈钢可以方便地铸造成复杂形状，不会产生缺陷并且易于焊接；热处理后，可以达到良好的强度等级（参见第9章）；对空蚀（一种特殊形式的腐蚀/侵蚀）有良好的耐受性。

另外，蜗壳、轮机轴、导流叶片、固定叶片等其他轮机组件，也经常使用相同等级的不锈钢制造。

最为人熟知的案例是中国的三峡大坝——迄今为止，世界上最大规模的水电站。这座水电站共安装了32个700兆瓦轮机组，是容量最大、规模最大的弗朗西斯发电机组。弗朗西斯涡轮转子直径10.05米、高5.99米，总重量445吨。涡轮叶片有15个，每个叶片重17.6吨，分别焊接在涡轮环上。使用的 stainless 是 ASTM CA6NM (EN 1.4313) 级不锈钢。





中国三峡大坝

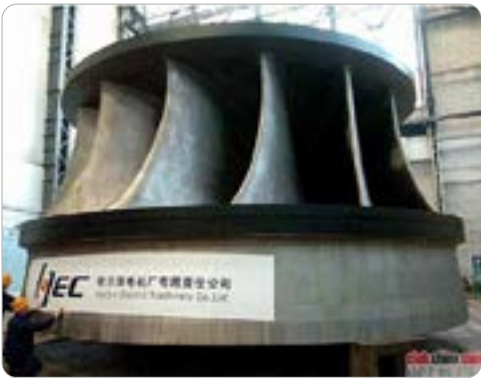
佩尔顿涡轮转子在小型水电站使用广泛。

滚珠轴承、滚柱轴承或直线轴承

轴承通常使用100Cr6合金钢制成。不过，对于要求高耐腐蚀性的特殊应用，首选材料则是EN1.4125 (AISI 440C)、EN 1.4034 (AISI 420C) 以及EN1.4116。

近年来，还出现了面向极端用途的专利高氮不锈钢等级。(07-1, 07-2)

- 美国航天飞机液氢和氧燃料泵使用的是X30CrMoN 15-1EN 1.4108 - AMS 5898
- 欧洲航空发射台液氢涡轮泵的轴承使用的是X40CrMoVN16-2 EN 1.4123 AMS 5925。



三峡电站的涡轮转子



佩尔顿涡轮转子。



滚柱轴承

### 摩托车和山地自行车用制动盘



不锈钢（420级）不会生锈（或者至少不会严重生锈），并且非常结实，能够耐受几乎所有制动衬片，尤其是热压制动衬片。不锈钢高度耐磨损，不会破碎，耐热性能也非常好。早在大约20年前，不锈钢制动盘和热压制动衬片的摩擦系数就超过了铸铁。

### 注塑模具

聚合物注塑模具必须能够生产数以万计、甚至百万计部件。耐磨性能是关键。当聚合物具有一定腐蚀性或者含有固体颗粒物时，模具材料必须具有一定耐腐蚀性，因此要使用马氏体不锈钢，例如，EN 1.4057（AISI 431）或1.4122。

由于模具形状复杂，需要高成本的切削加工，因此往往在接近成型之前进行热处理。

当塑制部件的表面要求不太严格时，首选使用具有高切削加工能力的不锈钢等级（参见第9章），以进一步降低切削加工成本。



### 玻璃瓶模具

玻璃模具最常使用的是EN1.4057（AISI 431）级不锈钢，这个等级的不锈钢提供了优秀的耐热循环能力，并且能够保持产品表面光洁——这是高质量环境部件的核心要求。对于熔点较低的玻璃制品，则往往优先使用EN 1.4542（AISI 630）级不锈钢。相反地，如果是特殊的高熔点玻璃，可能要用到昂贵的镍基合金。







### 法式滚球

法式滚球是一种放松身心的运动，主要在暑假期间室外进行，使用的是镀铬球或不锈钢球。

顶级质量滚球首选马氏体不锈钢EN 4006 (AISI 410)，这种不锈钢不仅使用寿命长，而且不需要任何预防腐蚀的措施。经过调整硬度后，可以按照要求，提供一种“柔软触感”或“中等硬度触感”。

## 9 防腐蚀和防蠕变应用

特种马氏体钢具有优秀的高温性能和抗蠕变性能，最高应用温度可达 650° C，在蒸汽发生器和蒸汽涡轮机上有广泛使用 (08-1)。特种奥氏体钢和镍基不锈钢虽然性能更好，但成本也更高。典型分析结果如图5所示。详细分析结果详见附件4。

名称	编号	碳	铬	钼	镍	钴	N	铌	钒	W	硼
X10CrMoVNb9-1	1.4903	0.10	8.75	0.95			0.03	0.08	0.22		
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	0.11	9.00	1.00	0.25		0.07	0.08	0.22	1.00	0.0026
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0.08	10.50	0.75	0.70	6.00		0.35	0.25		0.01
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0.20	10.75	0.65	0.40		0.08	0.35	0.20		
X20CrMoV11-1	1.4922	0.20	11.75	1.00	0.55				0.30		
X22CrMoV12-1	1.4923	0.21	11.75	1.00	0.55				0.30		
X20CrMoWV12-1	1.4935	0.20	11.75	1.00	0.55				0.28	0.50	
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0.12	11.75	1.75	2.50		0.03		0.33		

表5 EN 10302标准提供的抗蠕变马氏体不锈钢平均化学成分分析结果

如表所示，特殊合金元素的添加，增强了不锈钢的高温性能 (08-2至08-5)：

- 虽然钼能够提高耐腐蚀能力，但钼是一种铁素体稳定剂，少量镍（奥氏体稳定剂）可将其抵消。
- 在体心立方晶体矩阵结构中，钴和钨主要作为固溶体强化剂。
- 铌（钶）和钒是强力碳氮化物成形剂。这两种物质会形成极小的析出物，这种析出物能够阻止元素错位运动，保持晶粒边界，以及提供强度和抗蠕变能力。
- 在高温条件下，硼溶液（即：非氮化硼形态）会降低M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>碳化物在前奥



氏体晶粒边界附近的生长速度。这样，又会相应地降低蠕变速度\*，增加蠕变寿命。为使硼有效发挥作用，必须尽量降低氮化物含量，以避免形成氮化硼，因为只有硼溶液才能有效发挥作用。

不锈钢应用包括涡轮机叶片及其他部件、热交换管道、阀体部件、螺栓、管件以及内燃机的各种高温部件。

\* 在不断升高的温度和持续的应力或负载条件下，许多材料都会不断发生低速率变形。这种行为被称为蠕变，因为蠕变会降低组件的使用寿命，因此在工程领域非常受到重视。



管式热交换器



## 10 制造

### 热处理

为获得最佳性能，马氏体不锈钢必须进行热处理（09-1，09-2）

马氏体不锈钢分为两种状态：退火状态和调质状态。在后一种状态下，马氏体不锈钢不再需要其他热处理工序。这是最简化的使用方式，也完美地适合许多应用。

不过，马氏体的加工，尤其是切削加工，却难度更大并且成本也更高。因此，明智的做法是加工处于退火状态下的马氏体，然后再对成品或接近成品的部件进行热处理。

我们推荐的热处理条件位于附件10。

#### 奥氏体化

- 奥氏体化必须在一定温度条件下进行：
  - 温度必须足够高，以便在奥氏体内形成足够的碳化物溶液
  - 但是，温度还必须比较低，以避免晶粒生长
- 通常情况下，一次在高温下停留30分钟就已足够
- EN 10088-3标准提供了奥氏体化的推荐温度范围（68页）
- ASM标准的推荐范围也基本相同

#### 淬火工艺和马氏体形成

- 虽然在冷却过程中，不会发生奥氏体向马氏体的转变，但为防止冷却过程中，在奥氏体晶粒边界发生异常的碳化物析出，因此需要使用油冷却或空气冷却工艺。否则，碳化物网络会在晶粒边界生成一个铬枯竭区，构成易腐蚀通道。另外，碳化物网络还会降低冲击性能。如果水淬火的冷却速率过快，则会导致材料内部应力的增加，进而导致热处理部件的变形，有时还会开裂。

- 在冷却过程中，发生马氏体转变的初始温度 $M_s$ 取决于钢材成分。最新公式如下：

$$M_s (^{\circ}C) = 491.2 - 302.6\%C - 30.6\%Mn - 16.6\%Ni - 8.9\%Cr + 2.4\%Mo - 11.3\%Cu + 8.58\%Co + 7.4\%W - 14.5\%Si$$

其中：%表示为重量%（09-3）

至于马氏体转变的结束温度 $M_f$ ，还没有同等的公式。通常情况下， $M_f$ 温度低于 $M_s$ 温度 $150^{\circ}C$ 至 $200^{\circ}C$ 。

马氏体不锈钢的主要合金元素（即：碳、铬、镍）会压低 $M_s$ 温度。对于大部分合金马氏体， $M_s$ 温度可能相当低，因此马氏体转变不能在室温下完成。此时，需要进一步冷却至约 $-100^{\circ}C$ 。供应商会提供有关最佳热处理工艺的建议。

### 回火

- 马氏体硬度高且易脆；内部应力大，可能导致材料发生开裂，高碳马氏体尤其如此。因此，需要进行淬火后热处理。如图8所示，硬度会随时温度和时间降低。
- 在约 $200-300^{\circ}C$ 下进行应力消除，这并不会显著降低硬度。这种马氏
- 回火工艺的温度在 $500^{\circ}C$ 以上（图8）。回火工艺虽然会降低硬度，但却会恢复伸长率和韧度
- 于马氏体转变时的温度。其目的是为获得尽量柔软的材料，通常是为了便于切削。对于某些等级的不锈钢，需要进行两次退火处理。

体被用于制作刀具、切割工具，有时还用于制作模具

关于热处理后的最低机械性能，相关标准（ISO、EN、ASTM/AISI）都有规定。

## 析出硬化

相比于高温淬火后需要进行回火热处理的马氏体不锈钢，析出硬化马氏体不锈钢（例如，AISI 630 (17-4PH)）只需要在溶液处理状态下，进行简单的低温硬化热处理。这个硬化处理过程的温度足够低，不会导致明显的变形；只会发生表面变色，对于这种变色，可以通过机械手段、电解抛光或短时酸洗轻

松去除。这种不锈钢在最终热处理期间，会发生少量、但可知的尺寸变化。

通过将硬化处理温度控制在480 - 620 °C并且保持1至4小时，可以获得各种性能（参见表6）。注意：处理温度的名称（例如，H900）指的是保温温度，单位是华氏度（°F）。另外，还要注意：相对于溶液回火状态，硬化处理的温度越高（例如，H1150），材料的硬度却会越低，这一点有违我们的直觉。

这些不锈钢等级所对应的欧洲热处理标准位于附件9和附件10b。

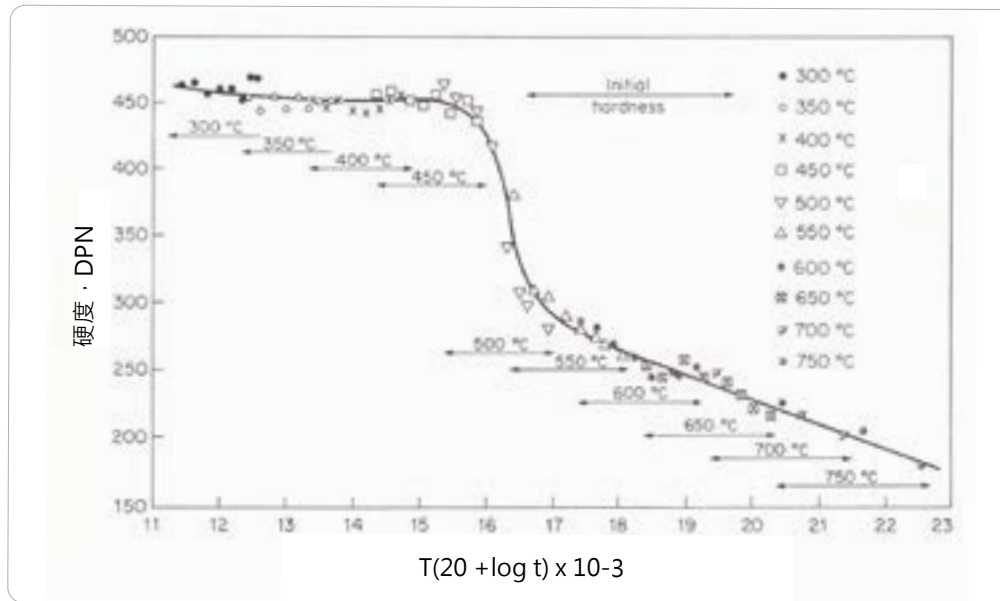


图7 回火工艺对0.14%碳12%铬不锈钢硬度的影响。

(T: 温度, 单位: 开氏度; t: 时间, 单位: 小时) (09 - 2)

状态	硬化		抗拉强度 (兆帕) <sup>2</sup>	屈服强度, 0.2% 弹性 (兆帕) <sup>2</sup>	伸长率 (% , 50毫米) <sup>2</sup>	硬度		夏比冲击-V <sup>2</sup>
	温度 (°C)	时间 (小时)				洛氏 <sup>2</sup>	布氏 <sup>2</sup>	
H900	480	1	1310	1170	10	40		-
H925	495	4	1170	1070	10	38	375	6.9
H1025	550	4	1070	1000	12	35	331	20
H1075	580	4	1000	860	13	32	311	27
H1100	595	4	965	795	14	31	302	34H1150
H1150	620	4	930	725	16	28	277	41

相关数值取自ASTM A564M标准；以上数值可能仅适用于部分尺寸范围

1 - 空气冷却

2 - 最低值

表6 美国热处理标准

## 切削加工

在很大程度上，切削加工性能取决于硬度。材料越硬，切削加工的难度越大。对于非常复杂的切削加工（例如，使用注塑模具进行的加工），我们往往会选择在退火状态下进行加工，然后再进行热处理。相反地，当只需要极少量切削加工时，则优先选择热处理后的棒材进行加工，用来生产轴杆、阀杆等。

碳含量的增加，会带来硬度的增加。当硬度高于30HRc时，切削加工变得相当困难。重要的切削加工都是在退火状态下进行。

另一种改善切削加工性能的方法是控制非金属夹杂物。

- 高速切削（例如，添加硫化物）等级钢材（即：EN1.4005 AISI 416、EN 1.4029 AISI 420F）含有硫化锰，硫化锰可以有效地润滑切屑与切削工具之间的界面，从而降低切削力量和工具磨损。这些等级钢材虽然存在时间较久，但它们的局限性也众所周知：



硫化锰夹杂物会降低材料的

抗点蚀能力，这一点可能无法令人接受。在热轧期间和热轧过后以及热处理期间，这些夹杂物可能会造成开裂。对于碳含量高于0.25%的材料，这是尤其严重的问题

- 今天，受控的氧化物夹杂物得到广泛接受。在炼钢工艺中，钙处理技术会产生相对低熔点的氧化物（例如，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO三元图解中的钙黄长石相），这种氧化物可以作为切屑与切削工具之间界面的润滑剂（有些像熔融状态下的玻璃）。氧化物的润滑温度要高于硫化物。



## 焊接

虽然其他焊接工艺也有使用，但最常用的焊接工艺是电弧焊（09-4和09-5）

一般情况下，如果要使焊缝的机械性能接近基底金属，则焊料中的铬和碳含量应当与基底金属相当。如果没有这一要求，则可使用ER 308、ER 309以及ER 310奥氏体焊料。

在加热过程中，马氏体不锈钢将转变成奥氏体；在冷却过程中，又会因为马氏体的形成而硬化。马氏体的硬度直接与碳含量相关。材料硬度越高，在冷却过程中，堆焊或热影响区发生焊缝开裂的趋势越强。

为避免这种情况，当碳含量超过0.1%时，我们建议采用预热工艺，并且将焊层间的温度保持在200-300 °C。无论在任何情况下，我们都建议对焊缝进行焊后热处理。如果碳含量超过0.4%，则我们不推荐使用焊接工艺。

另外，我们还推荐使用低氮保护气体，因为氮是一种强奥氏体稳定剂，在熔化带固化期间，氮将减少甚至消除所有的德尔塔铁素体构造。如果只有少量德尔塔铁素体，则会有利于降低热开裂，同时又不会给焊缝的机械性能造成大的损害。无论在任何情况下，为避免产生氢诱发延迟开裂，都要强制使用低氢焊料和保护气体。

EN 1.4313、1.4418以及1.4542（AISI 630）等级钢材的含碳量都比较低，相比于工程钢和标准马氏体不锈钢，它们更容易焊接，因此受到制造商的欢迎。

我们不可能针对每一种情况都提出详细建议，这是因为我们的建议还要取决于以下因素：

- 部件厚度、限制程度
- 不同金属之间的焊缝
- 所需焊缝的性能
- 是否需要对于部件进行焊前/焊后热处理以及后期全部热处理
- 焊料选择：i) 无；ii) 同质焊料；iii) 奥氏体

明智的做法是寻求炼钢企业或焊接耗材供应商提供的专家意见，这些意见将帮助材料制造商取得最佳结果。

AISI等级钢材	EN	涂层电极	TIG / MIG
410	1.4006	E 410	ER 410, ER 410NiMo
420	1.4028	E 410	E 410, E 420
431	1.4057	E 410	E 410
440 A/B/C	1.4125	不推荐	不推荐
630 (17-4PH) and 15-5PH	1.4542	E630 或者 AMS 5827B	AMS 5826

表7 推荐焊料

## 11 参考资料

03 - 1 D. Peckner and I.M. Berstein : Handbook of stainless steels, McGraw Hill Publisher, 1977, Chapter 6. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Martensitics/Handbook\\_of\\_stainless\\_steels\\_chapter6.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Martensitics/Handbook_of_stainless_steels_chapter6.pdf)

03 - 2 P. Lacombe, B. Baroux G. Beranger: Les Aciers inoxydables, Editions de Physique, 1990, Chapitre 13. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Martensitics/Blet\\_à\\_n\\_Les\\_aciers\\_inoxydables\\_martensitiques.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Martensitics/Blet_à_n_Les_aciers_inoxydables_martensitiques.pdf)

04 - 1 National Physical Laboratory guides to good practice in corrosion control: “Stress corrosion cracking” (2000) <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/stress.pdf> general on SCC

04 - 2 B.D. Craig and L. Smith “Corrosion Resistant Alloys in the oil and gas industry – selection guidelines update” Nickel Institute Technical series N° 10 073 3rd edition, September 2011  
<https://www.nickelinstitute.org/~media/Files/TechnicalLiterature/>

04 - 3 A Turnbull and A Griffiths “Corrosion and cracking of weldable 13% martensitic stainless steels – A review” National Physical Laboratory Teddington, UK, (2002) NPL Report MATC(A)108 [http://publications.npl.co.uk/npl\\_web/pdf/matc108.pdf](http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc108.pdf)

04 - 4 M. Barzinski, J.H. Magee, B. Friedrich: Improving the chemical homogeneity of austenitic and martensitic stainless steels during nitrogen alloying in the pressure electro slag remelting (PESR) process [http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/old/images/pages/publikationen/aer\\_à\\_sinskima\\_e\\_id\\_4297.pdf](http://www.metallurgie.rwth-aachen.de/old/images/pages/publikationen/aer_à_sinskima_e_id_4297.pdf)

04 - 5 S. Hamano, T. Shimizu, T. Noda, “Properties of Low Carbon High Nitrogen Martensitic Stainless Steels” , Materials Science Forum, Vols. 539-543, pp. 4975-4980, 2007 (on PESR)

04 - 6 Roman Ritzenhoff and André Hahn (2012). “Corrosion Resistance of High Nitrogen Steels” , Corrosion Resistance, Dr Shih (Ed.), ISBN: 978-953-51-0467-4 InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/corrosion-resistance/corrosion-resistance-of-high-nitrogen-steels>

04 - 7 Surinder Singh, Tarun Nanda: “Effect of alloying and Heat Treatment on the Properties of Super Martensitic Stainless Steels” International Journal of Vol 1, October 2013, Engineering technology and Scientific Research, p 6.

04 - 8 C.A.D Rodrigues, P.L.D Lorenzo, A. Solokwski, A. Barbosa and J.M.D.A Rollo: “Development of a supermartensitic stainless steel microalloyed with Niobium” J. of ASTM International, Vol 3, N° 5, (2006)

04 - 9 D. A. Baudouin, D.K. Barbin and J. Skogsberg: “Experience with 13Cr for mitigating CO<sub>2</sub> corrosion in the oilfield. Case histories: The gulf of Mexico and inland gas wells” . Corrosion 95, Paper n° 639 (1995).

06 - 1 M.A.Müller “Martensitic Stainless Steels - A hidden champion?” International Stainless & Special Steel Summit 2015 Vienna <http://www.metalbulletin.com/events/download.ashx/document/speaker/7608/a0ID000000X0kB0MAJ/Presentation>

06 - 2 B. Baroux, Ph. Maitrepierre and B. Thomas “Mechanism of intergranular brittleness in martensitic stainless steels containing 13% Chromium. Goteborg, 1984.

07 - 1 D.Girodin L. Manes J-Y. Moraux J-M de Monicault: “Characterisation of the XD15N High Nitrogen Martensitic Stainless Steel for Aerospace Bearing” 4th International conference on Launcher Technology 3-6 december 2002 Liège, Belgium <http://sullivansteelservice.com/xd15nw/wp-content/uploads/2015/02/Characterisation-of-xd15nw.pdf>

07 - 2 F. Zimmermann “Nitrogen-alloyed martensitic steel” <http://www.esa-tec.eu/workspace/assets/files/tdo0013-52b97e975f90a.pdf> N stainless replaces 440C

08 - 1 B. Hahn W. Bendick: “Pipe steels for modern high-output power plants” Vallourec & Voestalpine-Bohler Welding publication [http://www.vallourec.com/fossilpower/Lists/Brochures/Attachments/7/V\\_B01B0005B-15GB.pdf](http://www.vallourec.com/fossilpower/Lists/Brochures/Attachments/7/V_B01B0005B-15GB.pdf)

08 - 2 Hwa-Teng Lee, Feng-Ming Liu and Wun-Hsin Hou: “Application and characteristics of low-carbon martensitic stainless steels on turbine blades” Materials Transactions, 56, N° 4, (2015) 563-569 <https://www.jim.or.jp/journal/e/pdf3/56/04/563.pdf>

08 - 3 F. Abe: “Effect of Boron on Microstructure and Creep Strength of Advanced Ferritic Power plant Steels” Procedia Engineering 10 (2011) 94—99. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811002062>

08 - 4 P. Ernst “Effect of boron on the mechanical properties of modified 12%Cr stainless steels” Doctoral thesis Swiss Federal Institute of Technology Zurich 1988 <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:37464/eth-37464-02.pdf>

08 - 5 Kloeh RL, Harries DR “High Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications” ASTM publication (2001)  
[https://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/MNL/SOURCE\\_PAGES/MONO3.htm](https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/MNL/SOURCE_PAGES/MONO3.htm)  
[https://www.astm.org/BOOKS/RE/PREVIEWM3/Chapter2\\_Mono3.pdf](https://www.astm.org/BOOKS/RE/PREVIEWM3/Chapter2_Mono3.pdf)

09 - 1 J Dossett and G.E. Totten: “Heat treating of martensitic stainless steels”, ASM Handbook, vol 4D, Heat treating of Irons and Steels.

09 - 2 K.J. Irvine, D.J. Crowe and F.B. Pichering “The physical metallurgy of 12% chromium steel”, J. Iron Steel Inst. London, Vol 195, (1960), p 386

09 - 3 Capdevila, F.G Caballero and C Garcia de Andres “Determination of Ms Temperature in Steels. A Bayesian neural network model”, Dept of Physical Metallurgy, CENIM, Spain (2002)

09 - 4 P.J. Cuna: “The welding of Stainless Steels” Euro-Inox publication [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_EN.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_EN.pdf)

09 - 5 The Nickel Institute “Welding of Stainless steels and other joining Methods” [https://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/WeldingofStainlessSteelandotherJoiningMethods\\_9002\\_.pdf](https://www.nickelinstitute.org/~Media/Files/TechnicalLiterature/WeldingofStainlessSteelandotherJoiningMethods_9002_.pdf)

#### 更多参考资料:

K.H. Lao, S.H. Shek, J.K.L. Lai “Recent developments in Stainless Steels” Materials Science and Engineering R 65 (2009) 39-104 <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/au/motiva/downloads/Au/mot/b7StainlessSteelsDev.pdf>

## 12 附件

### 附件1: 马氏体不锈钢英国标准

#### 综合

- EN 10088-1:2005: 不锈钢清单
- ISO 15510:2014: 不锈钢——化学成分
- EN 10302 - 2008: 抗蠕变钢材、镍钴合金

#### 扁平材产品

- EN 10088-2:2014 不锈钢标准: 通用耐腐蚀钢材簿板/厚板和带材的技术交付条件
- EN 10088-4:2009 不锈钢标准: 施工用耐腐蚀钢材簿板/厚板和带材的技术交付条件
- EN 10151:2002 弹簧不锈钢带材标准: 技术交付条件

#### 长材产品

- EN 10088-3:2014 不锈钢标准: 通用型耐腐蚀钢材半成品、棒材、盘条、线材以及光亮产品的技术交付条件
- EN 10088-5:2009 不锈钢标准: 施工用耐腐蚀钢材棒材、盘条、线材以及光亮产品的技术交付条件
- EN 10270-3:2011 机械弹簧用钢丝标准: 不锈钢弹簧钢丝
- EN 10264-4:2002 钢丝与线材产品标准——绳用钢丝——第4部分: 不锈钢丝
- EN 10263-5:2001 冷锻和冷挤压工艺用钢筋、棒材以及线材标准: 不锈钢的技术交付条件
- EN 10090:1998 内燃机阀门用钢材与合金标准
- ISO 7153-1:1991 手术仪器标准——金属材料——第1部分: 不锈钢

#### 配管和管道

- EN 10312: 2005 水及其他水性液体输送用不锈钢焊管标准——技术交付条件
- EN 10296-2:2005 机械及一般工程用钢制焊接圆管标准: 技术交付条件——不锈钢
- EN 10297-2:2005 机械及一般工程用钢制无缝圆管标准: 技术交付条件——不锈钢
- ISO 9626:1991 医疗器械制造用不锈钢针管标准

#### 锻件

- EN 10250-2:2000 一般工程用开式钢制锻件模具标准: 非合金质量钢材与特种钢材

#### 铸件

- EN 10283:2010 耐腐蚀钢制铸件标准
- EN 10293:2005 一般工程用钢制铸件标准

#### 紧固件

- EN 10269:2013 具有指定高低温性能的紧固件用钢材与镍合金

## 附件2：马氏体不锈钢美国标准

### 综合

- \*ASTM A480 / A480M - 16a：平轧钢和耐热钢厚板、薄板及带材一般性需求标准规范
- ASTM A484 / A484M - 16：不锈钢棒材、方钢及锻件一般性需求标准规范
- ASTM A555 / A555M - 16：不锈钢丝和盘条一般性需求标准规范
- ASTM A959 - 11:统一标准锻造不锈钢等级成分标准指南
- ASTM A999 / A999M - 15：合金与不锈钢管一般性需求标准规范
- ASTM A1016 / A1016M - 14：铁素体合金钢管、奥氏体合金钢管以及不锈钢管一般性需求标准规范

### 扁平材产品

- \*ASTM A240 / A240M - 16：压力容器或一般性应用使用的铬及铬镍不锈钢厚板、薄板及带材标准规范
- ASTM A666 - 15：退火或冷加工奥氏体不锈钢簿板、带材、厚板及板片的标准规范
- ASTM A693 - 13：析出硬化不锈钢及耐热钢厚板、簿板及带材一般性需求标准规范

### 长材产品

- \*ASTM A276 / A276M - 16a：不锈钢棒材和异型材标准规范
- ASTM A314 - 15：锻造用不锈钢方钢和棒材标准规范
- ASTM A493 - 16：冷地方税及冷锻用不锈钢线材和盘条标准规范

- ASTM A564 / A564M - 13：热轧和冷精整、时效硬化不锈钢棒材和异型材标准规范
- ASTM A565 / A565M：高温用马氏体不锈钢棒材标准规范
- ASTM A582 / A582M - 12e1：高速切削加工不锈钢棒材标准规范

### 配管和管道

- ASTM A182 / A182M - 16：高温下使用的锻造或轧制合金及不锈钢管道法兰、锻造管件以及阀门和部件标准规范
- ASTM A268 / A268M - 10：一般性使用无缝和焊接铁素体及马氏体不锈钢配管标准规范
- ASTM A511 / A511M - 16：无缝不锈钢机械配管和空心棒材标准规范
- ASTM A554 - 16：焊接不锈钢机械配管标准规范

### 锻件和铸件

- ASTM A473 - 16：不锈钢锻件标准规范
- ASTM A743 / A743M - 13ae1：一般性应用使用的铁铬、铁铬镍、耐腐蚀铸件标准规范
- ASTM A487 / A487M - 14：压力条件下使用的钢制铸件标准规范

### 紧固件

- ASTM F593 - 13a：不锈钢螺栓、六角螺钉以及螺柱标准规范
- ASTM F594 - 09 (2015)：不锈钢螺母标准规范
- ASTM F836M - 16：1型不锈钢公制螺母标准规范（公制）

钢材指称		质量%										
名称	编号	C°	硅 最大	锰	磷 最大	硫	铬	铜	钼	铌	镍	至
X12Cr13	1.4406	0.08 至 0.15	1.00	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	11.5 至 13.5	-	-	-	≤ 0.75	-
X12CrS13	1.4005	0.08 至 0.15	1.00	≤ 1.50	0.040	0.15 至 0.35	12.0 至 14.0	-	≤ 0.60	-	-	-
X15Cr13	1.4024	0.12 至 0.17	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	12.0 至 14.0	-	-	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0.16 至 0.25	1.00	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	12.0 至 14.0	-	-	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0.26 至 0.35	1.00	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	12.0 至 14.0	-	-	-	-	-
X29CrS13	1.4029	0.25 至 0.32	1.00	≤ 1.50	0.040	0.15 至 0.25	12.0 至 13.5	-	≤ 0.60	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0.36 至 0.42	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	12.5 至 14.5	-	-	-	-	-
X46Cr13	1.4034	0.43 至 0.50	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	12.5 至 14.5	-	-	-	-	-
X46CrS13	1.4035	0.43 至 0.50	1.00	≤ 2.00	0.040	0.15 至 0.35	12.5 至 14.0	-	-	-	-	-
X38CrMo14	1.4419	0.36 至 0.42	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	13.0 至 14.5	-	0.60 至 1.00	-	-	-
X55CrMo14	1.4110	0.48 至 0.60	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	13.0 至 15.0	-	0.50 至 0.80	-	-	钒: ≤ 0.15
X50CrMoV15	1.4116	0.45 至 0.55	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	14.0 至 15.0	-	0.50 至 0.80	-	-	钒: 0.10 至 0.20
X70CrMo15	1.4109	0.60 至 0.75	0.70	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	14.0 至 16.0	-	0.40 至 0.80	-	-	-
X40CrMoVN16-2	1.4123	0.35 至 0.50	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	14.0 至 16.0	-	1.00 至 2.50	-	≤ 0.50	钒: ≤ 1.50 氮: 0.10 至 0.30
X14CrMoS17	1.4104	0.10 至 0.17	1.00	≤ 1.50	0.040	0.15 至 0.35	15.5 至 17.5	-	0.20 至 0.60	-	-	-
X39CrMo17-1	1.4122	0.33 至 0.45	1.00	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	15.5 至 17.5	-	0.80 至 1.30	-	≤ 1.00	-
X105CrMo17	1.4125	0.95 至 1.20	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	16.0 至 18.0	-	0.40 至 0.80	-	-	-
X90CrMoV18	1.4112	0.85 至 0.95	1.00	≤ 1.00	0.040	≤ 0.015	17.0 至 19.0	-	0.90 至 1.30	-	-	钒: 0.07 至 0.12
X17CrNi16-2	1.4057	0.12 至 0.22	1.00	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	15.0 至 17.0	-	-	-	1.50 至 2.50	-
X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422	≤ 0.020	0.50	≤ 2.00	0.040	≤ 0.003	11.0 至 13.0	0.20 至 0.80	1.30 至 1.80	-	4.0 至 5.0	氮: ≤ 0.020
X1CrNiMoCu12-7-3	1.4423	≤ 0.020	0.50	≤ 2.00	0.040	≤ 0.003	11.0 至 13.0	0.20 至 0.80	2.30 至 2.80	-	6.0 至 7.0	氮: ≤ 0.020
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	≤ 0.030	0.50	≤ 0.50	0.040	≤ 0.015	11.5 至 13.5	-	1.50 至 2.50	-	4.5 至 6.5	钛: ≤ 0.010 钒: 0.10 至 0.50
X3CrNiMo13-4	1.4313	≤ 0.05	0.70	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	12.0 至 14.0	-	0.30 至 0.70	-	3.5 至 4.5	氮: ≥ 0.020
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	≤ 0.06	0.70	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	15.0 至 17.0	-	0.80 至 1.50	-	4.0 至 6.0	氮: ≥ 0.020
X1CrNiMoAlTi2-9-2	1.4530	≤ 0.015	0.10	≤ 0.10	0.010	≤ 0.005	11.5 至 12.5	-	1.85 至 2.15	-	8.5 至 9.5	铝: 0.60 至 0.80 钛: 0.28 至 0.37 氮: ≤ 0.010
X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596	≤ 0.015	0.10	≤ 0.10	0.010	≤ 0.005	11.5 至 12.5	-	1.85 至 2.15	-	9.2 至 10.2	铝: 0.80 至 1.10 钛: 0.28 至 0.40 氮: ≤ 0.020
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	≤ 0.07	0.70	≤ 1.50	0.040	≤ 0.015	15.0 至 17.0	3.0 至 5.0	≤ 0.60	5xC 至 0.45	3.0 至 5.0	-



名称		质量%														
名称	编号	碳	硅	锰	磷 最大	硫 最大	氮	铝	铬	钼	铌	氮	钛	钒	钨	其他
马氏体不锈钢																
X10CrMoVNb9-1	1.4903	0.06 至 0.12	≤0.50	0.30 至 0.60	0.025	0.015	0.030 至 0.070	≤0.030	8.0 至 9.5	0.85 至 1.05	0.060 至 0.10	≤0.40	-	0.18 至 0.25	-	-
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	0.09 至 0.13	0.10 至 0.50	0.30 至 0.60	0.020	0.010	0.050 至 0.090	≤0.040	8.5 至 9.5	0.90 至 1.10	0.060 至 0.10	0.10 至 0.40	-	0.18 至 0.25	0.90 至 1.10	硼: 0.0005 至 0.0090
X8CrCoNiMo10-6	1.4911	0.05 至 0.12	0.10 至 0.80	0.30 至 1.30	0.025	0.015	≤0.035	-	9.8 至 11.2	0.50 至 1.00	0.20 至 0.50	0.20 至 1.20	-	0.10 至 0.40	≤0.70	硼: 0.0005 至 0.015 钴: 5.00 至 7.00
X19CrMoNbVN11-1	1.4913	0.17 至 0.23	≤0.50	0.40 至 0.90	0.025	0.015	0.050 至 0.10	≤0.020	10.0 至 11.5	0.50 至 0.80	0.25 至 0.55	0.20 至 0.60	-	0.10 至 0.30	-	硼: ≤0.0015
X20CrMoV11-1	1.4922	0.17 至 0.23	≤0.50	≤1.00	0.025	0.015	-	-	10.0 至 12.5	0.80 至 1.20	-	0.30 至 0.80	-	0.25 至 0.35	-	-
X22CrMoV12-1	1.4923	0.18 至 0.24	≤0.50	0.40 至 0.90	0.025	0.015	-	-	11.0 至 12.5	0.80 至 1.20	-	0.30 至 0.80	-	0.25 至 0.35	-	-
X20CrMoWV12-1	1.4935	0.17 至 0.24	0.10 至 0.50	0.30 至 0.80	0.025	0.015	-	-	11.0 至 12.5	0.80 至 1.20	-	0.30 至 0.80	-	0.20 至 0.35	0.40 至 0.50	-
X12CrNiMoV12-3	1.4938	0.08 至 0.15	≤0.50	0.40 至 0.90	0.025	0.015	0.020 至 0.040	-	11.0 至 12.5	1.50 至 2.00	-	2.00 至 3.00	-	0.25 至 0.40	-	-

UNS 指称	型号	成分, %									
		碳	锰	磷	硫	硅	铬	镍	钼	氮	其他元素
S40300	403	0.15	1.00	0.040	0.030	0.50	11.5-13.0	-	-	-	-
S41000	410	0.08-0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.5	-	-	-	-
S41040	XM-30	0.18	1.00	0.040	0.030	1.00	11.0-13.0	-	-	-	铌 0.05-0.30
S41400	414	0.15	1.00	0.040	0.030	1.00	11.5-13.5	1.25-2.50	-	-	-
S41425	-	0.05	0.50-1.00	0.020	0.005	0.50	12.0-15.0	4.0-7.0	1.50-2.00	0.06-0.12	铜 0.30
S41500	-	0.05	0.50-1.00	0.030	0.030	0.60	11.5-14.0	3.5-5.5	0.50-1.00	-	-
S42000	420	0.15 最小	1.00	0.040	0.030	1.00	12.0-14.0	-	-	-	-
S42010	-	0.15-0.30	1.00	0.040	0.030	1.00	13.5-15.0	0.35-0.85	0.40-0.85	-	-
S43100	431	0.20	1.00	0.040	0.030	1.00	15.0-17.0	1.25-2.50	-	-	-
S44002	440A	0.60-0.75	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	-	0.75	-	-
S44003	440B	0.75-0.95	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	-	0.75	-	-
S44004	440C	0.95-1.20	1.00	0.040	0.030	1.00	16.0-18.0	-	0.75	-	-

型号	ISO标准名称	ISO标准指称	EN	UNS	AISI	JIS	GB
M	-	X12Cr12		S40300	403	SUS403	S40301
M		X6Cr13	1.4000		410S	SUS410S	S41008
M	4119-410-92-C	X13CrMo13	1.4119()			SUS410J1	
M	4024-410-09-E	X15Cr13	1.4024			SUS410	
M	4006-410-00-I	X12Cr13	1.4006	S41000	410	SUS410	S41010
M	4415-415-92-E	X2CrNiMoV13-5-2	1.4415				
M	4313-415-00-I	X3CrNiMo13-4	1.4313	S41500		SUSF6NM	S41595
M	4642-416-72-J	X13CrPb13	1.4642 ()			SUS410F2	
M	4005-416-00-I	X12CrS13	1.4005	S41600	416	SUS416	
M	4038-420-00-I	X52Cr13	1.4038 ()	S42000			
M	4039-420-09-I	X60Cr13	1.4039()				
M	4419-420-97-E	X38CrMo14	1.4419				
M	4110-420-69-E	X55CrMo14	1.4110				
M	4116-420-77-E	X50CrMoV15	1.4116				S46050
M	4035-420-74-E	X46CrS13	1.4035				
M	4034-420-00-I	X46Cr13	1.4034	S42000			
M	4643-420-72-J	X33CrPb13	1.4643()			SUS420F2	
M	4029-420-20-I	X33CrS13	1.4029	S42020	420F	SUS420F	
M	4031-420-00-I	X39Cr13	1.4031	S42000	420		S42040
M	4028-420-00-I	X30Cr13	1.4028	S42000	420	SUS420J2	S42030
M	4021-420-00-I	X20Cr13	1.4021	S42000	402	SUS420J1	S42020
M	4923-422-77-E	X22CrMoNiV12-1	1.4923				
M	4929-422-00-I	X23CrMoWmNiV12-1-1	1.4929()	S42200	422	SUH616	
M	4058-429-99-J	X33Cr16	1.4058()			SUS429J1	
M	4019-430-20-I	X14CrS17	1.4019,1.4104	S43020	430F		
M	4418-431-77-E	X4CrNiMo16-5-1	1.4418				
M	4123-431-77-E	X40CrMoVN16-2	1.4123				
M	4057-431-00-X	X17CrNi16-2	1.4057	S43100	431	SUS431	S43120
M	4122-434-09-I	X39CrMo17-1	1.4122				
M	4766-440-77-X	X80CrSiNi20-2	1.4766 ()			SUH4	
M	4025-440-74-J	X110CrS17	1.4025 ()		“440F”	SUS440F	
M	4023-440-04-I	X110Cr17	1.4023 ()	S44004	440C	SUS440C	
M	4041-440-03-X	X85Cr17	1.4041 ()	S44003	440B	SUS440B	
M	4040-440-02-X	X68Cr17	1.1010 ()	S44002	440A	SUS440A	S44070
M	4916-600-77-J	X18CrMnMoNbVN12	1.4916 ()			SUH600	

## 附件 6: 不同等级钢材之间的对应性 (续)

型号	ISO标准名称	ISO标准指称	EN	UNS	AISI	JIS	GB
M-PH	4534-138-00-X	X3CrNiMoAl13-8-3	1.4534	S13800			
M-PH	4594-155-92-E	X5CrNiMoCuNb14-5	1.4594				
M-PH	4532-157-00-I	X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	S15700			
M-PH	4542-174-00-I	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	S17400	“630”	SUS630	
M-PH	4568-177-00-I	X7CrNiAl17-7	1.4568	S17700	“631”	SUS631	
M-PH	4457-350-00-X	X9CrNiMoN17-5-3	1.4457 ()	S35000			
M-PH	4530-455-77-E	X1CrNiMoAlTi12-9-2	1.4530				
M-PH	4596-455-77-E	X1CrNiMoAlTi12-10-2	1.4596				
M-PH	4645-469-10-U	X2CrNiMoCu AlTi12-9-4-3	1.4645 ()	S46910			
M-PH	4644-662-20-U	X4NiCrMoTiMnSiB26-14-3-2	1.4644 ()	S66220			

钢材指称		密度	弹性模数,					平均热膨胀系数, 温度范围: 20° 至				热导率, 20° C	比热容, 20° C	电阻率, 20° C	可磁化
名称	编号	千克/立方分米	20° C	100° C	200° C	300° C	400° C	100° C	200° C	300° C	400° C	W	J	Ω * mm <sup>2</sup>	
			吉帕					10 <sup>4</sup> x K <sup>-1</sup>				m * K	kg * K	m	
X12Cr13	1.4006	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.60	
X12CrS13	1.4005	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.60	
X15Cr13	1.4024	7.7	216	213	207	200	192	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.60	
X20Cr13	1.4021	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.60	
X30Cr13	1.4028	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.65	
X29CrS13	1.4029	7.7	215	212	205	200	190	10.5	-	11.5	-	30	460	0.55	
X39Cr13	1.4031	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.55	
X46Cr13	1.4034	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.55	
X46CrS13	1.4035	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.55	
X38CrMo14	1.4419	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.62	
X55CrMo14	1.4110	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.5	12.0	30	460	0.62	
X50CrMoV15	1.4116	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.0	11.5	30	460	0.65	
X70CrMo15	1.4109	7.7	215	212	205	200	190	10.5	11.0	11.0	11.5	30	460	0.65	
X40CrMoVN16-2	1.4123	7.7	195	199	192	177	-	10.4	10.6	10.8	11.1	24	430	0.90	
X14CrMoS17	1.4104	7.7	215	212	205	200	190	10.0	10.5	10.5	10.5	25	400	0.70	是
X39CrMo17-1	1.4122	7.7	215	212	205	200	190	10.4	10.8	11.2	11.5	15	430	0.80	
X105CrMo17	1.4125	7.7	215	212	205	200	190	10.4	10.8	11.2	11.5	15	430	0.90	
X90CrMoV18	1.4112	7.7	215	212	205	200	190	10.4	10.8	11.2	11.5	15	430	0.80	
X17CrNi16-2	1.4057	7.7	215	212	205	200	190	10.0	10.5	10.5	10.5	25	460	0.70	
X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422	7.7	200	195	165	175	170	10.4	10.8	11.2	11.5	16	450	0.75	
X1CrNiMoCu12-7-3	1.4423	7.7	200	195	185	175	170	10.4	10.8	11.2	11.5	16	450	0.75	
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	7.8	200	195	185	175	170	10.9	-	11.1	-	16	500	0.71	
X3CrNiMo13-4	1.4313	7.7	200	195	185	175	170	10.5	10.9	11.3	11.5	25	430	0.60	
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	7.7	200	195	185	175	170	10.3	10.8	11.2	11.5	15	430	0.80	
X1CrNiMoAlTi12-9-2	1.4530	7.7	195	187	178	171	-	10.0	10.3	10.7	11.2	16	500	0.71	
X1CrNiMoAlTi2-10-2	1.4596	7.7	195	187	178	171	-	10.0	10.3	10.7	11.2	16	500	0.71	
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	7.8	200	195	185	175	170	10.9	-	11.1	-	16	500	0.71	
X7CrNiAl17-7	1.4506	7.8	200	195	185	175	170	13.0	13.5	14.0	-	16	500	0.80	
X5CrNiMoCuNb145	1.4594	7.8	200	195	185	175	170	10.9	-	11.1	-	16	500	0.71	
X5NiCrTiMoV925-15-2	1.4606	7.9	211	206	200	192	193	16.5	16.9	18.0	17.5	14	460	0.91	否

## 附件8：石油生产中使用的马氏体不锈钢

相关标准（API、NACE、NORSOK等）根据油田特征（即：硫化氢、二氧化碳、氯化物、pH值以及温度），定义可以使用的钢材和耐腐蚀性合金。

部分相关标准：

- MR 0175/ISO 15156：石油和天然气行业标准——在石油天然气生产过程中，在硫化氢环境下使用的材料
- API 5CRA：铸件、配管及耦接器用耐腐蚀性合金无缝管规范——技术交付条件
- ISO 13680-2000：石油和天然气行业标准——铸件、配管及耦接器用耐腐蚀性合金无缝管——技术交付条件
- NORSOK M-001 标准

当需要中度耐腐蚀能力时（即：硫化氢压力在10千帕以下，pH值大于等于3.5，温度低于90° C），可以使用马氏体不锈钢。

该环境容易发生硫化物应力致裂和应力腐蚀致裂，这是少数几种要求提供极低机械性能的情况，即：所有材料的硬度必须低于22HRc。



名称	编号	状态	最小屈服应力0,2%, 兆帕	抗张强度极限, 兆帕	最小断裂伸长率
标准等级钢材					
X12Cr13	1.4006	A	-	≤ 730	-
		QT650	450	650-850	15
X12CrS13	1.4005	A	-	≤ 730	-
		QT650	450	650-850	12
X15Cr13	1.4024	A	-	≤ 730	-
		QT650	450	650-850	15
X20Cr13	1.4021	A	-	≤ 760	-
		QT700	500	700-850	13
		QT800	600	800-950	12
X30Cr13	1.4028	A	-	≤ 800	-
		QT850	650	850-1000	10
X39Cr13	1.4031	A	-	≤ 800	-
		QT800	650	800-1000	10
X46Cr13	1.4034	A	-	≤ 800	-
		QT800	650	800-1000	10
X17CrNi16-2	1.4057	A	-	≤ 950	-
		QT800	600	800-950	12
		QT900	700	900-1050	10
X38CrMo14	1.4419	A	-	≤ 760	-
X55CrMo14	1.4110	A	-	≤ 950	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	A	-	≤ 1100	-
		QT700	520	700-850	15
		QT780	620	780-980	15
		QT900	800	900-1100	12
X50CrMoV15	1.4116	A	-	≤ 900	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	A	-	≤ 1100	-
		QT760	550	760-960	16
		QT900	700	900-1100	16
X14CrMoS17	1.4104	A	-	≤ 730	-
		QT650	500	650-850	10
X39CrMo1	1.4122	A	-	≤ 800	-
		QT750	550	750-950	10

名称	编号	状态	最小屈服应力 $\sigma_{0.2}$ , 兆帕	抗张强度极限, 兆帕	最小断裂伸长率
特殊等级钢材					
X29CrS13	1.4029	A	-	$\leq 800$	-
		QT850	650	850-1000	9
X46CrS13	1.4035	A	-	$\leq 800$	-
X70CrMo15	1.4109	A	-	$\leq 900$	-
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	QT750	650	750-900	18
		QT850	750	850-1000	15
析出硬化等级钢材					
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	AT	-	$\leq 1200$	-
		P800	520	800-950	18
		P930	720	930-1000	16
		P960	790	960-1160	12
		P1070	1000	1070-1270	10
型材 $\leq 160\text{mm}$ : A: 退火 QT: 淬火回火 AT: 溶液退火 P: 析出硬化					

钢材指称		热成形		热处理符号	退火		淬火		回火	
名称	编号	温度, ° C	冷却类型		温度 <sup>1</sup> , ° C	冷却类型	温度 <sup>2</sup> , ° C	冷却类型	温度, ° C	
标准等级钢材										
X12Cr13	1.4006	1100 至 800	空气	+A	745 至 825	空气	-	-	-	
				+QT650	-	-	950 至 1000	油, 空气	680 至 780	
X12CrS13	1.4005		空气	+A	745 至 825	空气	-	-	-	
				+QT650	-	-	950 至 1000	油, 空气	680 至 780	
X15Cr13	1.4024		1100 至 800	慢速冷却	+A	750 至 800	炉内, 空气	-	-	-
					+QT650	-	-	950 至 1030	油, 空气	700 至 750
X20Cr13	1.4021			慢速冷却	+A	745 至 825	空气	-	-	-
					+QT700	-	-	950 至 1050	油, 空气	650 至 750
					+QT800	-	-	950 至 1050	油, 空气	600 至 700
					+A	745 至 825	空气	-	-	-
X30Cr13	1.4028	慢速冷却		+A	745 至 825	空气	-	-	-	
				+QT850	-	-	950 至 1050	油, 空气	625 至 675	
X39Cr13	1.4031	1100 至 800		慢速冷却	+A	750 至 850	炉内, 空气	-	-	-
					+QT800	-	-	950 至 1050	油, 空气	650 至 700
X46Cr13	1.4034		慢速冷却	+A	750 至 850	炉内, 空气	-	-	-	
				+QT850	-	-	950 至 1050	油, 空气	650 至 700	
X17CrNi16-2	1.4057		慢速冷却	+A <sup>c</sup>	680 至 800	炉内, 空气	-	-	-	
				+QT800 <sup>d</sup>	-	-	950 至 1050	油, 空气	750 至 800 + 650 至 700 <sup>d</sup>	
				+QT900	-	-	950 至 1050	油, 空气	600 至 650	
X38CrMo14	1.4419		1150 至 900	空气	+A	750 至 830	炉内, 空气	-	-	-
X55CrMo14	1.4110				+A	750 至 850	炉内, 空气	-	-	-
X3CrNiMo13-4	1.4313				+A <sup>e</sup>	600 至 650	炉内, 空气	-	-	-
		+QT700			-	-	950 至 1050	油, 空气	650 至 700 + 600 至 620	
		+QT780			-	-	950 至 1050	油, 空气	550 至 600	
		+QT900			-	-	950 至 1050	油, 空气	520 至 580	
X50CrMoV15	1.4116	慢速冷却			+A	750 至 850	炉内, 空气	-	-	-
+A <sup>e</sup>	600 至 650				炉内, 空气	-	-	-		
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	空气			+QT760	-	-	950 至 1050	油, 空气	590 至 620 <sup>f</sup>
					+QT900	-	-	950 至 1050	油, 空气	550 至 620



钢材指称		热成形		热处理符号	退火		淬火		回火
名称	编号	温度, ° C	冷却类型		温度 <sup>1</sup> , ° C	冷却类型	温度 <sup>2</sup> , ° C	冷却类型	温度, ° C
X14CrMoS17	1.4104	1100 至 800	空气	+A	750 至 850	-	-	-	
				+QT650	-	-	950 至 1070	油, 空气	550 至 650
X39CrMo17-1	1.4122	1100 至 800	慢速冷却	+A	750 至 850	炉内, 空气	-	-	
				+QT750	-	-	980 至 1050	油	650 至 750
特殊等级钢材									
X29CrS13	1.4029	1100 至 800	慢速冷却	+A	740 至 820	空气	-	-	-
				+QT850	-	-	950 至 1050	油, 空气	625 至 675
X46CrS13	1.4035			+A	750 至 850	-	-	-	-
X70CrMo15	1.4109			+A	750 至 800	炉内, 空气	-	-	-
X2CrNiMoV13-5-2	1.4415	1150 至 900	空气	+QT750	-	-	950 至 1050	油, 空气	600 至 650 + 500 至 550
				+QT850	-	-			
X53CrSiMoVN16-2	1.4150	1200 至 1000	慢速冷却	+A	800 至 850	-	-	-	
				+QT	-	炉内, 空气	950 至 1050	油 + 深度冷冻 -80° C	180
X40CrMoVN16-2	1.4123	1200 至 1000	慢速冷却	+A	800 至 850	-	-	-	
				+QT	-	炉内, 空气	950 至 1050	油 + 深度冷冻 -80° C	180
W105CrMo17	1.4125	1100 至 900	慢速冷却	+A	780 至 840	-	-	-	
X90CrMoV18	1.4112	1100 至 800		+A	780 至 840	-	-	-	

- a. 退火、淬火及回火的温度应与模拟热处理测试件保持一致
- b. 如果使用连续作业炉进行热处理, 则相关标准中指定的上限范围通常是首选范围, 甚至会超出这个范围
- c. 双重退火可能是可取的做法。
- d. 如果镍含量较低, 在620° C至720° C之间进行单次回火可能就已足够。
- e. 马氏体转变发生后的回火处理
- f. 最低时间采用 2 x 4小时或 1 x 8小时

钢材指称		热成形		热处理符号	溶液退火		析出硬化
名称	编号	温度, ° C	冷却类型		温度 <sup>b</sup> , ° C	冷却类型	温度, ° C
标准等级钢材							
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	1150 至 900	炉内, 空气	+AT <sup>c</sup>	1030 至 1050	油, 空气	-
				+P800	1030 至 1050		2 h 760 ° C/空气 + 4 h 620 ° C/空气
				+P930	1030 至 1050		4 h 620 ° C/空气
				+P960	1030 至 1050		4 h 590 ° C/空气
				+P1070	1030 至 1050		4 h 550 ° C/空气
<p>a. 溶液退火的温度应与模拟热处理测试件保持一致</p> <p>b. 如果使用连续作业炉进行热处理, 则相关标准中指定的上限范围通常是首选范围, 甚至会超出这个范围</p> <p>c. 不适合直接应用, 为避免发生开裂, 建议在溶液退火后, 立即进行析出硬化。</p>							





## 帮助

帮助页

目录页

上一页

下一页

返回

## 关于国际不锈钢论坛 (ISSF)

国际不锈钢论坛 (ISSF) 是非营利研究与开发机构, 1996年成立, 是国际不锈钢行业的联络处。

### 成员有哪些?

国际不锈钢论坛 (ISSF) 有两类成员: 公司成员和附属成员。公司成员是指不锈钢生产商 (全能工厂和单轧厂)。附属成员是指国家或地区不锈钢工业协会。国际不锈钢论坛 (ISSF) 现在有65名成员, 分布在25个国家。这些成员的不锈钢生产量占总产品量的80%。

### 发展前景

不锈钢为日常生活提供可持续性解决方案。

### 更多信息

如需了解关于国际不锈钢论坛 (ISSF) 的更多信息, 请访问我们的网站[worldstainless.org](http://worldstainless.org)。

## 鸣谢

本书由国际不锈钢论坛长材产品特别工作组编写, 该特别工作的成员如下:

- Eduardo Carregueiro (葡萄牙博恩豪斯特钢股份公司)
- Thierry Cremailh (斯穆+碧根柏不锈钢股份有限公司)
- Kai Hasenclever (国际不锈钢论坛)
- Clara Herrera (德意志不锈钢有限公司)
- Bernard Heritier (国际不锈钢论坛)
- Stephen Jones (奥托昆普钢铁有限公司)
- Luis Peiro (阿赛里诺克斯集团股份公司)

本书作者感谢Jacques Charles博士与Francis Chassagne认真完成的审稿工作。另外, 还要感谢日本不锈钢协会与大同钢铁株式会社提供的支持。

### 声明

国际不锈钢论坛认为所提供信息在技术上是正确的。但对于因使用本手册所含信息导致的损失、损害或人身损伤的全部或部分责任, 国际不锈钢论坛及其成员、员工和顾问宣布免责。

