



图片由Microalloying
International提供

技术简报

现代铌微合金化钢及其 焊接性能



这篇短文的主要目的是向读者提供可焊性概念的基本信息，以及它对加工行业的重要性。虽然大部分内容都是一般性的，但以下信息主要集中在含铌的钢的加工。铌是以铌铁的形式在炼钢过程中添加的，而且它在钢中的微小含量能显著地提高强度和韧性，从而在世界范围内的许多行业应用中带来了益处。焊接是几乎所有钢产品制造和使用的一个基本特征。

在世界范围内铌在许多钢种中起着重要的作用，其中包括本文不涉及的不锈钢，但它的主要应用是被归纳为高强度低合金钢（HSLA），即通常被称为微合金钢（HSLA）的范畴。这种钢在板材、型钢、线材、管线钢等许多不同的产品类型中都有应用，但也许最重要的行业是汽车薄板和高强度油气管线用中厚板或卷板。

历史上从20世纪50年代末到60年代和70年代，碳锰（C-Mn）微合金钢中铌的含量在0.015到 0.04 wt%之间。然而，随着现代炼钢技术的进步而采用的具有成本竞争优势的生产工艺，碳含量可降至0.06 wt%甚至更低，加上对铌作为一个微合金化元素的巨大潜力认识之提高，现在钢铁企业已普遍采用高达0.11 wt%的铌，以提供优越性能的产品及稍后我们将会看到的良好焊接性。

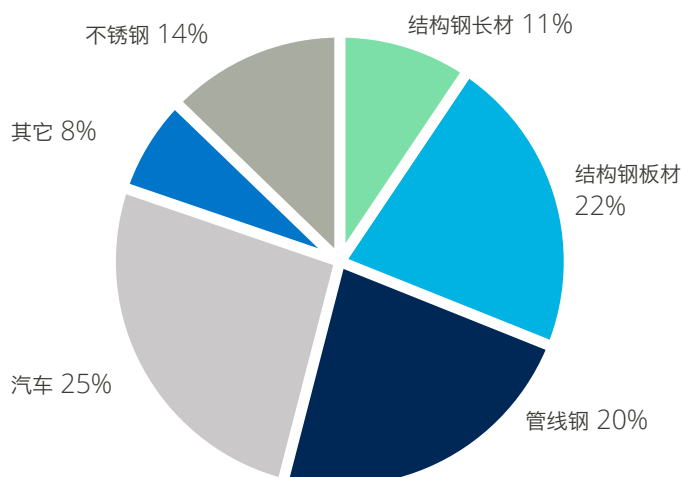


图1：铁铌应用分布图 - 2015年数据（来源于CBMM）

什么是焊接，我们所说的可焊性意味着什么？

焊接是两块材料之间的连接，它涉及到两块材料加热到其熔点以上的温度。这通常涉及到在电极上施加电流，使电极本身和被连接的相邻表面熔化。因此，焊接接头通常由焊接母材和填充电极的混合物组成。

焊接可以是单道或多道次的，如下所示。

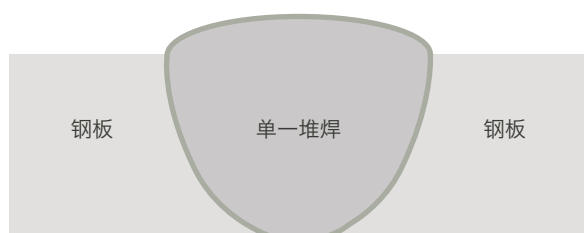


图2. 单道次焊接

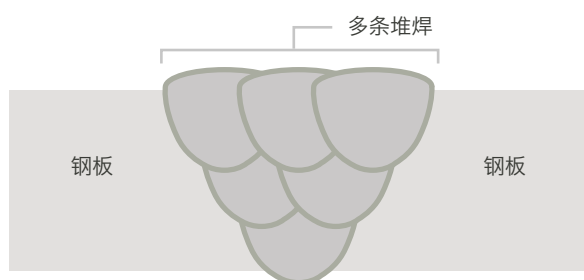


图3. 多道次焊接

焊接材料所经历的热周期导致快速加热和冷却，此周期的性质会影响熔敷金属和相邻的热影响区（HAZ）的性能。很明显，熔入溶敷金属中的材料通过我们所说的熔合可能会影响到其化学成分，从而影响微结构和性能。在HAZ中，化学成分和抗晶粒粗化的能力直接影响到微结构。

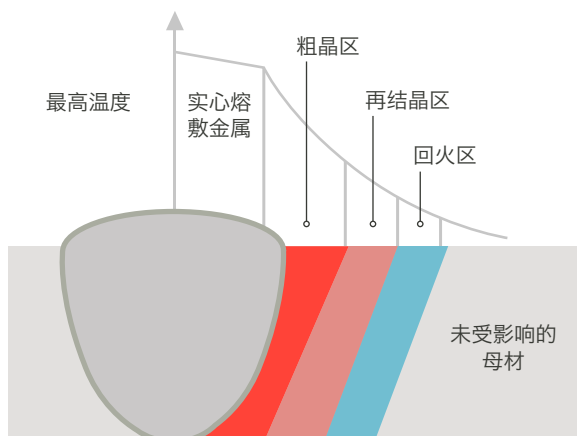


图4. 简化的热影响区。
(改编自 Easterling) [1].

可焊性是什么？

在最简单的定义中，这个词仅仅是指一种材料通过焊接可以可靠、安全地连接在一起的方便性。一个更全面的技术定义如下：

一种材料通过多种适用的焊接工艺被连接的能力，且产生的接头整体没有明显缺陷并具有足够的强度与韧性，适用于预期的[2]目的。

钢可焊性有很多方面，几十年前常见的一些问题也不再经常出现，原因是先进的清洁炼钢工艺被广泛应用，特别是降低了硫和磷的含量 [2]。然而，最重要的进展来自于认识到通常与低碳当量（CE）相结合的底碳含量是最佳可焊性的前提。

那么钕适用于何处呢？

关注钕对焊接性可能产生的影响往往集中在三个特定领域：

- (i) 钕对熔敷金属微结构和韧性的影响；
- (ii) 钕对氢致冷裂的影响（详见下文）；
- (iii) 钕对热影响区 HAZ 微结构和韧性的影响。

因此，让我们依次看看它们中的每一个。

熔敷金属和钕

当焊接如上所述时，通常被称为熔合焊缝，并且取决于电弧的能量，即其热量输入，最终焊接金属的一个百分比是由焊接的钢熔化到熔池中的材料得到的。一些焊缝可能被描述为高熔合度和一些被描述为低熔合度如下。

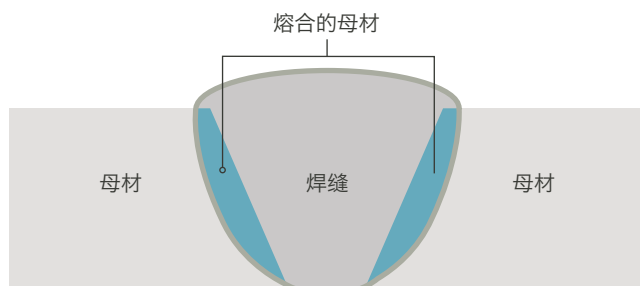


图5。熔合概念的说明。

$$\text{熔合比}\% = (\text{熔合区域面积} \div \text{熔融区面积}) \times 100$$

熔合程度通常取决于焊接工艺。例如在焊管厂中应用的多弧焊接采用埋弧焊工艺，并且通常有更高的综合电能的输入，因此造成更高的熔合比，而在低能量手工焊条电弧焊时则明显导致更低的熔合度。附录1说明了最常见的焊接工艺的主要特点。

由于被熔合到熔池中的元素影响凝固后焊缝的最终化学成分，因此可以预期它们对焊缝的微结构及力学性能产生一定的影响，即强度和韧性。然而，焊缝的冷却速度也至关重要，这取决于焊接时的能量输入和母材的厚度。

诸如碳、锰、镍等元素通常对熔敷金属性能起主导作用，当遇到困难时，往往被归因于已完成焊缝的碳含量过高。我们指的是这些促进更高淬透性的元素，这意味着它们使焊缝金属的最终微结构在较低的温度下形成。这可能是有益的或有害的，取决于当前元素的精确平衡。附录2对“淬透性”一词作了进一步的澄清。

在某些情况下，钕也具有几乎独一无二的强大的作用，其作为一种可以提高淬透性的元素，而且如果它已被熔合进了凝固中的熔敷金属，只要焊缝的碳含量保持在约0.1 wt%以下，其效果是有益的。

事实上，通过正确利用钕的作用可以大大地减少诸如锰和镍等其他能提高淬透性元素的含量，以防止过度硬化和韧性下降的发生。

在未来，我们甚至可以看到有意识开发可增加熔敷金属中钕含量的焊材。

氢致冷裂

钢碳当量（CE）通常被用作其淬透性的指标[2]及其抗加工中最常见的问题之一，即氢裂的能力。

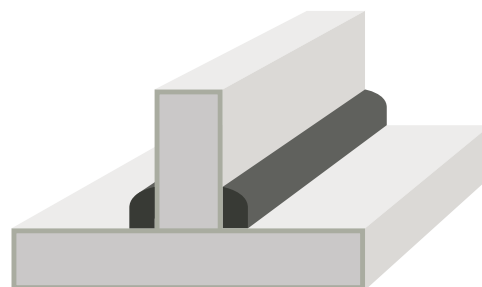


图6。T形角焊缝。



图7。T型角焊缝中典型的氢致冷裂。

许多不同的公式被用来计算钢的CE，但最常见的应是：

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Cu+Ni)}{15}$$

传统上CE值 > 0.45被认为是不理想的，很难保证焊接后不发生氢致裂，而CE水平 < 0.40通常是可接受的。然而，尽管这是一个很好的指导系数，但过于简单化了。多年来已经认识到碳是主要因素，如果碳的含量可以降低到大约0.1 wt%，即可获得可接受的抗氢致裂能力而CE值的水平几乎不起作用[3]。

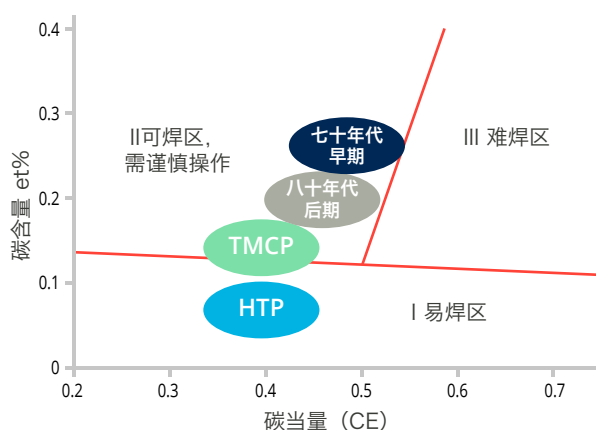


图8. 近几十年来碳和碳当量的演变
(来自于 Graville) (3)。

值得注意的是铌未出现在任何常用的CE公式中，经验证明铌对氢致冷裂没有任何不利影响。事实上如果铌有所作用的话，就是可提高钢在这方面 [4] 的性能。简单地说，这是因为在较快的热周期焊接过程中富铌析出物限制了HAZ中的晶粒生长，从而得到更好的微结构（没有硬的马氏体）。这种益处适用于所有铌处理的钢，而不需考虑工艺路线，但在含碳量低于0.06wt%和铌含量高于0.07wt%的钢中尤为突出。

热影响区的韧性

钢板紧邻凝固焊缝的部分实际上是一个极其复杂的区域，由多个分区域组成，这些分区域的细节在其他文献中已被充分的说明[5]。然而，为了本指南的目的，我们把粗晶热影响区（CG-HAZ）设为焦点。

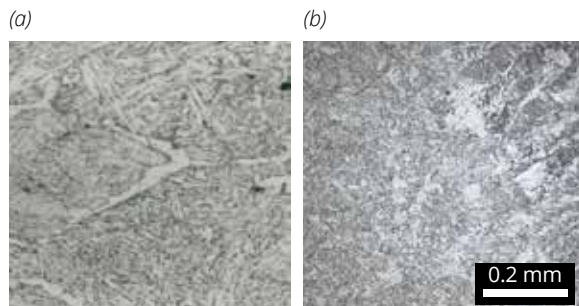


图 9. 常规 (A) 和 HTP 钢 (B) 粗晶热影响区增长的对比。

许多最先进的铌处理钢还含有微量的钛。通过析出物，钛与铌一起作用，提供了更强的晶粒粗化阻力。

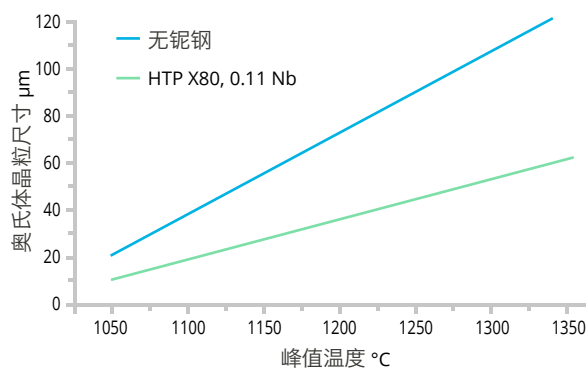


图10. 铌对HAZ晶粒粗化特性的影响

HAZ中较细的晶粒度几乎总是能改善的微结构和提高韧性，并且在较低的热量输入下富铌析出物的精细分布（如前面部分所述）发挥了关键作用。在同一个化学成分，细小晶粒尺寸往往会倾向于减小我们先前所说的淬透性，这意味着可以避免较低温度的相变产物，例如可能是脆性的马氏体。

随着热量输入的增加，含铌钢继续阻止我们已经注意到的晶粒生长。这往往有利于韧性，但由于较细的晶粒尺寸也造就了较低的淬透性，因此可以预期在某一点上当冷却速率应对较高的热量输入而降低时，相变温度可能不够低以形成一个适当的微结构来保持最佳韧性。然而有趣的是出乎许多人意料的，由于较小的晶粒尺寸引起的任何不利的相变效应都会随着热输入量的增加而抵消，这是铌特有的第二个重要的效应。

随着抑制晶粒生长的细小铌析出物开始溶解，释放出的铌进入固溶体中并开始发挥其已充分被文献记载的对淬透性的强大影响。这种积极作用确保相变温度保持足够低，以在非常宽的热输入量和冷却速率范围内形成相对细小具有韧性的贝氏体。

马氏体是钢铁焊接热影响区中存在的最低温度相变产物。马氏体的硬度取决于它的碳含量，而且碳含量越高其韧性就可能越差。贝氏体是HSLA钢里粗晶热影响区（CGHAZ）中经常遇到的微结构的名称，如果化学成分优化至低碳含量，其强度和韧性影响的组合是显著的。

在低碳高铌钢中，细晶粒度贝氏体微结构能在大范围的热输入量下提供优异的韧性（见图11）。

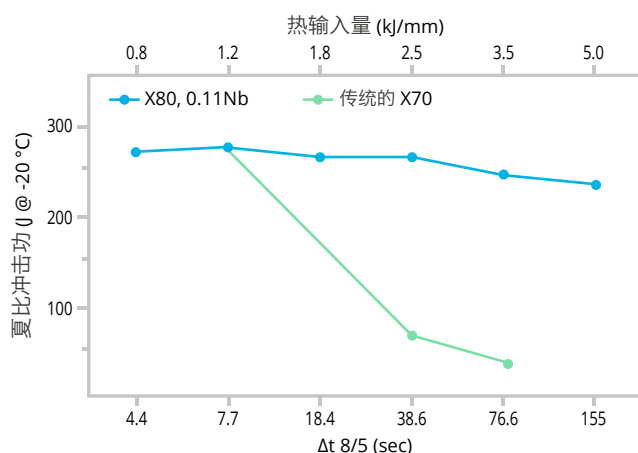


图11。HAZ 夏比冲击韧性数据直接来自于0.11%的 Nb钢，与传统的X70钢直接比较（焊接热模拟数据）[6]。

铌含量至少为 0.11 wt%的低碳高铌HSLA 钢具有独特的能力以提供这种适合于很大范围内不同焊接工艺和板厚的最佳微结构。

结论

铌是一种独特的重要元素，其在现代高强度低合金 (HSLA) 钢设计中的地位越来越受到人们的重视。低碳炼钢的出现，特别是对低碳对钢性能和可焊性的重要性的认识，无疑正在改变人们的看法。例如，用于最繁重和最高压力应用的高强度管线钢，现在最有可能以一种鼓励钢铁制造商、加工厂家和他们的客户的方式来利用我们已增强对铌所扮演的角色的理解和铌在低碳钢的具体利益。国际标准也终于接受并认识到通过使用低碳高铌设计来获得广泛的重要应用的钢规格所带来的好处。

参考文献

1. K. E. Easterling, "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", second edition Butterworth-Heinemann (1992).
2. P. R. Kirkwood, "The Weldability of Modern Niobium Microalloyed Structural Steels", Proceedings of the Value-Added Niobium Microalloyed Construction Steels Symposium, Singapore 5-7 November (2012).
3. B. A. Graville, "Cold Cracking in Welds in HSLA Steels", Welding of HSLA (Microalloyed) Structural Steels, Proceedings of the AIM/ASM Conference, Italy, November 9-12, (1976).
4. P. R. Kirkwood, "Welding Niobium Bearing HSLA Steels – Myths and Magic", Proceedings of HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015, Hangzhou, Zhejiang Province, China, November 11-13, (2015).
5. A. D. Batte, P. J. Boothby and A. B. Rothwell, "Understanding the Weldability of Niobium Bearing HSLA Steels", Proceedings of the International Symposium Niobium 2001, Orlando, Florida, December (2001).
6. F. J. Barbaro, Z. Zhu, L. Kuzmikova and H. Li, "Control of Weld HAZ Properties in Modern High Strength Pipeline Steels" IPC2014 -33109. Proceedings of the 10th International Pipeline Conference IPC2014, Calgary, Canada, September (2014).
7. A. Glover, "Pipeline Design and Construction using High Strength Steels", Proceedings of the International Seminar on Welding of High Strength Pipeline Steels, Araxá, MG, Brazil, 27-30 November (2011).

附录1 传统的焊接方法



图12。手工电弧焊。



图13。埋弧焊
(图片来源于塔塔公司钢管)



图14。气体保护电弧焊
(WestPATH, GR690内焊 使用 4头
短路融化极气保焊 [7])。

附录2 淬透性

当钢逐步加温到1000摄氏度以上时，它以一种我们称为奥氏体的形式存在。形成的奥氏体数量取决于钢的化学成分和加热速度。当钢随后再次冷却时，奥氏体通常会转变回铁素体和各种富碳相的混合物。在冷却过程中生成的最低温度相变产物叫做马氏体。

淬透性简单来说是钢某一特定冷却条件下表面一定的深度下从奥氏体部分或完全转变为一定比率的马氏体的能力。例如，一个高淬透性的钢在相对缓慢的冷却（如油淬）下可在表面几毫米的深度转变称大量的马氏体，而一个低淬透性的钢即便在速冷条件下（如水淬）仅能在表面1毫米内

生成大比率的马氏体。因此淬透性描述了钢在特定的条件下硬化深度的能力。

以下是在特定冷却速率下产生的典型微结构。

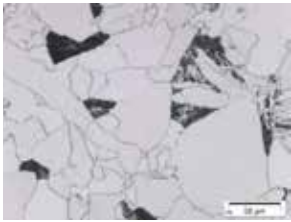


图16。冷却速度在1 °C /秒左右时可观察到铁素体和珠光体（黑色区域）

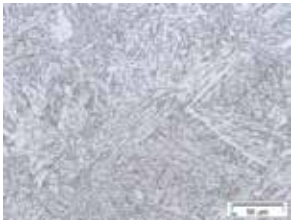


图17。在 3~20 °C/s的冷却速率下能观察到贝氏体

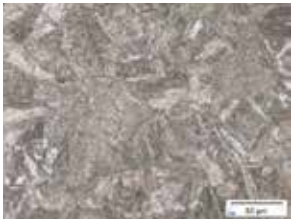


图18。在冷却速率超过 30 °C/s 时，可以观察到马氏体。

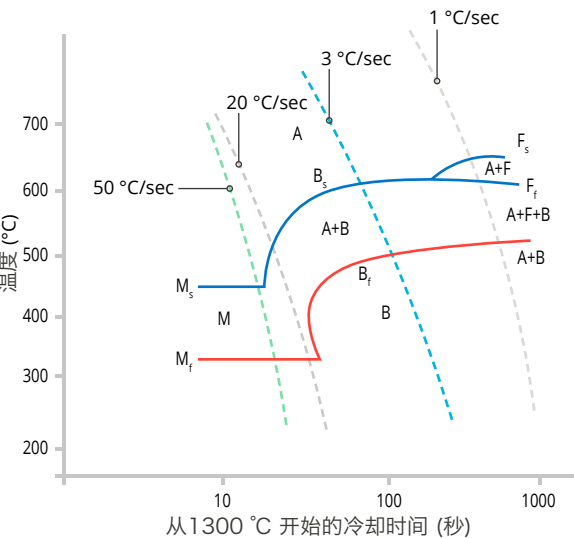


图 15。低合金化海工结构钢的典型 CCT图



技术内容由 P R Kirkwood博士整理, Beta技术公司协助编辑