

Hardox 悍达钢焊接指导手册





Hardox 悍达钢板的焊接

Hardox 耐磨钢板集优异的使用性能与良好的焊接性于一身。可采用任何常规的焊接方法将这些钢板与其他可焊钢材进行焊接。

本手册旨在简化、改善焊接工艺并提高焊接效率。它提供了预热、层间温度、热输入、焊材选用等方面的建议，让所有用户充分使用到 Hardox 钢材的优异性能。

目录

影响焊接结果的重要参数	5
焊接耗材	5
焊材氢含量要求	6
不锈钢焊材	7
保护气体	8
热输入	9
冷却时间 $t_{8/5}$	10
焊接顺序与坡口间隙	11
预热和层间温度	11
氢致裂纹	12
Hardox 的预热和层间温度	12
层间温度	14
预热方法及测量	14
表面耐磨堆焊	15
减少焊接变形的建议	16
Hardox 带底漆焊接	19
焊后热处理	19

Hardox

Hardox 是 SSAB 生产的一种耐磨钢板品牌。Hardox 耐磨钢板广泛应用于各种气候条件、地域和环境。Hardox 的耐磨性能深受全球用户的信赖。Hardox 可提高设备的使用性能并且最大限度增加各种应用的使用寿命、诸如挖掘机、轮式装载机、自卸车车身、矿用卡车、输送机、溜槽、集装箱、压碎机、破碎机、混合机、筛网、拆解工具和船舶等。对于车间生产，可以缩短交货周期、削减生产成本。

表 1. Hardox 机械性能

机械性能					
钢材级别	硬度 [HBW] 最小 - 最大	屈服强度 ¹ (MPa)	延伸率 A ₅ ¹ (%)	冲击韧性 CVL ¹ t=20 mm	厚度 (mm)
Hardox 悍达 HiTuf	310 – 370	850	14	95J – 40 C	40 – 160
Hardox 悍达 400	370 – 430	1000	10	45J – 40 C	3 – 130
Hardox 悍达 450	425 – 475	1300	3 ²		0.7 – 2.10
Hardox 悍达 450	425 – 475	1100 – 1300	10	50J – 40 C	3 – 130
Hardox 悍达 500	450 – 540	1250		35J – 40 C	4 – 80
Hardox 悍达 550	525 – 575			30J – 40 C	10 – 50
Hardox 悍达 600	570 – 640			20J – 40 C	8 – 51
Hardox 悍达 Extreme	57 – 63 ³			<15J – 40 C	8 – 20

1. 典型值

2. A₈₀

3. HRC

表 2. 化学成分

化学成分（炉前分析）									
钢材级别	含C量 % (最大)	含Si量 % (最大)	含Mn量 % (最大)	含P量 % (最大)	含S量 % (最大)	含Cr量 % (最大)	含Ni量 % (最大)	含Mo量 % (最大)	含B量 % (最大)
Hardox 悍达 HiTuf	0.20	0.60	1.60	0.020	0.020	0.70	2.0	0.70	0.005
Hardox 悍达 400 ¹	0.15	0.70	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004
Hardox 悍达 450 ²	0.18	0.25	1.30	0.015	0.004	0.10	0.10	0.04	0.003
Hardox 悍达 450	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.50	0.60	0.005
Hardox 悍达 500	0.30	0.70	1.60	0.020	0.010	1.50	1.50	0.60	0.005
Hardox 悍达 550	0.37	0.50	1.30	0.020	0.010	1.40	1.40	0.60	0.004
Hardox 悍达 600	0.47	0.70	1.00	0.015	0.010	1.20	2.50	0.70	0.005
Hardox 悍达 Extreme	0.47	0.50	1.0	0.015	0.020	1.20	2.50	0.80	0.005

1. 20mm 厚度钢板的最大值

2. 钢板厚度 0.7 – 2.10 mm

影响焊接结果的重要参数

焊接前，先清除待焊区的水分、油迹、锈蚀或其它任何杂质。除良好的焊接清洁状态外，以下方面也非常重要：

- ▶ 焊接耗材的选择
- ▶ 预热和层间温度
- ▶ 热输入
- ▶ 焊接顺序及坡口间隙

焊接耗材

对碳素钢和低合金焊材的强度要求

对于 Hardox，通常建议使用屈服强度不高于500 MPa 的碳素钢和低合金焊材。对于厚度在 0.7—6.0 mm 之间的 Hardox 400 和 450，可使用强度较高的焊材（ R_e 最高可以使用屈服强度900MPa的焊材）。低合金焊材可增加焊缝金属的硬度，进而降低焊缝金属的磨蚀率。如果焊缝金属的耐磨性能至关重要，焊缝的盖面层可以采用耐磨焊材进行耐磨堆焊。此外，表 3 为 Hardox 钢板焊材推荐的 EN 标准和 AWS 标准的分类号。

表 3：Hardox 钢板推荐的焊材

焊接方式	AWS 分类	EN 分类
MAG，实芯焊丝	AWS A5.18 ER70X-X AWS A5.28 ER80X-X	EN ISO 14341-A- G 38xxxxxx EN ISO 14341-A- G 42xxxxxx
MAG，金属粉芯焊丝	AWS A5.18 E7XC-X AWS A5.28 E8XC-X	EN ISO 17632-A- T 42xxxxH5 EN ISO 17632-A- T 46xxxxH5
MAG，药芯焊丝	AWS A5.29 E7XT-X AWS A5.29 E8XT-X AWS A5.20 E7XT-X	EN ISO 17632 -A- T 42xxxxH5 EN ISO 17632 -A- T 46xxxxH5
MMA	AWS A5.5 E70X AWS A5.5 E80X AWS A5.1 E70X	EN ISO 2560-A- E 42xxxxH5 EN ISO 2560-A- E 46xxxxH5
SAW	AWS A5.23 F7X AWS A5.23 F7X AWS A5.17 F7X	EN ISO 14171-A- S 42xxx EN ISO 14171-A- S 46xxx
TIG	AWS A5.18 ER70X AWS A5.28 ER80X	EN ISO 636-A- W 42xx EN ISO 636-A- W 46xx

注意： X 表示一个或多个字符

焊材含氢量要求

利用碳素钢或低合金焊材进行焊接时，每 100 克焊缝金属中的含氢量应小于或等于 5 毫升。

MAG 焊和 TIG 焊所采用的实芯焊丝能获得含氢量较低的焊缝金属。有关其他类型焊材中的氢含量信息应向相应的焊材生产厂商索取。

如果按照制造商的建议存放焊材，则可以使氢含量保持在要求的水平。此要求适用于所有涂层耗材与焊剂。

不锈钢焊材

奥氏体不锈钢耗材可用于所有 Hardox 产品的焊接，如表 4 所示。除了 Hardox600,Hardox Extreme 以外，其它的 Hardox 材料可在常温 (+5 – 20 ° C)下焊接，无需预热。

SSAB 建议将 AWS 307 焊材作为首选，其次考虑符合 AWS 309 的焊材。这类焊材可以达到焊缝金属的屈服强度约 500 MPa。

AWS 307 类型的抗热裂纹性优于 AWS 309。应当注意的是，制造商很少说明不锈钢耗材的氢含量，因为氢对不锈钢焊材性能的影响远没有对碳素钢或低合金焊材性能的影响大。

表 4：推荐用于 Hardox 钢板的不锈钢焊材

焊接方法	AWS 类别	EN 类别
MAG，实芯焊丝	AWS 5.9 ER307	首选： EN ISO 14343-A: B 18 8 Mn/ EN ISO 14343-B: SS307 第二选择： EN ISO 14343-A: B 23 12 X/ EN ISO 14343-B: SS309X
MAG，金属粉芯焊丝	AWS 5.9 EC307	首选： EN ISO 17633-A: T 18 8 Mn/ EN ISO 17633-B: TS307 第二选择： EN ISO 17633-A: T 23 12 X/ EN ISO 17633-B: TS309X
MAG，药芯焊丝	AWS 5.22 E307T-X	首选： EN ISO 17633-A: T 18 8 Mn/ EN ISO 17633-B: TS307 第二选择： EN ISO 17633-A: T 23 12 X/ EN ISO 17633-B: TS309X
MMA	AWS 5.4 E307-X	首选： EN 1600: E 18 8 Mn 第二选择： EN 1600: E 19 12 X
SAW	AWS 5.9 ER307	首选： EN ISO 14343-A: B 18 8 Mn/ EN ISO 14343-B: SS307 第二选择： EN ISO 14343-A: S 23 12 X/ EN ISO 14343-B: SS309X
TIG	AWS 5.9 ER307	首选： EN ISO 14343-A: W 18 8 Mn/ EN ISO 14343-B: SS307 第二选择： EN ISO 14343-A: W 23 12 X/ EN ISO 14343-B: SS309X

注意： X 表示一个或多个字符

保护气体

通常 Hardox 钢板使用的保护气体与碳素钢和低合金钢板通常选择的保护气体相同。

Hardox 钢板 MAG 焊接所用保护气体通常为包含氩气 (Ar) 和二氧化碳 (CO₂) 的混合气体。会加入少量氧气 (O₂) 混入 Ar 和 CO₂ 中, 达到稳弧的目的以及减少焊接飞溅。手动焊接时建议使用氩气中混有 18—20 CO₂ 的保护混合气, 有助于获得良好的熔合以及合理的飞溅量。如果使用自动或机器人焊接, 则使用氩气中混有 8—10 CO₂ 的保护气, 以起到提高生产效率以控制飞溅量。在图 1 查看不同混合气体配比的影响。表 3 为用于不同焊接方法的保护气体的推荐。表 5 所述为可用于短弧焊接和喷射弧焊接的混合气体配比。

图 1: 保护气体混合配比及其对焊接操作的影响

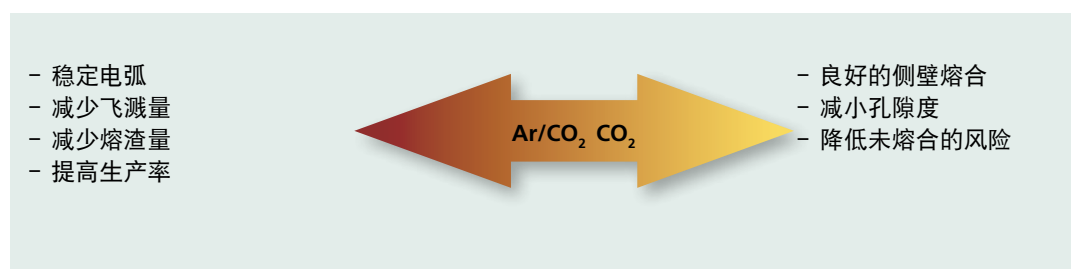


表 5: 混合气体配比及使用推荐

焊接方法	电弧类型	位置	保护气体
MAG, 实芯焊丝	短弧	全位置	氩气中含有 18 25% CO ₂
MAG, 粉芯焊丝	短弧	所有位置	氩气中含有 18 25% CO ₂
MAG, 实芯焊丝	喷射电弧	水平 (PA, PB, PC)	氩气中含有 15 20% CO ₂
MAG, FCAW	喷射电弧	全位置	氩气中含有 15 20% CO ₂
MAG, MCAW	喷射电弧	水平 (PA, PB, PC)	氩气中含有 15 20% CO ₂
机器人和自动化 MAG	喷射电弧	水平 (PA, PB, PC)	氩气中含有 8 18% CO ₂
TIG		全位置	100% Ar

注意: 气体混合物包含三种成分, 即氩气中有时会混入 O₂、CO₂, 以便优化焊接性能。

对于所有使用保护气体的焊接方法, 保护气体流量取决于焊接条件。一般推荐是, 应当将保护气体流 (单位: l / min) 设定为与气体喷嘴 (单位: 毫米) 内径相同的数值。

热输入

热输入 (Q) 是指过渡到单位长度母材上的热量。根据以下公式计算热输入：

$$Q = \frac{k \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \text{ kJ/mm}$$

Q = 热输入 (kJ/mm)
k = 电弧热效率 (无量纲)
U = 电压
I = 电流
v = 焊接速度 (mm/min)

不同的焊接工艺的热效率不同。表 6 说明了不同焊接方法热效率的近似值。

表 6：不同焊接方法的热效率

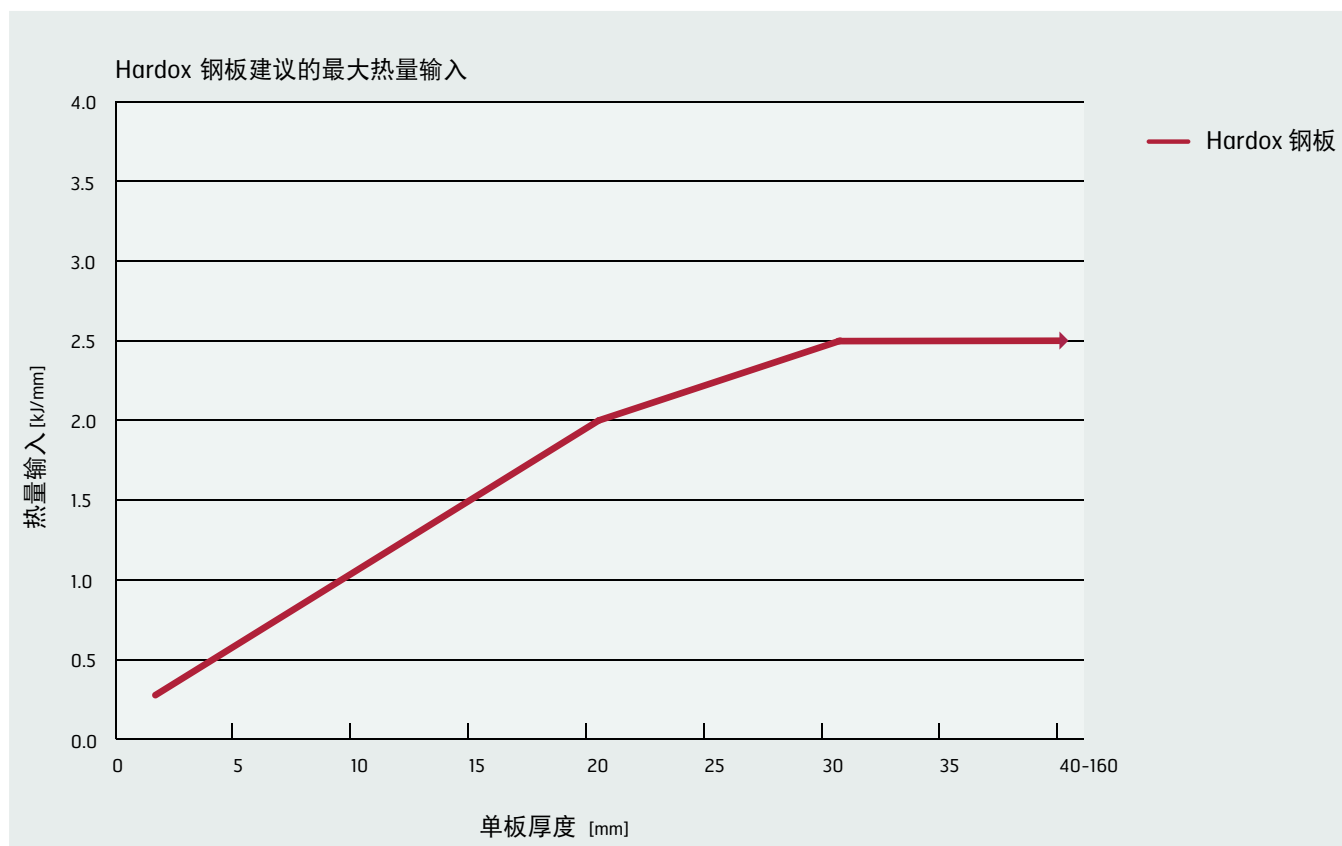
焊接方法	热效率 (k)
MAG	0.8
MMA	0.8
SAW	1.0
TIG	0.6

过高的热输入会增加热影响区 (HAZ) 的宽度,进而损害热影响区的机械性能以及耐磨性。较低热输入焊接具有如下优点：

- ▶ 增加 HAZ 的耐磨性
- ▶ 减少变形（单道焊缝）
- ▶ 提高接头的韧性
- ▶ 增加接头的强度

但过低的热输入也会对接头冲击韧性造成不利影响（t_{8/5} 值小于 3 秒）。图 2 指明了 Hardox 建议的最大热量输入 (Q)。

图 2：Hardox 钢板建议的最大热量输入



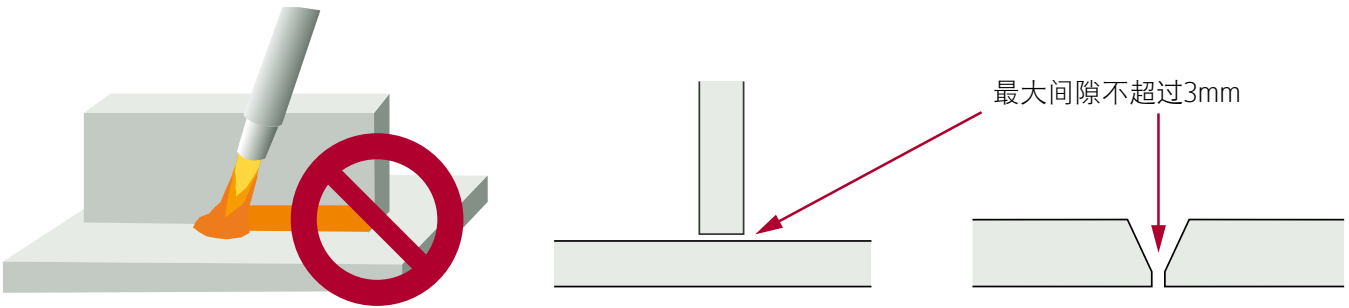
冷却时间 $t_{8/5}$

冷却时间 ($t_{8/5}$) 是指接头从 800 °C 冷却至 500 °C 所用的时间，这是决定接头最终微观组织的重要因素。通常会提供结构钢焊接的建议冷却时间，以便优化焊接工艺，满足诸如最小冲击韧性等特定要求。通过 SSAB 软件 – “WeldCalc” 可以计算不同 Hardox 等级的建议最长冷却时间。

焊接顺序和坡口间隙

开始点焊操作前，保证坡口根部间隙不大于 3 mm，参阅图 3。尽量让坡口间隙大小保持一致。此外，避免在高应力区域起/熄弧。如果可能，应在距角落至少 5—10 cm 的地方开始和停止焊接，参阅图 3。当需要焊接至钢板边缘时，可以采用引弧，收弧板。

图 3：避免在角落等高应力区域起/熄弧。坡口间隙大小不得超过 3 mm。



预热和层间温度

必须遵守最低预热温度的推荐以及预热方式及测量方法，避免出现氢致裂纹。

钢材合金元素对预热和层间温度选择的影响

合金元素的独特配比可优化 Hardox 钢板的机械性能。合金元素的配比是选择 Hardox 钢板焊接的预热及层间温度的重要依据，也是计算碳当量的原则。碳当量通常表示为 CEV 或者 CET，具体的计算公式如下：

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

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

上述两个公式采用体现在出厂材质单上的合金元素质量百分比计算。碳当量越高，通常所需的预热和层间温度也越高。SSAB 产品数据表提供了 Hardox 钢板的典型碳当量。

氢致裂纹

得益于相对低的碳当量，Hardox 悍达钢抗氢致裂纹的能力优于其他耐磨钢板。

如果遵守以下建议，可最大程度减少氢致裂纹的风险：

- ▶ 将焊接区域预热至建议的最低温度
- ▶ 根据 SSAB 建议测量预热温度
- ▶ 使用焊缝金属含氢量不大于 5ml/100g 的焊材
- ▶ 避免待焊处有杂质，诸如铁锈、油脂、油迹、霜冻等
- ▶ 使用 SSAB 推荐的焊材等级
- ▶ 应用正确的焊接顺序，以便最大限度减小残余应力
- ▶ 避免根部间隙超过 3 mm，参阅图 3

Hardox 的预热和层间温度

表 7 和 8 提供了 Hardox 焊接推荐的最低预热温度和最高层间温度。除非另有说明，这些数据适用于碳素钢或者低合金焊材。

- ▶ 如果需要焊接的钢板厚度不同，但钢板等级相同，则由较厚的钢板决定所需预热和层间温度，参阅图 4。
- ▶ 当焊接不同钢板类型时，由预热温度最高的钢板决定所需预热和层间温度。
- ▶ 表 7 适用于焊接热输入为 1.7 kJ/mm 或更高的焊接工艺。如果采用的焊接工艺的热输入是 1.0 — 1.69 kJ/mm，则建议比表 7 推荐预热温度高 25°C。
- ▶ 如果采用焊接工艺的热输入低于 1.0 kJ/mm，则建议使用 SSAB 软件 “WeldCalc”，以便计算出所需的最低预热温度。
- ▶ 如果环境湿度较高或室温低于 +5 °C，则应比表 7 中给出的最低建议预热温度高 25 °C。
- ▶ 对于厚度大于 30 mm 钢板如采用双 V 形对接接头，建议根部偏置于钢板中心线一定距离。

表 7： 建议的预热温度。X 轴表示单板厚度 (mm)。

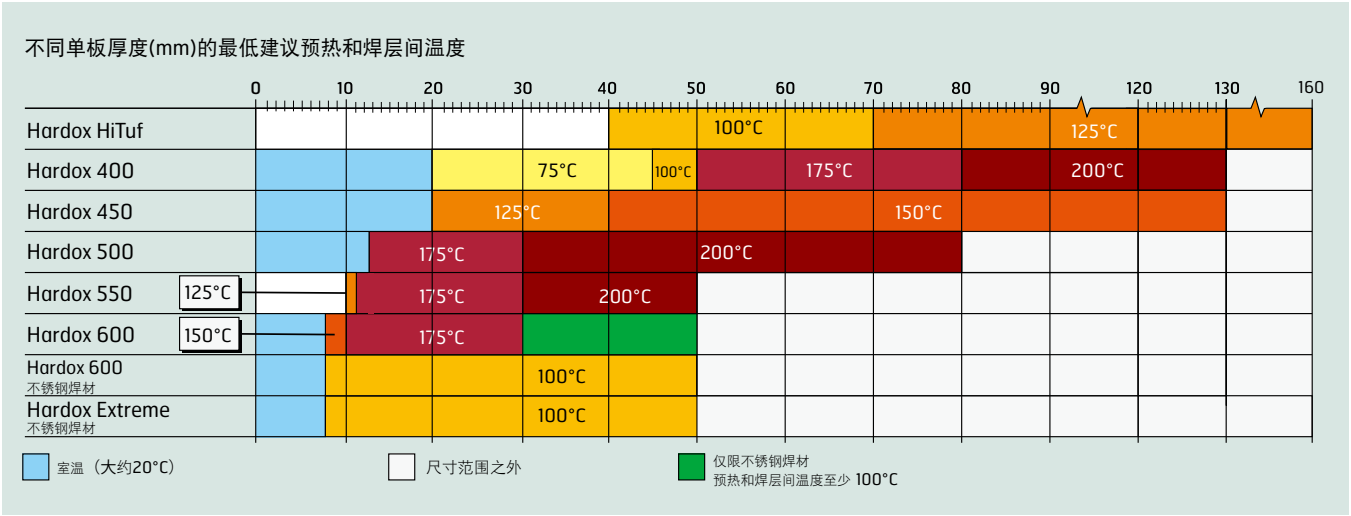
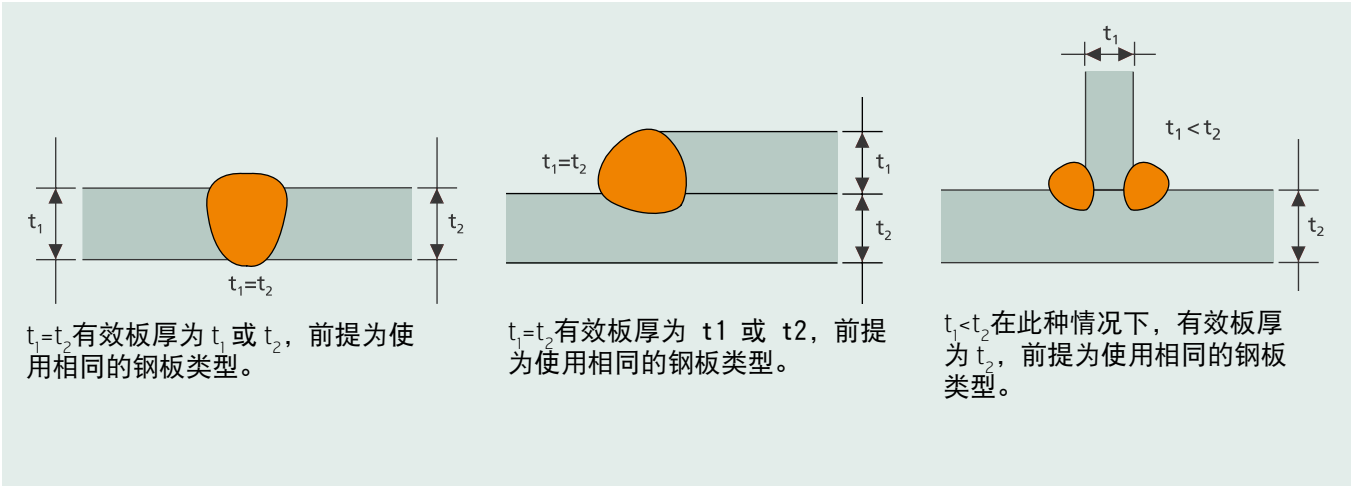


图 4： 示意图表示“单一有效板厚”



层间温度

表 8 提供了推荐的最高层间温度，层间温度为在开始下一道次焊接前焊缝表面或者毗邻焊缝的母材部位的温度。

表 8： 推荐的最高层间温度/预热温度

Hardox HiTuf**	300°C
Hardox 400	225°C
Hardox 450	225°C
Hardox 500	225°C
Hardox 550	225°C
Hardox 600	225°C
Hardox Extreme	100°C

** 在某些情况下，Hardox HiTuf 可使用高达约 400°C 的层间温度。此种情况下，需使用 WeldCalc 软件计算。

热输入高于 1.7 kJ / mm 时，不影响表 7 和 8 提供的最低建议预热和最高层间温度。该信息基于焊接接头在空气中自由冷却。定位点焊和根部焊道同样应该遵守上述的工艺推荐。定位点焊的每个焊点长度至少为 50 mm。定位点焊间的距离根据实际情况确定。

预热及测量

许多的加热方式均可用来预热。由于加热比较均匀，电加热垫预热方式可以达到最好的预热效果。应使用专业的温度测量工具（如接触式测温计）测量预热温度。

建议在工件加热面的背面测温，如图 6 所示。

图 5：电加热垫示例

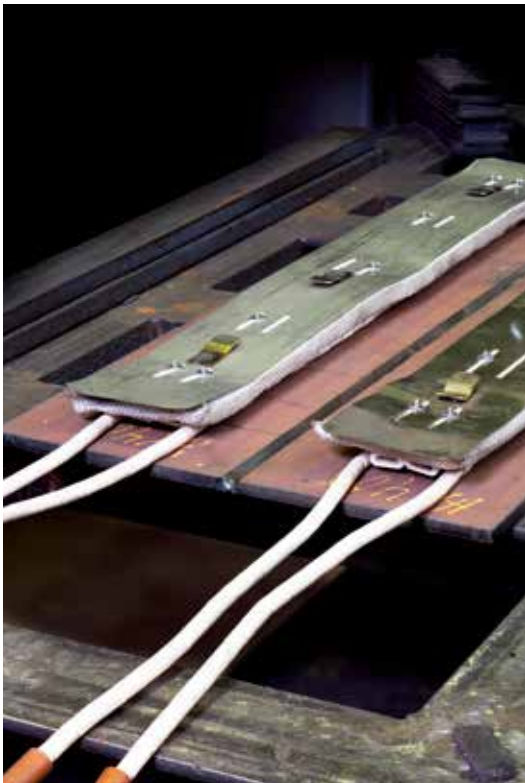
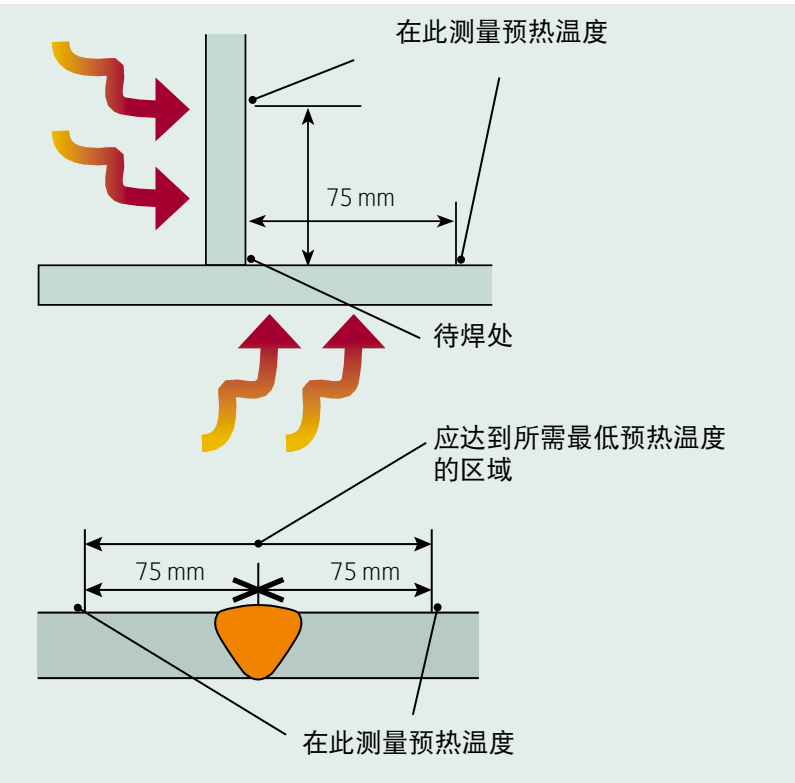


图 6：建议的预热方式



开始测量预热温度前，等待的时间为 2 min/25 mm。在待焊处 75 + 75 mm 的周围区域内应达到最低预热温度，参阅图 6。

表面耐磨堆焊

如果焊缝位于受磨损较大的区域，则应用特定焊材进行耐磨堆焊，以增加焊缝金属的耐磨性。应同时遵守 Hardox 材料以及耐磨材料的堆焊推荐。有些耐磨堆焊焊材所需的预热温度非常高，可能超出 Hardox 钢板建议的最高层间温度。需要注意的是，当使用的预热温度高于 Hardox 钢板的建议最高层间温度时，将降低基板的硬度并导致预热区域耐磨性降低。

最低和最高预热温度与传统焊接工艺相同，参阅表 5。耐磨堆焊基板的有效厚度的确定方法参阅图 7。

图 7：有效厚度定义

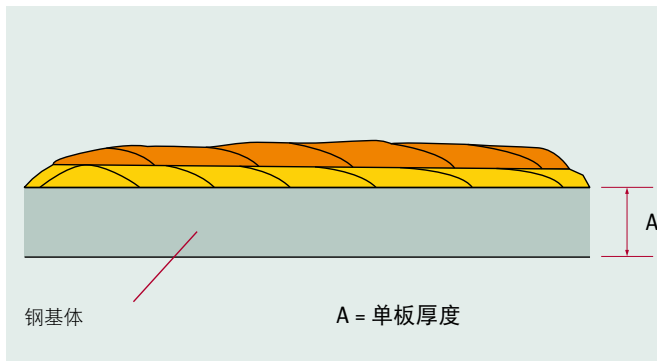
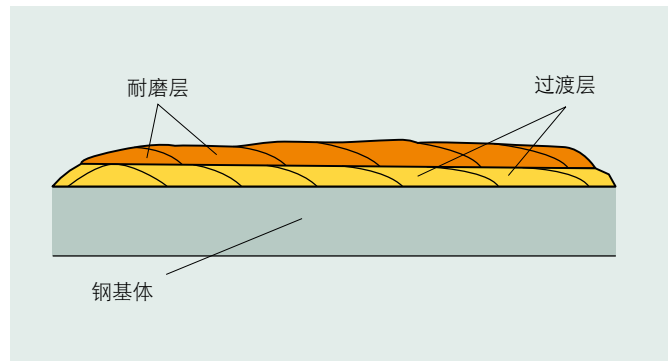


图 8：过渡层与耐磨层的堆焊顺序



最好在待堆焊焊缝或待堆焊钢板与耐磨层之间堆焊一层高韧性的过渡层。过渡层焊材的选择应遵守 Hardox 钢板的焊接推荐。符合 AWS 307 和 AWS 309 系列的不锈钢焊材适用于过渡层，参阅图 8。

减少焊接变形的建议

焊接过程中或者焊后产生的焊接变形与基板的厚度以及所采用的焊接工艺有关。薄板更加易于变形,薄板焊接产生的过大的焊接变形或着烧穿会对焊接造成很大的危害，甚至有时会造成整个结构的失效。

为了最大限度减少焊接变形，应遵守以下建议：

- ▶ 焊接时要使用尽可能小的热输入（单道焊缝）
- ▶ 尽量减少焊缝金属的填充量，参阅图 9
- ▶ 开始焊接前，预先弯曲、固定或让零件弯曲一定角度，以补偿变形，参阅图 10
- ▶ 避免不规则的坡口根部间隙
- ▶ 使用对称焊接，参阅图 9
- ▶ 尽量减少角焊缝的尺寸以及余高
- ▶ 焊接应从拘束度高的区域至拘束度低的自由端
- ▶ 减小点焊之间的间隙
- ▶ 使用反手焊接技术，参阅图 11-12

图 9：焊缝横断面积以及其如何影响角向变形

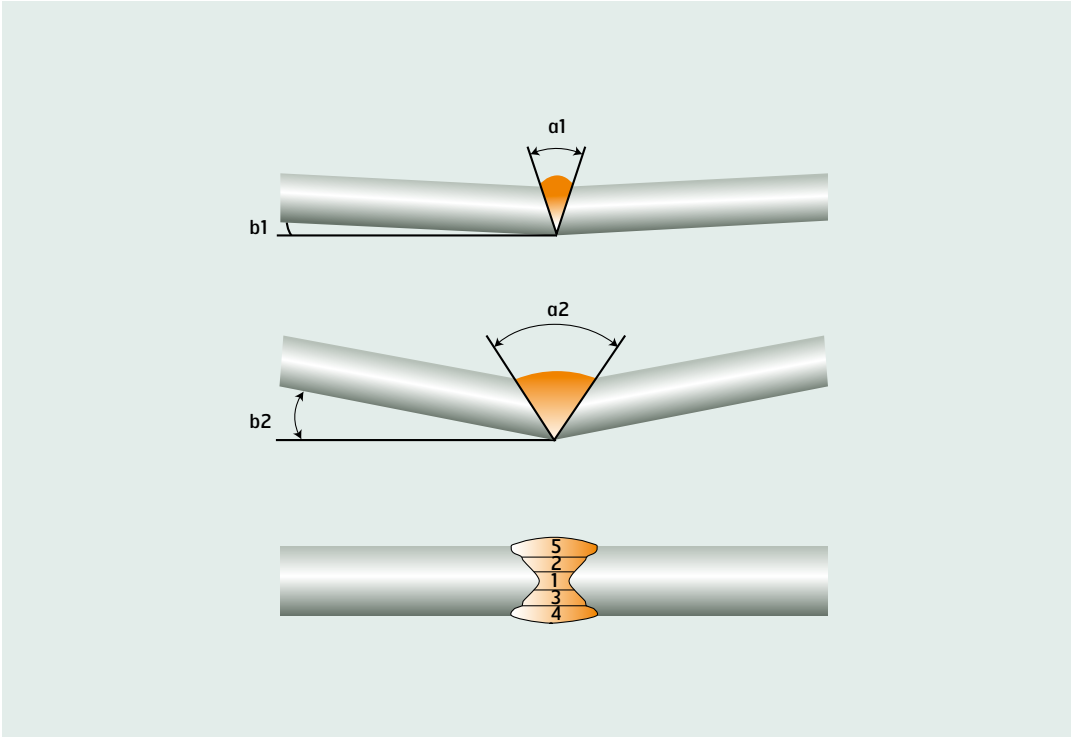


图 10：角接头和单 V 形对接接头的预置变形

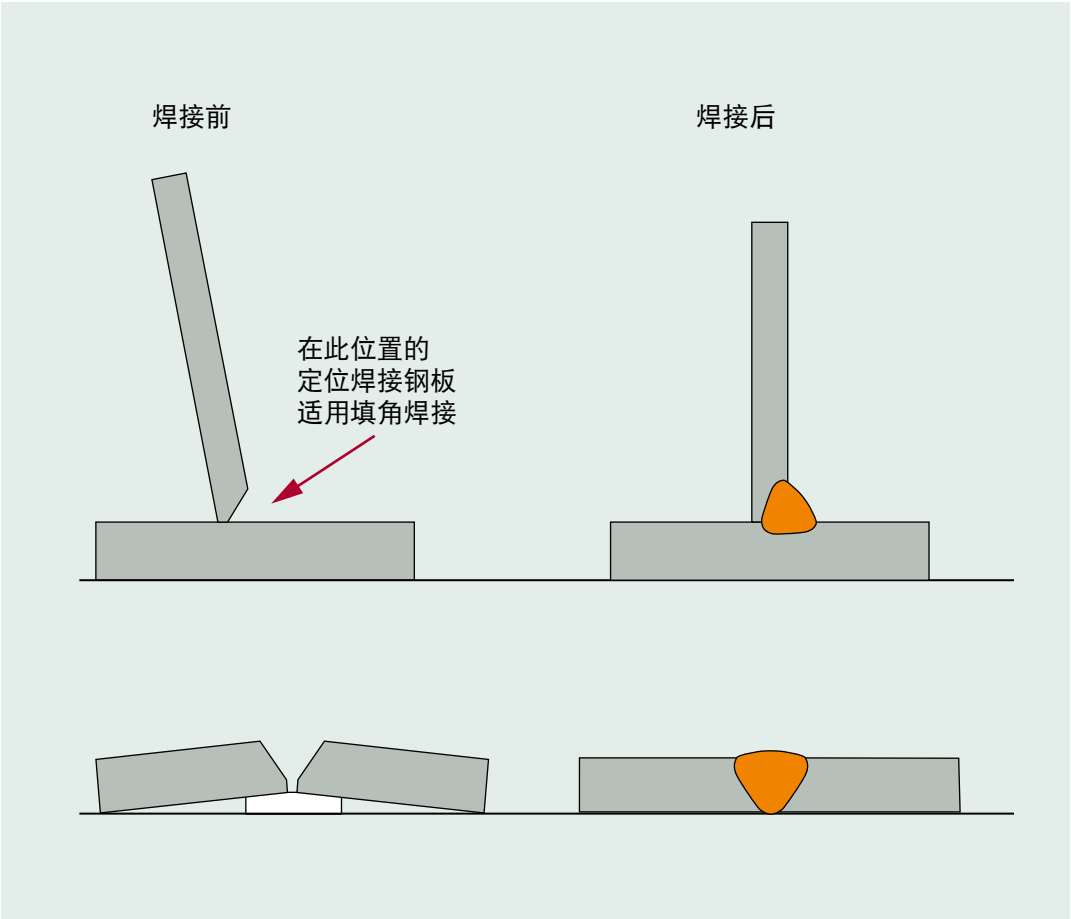


图 11: 使用对称焊接顺序

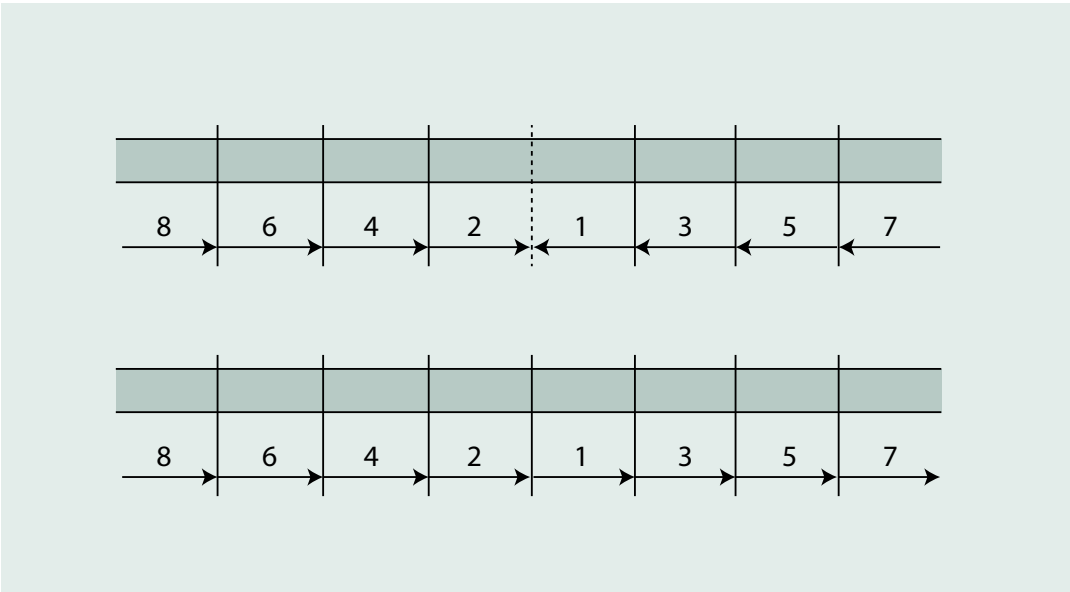
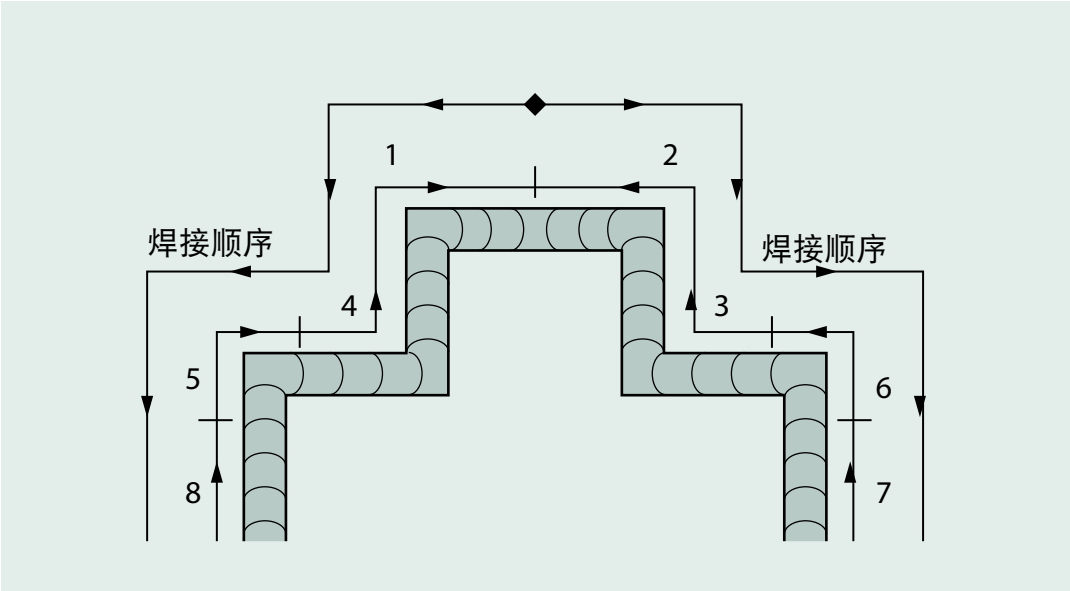


图 12: 反手焊接技术示例



Hardox 带底漆焊接

由于 Hardox 底漆含锌量较低，因此可直接对其进行焊接。可轻松刷去或清除接合处周围的底漆，参阅图 13。最好在焊接前清除底漆，因为如此可最大限度降低焊缝的气孔，并有利于非平焊位置的焊接。如果带底漆焊接，焊缝表面或近表面的气孔可能会略有增加。碱性焊材的 FCAW 焊接可以获得最低的气孔。焊接过程中应保持良好的空气流通条件，在此条件下底漆不会对操作者的健康及环境造成影响。如需详情，可在载“TechSupport #25”文件。

图 13： 如果需要，可轻松清除底漆。



焊后热处理

在非常罕见的情况下，可以对Hardox HiTuf材料进行去应力热处理。其他 Hardox 钢板不宜使用此方法进行应力消除，因为这会影响材料的机械性能。如需了解更多信息，请参阅焊接手册。您可在网站

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与服务，从而创造一个更强、更轻和更可持续发展的世界。

SSAB 的员工遍及全球逾 50 个国家及地区。SSAB 在瑞典、芬兰和美国均建有生产工厂。SSAB 在斯德哥尔摩 NASDAQ OMX Nordic Exchange 交易所上市，并在赫尔辛基 NASDAQ OMX 二次上市。

SSAB
SE-613 80 Oxelösund
瑞典
Tel: 021-67675298
Fax: 021-51687938
www.zqsteel.com.cn

SSAB