

Strenx® 的焊接

在研讨会中取得最佳成果的专家建议。



Strenx® 的焊接

Strenx® 高强度钢的优异性能与其优异的可焊性密不可分。任何常规焊接方法都可用于将 Strenx® 高强度钢焊接到其它类型的可焊接钢上。



本手册中所包括的 Strenx® 牌号

- ✓ 某些 Strenx® 牌号可按 D、E 或 F 等级订购。对于这些牌号，本手册中的建议与 Strenx® E 等级的冲击韧性要求相关。E 等级在 -40°C 时对未受影响的母材有冲击韧性要求，这是最常见的测试温度。
有关具有与 F 等级相同的冲击韧性的 Strenx® 牌号、Strenx® P700 和 Strenx® 700 OME 的焊接建议，请联系 SSAB 了解更多信息。

本手册还提及：

- ✓ 我们的技术支持文件，这些文件提供有关某个主题的进一步信息。每个技术支持文件解决一个特定领域的问题，如避免不连续的措施和耗材的合适品牌名称的示例等。
- ✓ 我们的 WeldCalc™ 软件可使用户根据其焊接结构的具体条件和要求优化其焊性能。

技术支持文件可以在我们的主页 www.ssab.com/download-center 上找到和下载。WeldCalc™ 的用户许可证可以通过在相同主页上注册获得。技术支持文档和 WeldCalc™ 用户许可证都是免费的。

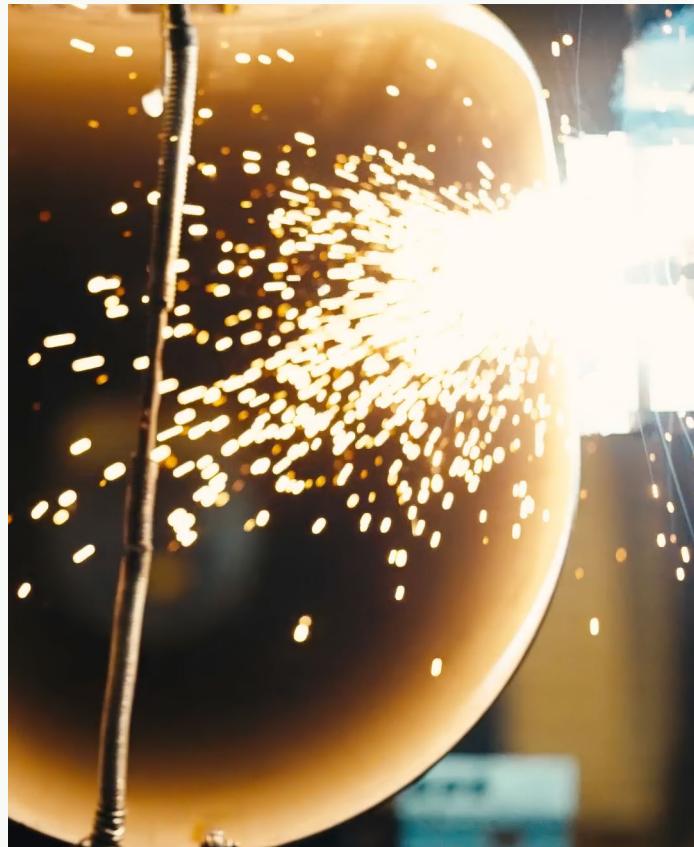
本手册中包含的信息仅作为一般信息提供。SSAB 对任何具体应用的适用性或适当性不承担任何责任。因此，对于具体应用所需的任何必要的调整和/或修改，用户自行负责。

坡口制备方法

所有常规的坡口制备方法都可以用于这些钢。最常见的方法是机加工和热切割。厚度约 10mm 以下的钢板坡口制备也可以通过剪切和冲剪来进行。

对于厚度约 4mm 以下的钢板，常规电弧焊接对边缘的要求不是非常严格。所有板厚的搭接焊缝和角焊缝，对接头边缘的质量要求通常是中等的。铣削和热切割（气体、等离子体或激光切割）是用于坡口制备的最常用的方法。Strenx® 高强度钢的坡口制备与低碳钢一样容易。

热切割期间，在坡口表面会形成薄的氧化膜。建议在焊接前清除此膜。如果使用等离子切割进行坡口制备，则建议使用氧气作为等离子体气体。氮气可能导致在焊缝金属中形成孔隙。如果使用氮气，在焊接前建议将切割表面至少磨削约 0.2 mm。对于薄板，可采用普通剪切制备坡口。



焊接的重要参数

焊接前应清理焊接坡口，去除水分和油污等异物。除了良好的焊接清理工作，还应注意以下要点：

- 预热和层间温度，以避免氢致开裂
- 热输入
- 焊接耗材
- 保护气体
- 焊接顺序和焊缝间隙尺寸

热输入

采用推荐的热输入值进行焊接，焊缝将获得良好的机械性能。

焊接的热输入值 (Q) 取决于电流、电压和行走速度。热输入 (Q) 指的是输入能量与焊缝长度之比。其值影响焊缝的机械性能。在焊接期间，电弧中有能量损失。热效率 (k) 是焊接过程中输入的传递到焊缝的热量比率。不同的焊接方法具有不同的热效率。k 的近似值请参见下表。

大多数焊接工艺都是通过直流或交流电源进行焊接的，对于直流和交流焊接，热输入根据以下公式计算。

$$Q = \frac{k \times U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad [\text{kJ/mm}]$$

可任选以下两个公式中的一个确定脉冲电弧焊的热输入：

$$Q = \frac{k \times I \times E}{L \times 1000} \quad [\text{kJ/mm}]$$

或

$$Q = \frac{k \times I \times P \times 60}{v \times 1000} \quad [\text{kJ/mm}]$$

焊接方法	热效率 k[无量纲]
焊条手工焊	0.8
熔化极活性气体保护焊, 所有类型	0.8
埋弧焊	1.0
钨极惰性气体保护焊	0.6

Q = 热输入 [kJ/mm]

k = 热效率 [无量纲]

U = 电压 [V]

I = 电流 [A]

v = 焊接速度 [mm/min]

L = 焊接长度 [mm]

IE = 瞬时能量 [J]

IP = 瞬时功率 [W]

热输入对焊缝的一般影响

减少热输入

增加热输入

- 更好的韧性
- 增加强度
- 减少变形
- 降低残余应力
- 更窄的热影响区

- 对于传统焊接方法的生产率更高

避免氢致裂纹

由于碳当量低, Strenx® 高强度钢具有非常高的抗氢致裂纹性能。如能遵守我们的建议, 氢致裂纹的风险将可降到最低。

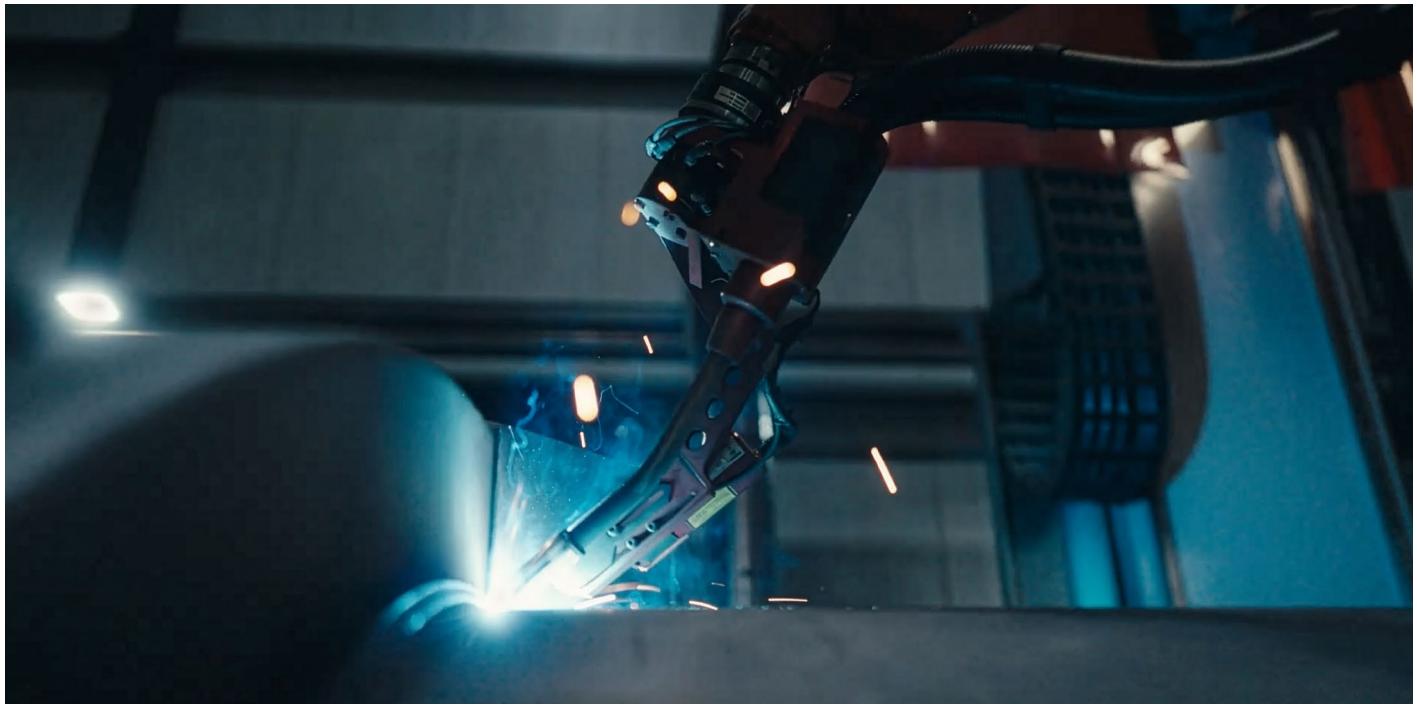
避免氢致裂纹的两个原则:

1. 使焊缝中和焊缝周围的氢含量降到最低

- 采用正确的预热和层间温度
- 使用氢含量低的焊接耗材
- 保持焊接区域无杂质

2. 使焊缝应力降到最小

- 不要使用强度高于实际需求的焊接耗材
- 合理安排焊接顺序, 使残余应力降到最低
- 将焊接接头的组对间隙设置最大为3mm



最低预热和层间温度

如能遵守我们的建议，所有 Strenx® 钢牌号都可以焊接而不会有氢致裂纹的风险。没有推荐预热值时，其条件是指环境空气和焊缝温度至少为 +5°C。如果空气温度低于 +5°C，则需要将焊缝至少预热至 +60°C。

多道焊具有与第一焊道相同的预热要求。

Strenx® 热轧和冷轧带钢产品

由于钢的性能，Strenx® 热轧和冷轧带钢产品的任何厚度都无需考虑最低的预热 / 层间温度，包括 MC、Plus、MC Plus、CR、MH、MLH、QLH 牌号和型材。

对于最小屈服强度为 700 MPa 的 Strenx® 牌号焊接，由于所用耗材的特性，可能需要进行预热。关于这方面的更多信息，请参阅第 9 页"与耗材相关的预热 / 层间温度"的介绍。

Strenx® 板材产品

Strenx® 板材产品可提供比 Strenx® 热轧和冷轧带钢产品更大的钢板厚度。它们的强度等级以及较大的板厚度意味着对于某些板厚度和钢种仍需要预热。请参阅第8页上我们的建议。屈服强度为 900 MPa 或更高的 Strenx® 牌号的焊接，通常使用高强度耗材进行，即使钢材本身没有要求，也会要控制最低预热温度，因为此时预热是由耗材决定的。

合金元素如何影响预热和层间温度

独特的合金元素组合优化了 Strenx® 钢的机械性能。

该种组合控制焊接期间钢的最小预热温度，并且可以用于计算其碳当量值。

碳当量值通常根据以下等式表示为 CEV 或 CET。

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo+Cr+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} [\%]$$

$$CET = C + \frac{(Mn+Mo)}{10} + \frac{(Cr+Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} [\%]$$

合金元素含量在钢板的检验证书中指定，并且在这些公式中以重量百分比表示。较高的碳当量通常需要焊缝有较高预热和层间温度。我们的产品数据表中给出了碳当量的典型值。

Strenx® 板材产品的预热和层间温度

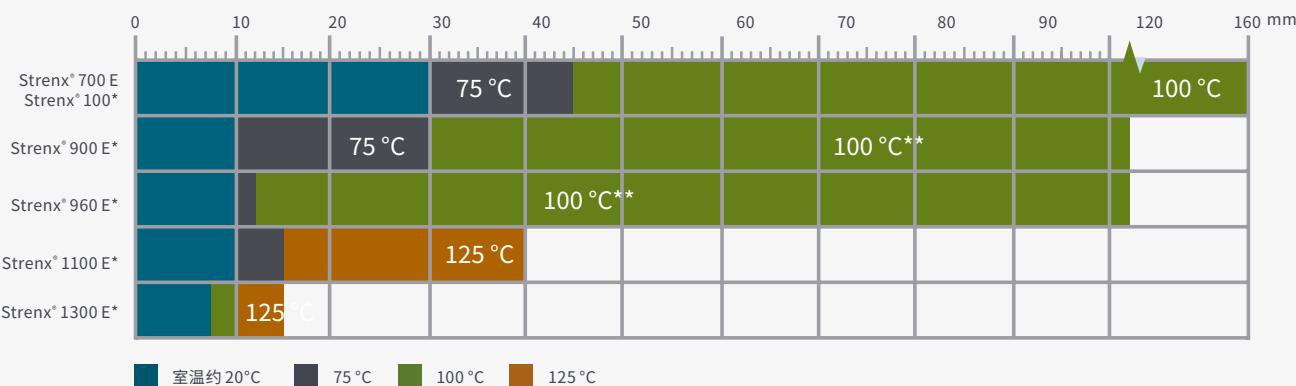
焊接过程中的最低预热温度如图表所示。除非另有说明，这些值适用于使用非合金和低合金焊接耗材的焊接。对于图表中未显示的单板厚度，请联系SSAB以获得进一步的帮助。

- 当厚度不同但钢种相同的钢板焊接在一起时，所需的小预热温度由最厚的钢板来确定。
- 当不同钢种焊接在一起时，由需要最高预热温度值的钢板来确定最低预热温度。

对于以下每种情况，
相对于上述预热表将最低预热温度提高 25°C：

1. 如果环境湿度高或周围空气温度低于 + 5°C
2. 高拘束度的焊接装配
3. 热输入在 1.0-1.6 kJ / mm 范围内

Strenx® 板材产品的最小预热和层间温度[°C]

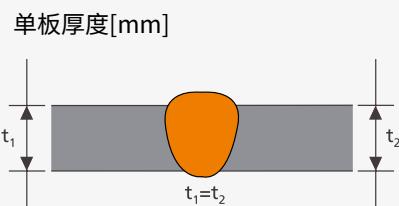


* 此表适用于不同单板厚度，当采用 1.7 kJ / mm 或更高热输入焊接时。对于图中未表示出的板厚，请联系SSAB了解更多详情。

** 100 °C 含括以下板厚度 (Pt) 范围

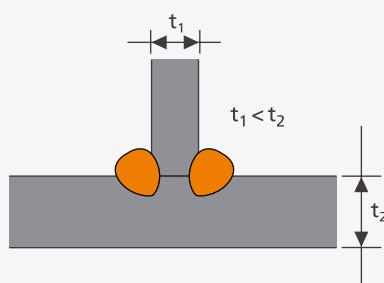
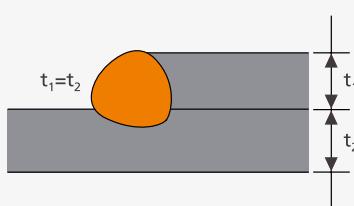
- Strenx® 900 E: Pt 在 30.1-120.0 mm 之间

- Strenx® 960 E: Pt 介于 12.1-120.0 mm 之间



$t_1 = t_2$ (尺寸以mm为单位),
表中的单板厚度为

t_1 或 t_2 , 假定使用相同的钢种。



$t_1 < t_2$ (尺寸以mm为单位),
在这种情况下,

表中的单板厚度为 t_2 ,
假定使用相同的钢种。

热输入高于 1.7 kJ / mm 时, 第 8 页上图表中最低的预热和层间温度推荐值不受影响。若热输入值低于 1.0 kJ / mm , 则第8页图表中的最小预热温度可以用WeldCalcTM 计算。

这是基于焊缝可以在空气中冷却的假设。注意, 这些建议也适用于定位点焊和根部焊道。定位点焊每个焊点至少为50 mm长。但是, 对于厚度 8mm 以下的板材, 可以使用更短的点焊长度。

不建议超过最大预热温度, 以便在整个焊接结构中获得有利的性能。有关详细信息, 请参阅第14页。定位点焊之间的距离可以根据需要变化。有关以下案例的更多详情, 请联系SSAB:

- 第8页上的预热特殊条件1-3,
当有一个以上的特殊条件同时出现时
- 对于板厚超过 8 mm 的板材焊缝,
要求点焊长度小于50 mm。

基于耗材性能的预热/层间温度

当使用具有高达700MPa的屈服强度 ($R_{p0.2}$) 的耗材进行焊接时, 耗材性能通常不影响焊缝的最小预热温度。其原因是母材金属的碳当量 (CET) 通常超过焊缝金属的碳当量至少 0,03 百分比单位。对于屈服强度为 700 MPa 及以上的耗材, 其 CET 值与 Strenx® 的 CET 值相比通常很高, 以至于钢材和耗材的最低预热温度均需考虑。

在这种情况下, 应采用最高的焊接板或耗材的最低预热温度。软件WeldCalcTM 可以简化这些计算。

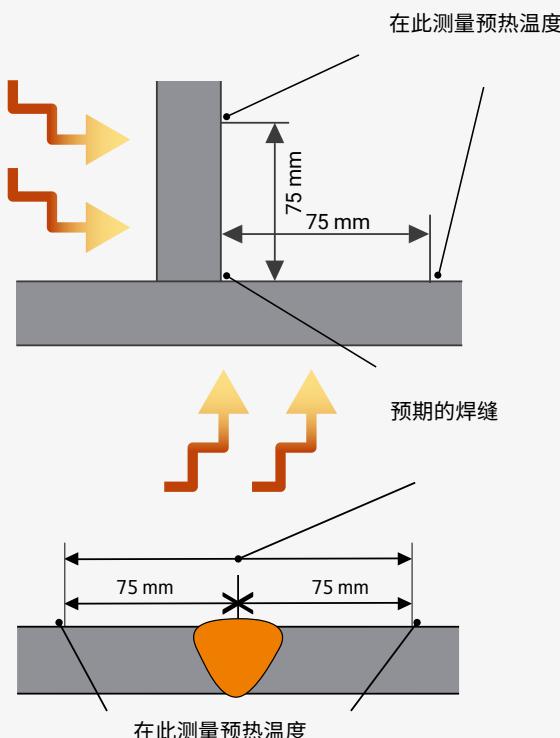
对于所有类型的低合金耗材, 最大氢含量设定为5毫升/100克焊接金属。

预热和层间温度的获得和测量

所需的预热和层间温度可用几种方式实现。采用电热元件围绕制备的坡口四周进行预热通常是最好的方式, 因为这可以使该区域均匀加热。温度应该使用接触温度计之类测量工具来监测。

单板厚度

测量坡口中最厚钢板的温度。在测量预热温度之前, 25 mm厚度钢板应至少等待2分钟。待焊处 $75 + 75 \text{ mm}$ 的区域内应达到最低预热温度,



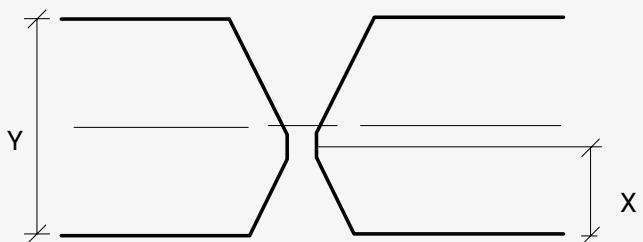
厚板的连接

焊接厚度大于 25 mm 的钢板时，建议使用不对称焊缝。

这将增加额外的抗氢致裂纹能力。其理由是，较厚钢板的中心部分在一定程度上可能包含导致形成氢致裂纹的化学元素。钢板厚度达 25 mm 的焊缝可以是对称的或不对称的。

钢板厚度大于 25 mm 的焊缝

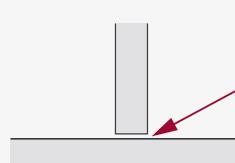
不对称焊缝：焊缝中心应偏离板厚度的中心约 5mm



Y: 钢板厚度

X: (钢板厚度/2)-5 mm

焊接顺序和间隙尺寸

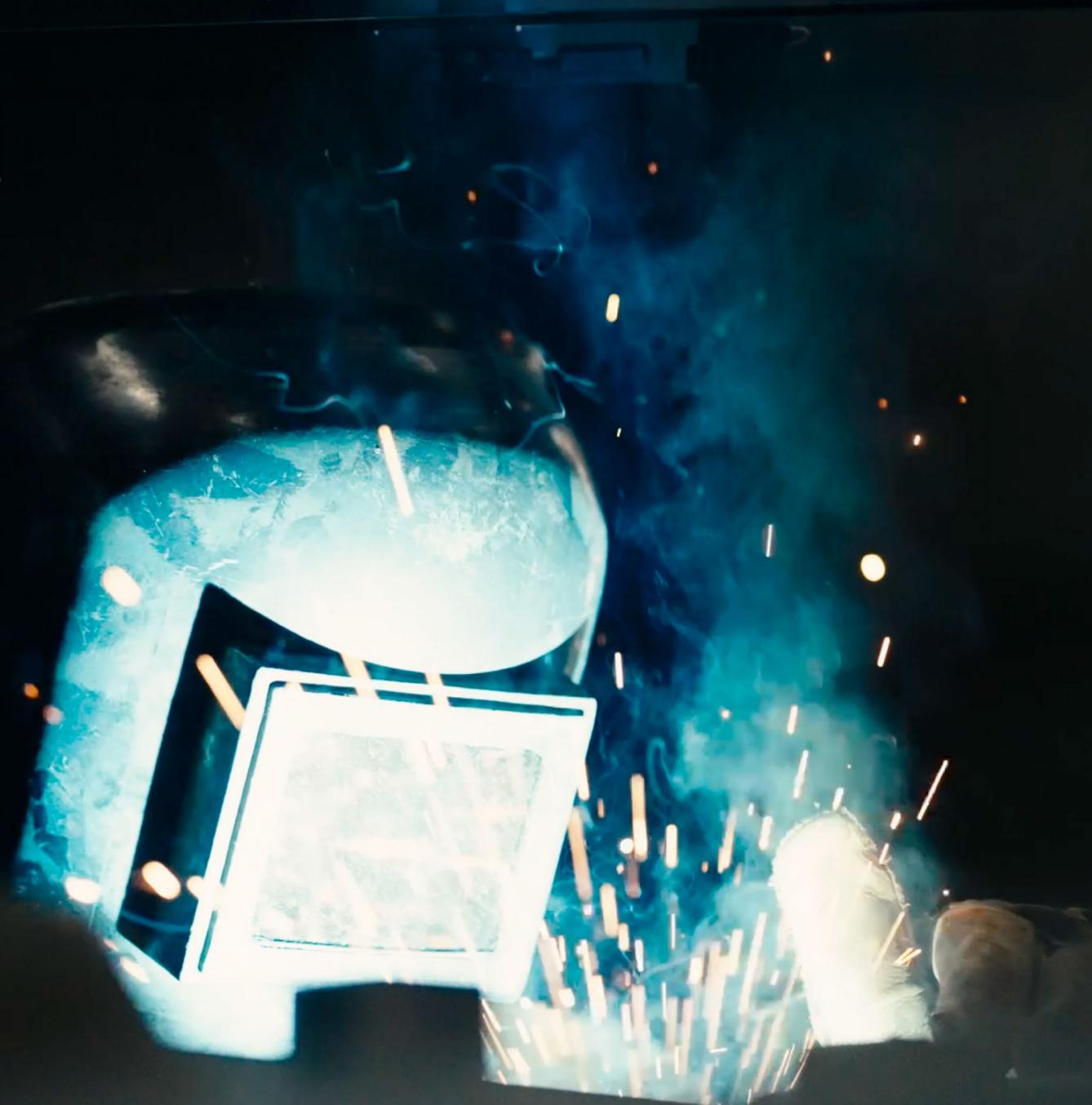


为避免焊缝出现氢致裂纹

- 启弧和停弧不应安排在拐角处。如果可能，应在距离拐角至少 50 - 100 mm 处才开始或停止焊接。
- 焊接接头装配间隙最大不超过 3 mm。



焊缝的机械性能



Strenx® 冷轧产品

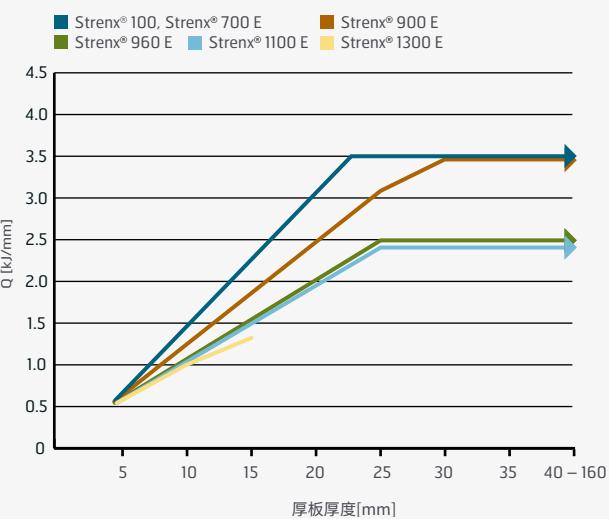
热输入应设置得足够低，以避免焊穿材料并使焊接变形保持在较低水平。通过适当的设置，热输入可使焊缝具有良好的机械性能。

每个焊接的情况或多或少都有不同。因此，SSAB 并没有规定最大热输入的要求。与未受影响的母体金属的性能相比，焊缝的强度在一定程度上要低一些。通常较低的热输入有助于形成焊缝的高强度。在技术支持60号文件中可以找到更精确的值。

Strenx® 厚板和热轧带钢产品

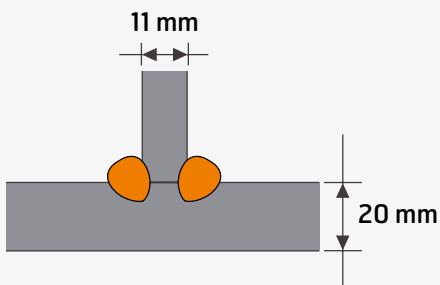
我们对Strenx®高强度钢所作建议的依据是，焊接热影响区(HAZ) 在-40°C时的韧性至少为27J的典型值。此外，较低的热输入有助于形成焊缝的高静态强度。对于图表中未列出的单板厚度，请联系SSAB以获得进一步的帮助。

推荐的 Strenx® 板材产品最大热输入值基于所使用的最低预热温度来确定



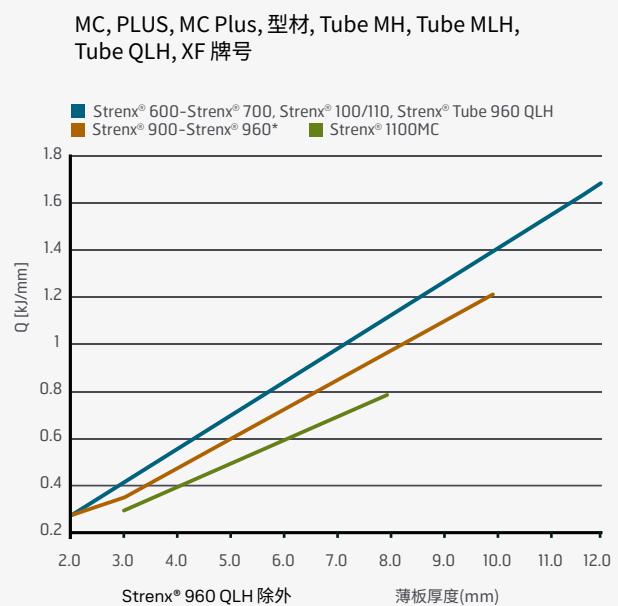
厚板和薄板的厚度

当焊接不同板厚的坡口时，推荐的热输入值是按坡口中最薄的钢板来确定的。



在这种情况下，许可热输入值基于 11 mm 的板厚度来确定。

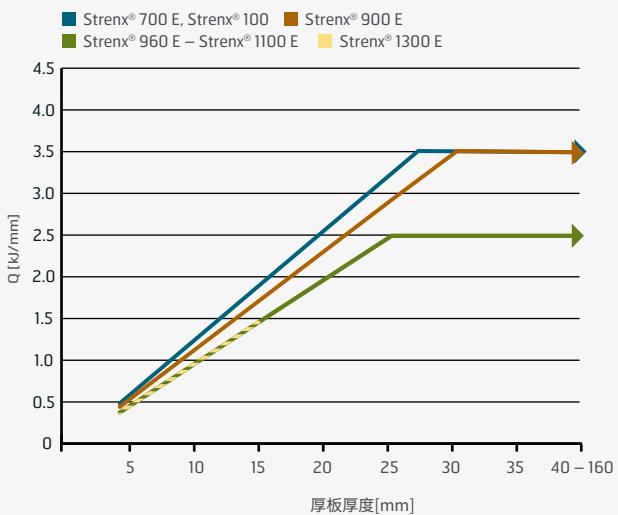
基于所使用的最低预热温度来推荐Strenx® 热轧带钢产品的最大热输入



在较高的预热层间温度下焊接

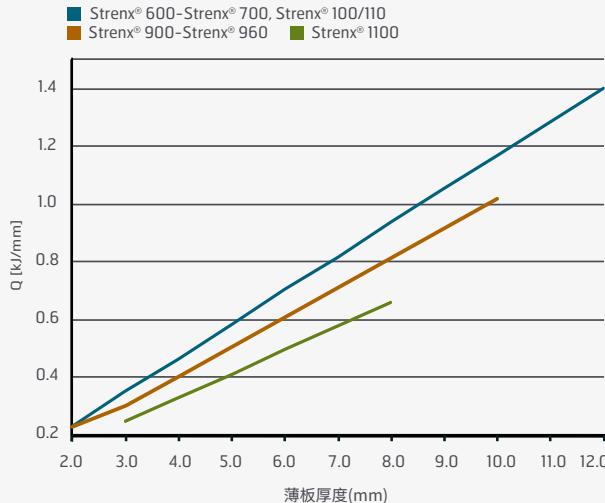
可能在高温下进行焊接，例如在多焊道焊缝中，将影响推荐的热输入。下图显示了焊缝温度为 100°C 和 175°C 时的推荐热输入。

板材产品焊接预热温度为 100 °C 时的推荐最大热输入

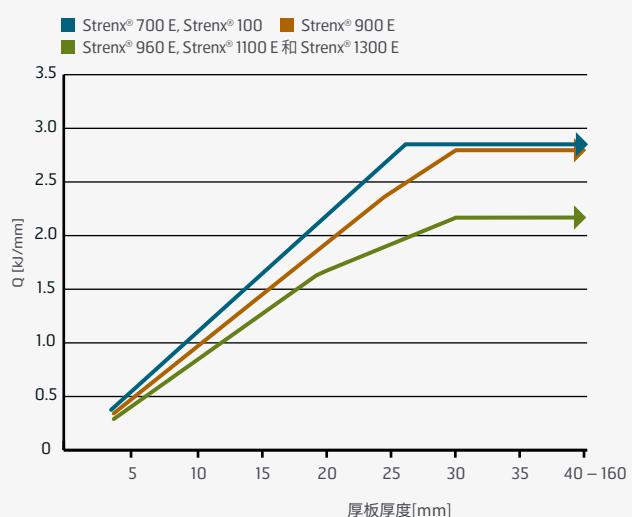


焊缝温度为+ 100°C 时的推荐最大热输入

MC, PLUS, MC Plus, Tube MH, Tube MLH, Tube QLH, 型材和XF 牌号



板材产品焊接预热温度 175 °C 时的推荐最大热 输入 *



其他Strenx® 牌号因其更薄的钢板厚度而未提及。
这些情况通常不会达到 175 °C 的高层间温度。

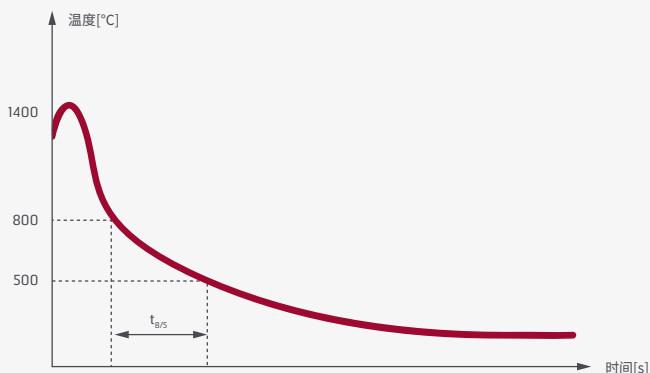
$t_{8/5}$ 值

焊接的热循环可以通过热影响区温度从 800°C 冷却到

500°C 所用的冷却时间来定义。此参数称为 $t_{8/5}$ 值。

要焊接工艺的峰值温度达到 900°C 以上，焊缝不同部分的 $t_{8/5}$ 值将大致保持恒定。

$t_{8/5}$ 定义



不需要计算 $t_{8/5}$ ，但它有助于我们对焊接工艺的更好理解。每个 Strenx® 牌号都有一个特定的推荐 $t_{8/5}$ 区间。可以使用 WeldCalc™ 计算 $t_{8/5}$ 值，其中对每个钢种都规定了合适的允许区间。

$t_{8/5}$ 值, -40 °C 时最小 27 J

Strenx® 960 E, Strenx® 1100 E, Strenx® 1300 E 5-15 s

Strenx® 1100MC 1-10 s

Strenx® 900MC, Strenx® 900 Plus,
Strenx® Section 900MC,

Strenx® Tube 900MH, Strenx® 960MC,
Strenx® Tube 960MH Strenx® 960 Plus

Strenx® 100, Strenx® 700 E, Strenx® 900 E, 5-20 s
Strenx® Tube 960QLH

Strenx® 100 XF, Strenx® 110 XF 1-20 s

Strenx® 650MC, Strenx® Section 650MC,

Strenx® 600MC

Strenx® 700MC, Strenx® 700MC Plus,

Strenx® Section 700MC,

Strenx® Tube 700MH, Strenx® Tube 700MLH

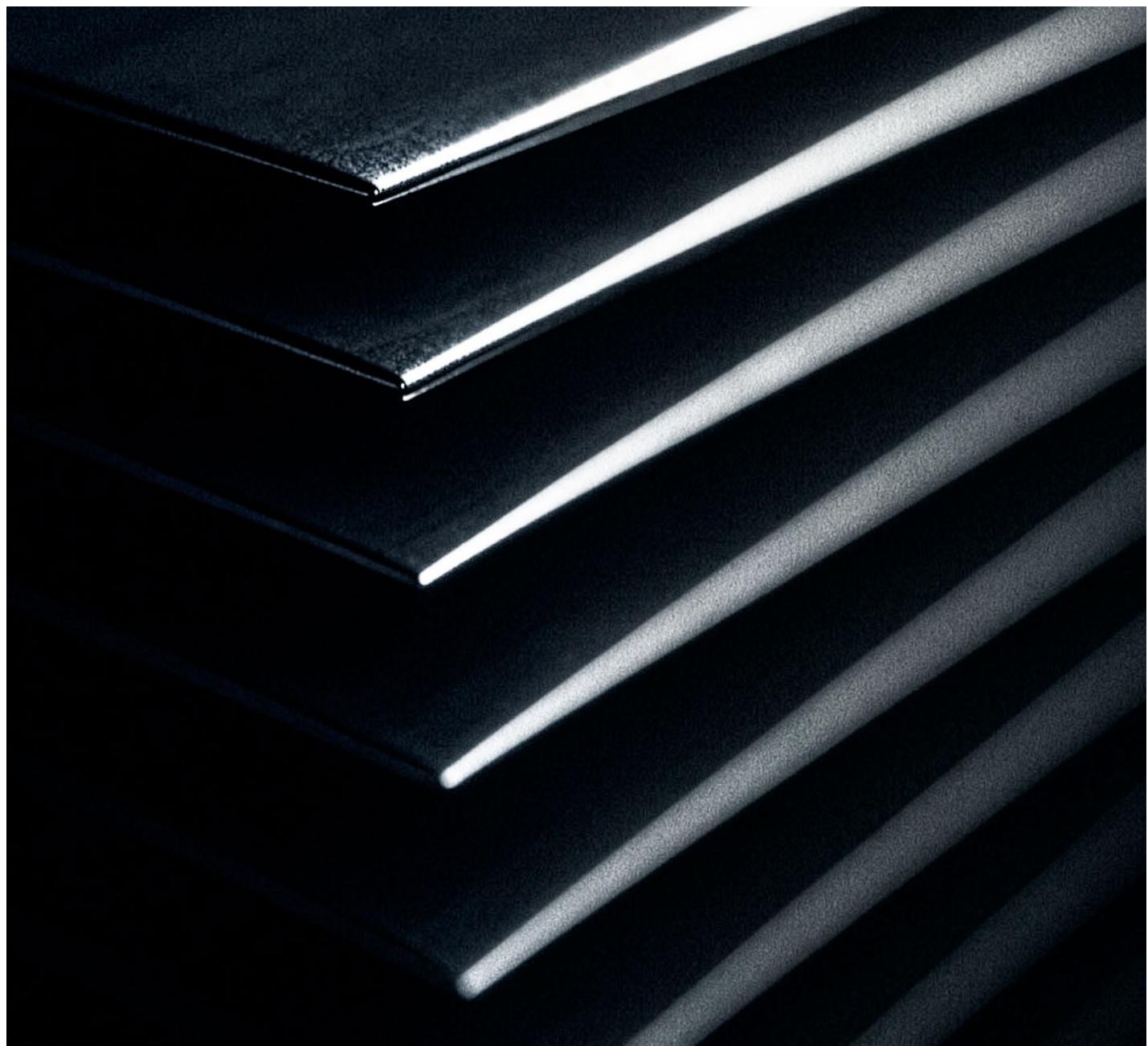
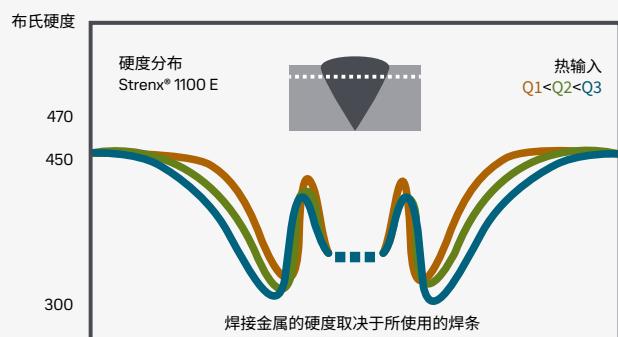
Strenx® Tube 700 QLH 5-25 s



焊缝的硬度分布

焊接热影响区中的硬度分布取决于钢种、钢板厚度和焊接期间施加的热输入。焊缝金属的硬度与其强度成正比关系。焊缝强度越高，硬度值也越高。

热输入与HAZ中的软化





焊接和热切割期间的最大推荐预热 / 层间温度

规定了最大预热/层间温度，以避免整个焊接结构的机械性能退化。规定的最大预热温度适用于使用预热的焊接。由于

Strenx® CR 牌号只用单焊道技术焊接，因此没有规定最大预热温度。

钢名称	最大预热/层间温度[°C]	钢名称	最大预热/层间温度[°C]
Strenx® 100	300	Strenx® 900 E*	300
Strenx® 100 XF	100	Strenx® 900 Plus	100
Strenx® 110 XF	100	Strenx® 900MC	100
Strenx® 600MC	100	Strenx® Section 900MC	100
Strenx® 650MC	100	Strenx® Tube 900MH	100
Strenx® 650 Section	100	Strenx® 960 E*	100
Strenx® 700 E*	300	Strenx® 960 Plus	300
Strenx® 700MC	100	Strenx® 960MC	100
Strenx® 700MC Plus	100	Strenx® Tube 960MH	100
Strenx® Section 700MC	100	Strenx® Tube 960QLH	100
Strenx® Tube 700MH	100	Strenx® 1100 E*	100
Strenx® Tube 700MLH	100	Strenx® 1100MC	100
Strenx® Tube 700QLH	300	Strenx® 1300 E*	300

* 在某些情况下，可以使用高达 400 °C 的层间温度。



焊接耗材

焊接 Strenx® 钢时最常用的耗材是非合金、低合金和不锈钢耗材。

非合金和低合金焊接耗材的强度

焊接耗材的强度应根据下页的数字选择。使用低强度耗材有几个好处，例如：

- 焊缝金属的韧性更高
- 更高的抗氢致裂纹能力
- 降低焊缝中的残余应力

对于需要预热的 Strenx® 牌号的多道焊缝，使用不同强度的耗材进行焊接可能更有优势。点焊焊缝和头道焊道用低强度的耗材焊接。然后高强度耗材用于剩余的焊道。这种技术可以增加焊缝的韧性和抗氢致裂纹能力。

非合金和低合金焊接耗材的氢含量

氢含量应低于或等于每 100g 焊接金属 5ml 氢。在熔化极活性气体保护焊和钨极惰性气体保护焊中使用的实芯焊丝通常在焊缝金属中引入的氢含量比较低。其它类型焊接耗材的氢含量可从制造商处获知。

耗材的示例在 www.ssab.com 中的出版物 TechSupport 60里给出。如果按照制造商的建议储存耗材，氢含量将保持在预期水平。这尤其适用于所有药皮耗材和助焊剂。

焊接耗材



具有更高强度的焊接耗材
强度较低的焊接耗材

焊接耗材, EN类



焊接耗材, AWS类



保护气体

保护气体的选择和混合取决于焊接情况。
Ar 和 CO₂ 的混合气是最常见的。

各种保护气体混合物的影响

- 易于引弧
- 减少飞溅
- 氧化物含量低

Ar (惰性气体)

Ar/CO₂

(活性气体) CO₂

- 稳定电弧
- 低孔隙率
- 更多焊接飞溅/ 焊嘴堵塞
- 焊缝金属具有高焊透性

保护气体混合物的实例

焊接方法	电弧类型	位置	保护气体
熔化极活性气体保护焊, 实芯焊丝	短弧	全焊位	其余 18-25% CO ₂ 。 Ar
熔化极活性气体保护焊, 实芯焊丝	短弧	全焊位	其余 18-25% CO ₂ 。 Ar
熔化极活性气体保护焊, 实芯焊丝	喷弧	水平 (PA, PB, PC)	其余 15-20% CO ₂ 。 Ar
熔化极活性气体保护焊, 药芯焊丝	喷弧	全焊位	其余 15-20% CO ₂ 。 Ar
熔化极活性气体保护焊, 金属药芯焊丝	喷弧	水平 (PA, PB, PC)	其余 15-20% CO ₂ 。 Ar
机器人焊或熔化极活性气体保护自动焊接	喷弧	水平 (PA, PB, PC)	其余 8-18% CO ₂ 。 Ar
钨极惰性气体保护焊	喷弧	全焊位	100% 纯氩气 (Ar)

在所有基于保护气体的焊接方法中, 保护气体的流量取决于焊接情况。作为一般原则, 保护气体流量 (l / min) 应设置为与气体喷嘴的内径 (mm) 相同的数值。



Strenx® 钢焊接的额外建议

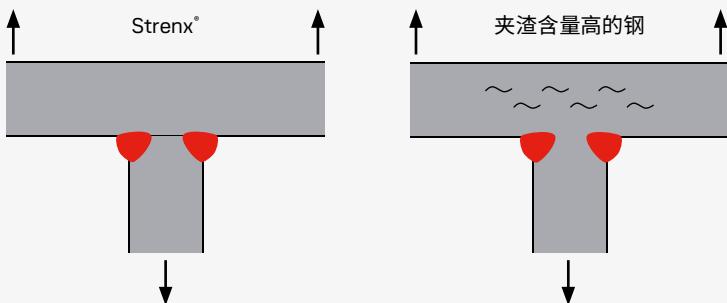
Strenx®牌号产品的硫和磷等杂质含量非常低。这有助于在 HAZ区域和未受影响的母体金属中形成有利的机械性能。此外，在热裂纹和层状撕裂方面也增加了对焊接不连续性的抵抗力。

层间撕裂是由于钢板内部存在与钢板表面平行的夹杂物，而拉伸载荷施加在与钢板表面垂直的方向上而导致的结果。

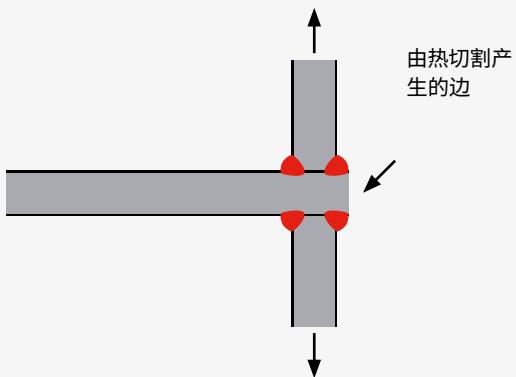
对于承受垂直于钢板表面的载荷的焊缝，可通过将焊缝远离钢板边缘布置来避免缺陷。对于更薄的样板中的焊缝，热切割产生的边缘比剪切和冲裁有更高的表面质量。

热裂纹

- 在焊接之前，确保焊缝没有油和油脂等污染物。使用合适的方法清除这些物质。



层状撕裂。具有很高夹渣含量的钢和 Strenx® 钢之间的差异



建议在T形焊缝中使用热切割边，使焊缝靠近切割边

对于各类钢材的焊接，通常应采取避免不连续的预防措施。有关此问题的其它信息，请在 www.ssab.com 下载TechSupport 47。

在带有底漆的Strenx® 钢上焊接

可以订购带有底漆的 Strenx® 牌号。由于其锌含量低，可以直接在底漆上进行焊接。该底漆可以容易地在焊缝周围的区域刷去 或打磨掉。在焊接之前清除底漆可以使焊缝中的孔隙率降至最低，并且便于在除水平之外的位置进行焊接。如果在焊缝坡口制备中留下底漆，则焊缝金属的孔隙率将会有所增加。熔化极活性气体保护焊接工艺，采用碱性类型的药芯焊丝，和手工焊条电弧焊接工艺进行焊接，使孔隙率达到最低。在所有焊接操作中，必须保持良好的通风，以避免对焊工及其周围环境产生有害影响。欲了解更多详情，请从 www.ssab.com.hk/downloads-center 下载TechSupport 25。



为了获得最佳结果，可以去除底漆。

焊接订购的带有油膜的 Strenx® 冷轧产品

为了避免腐蚀损伤，这种薄钢板通常涂有薄油膜。油膜很薄，不会产生任何孔隙问题。在焊接期间油被气化并快速消失。

焊后热处理

Strenx® 产品，除 Strenx® 1100 E, Strenx® 1300 E 和 Strenx® 1100MC 外，都可以通过焊后热处理来消除应力，尽管很少需要这样做。不建议对这三种钢进行焊后热处理，因为该措施可能会影响整个结构的机械性能。有关合适的温度和保温时间的更多详情，请联系SSAB。

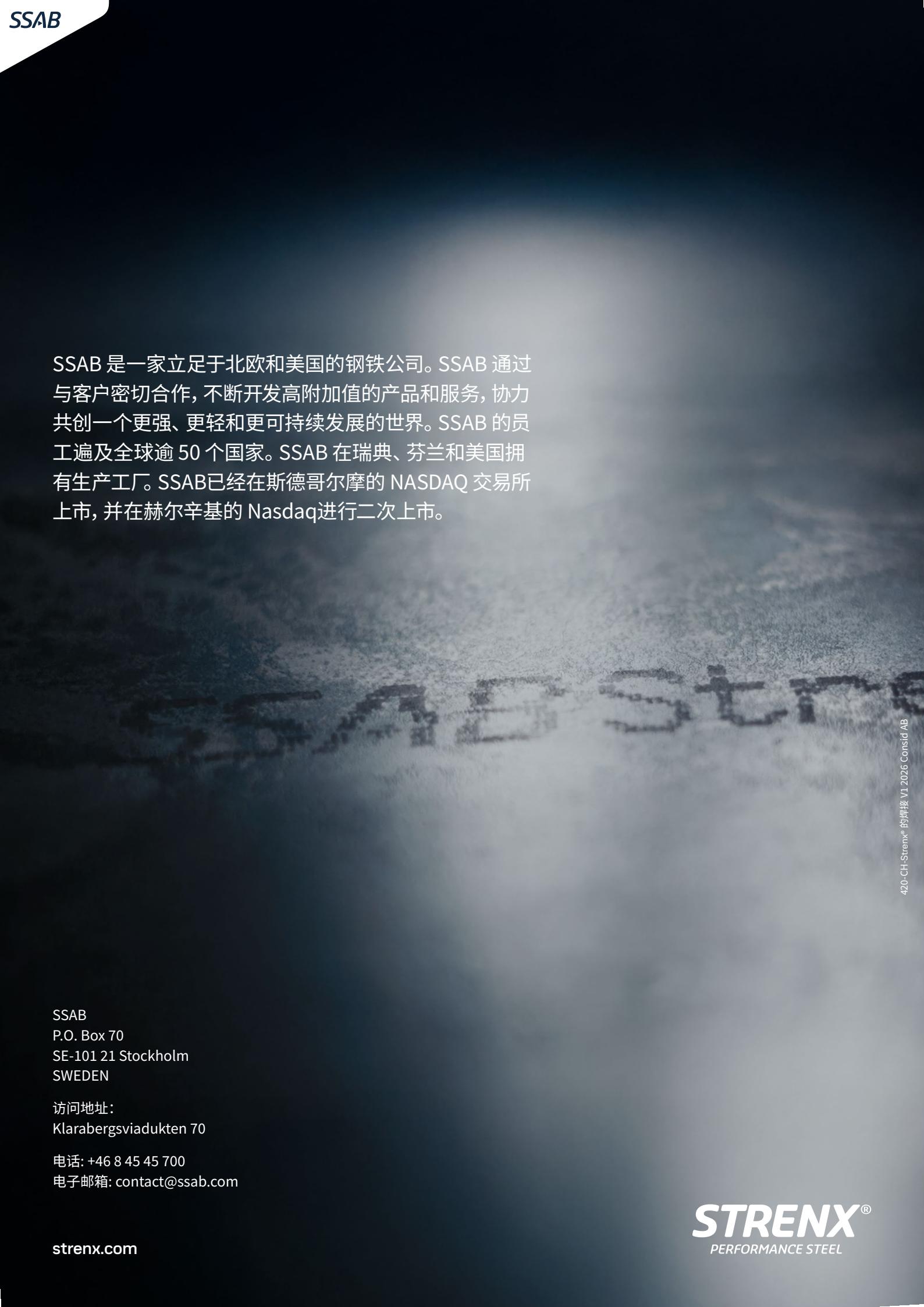
储存

如果Strenx®储存在杂质可能积聚在薄板表面上的环境中，则必须采取一些预防措施。为了避免焊接缺陷，在焊接之前可能需要对钢板进行某种形式的清洁。

材料分组符合欧洲标准EN 15608

当根据欧洲标准执行焊接工艺评定时，这些钢组设置为：

钢材	厚度 [mm]	材料分组依据 ISO/TR 15608
Strenx® 700 E	≤ 53.0	3.2
Strenx® 700 E	> 53.0	3.1
Strenx® 100 E	所有板厚	3.1
Strenx® 900 E, 960 E, 1100 E, 1300 E	所有板厚	3.2
Strenx® 100 XF, 110 XF, 700MC Plus, Strenx® 以 MC、Tube MH、Tube MLH 结尾的牌号和所有型材牌号	所有薄板厚度	2.2
Strenx® 900 Plus, 960 Plus, Tube 960 QLH	所有薄板厚度	3.2



SSAB 是一家立足于北欧和美国的钢铁公司。SSAB 通过与客户密切合作，不断开发高附加值的产品和服务，协力共创一个更强、更轻和更可持续发展的世界。SSAB 的员工遍及全球逾 50 个国家。SSAB 在瑞典、芬兰和美国拥有生产工厂。SSAB已经在斯德哥尔摩的 NASDAQ 交易所上市，并在赫尔辛基的 Nasdaq 进行二次上市。

SSAB
P.O. Box 70
SE-101 21 Stockholm
SWEDEN

访问地址：
Klarabergsviadukten 70

电话: +46 8 45 45 700
电子邮箱: contact@ssab.com

strenx.com

STRENX®
PERFORMANCE STEEL