

# 团 体 标 准

T/CWAN 0061—2022

---

## 大厚度高强钢窄间隙激光填丝焊接推荐工艺规范

Recommended process specification for narrow gap laser wire filling welding of large thickness  
high-strength steel

2022-09-14 发布

2022-11-01 实施

---

中国焊接协会 发布

## 目 次

前 言.....	2
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语及定义.....	1
4 符号.....	3
5 一般要求.....	3
6 工艺要求.....	5
7 焊接检验.....	7
附录 A.....	10

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的附录 A 为资料性附录。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：哈尔滨焊接研究院有限公司、徐州徐工矿业机械有限公司、长沙天一智能科技有限公司、渤海造船厂集团有限公司、哈尔滨工业大学、南昌航空大学、重庆科技学院、郑州机械研究所有限公司、中船黄埔文冲船舶有限公司、合肥工业大学。

本文件主要起草人：黄瑞生、李柏松、唐方、刘殿宝、徐锴、陈健、曹浩、李俐群、吴满鹏、蒋宝、滕彬、魏兴明、武鹏博、韩鹏薄、赵德民、魏守盼、周坤、李洋、梁晓梅、邹吉鹏、陈玉华、尹立孟、秦健、方乃文、谢吉林、邵丹丹、刘大双、宫建锋、孟圣昊、孙徕博。

# 大厚度高强钢窄间隙激光填丝焊接推荐工艺规范

## 1 范围

本文件规定了高强钢窄间隙激光填丝焊接工艺的一般要求、工艺要求、焊接检验等。  
本文件适用于板厚 $\geq 20$  mm的高强钢窄间隙激光填丝焊。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本标准的条款。凡注日期或版次的引用文件，其后的任何修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，但提倡使用本标准的各方探讨使用其最新版本的可能性。凡不注日期或版次的引用文件，其最新版本适用于本标准。

- GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢
- GB/T 2650 焊接接头冲击试验方法
- GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法
- GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法
- GB/T 8110—2020 气体保护电弧焊用碳钢、低合金钢焊丝
- GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证
- GB/T 18591—2001 预热温度、道间温度及预热维持温度的测量指南
- GB/T 19867.4—2008 激光焊接工艺规程
- GB/T 19869.1—2005 钢、镍和镍合金的焊接工艺评定试验
- GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验
- GB/T 29710 电子束及激光焊接工艺评定试验方法
- GB/T 35085—2018 金属材料焊缝破坏性试验 激光和电子束焊接接头的维氏和努氏硬度试验
- GB/T 39255 焊接与切割用保护气体
- T/CWAN 0002—2018 焊接车间烟尘卫生标准
- T/CWAN 0008—2018 焊接术语-焊接基础
- T/CWAN 0010—2018 焊接术语-焊接检验

## 3 术语及定义

T/CWAN 0008—2018 和 T/CWAN 0010—2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 光丝间距 bare wire spacing

激光束与焊件上表面交点为A，焊丝延长线与焊件上表面相交于点B，A与B两点之间的距离 $D_L$ 为光丝间距。

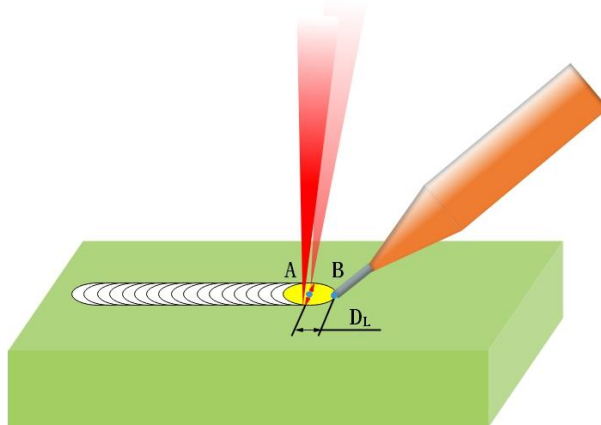


图1 激光填丝焊接光丝间距示意图

### 3.2 摆动激光焊接 oscillating laser welding

激光束通过可编程聚焦镜组实现以一定运动方式、运动速度、运动幅度的振荡激光焊接技术。

### 3.3 双焦点激光焊接 bifocal laser welding

一是通过光学方法将一束光分成两束；二是组合两束独立的激光获得。通过调整不同光斑间距和能量比的激光焊接技术。

### 3.4 窄间隙焊 narrow-gap welding

厚板对接接头，焊前不加工坡口或只加工小角度坡口，并留有窄而深的间隙。一般通过单道多层焊完成整条焊缝的高效率焊接方法。

### 3.5 激光能量密度 laser energy density

焊接区域的激光输入功率与激光束作用在此区域面积的比值。

### 3.6 激光入射角度 laser incidence angle

激光束与焊接平面法线的夹角 $\alpha$ 为激光入射角度。

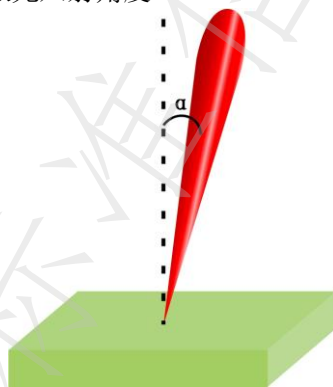


图2 激光入射角示意图

### 3.7 激光填丝焊 laser welding technique with filler wire

利用激光束做为热源将送进的焊丝及母材熔化形成焊缝的焊接方法。

### 3.8 坡口宽度 groove width

坡口宽度是指窄间隙坡口的上表面宽度，用 $b$ 标识如图所示，坡口宽度应大于该平面光斑的直径 $D$ ，即 $b > D$ ，摆动激光焊接或双焦点激光焊接时， $b > D + 2a$ 或 $b > D + L_d$ ，其中 $a$ 为激光束运动半径， $L_d$ 为双焦点激光间距。

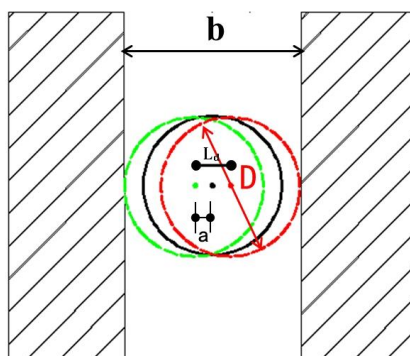


图3 窄间隙坡口示意图

## 4 符号

表1给出本文件所用到的符号及相应的含义说明。

表1 符号及说明

符号	说明	单位
$t_1$	坡口钝边厚度	mm
$t_2$	母材厚度	mm
$b$	坡口组配间隙	mm
$\lambda$	坡口角度	mm
$C_j$	激光束运动方式	(°)
$a$	激光束运动半径	(—)
$V_f$	激光束运动频率	mm
$P$	激光功率	Hz
$V_h$	焊接速度	kW
$D_f$	离焦量	m/min
$Q$	保护气体流量	mm
$W$	焊缝宽度	L/min
$H$	焊缝余高	mm
$D_L$	光丝间距	mm
$V_s$	送丝速度	m/min
$L_d$	双焦点间距	mm
$E_R$	双焦点能量比	(—)

## 5 一般要求

### 5.1 人员

5.1.1 焊接操作人员应经过系统的理论学习和培训，具备足够的焊接专业知识和技能，取得相应考核机构颁发的焊接机器人操作工技能证书，并确保该证书在有效期内。

5.1.2 焊接检验人员应经过相关检验知识理论学历和培训。

5.1.3 无损检测人员应取得GB/T 9445中规定的2级以上资格证书，或依据其他相关标准进行培训、考核，并取得相应的资格证书。

### 5.2 设备

5.2.1 激光器、激光枪头、送丝设备、相关仪器仪表等应经过检定合格方可使用，并按照相关要求定期进行检修及检定。

5.2.2 设备在安装、搬迁、大修或停止使用一年以上时，应进行检定并进行工艺参数确认，合格后方可使用。

5.2.3 激光焊接设备连入的电源网路电压波动范围不应超过额定值的±10%，否则应配备稳压器。

5.2.4 激光器使用一段时间或者更换激光发生物质后，应检查激光功率输出情况，并进行工艺参数确认。

5.2.5 设备应具有侧吹保护装置，以免激光焊接中产生的高压金属蒸气粒子污染激光枪头保护镜片。

5.2.6 设备应安装惰性气体保护装置。推荐使用长方形拖罩气体保护装置，可以增加气体保护范围。

### 5.3 材料

5.3.1 高强钢板及焊丝应具有生产厂家提供的质量保证书，如有必要应按照相关标准进行复验。

5.3.2 高强钢板应符合GB/T 1591-2018等标准相关规定。为了减少气孔及裂纹等缺陷的产生，高强钢板应在焊接前12h以内。

5.3.3 高强钢焊丝应符合GB/T 8110-2020等相关规定。

5.3.3.1 成品焊丝由制造厂质量检查部门安批检验

5.3.3.2 焊丝应采用适当的内外包装，以防止在运输和存放过程中损坏。

5.3.3.3 每个焊丝盘上的焊丝应为连续焊丝，焊丝不应有扭结、折弯、搭接或者嵌接等缺陷，焊丝缠绕的外端应牢固，明显易找。

5.3.4 保护气体应符合GB/T 39255相关规定。

5.3.4.1 焊接厚度较大的高强钢板时，建议使用较大流量惰性保护气体确保熔池区域完全被保护。

5.3.4.2 焊接较为重要的高强钢构件时建议使用纯度为99.999%Ar或He进行气体保护，也可以使用2种气体的混合气。

### 5.4环境

5.4.1 激光填丝焊接环境应保持洁净和通风良好，为防止激光器结露，工作环境的温度、湿度应控制在对应型号激光器结露点以上。

5.4.2 操作区照度不小于300 lx，噪声不大于80 dB，焊接烟尘的最高允许浓度依据T/CWAN 0002中规定的不得大于4 mg/m<sup>3</sup>。

### 5.5坡口制备

采用对接接头进行焊接试验，可采用单面焊接或双面焊接，坡口宽度应大于该平面激光束光斑的直径，坡口角度加工精度为 $\pm 0.5^\circ$ ，坡口宽度加工精度为 $\pm 1\text{mm}$ ，推荐采用表2的坡口形式。

表2 推荐采用坡口形式

单位为毫米

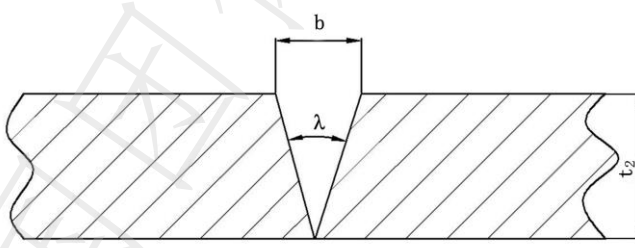
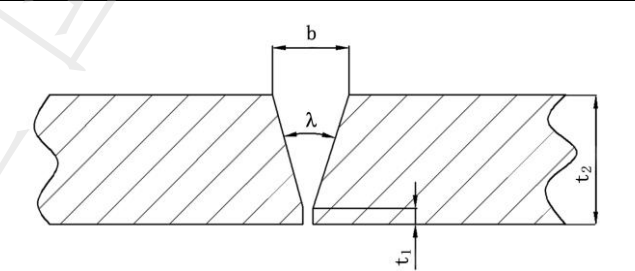
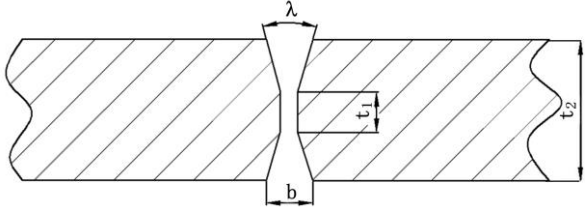
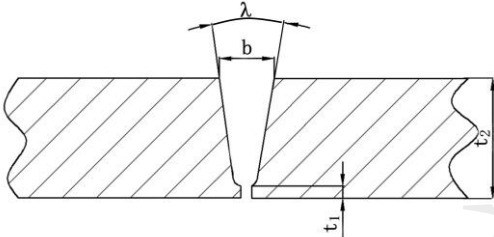
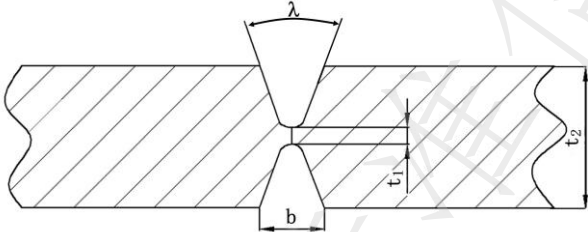
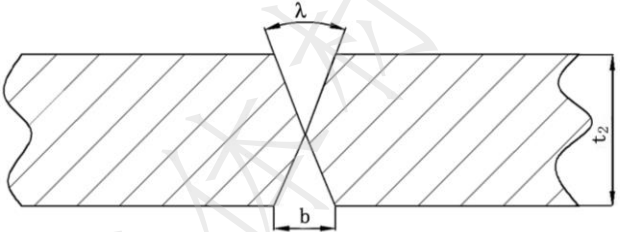
序号	坡口形式	坡口种类	规格尺寸		
			坡口角度	坡口宽度	钝边
1		V型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	0
2		Y型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	$t_1 \geq 1.5$

表2 推荐采用坡口形式（续）

3		双Y型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	$t_1 \geq 1.5$
4		U型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	$t_1 \geq 1.5$
5		双U型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	$t_1 \geq 1.5$
6		双V型坡口	$\lambda \leq 4^\circ$	$3 \leq b \leq 10$	0

## 6 工艺要求

### 6.1 焊前准备

6.1.1 首先在定位焊之前用砂纸打磨坡口，装配间隙要求见表3。将试板竖直放于立焊夹具中，用钢直尺横卡于工件表面观察错边量，应使两试板处于相对平行的位置，尽量减少错边，错边要求见表4。定位焊分别在试板的两端进行，必须焊接牢固，防止开裂。装配结束后必须交检验人员验收，合格后方可施焊。验收后未及时施焊，应重新清理，达到要求后才能焊接。

6.1.2 定位焊宜采用激光焊或激光填丝焊。一般定位焊长度在 2 mm~5 mm 之间，间距一般控制在 50 mm~150 mm 之间。

6.1.3 高强钢试板应根据厚度设计反变形，保证焊后焊接试板平整和根部不致开裂。

表3 对接试件焊接装配间隙要求

单位为毫米

母材厚度	$20 \leq t_2 \leq 100$	$100 < t_2$
允许的局部间隙	$\leq 0.5$	$\leq 1$

表4 对接试件焊接装配错边量要求

单位为毫米

母材厚度	$20 \leq t_2 \leq 50$	$50 < t_2 \leq 100$	$100 < t_2$
允许的错边量	$\leq 0.1$	$\leq 0.5$	$\leq 1$

## 6.2 预热、道间温度以及后热要求

对于需要焊前预热以及焊后热处理的钢材，应满足GB/T 18591-2001 预热温度、道间温度及预热维持温度的测量指南。

### 6.2.1 预热

焊前应采用电加热法对焊接区进行预热，具体要求如下：

- 1) 先进行定位焊，再进行预热，预热温度为 $50^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 。
- 2) 预热范围为坡口两侧各不小于100mm。预热区内温度应均匀分布。

### 6.2.2 道间温度

道间温度与预热温度相同。室温在 $0^{\circ}\text{C}$ 或 $0^{\circ}\text{C}$ 以下，道间温度应按上限温度控制；相对湿度大于等于85%时，需采取措施降低施工区域的相对湿度，否则不允许焊接。

### 6.2.3 后热

焊接结束后应立即对其进行后热处理，后热制度为 $100^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$ 保温2~3小时。

### 6.2.4 测温方法及要求

- 1) 测量温度用表面测温计测量。
- 2) 测量预热温度在焊接面进行，距离施焊坡口约50mm处。
- 3) 测量道间温度必须在焊接面的基体金属表面，距离焊趾边缘25mm和沿接头下一道起始处75mm处进行。

## 6.3 焊接

6.3.1 定位焊宜采用激光焊或激光填丝焊。一般定位焊长度在 2 mm~5 mm 之间，间距一般控制在 50 mm~150 mm 之间。

6.3.2 根据钝边厚度可选择双面打底或单面打底，双面坡口推荐采用双面打底焊，单面坡口推荐采用单面打底焊；双面打底焊时，双面打底焊熔深需超过钝边厚度，单面打底焊接时，需单道焊透，双面成形。打底焊接时焊缝背面需要通入惰性气体进行保护。

6.3.3 打底焊接后观察焊缝表面及熔深情况，如发现表面成形不良或熔深不足应进行焊缝修正或返修重新焊接。

6.3.4 在每道次焊接之前应去除高强钢窄间隙焊缝内待焊区域氧化物，确认清理干净后方可进行下道次焊接操作。

6.3.5 高强钢窄间隙焊接过程应根据坡口间隙变化，适时调整工艺参数以实现单道多层填充而完成整条焊缝的焊接。

6.3.6 激光入射方向宜与工件法向呈 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 夹角，以防止激光反射损坏激光头。

6.3.7 为抑制高强钢金焊接过程产生气孔，优化焊缝表面成形，保证良好的窄间隙侧壁熔合及层间熔合情况，激光束宜采用较高的运动速度及运动半径。

6.3.8 焊接过程可采用拖罩、拖罩与喷嘴结合的方式对焊接熔池和高温区域进行保护；特殊情况下可在惰性气体保护舱或真空舱内焊接。

6.3.9 焊接过程中应至少提前5 s送气，焊后应至少延时5 s停气；若在惰性气体保护舱内焊接时，保护舱内氧气含量应不大于  $213 \text{ mg/m}^3$ ；若在真空舱内焊接时，真空舱内环境压力应低于5 Pa。

6.3.10 储存惰性气体的气瓶压力小于0.4 MPa时应停止使用。

6.3.11 高强钢窄间隙内焊接为防止凝固裂纹，其送丝速度不宜过快，推荐 $V_s \leq 4.5 \text{ m/min}$ 。

6.3.12 底焊接推荐工艺参数参照表 5 进行选择，填充焊激光填丝焊接推荐工艺参数参照表 6 进行选择。

6.3.13 填充焊宜采用激光摆动填丝焊，焊丝直径宜选取 1.0 或 1.2 mm，送丝角度选取  $45^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ，正面保护气体侧吹角度取  $45^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ，光丝间距 DL 取 0.5 mm~1 mm。

表5 高强钢打底层激光焊接推荐工艺参数

钝边厚度 ( $t_1$ ) mm	激光功率 kW	焊接速度 m/min	离焦量 mm	保护气体流量 L/min
1.5~3	1.5~2.5	0.8~1.0	0~10	15~25
3~5	2.5~4	0.6~1.0	0~10	15~25
$\geq 5$	$\geq 4$	0.6~1.0	0~10	15~25

表6 高强钢填充层激光填丝焊接推荐工艺参数

母材厚度 mm	激光功率 kW	焊接速度 m/min	离焦量 mm	送丝速度 m/min	保护气体流量 L/min	光束运动 半径 Mm	光束运动 速度 Hz	双焦点间距 $L_d$ /mm	双焦点能 量比
20-30	3~6	0.3~1.0	+5~+10	2~4	15~25	0.5~1.0	50~250	0.5~1.0	50/50
30-50	3~6	0.3~1.0	+5~+10	2~4	15~25	0.5~1.2	50~250	0.5~1.2	50/50
$\geq 50$	3~6	0.3~0.8	5+~+15	2~4	15~25	0.5~1.5	50~250	0.5~1.5	50/50

## 6.4 焊后处理

6.4.1 焊缝正面、背面余高超过上限或向母材急剧过渡时，可采用角磨机对余高进行修整至圆滑过渡。

6.4.2 焊缝表面的气孔、夹杂物、焊瘤、飞溅、裂纹可采用角磨机进行修整。

6.4.3 可采用修饰焊对焊件表面气孔、咬边缺陷进行修整。

## 7 焊接检验

焊接接头的检验项目见表7，取样位置示意图4，若有特殊的使用条件所需的试验可能比本标准规定更复杂，则由供需双方协商确定补充检验项目。

表7 试件的检验与试验

试件状态	试验种类	试验比例或数量
焊后检验	外观检验	100%
	射线检验	100%
	拉伸试验	厚度100%
	硬度检验	1
	焊接变形	100%
	冲击检验	20
	宏观金相检验	2

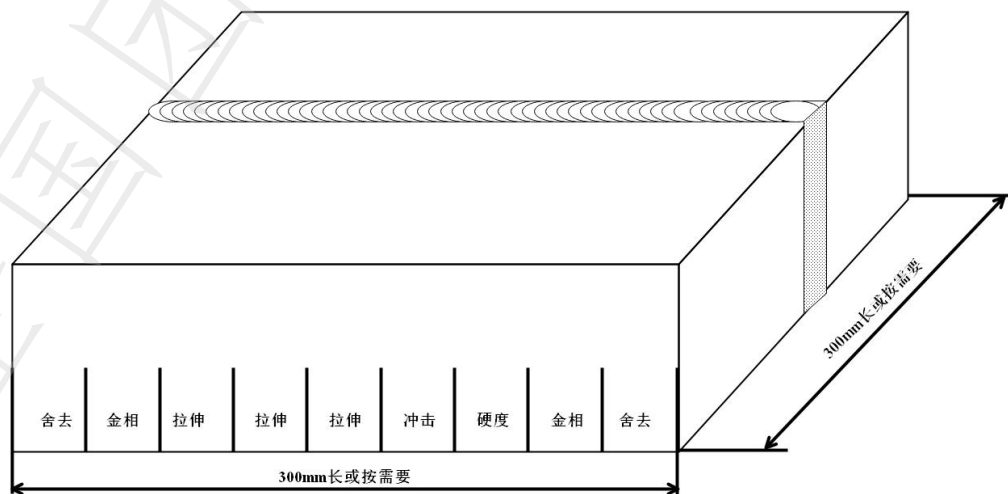


图4 对接接头试板尺寸及截取位置

## 7.1 外观检验

7.1.1 可通过肉眼或放大镜对焊缝外形尺寸及表面质量进行检查。

7.1.2 焊缝几何尺寸应符合设计图纸要求。

7.1.3 焊缝表面成形应均匀、致密、平滑向母材过渡，不应有裂纹、未熔合、咬边及气孔等缺陷。焊缝尺寸应符合表8要求。

表8 焊缝外观要求

单位为毫米

母材厚度	$20 < t_2 \leq 50$	$50 < t_2 \leq 100$	$100 < t_2$
焊缝宽度	$W \leq 8$	$W \leq 10$	$W \leq 13$
焊缝余高	$H \leq 4$	$H \leq 4.5$	$H \leq 5$

## 7.2 焊接变形检验

焊接试板变形度检验可通过对接试件焊后表面夹角进行测定，为保证测量精度，测定仪器推荐采用faro三坐标形位公差测量仪。焊接接头整体变形度应符合表9规定。

表9 焊接接头整体变形度

母材厚度/mm	$20 < t_2 \leq 50$	$50 < t_2 \leq 100$	$100 < t_2$
变形度/°	$\leq 1.0$	$\leq 1.5$	$\leq 2.0$

## 7.3 无损检验

焊接接头超声波检验应按照GB/T 35361进行。

## 7.4 拉伸性能检验

7.4.1 焊接接头拉伸试样尺寸及拉伸试验按照GB/T 2651规定进行。

7.4.2 焊接接头拉伸试样的焊缝余高应以机械方法去除，使之与母材齐平。

7.4.3 焊接接头拉伸试样取样数量按照表10规定进行。

表10 焊接接头拉伸试样取样数量

母材厚度/mm	$20 < t_2 \leq 50$	$50 < t_2 \leq 100$	$100 < t_2$
拉伸试样数量/个	2	3	4

## 7.5 冲击性能检验

7.5.1 焊接接头冲击试验按照GB/T 2650规定执行。冲击试验试样的取样位置按图5所示，沿厚度方向上、中上、中、中下、下5层，每一层取自焊缝中心、熔合线、热影响区、母材部位，共计20件冲击试样。

7.5.2 试样的纵轴与焊缝长度方向垂直，缺口面垂直于试件表面。

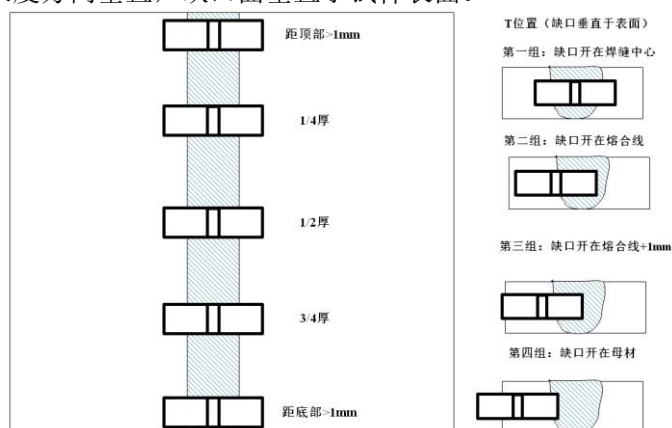


图5 冲击试样取样位置示意图

## 7.6 硬度检验

7.6.1 焊接接头硬度试验按照GB/T 35085—2018要求进行。

硬度试样表面的制备过程应正确进行以保证硬度测量没有受到冶金因素的影响。硬度试验检测表面制备完成后进行适当腐蚀，以便于确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。

7.6.2 点测试（E型测试）

7.6.2.1 焊缝金属硬度试验

压痕应在离顶端表面和底部表面2mm范围内以及板材厚度中间位置，如图6所示。焊缝金属应至少选取3个点进行硬度试验：中心、顶部和底部，以及中心、左边和右边。对于维氏硬度试验使用较大实验力时，压痕数量可减少。

7.6.2.2 热影响区硬度试验

热影响区应沿熔合线选取3个点进行硬度试验，如图6所示。

热影响区和焊缝金属硬度试验时的试验力应相同。

7.6.2.3 母材硬度试验

母材至少取3个点进行硬度试验，如图6所示。

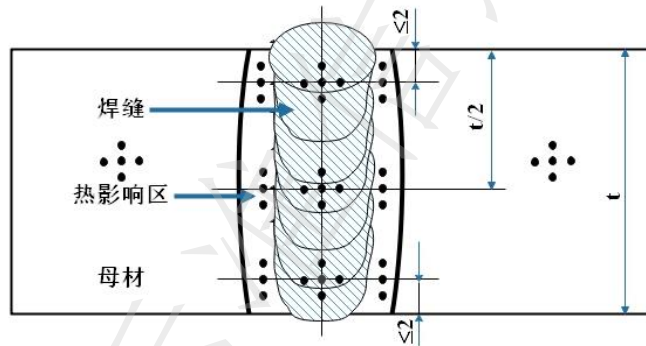


图6 点测试（E型测试）压痕位置示意图

7.6.3 线测试（R型测试）

图7给出了先测试（R型测试）压痕位置示例。如相关协议或应用标准有规定，可增加压痕数量和/或变更压痕位置。

压痕的位置和数量选择应能保证可以确定焊接所引起的硬化或软化区域。

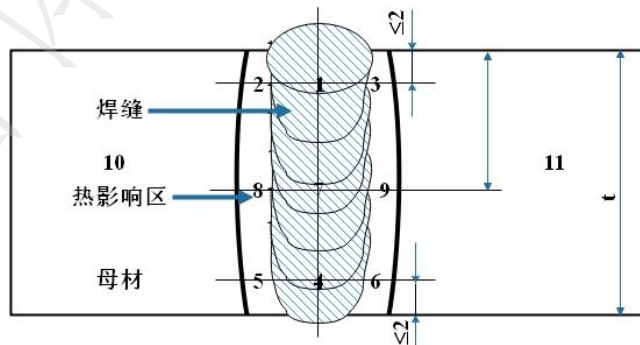


图7 线测试（R型测试）压痕位置示意图

## 7.7 宏观金相检验

7.7.1 焊接接头宏观金相检验按照GB/T 26955要求进行。

7.7.2 焊接接头宏观金相试样表面不得有裂纹、侧壁未熔合、夹渣等焊接缺陷。

## 附录 A

(资料性附录)

焊接工艺评定报告推荐格式

## 焊接工艺规程 (WPS)

焊接工艺规程编号 Welding procedure Specification No.		页数 Page	
工程名称Project Name _____ 工程编号Project No. _____ 产品名称Product Joint Name _____ 焊接工艺评定编号PQR No. _____ 焊接施工执行标准Acceptance Criteria _____			
焊接方法Welding Process _____ 坡口形式Groove Type _____ 简图(坡口形式、尺寸、焊接顺序示意图) Sketch:			
母材Base Metals _____ 母材厚度Base Metal Thickness _____ 焊材牌号Welding Material Grades _____ 焊材直径Wire Diameter _____			
焊接位置positions _____ 焊接方向welding progression _____		预热温度Preheat Temperature _____ 层间温度Interpass Temperature _____ 后热温度Postheating Temperature _____	
准备			
规范参数			
	定位焊	打底层焊接焊道	填充层焊接焊道
	盖面焊接焊道		
焊接位置			
焊接方向			
工作处的光束功率			
功率变化情况			
光束是否振荡			
激光束方位角度			
光束运动半径			
光束运动速度			
双焦点间距			
双焦点能量比			
焊接速度			
焊接速度变化情况			
送丝速率			
正保护气体			
背保护气体			
工作距离			
保护气体喷嘴			
焊后操作 <sup>a</sup>			
<sup>a</sup> 有要求时			