

ICS 25.160

P 72

备案号: J2097-2015



中华人民共和国石油化工行业标准

SH/T 3525—2015

代替 SH/T 3525—2004

石油化工低温钢焊接规范

Welding specification of low temperature steel in petrochemical industry

2015-04-30 发布

2015-05-01 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 材料验收	2
4.1 一般规定	2
4.2 钢材验收	2
4.3 低温冲击韧性试验	3
4.4 焊接材料验收	3
4.5 材料管理	4
5 焊工资格和焊接工艺评定	4
6 焊前准备	5
6.1 坡口制备	5
6.2 组对定位	5
7 焊接工艺	7
7.1 一般规定	7
7.2 预热	7
7.3 焊接	8
8 焊后热处理	8
9 焊接检验	8
9.1 外观检查	8
9.2 无损检测	9
10 焊缝返修	9
附录 A (资料性附录) 国内常用低温钢板、钢管及锻件低温冲击试验	10
附录 B (资料性附录) 美国(ASME)常用低温钢板、钢管、锻件	11
附录 C (资料性附录) 日本常用低温钢板、钢管、锻件	15
附录 D (资料性附录) 常用低温钢焊接材料选用	17
附录 E (资料性附录) 常用低温钢焊接材料化学成分	18
附录 F (资料性附录) AWS 常用低温焊条	22
附录 G (资料性附录) AWS 常用低温焊丝	23
附录 H (资料性附录) 低温用焊条冲击试验规定	25
本规范用词说明	28
附：条文说明	29

Contents

Foreword·····	III
1 Scope·····	1
2 Normative documents quoted·····	1
3 Terms and definitions·····	2
4 Material inspection and acceptance ·····	2
4.1 General specifications·····	2
4.2 Material inspection and acceptance ·····	2
4.3 The low temperature impact toughness test ·····	3
4.4 Welding material inspection and acceptance·····	3
4.5 Material management·····	4
5 Welder qualification and welding procedure qualifications ·····	4
6 Welding preparation ·····	5
6.1 Groove processing·····	5
6.2 Assembly of joints·····	5
7 Welding procedure·····	7
7.1 General specifications·····	7
7.2 Preheating ·····	7
7.3 Welding ·····	8
8 PWHT·····	8
9 Welding inspection·····	8
9.1 Visual examination·····	8
9.2 NDT ·····	9
10 Weld repair ·····	9
Annex A (Informative) Common low temperature steel plates, steel pipes and forgings in domestic·····	10
Annex B (Informative) Common low temperature steel plates, steel pipes, forgings in US (ASME) ·····	11
Annex C (Informative) Common low temperature steel plates, steel pipes, forgings in Japan·····	15
Annex D (Informative) Common low temperature steel welding materials selection·····	17
Annex E (Informative) Chemical composition of common low temperature steel welding materials·····	18
Annex F (Informative) AWS common low temperature electrode·····	22
Annex G (Informative) AWS common low welding wire·····	23
Annex H (Informative) Specification for low temperature electrode impact test·····	25
Explanation of wording in this specification·····	28
Add: Explanation of articles·····	29

前 言

根据中华人民共和国工业和信息化部《2012年第二批行业标准制修订计划》(工信厅科[2012]119号)的要求,规范编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,修订本规范。

本规范共分10章和8个附录。

本规范的主要技术内容是:材料验收、焊工资格和焊接工艺评定、焊前准备、焊接工艺、焊后热处理、焊接检验、焊缝返修。

本规范是在SH/T 3525—2004《石油化工低温钢焊接规程》的基础上修订而成,修订的主要技术内容是:

- 扩大了适用范围;
- 对规范的结构作了适当调整;
- 增加了低温钢材料现场管理的要求;
- 对低温钢焊接材料按新标准作了调整;
- 增加了焊后热处理控制的具体要求;
- 无损检测方法增加了衍射时差法超声检测(TOFD)。

本规范由中国石油化工集团公司负责管理,由中国石油化工集团公司施工技术淄博站负责日常管理,由中石化第十建设有限公司和惠生工程(中国)有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见和建议,请寄送日常管理单位和主编单位。

本规范日常管理单位:中国石油化工集团公司施工技术淄博站

通讯地址:山东省青岛市黄岛区漓江西路677号

邮政编码:266555

电 话:0532-55681827

传 真:0532-58681000

本规范主编单位:中石化第十建设有限公司

通讯地址:山东省淄博市临淄区建设路29号

邮政编码:255438

惠生工程(中国)有限公司

通讯地址:上海浦东中科路699号

邮政编码:201203

本规范参编单位:胜利油田胜利石油化工建设有限责任公司

本规范主要起草人员:张立平 张桂红 唐元生 赵秀兰 姜俊荣 汤日光

本规范主要审查人员:吉章红 葛春玉 吴忠宪 李永红 段 瑞 李雪梅 王一帆 胡联伟
张永明 袁 永 苏良骥 任鹏举 张立芳 张贤俊 刘知跃

本规范1992年首次发布,2004年第1次修订,本次为第2次修订。

石油化工低温钢焊接规范

1 范围

本规范规定了低温钢的材料验收、焊接工艺评定和焊工考试、焊接准备、焊接工艺、焊后热处理和焊接检验等要求。

本规范适用于石油化工、天然气化工和煤化工工程低温钢设备和管道的焊条电弧焊、埋弧焊、钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊的焊接施工。

2 规范性引用文件

下列文件对于本规范的应用是必不可少的，凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

- GB 150 压力容器
- GB/T 229 金属材料夏比摆锤冲击试验方法
- GB/T 983 不锈钢焊条
- GB/T 3375 焊接术语
- GB 3531 低温压力容器用低合金钢钢板
- GB/T 4842 氩
- GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条
- GB/T 12470 埋弧焊用低合金钢焊丝和焊剂
- GB/T 13814 镍及镍合金焊条
- GB/T 14976 流体输送用不锈钢无缝钢管
- GB/T 15620 镍及镍合金焊丝
- GB/T 17493 低合金钢药芯焊丝
- GB/T 17853 不锈钢药芯焊丝
- GB/T 17854 埋弧焊用不锈钢焊丝和焊剂
- GB/T 18984 低温管道用无缝钢管
- GB 19189 压力容器用调质高强度钢板
- GB 24510 低温压力容器用9%Ni钢板
- GB 24511 承压设备用不锈钢板及钢带
- NB/T 47009 低温承压设备用低合金钢锻件
- NB/T 47010 承压设备用不锈钢和耐热钢锻件
- NB/T 47013 承压设备无损检测
- NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定
- NB/T 47018 承压设备用焊接材料定货技术条件
- JB/T 3223 焊接材料质量管理规程
- SH/T 3517 石油化工钢制管道工程施工技术规程
- SH/T 3526 石油化工异种钢焊接规范
- SH/T 3537 立式圆筒形低温储罐施工技术规程
- SH/T 3543 石油化工建设工程项目施工过程技术文件规定

SH/T 3554 石油化工钢制管道焊接热处理规范

YB/T 5092 焊接用不锈钢丝

TSG Z 6002 特种设备焊接操作人员考核细则

3 术语和定义

GB/T 3375 和 NB/T 47014 确立的及下列术语和定义适用于本规范。

3.1

低温钢 Low temperature steel

设备在-20℃以下、管道在-29℃及以下使用的无镍、含镍低温合金钢和奥氏体不锈钢的统称。

4 材料验收

4.1 一般规定

4.1.1 低温受压元件所采用的材料应是镇静钢。国外材料应符合合同规定的材料标准和技术条件。

4.1.2 低温钢及焊接材料应具有质量证明文件，其内容应包括：

- a) 材料标准代号；
- b) 材料规格、牌号；
- c) 订货合同中规定的各项特性数据的检验结果；
- d) 生产批号和供货状态；
- e) 生产单位名称；
- f) 检验印鉴标志。

4.1.3 低温钢质量证明文件应具有低温夏比（V 形缺口）冲击试验值。其合格标准应符合相应的产品标准。

4.1.4 不得在低温钢表面刻划或敲打材料标记和焊工钢印等导致产生缺口效应的划痕。

4.1.5 当材料有下列情况之一时，不得使用：

- a) 质量证明文件的特性数据不符合产品标准和订货技术条件或对其有异议；
- b) 实物标识与质量证明文件不符；
- c) 要求复验的材料未进行复验或复验不合格；
- d) 材料外观质量检查不合格者。

4.2 钢材验收

4.2.1 常用低温钢板、钢管、锻件的钢号及低温冲击韧性试验要求参见附录 A，验收检验项目和技术指标应符合下列要求：

- a) 钢板应符合 GB 3531、GB 19189、GB 24510、GB 24511、GB 150 的规定；
- b) 钢管应符合 GB/T 18984、GB 150、GB/T 14976 的规定；
- c) 锻件应符合 NB/T 47009、NB/T 47010 的规定。

4.2.2 使用奥氏体不锈钢材料时，当其设计温度高于-196℃，可免除低温冲击试验。

4.2.3 直接与受压元件焊接的非受压件应是具有良好焊接性的钢材，其低温冲击韧性及焊接接头性能应与受压元件匹配。

4.2.4 材料在使用前应按相应产品标准和订货技术条件进行质量验收，并符合下列要求：

- a) 进行质量证明文件的审查，并与实物核对标识；
- b) 按设计文件或标准要求进行复验；
- c) 表面不得有裂纹、折叠、夹层、结疤等缺陷；
- d) 表面的锈蚀、凹陷及其他机械损伤的深度不应超过相应产品标准允许的厚度负偏差。

4.2.5 锻件经外观检查，应无肉眼可见的裂纹、夹层、折叠、夹渣等有害缺陷。如有缺陷，允许清

除，当缺陷存在于非机械加工表面，清除深度不应超过该处公称尺寸下偏差。当缺陷存在于机械加工表面，清除深度不应超过该处余量，修磨部分应圆滑过渡。

4.2.6 国外材料应按合同规定的材料标准和技术条件进行验收，部分国外低温用钢板、钢管参见附录 B 和附录 C。

4.3 低温冲击韧性试验

4.3.1 低温冲击试验方法应执行 GB/T 229 的规定，并符合下列规定：

- a) 标准冲击试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm；
- b) 小尺寸冲击试样为 7.5 mm×10 mm×55 mm 和 5 mm×10 mm×55 mm；
- c) 当能制备标准尺寸试样时，不应采用小试样进行试验；
- d) 当无法制备标准试样试验时，宜采用尽可能大的小尺寸试样进行试验。

4.3.2 材料截面尺寸无法制取 5 mm×10 mm×55 mm 小尺寸试样时，可免除低温夏比（V 形缺口）冲击试验。

4.3.3 设计文件有冲击韧性复验要求或现场对材料低温冲击韧性有异议时，应对低温材料进行冲击韧性复验，冲击试验不合格的材料不得使用。

4.3.4 低温材料的冲击试验温度应低于或等于最低设计温度。材料试验温度下的冲击功指标，按材料标准抗拉强度下限值确定。

4.4 焊接材料验收

4.4.1 低温焊接材料质量证明文件应符合合同规定的技术条件，焊接材料验收项目和技术指标应符合下列要求：

- a) 非合金钢及细晶粒钢焊条应符合 GB/T 5117 的规定；
- b) 不锈钢焊条应符合 GB/T 983 的规定；
- c) 镍及镍合金焊条应符合 GB/T 13814 的规定；
- d) 埋弧焊用低合金钢焊丝及焊剂应符合 GB/T 12470 的规定；
- e) 低合金钢药芯焊丝应符合 GB/T 17493 的规定；
- f) 不锈钢焊丝应符合 YB /T 5092 的规定；
- g) 不锈钢药芯焊丝应符合 GB/T 17853 的规定；
- h) 埋弧焊用不锈钢焊丝及焊剂应符合 GB/T 17854 的规定；
- i) 镍及镍合金焊丝应符合 GB/T 15620 的规定；
- j) 承压设备用焊接材料应符合 NB/T 47018 的规定。

4.4.2 低温压力容器使用的低氢焊条应按批次进行药皮含水量或熔敷金属扩散氢含量的复验，其复验方法及结果应符合相应标准和技术文件要求。

4.4.3 所用氩气应符合 GB/T 4842 规定，其纯度不应低于 99.99%，当瓶装氩气的压力低于 0.5MPa 时应停止使用。

4.4.4 熔敷金属的化学成分和力学性能应与母材相近，低温冲击韧性值不低于母材标准值，当设计文件无规定时，焊接材料应按下述原则选用：

- a) 焊条电弧焊应选用低氢型药皮焊条；
- b) 埋弧焊应根据钢种选用与之相匹配的焊丝、焊剂；
- c) 焊接含 Ni 低温钢所用焊材的含 Ni 量应与母材相近或稍高；
- d) 9%Ni 钢焊接宜选用铬镍奥氏体或镍基焊条；
- e) 异种钢焊接应按 SH/T 3526 选用焊接材料。

4.4.5 常用低温钢推荐选用的焊接材料参见附录 D，常用低温焊接材料化学成分参见附录 E、附录 F、附录 G。

4.4.6 选用 GB/T 5117 标准规定的焊条，焊条焊缝金属夏比 V 形缺口冲击试验温度、断后延伸率和

冲击功应满足设计文件的要求，尚应符合附录 H 的规定。

4.5 材料管理

4.5.1 经验收合格的低温钢板材、管材、焊材及配件，应做好标识。

4.5.2 低温钢材料与其他材质的材料宜分开堆放，板材、管材应在下面垫道木或木块，与地面距离宜 100mm 以上，管材管口应进行封堵。

4.5.3 低温钢管配件宜设库房管理。

4.5.4 低温场合使用的不锈钢、镍及镍基材料，应进行覆盖或库房存放，不宜露天堆放。

4.5.5 低温钢发放应由专人负责，且应建立明细台账。

4.5.6 焊接材料仓库储存及保管应符合 JB/T 3223 规定。

4.5.7 焊条、焊剂应按产品说明书烘干，并应由专人负责，记录应符合 SH/T 3543 要求。

4.5.8 焊材的领用、回收应有记录。

4.5.9 领用的低温钢焊条应采用完好无损的保温桶保存，随用随取。

5 焊工资格和焊接工艺评定

5.1 从事低温钢压力容器及压力管道的焊工应按 TSGZ 6002 的规定取得焊工资格证书，并在有效期内方能承担相应资格项目焊接施工作业。

5.2 低温钢的焊接工艺评定应符合 NB/T 47014 的规定。

5.3 低温钢焊接工艺评定应进行焊缝和热影响区低温夏比（V 型）冲击试验，当无法制备 5mm×10mm×55mm 小尺寸冲击试样时，可免做冲击试验。冲击试验取样方法及合格标准应符合 GB/T 229 和 NB/T 47014 的规定要求。低温冲击功试验值应符合表 5.3 规定。

表 5.3 低温冲击功试验值

项 目	标准抗拉强度 下限值 R_m MPa	试样尺寸（厚×宽×长） mm					
		标准试样		小尺寸试样			
		10×10×55		7.5×10×55		5×10×55	
		最小冲击功 A_{kv} J					
		3 个试样 平均	单个 试样	3 个试样 平均	单个 试样	3 个试样 平均	单个 试样
铁素体钢 及其焊接 接头	≤ 450	20	14	15	10.5	10	7
	$450 < R_m \leq 510$	24	19	13	9	12	8.5
	$510 < R_m \leq 570$	31	22	23.5	16.5	15.5	11
	$570 < R_m \leq 630$	34	24	25.5	18	17	12
	$630 < R_m \leq 690$	38	27	28.5	20	19	13.5
奥氏体钢及 其焊接接头	任意	31	27	24	20	16	13.5

5.4 当焊缝金属两侧的母材不相同，焊接接头拉伸和弯曲试验按两侧母材中的较低要求。

5.5 当焊缝两侧母材具有不同冲击试验要求时，焊缝金属的冲击试验温度应低于或等于两侧母材中的较高者。低温冲击功按两侧母材抗拉强度的较低者，热影响区按相应母材的要求确定。

5.6 焊缝和热影响区的低温夏比 V 型缺口冲击应按 NB/T 47014 或设计文件规定执行，焊缝和热影响区各取一组，每组三个试样。冲击试样的缺口位置，应符合下列规定：

- a) 试样应垂直于焊缝轴线，缺口轴线应垂直于母材表面；
- b) 焊缝区试样的缺口轴线应位于焊缝中心线上；
- c) 热影响区试样的缺口轴线与熔合线交点的距离大于零，且应尽可能多的通过热影响区。

6 焊前准备

6.1 坡口制备

6.1.1 焊接坡口应符合设计图样的要求或按工艺条件选用标准坡口，也可以根据现场施工实际情况自行设计，自行设计坡口应综合考虑下列因素：

- a) 母材种类及厚度；
- b) 焊接方法；
- c) 焊缝填充金属尽量少；
- d) 避免产生缺陷；
- e) 有利于减少焊接变形及残余应力；
- f) 有利于焊接防护；
- g) 焊工操作方便。

6.1.2 低温钢宜采用冷加工方法制备坡口，也可采用热加工方法制备坡口。当采用热加工方法，应用冷加工方法去除影响焊接质量的表面层。

6.1.3 坡口表面不得有裂纹、分层、夹渣等缺陷。

6.1.4 施焊前，应将坡口表面及两侧30mm范围内的铁锈、油污、熔渣等影响焊接质量的有害杂质清除干净。

6.1.5 奥氏体不锈钢坡口两侧各100mm范围内应采取防飞溅污染措施。

6.1.6 下列管子若采用热加工方法制备坡口时，坡口表面应进行无损检测，检测结果不得有线性缺陷：

- a) 材料标准抗拉强度下限值大于或等于540 MPa钢材的管子坡口100%无损检测；
- b) 设计温度低于-29℃的非奥氏体不锈钢管子的坡口，应进行5%抽检，若有不合格，应加倍抽检，仍有不合格，应进行100%检测。

6.1.7 坡口表面无损检测应执行NB/T 47013的相关规定，I级合格。

6.2 组对定位

6.2.1 不得进行强力组对定位。定位焊的尺寸及间距应符合表6.2.1-1、6.2.1-2的规定。

表 6.2.1-1 管道手工定位焊的尺寸及间距推荐表

单位为 mm

焊件厚度 T	厚度	长度	间距
≤ 4	< 4	> 5	50~100
$4 < T \leq 20$	$\leq 0.70T$ 且 ≤ 6	> 10	100~300
> 20	< 8	> 20	250~400

表 6.2.1-2 设备手工定位焊的尺寸及间距推荐表

单位为 mm

焊件厚度 T	厚度	长度	间距
≤ 4	< 4	5~8	100~200
$4 < T \leq 20$	$\leq 0.70T$ 且 ≤ 6	10~15	200~300
> 20	$6-1/4 T$	15~20	300~500

6.2.2 熔入焊缝的定位焊应由合格焊工采用评定合格的焊接工艺进行施焊。在正式焊接时应定位焊

焊缝进行修磨，且符合下列规定：

- a) 定位焊缝不得有裂纹、气孔、夹渣；
- b) 定位焊缝宜均匀分布。

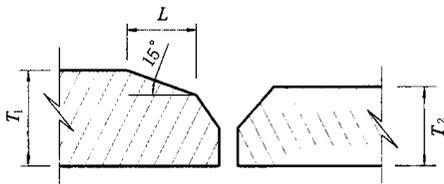
6.2.3 临时支架、卡具等与焊件接触部分的材质应与焊件相同或相近，应采用经评定合格焊接工艺。不得用敲打等方法拆除卡具，拆除后应用砂轮修磨焊痕，并进行表面无损检测，不得有裂纹等缺陷。

6.2.4 有预热要求的低温钢定位焊和临时固定焊，应按正式工艺要求进行预热，焊点处母材预热温度取要求的预热温度上限。

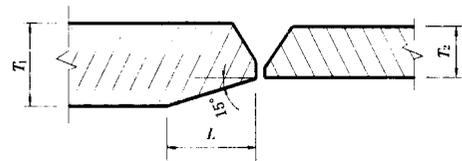
6.2.5 等厚管道组件对接环焊缝组对时，应使内壁平齐，其错边量不应超过壁厚的 10%，质量等级要求为 1 级的管道，错边量不应大于 1mm，其他级别的管道组对错边量不应大于 2mm。

6.2.6 不等厚对接焊件组对时，应符合下列要求：

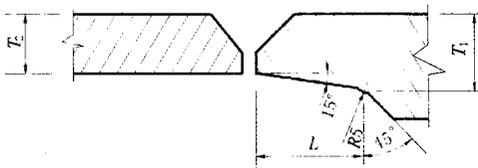
- a) 不同壁厚的管子、管件组对时，当内壁壁厚差大于 0.5mm，或外壁壁厚差大于 2mm，应按图 6.2.6 a) 及图 6.2.6 b) 的要求对厚壁侧母材进行过渡削薄加工处理；
- b) 当不同壁厚的设备或低温钢容器筒体组对出现下列情况之一时，应按图 6.2.6 c) 的要求对厚板边缘进行单面或按图 6.2.6 d) 的要求对厚板边缘进行双面削薄处理：
 - 1) 薄板厚度不大于 10mm，两板厚度差超过 3mm；
 - 2) 薄板厚度大于 10mm，两板厚度差大于薄板厚度的 30%或超过 5mm。
- c) 当两焊件厚度差小于 b) 项规定的数值时，对口错边量应以较薄焊件厚度为基准确定，但在测量对口错边量时，不应计入两板厚度的差值。



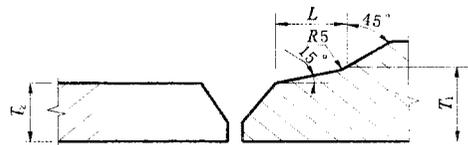
注： $L \geq 3(T_1 - T_2)$



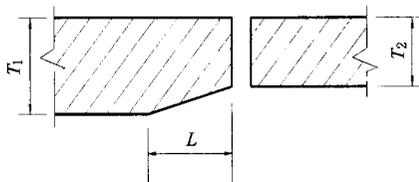
a) I型



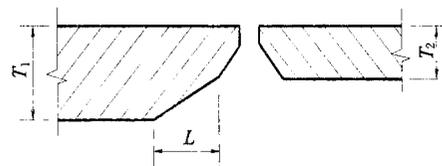
注： $L \geq 3(T_1 - T_2)$



b) II型



注： $L \geq 3(T_1 - T_2)$



c) III型

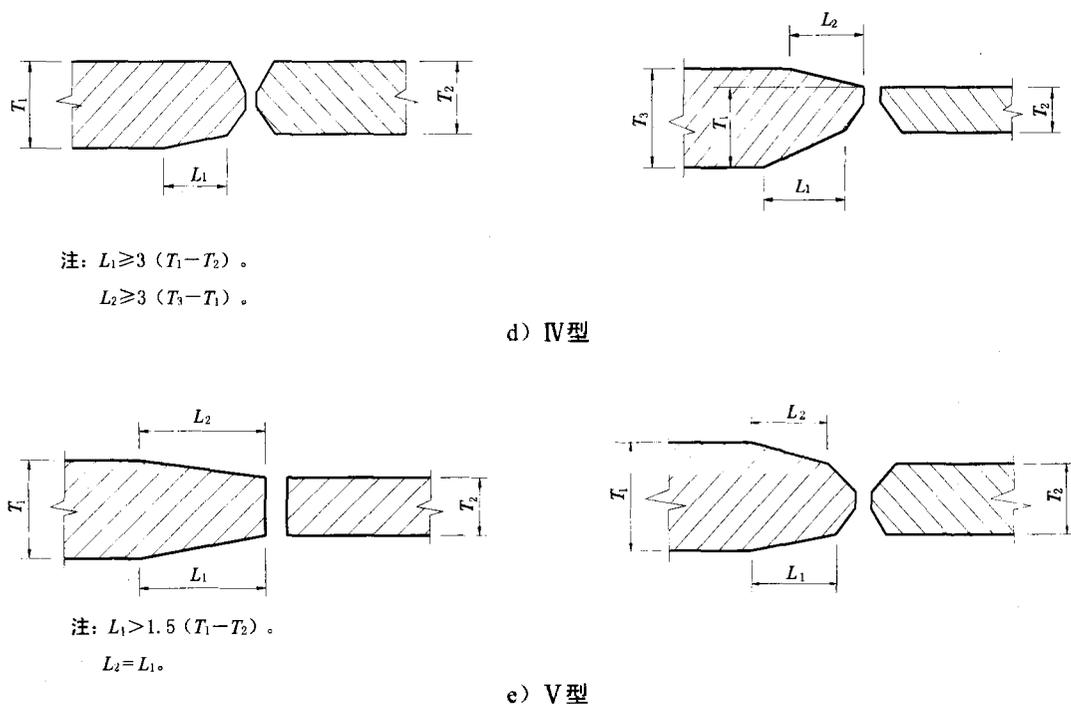


图 6.2.6 不同厚度焊件对口形式

7 焊接工艺

7.1 一般规定

7.1.1 焊接设备及辅助装备等应安全可靠,并处于完好状态,设备上的计量仪器、仪表应在检定校准有效期内。

7.1.2 焊接施工前,应依据合格的工艺评定报告编制适合本工程的焊接工艺规程(或焊接作业指导书)。

7.1.3 由合格的焊工按照焊接指导文件进行焊接,并应在其施焊焊缝邻近区域标识识别代号,但不得采用钢印标记。

7.1.4 防止地线、电缆线、焊钳对焊件电弧擦伤。

7.1.5 母材表面的缺陷应进行修理,修理处应平滑,消除缺陷的深度不应超过材料标准规定的负偏差。

7.1.6 母材需要补焊时,应采用评定合格的焊接工艺,如需预热,预热温度应符合表 7.2.1。补焊后进行表面无损检测。

7.1.7 当焊接环境出现下列任一情况时,应采取有效措施,否则不得施焊。

- a) 钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊时风速大于 2m/s;
- b) 其他焊接方法时风速大于 8m/s;
- c) 相对湿度大于 90%;
- d) 雨雪环境;
- e) 焊件温度低于 0°C。

7.2 预热

7.2.1 焊前预热应根据母材的交货状态、化学成分、力学性能、焊接性能、焊件厚度、焊接接头的拘束程度、焊接方法等综合考虑,必要时通过试验确定。常用钢号预热温度见表 7.2.1。

表 7.2.1 常用钢号预热温度

钢号或公称成分	厚度 mm	预热温度 ℃
低温碳钢	≥25	≥10
1.5Ni~3.5Ni	任意厚度	≥150
5Ni、8Ni、9Ni	任意厚度	≥10
注：预热温度上限按焊接工艺评定确定；本表范围以外厚度的母材，当焊件温度低于10℃时，均预热到10℃以上。		

7.2.2 异种钢焊接接头预热温度应按预热温度要求较高的母材确定。

7.2.3 局部预热时，预热的范围为焊缝两侧各不小于焊件厚度的5倍，且不小于100mm。加热区以外100mm范围内应予保温。

7.2.4 预热过程应保证坡口两侧沿壁厚均匀受热，并防止局部过热。

7.3 焊接

7.3.1 引弧应在引弧板或坡口内引弧，不得在非焊接部位引弧，收弧处应填满。

7.3.2 在焊接工艺评定所确认的焊接线能量范围内，宜选择较小的焊接线能量施焊。焊接应采用窄道焊和多层多道施焊。

7.3.3 低温钢单面焊底层焊道宜采用钨极气体保护焊，奥氏体不锈钢底层焊道的焊接宜采用钨极气体保护焊焊接，打底焊及第二层焊焊接时，焊缝背面应充氩气或其他气体保护。

7.3.4 采用多层多道焊时，施焊过程应控制道间温度。各层间、道间焊接接头应错开。接弧处应保证熔合。双面焊清理焊根后，宜进行渗透检测，无缺陷为合格。

7.3.5 有预热要求的焊接接头，焊缝宜一次焊完，施焊过程道间温度不得低于预热温度，当中断焊接时，应及时采取后热措施。重新施焊时，应按原要求进行预热。

7.3.6 9Ni钢采用镍基焊材时应符合下列要求：

- a) 应按焊接工艺评定的要求控制线能量上限；
- b) 层间温度不应大于100℃。

8 焊后热处理

8.1 当设计文件有要求时，按设计文件的要求执行，设计文件无规定时，管道焊后热处理，推荐的焊后热处理条件见表8.1。

表 8.1 推荐的焊后热处理条件

钢号或公称成分	热处理厚度 T mm	焊后热处理温度 ℃	最少保温时间 min	按厚度确定的 最少保温时间 min/mm
低温碳钢	>16	600~650	15	厚度小于50mm时为2.4min/mm，厚度大于50mm时为2h+15min每增加25mm
1.5Ni~3.5Ni	>16	600~650	15	

8.2 低温钢管道焊缝焊后热处理执行SH/T 3554。

8.3 低温钢设备焊缝焊后热处理执行GB 150。

9 焊接检验

9.1 外观检查

9.1.1 焊后应对焊缝外观质量进行检查。检查前应将焊缝表面上的熔渣、飞溅等杂物清理干净。

9.1.2 焊缝外观质量应符合以下规定：

- a) 焊缝与母材圆滑过渡；

- b) 焊接接头表面不允许有裂纹;
- c) 焊缝表面不得有气孔、夹渣、弧坑、未填满等缺陷;
- d) 焊缝不得有咬边。

9.1.3 焊缝余高应符合下列规定:

- a) 低温钢容器对接接头焊缝余高应不大于壁厚的 10%，且不大于 3mm;
- b) 管道对接接头，当接头中较薄壁厚小于或等于 6mm 时，外表面焊缝余高应不大于 1.5mm，当管道接头中较薄壁厚大于 6mm 时，外表面焊缝余高应不大于 2.5mm;
- c) 对接接头内表面焊缝宜与内壁平齐;
- d) 角焊缝应圆滑过渡，否则应进行打磨处理。

9.2 无损检测

9.2.1 焊缝的无损检测应在焊缝外观质量检查合格后进行。

9.2.2 无损检测工艺和缺陷评定应执行 NB/T 47013 的规定，并符合以下要求:

- a) 压力容器焊缝的检测方法、检测比例和合格标准应符合 GB/T 150 的规定;
- b) 管道焊缝的检测方法、检测比例和合格标准应符合 SH/T 3517 的规定;
- c) 储罐焊缝的检测方法、检测比例和合格标准应符合 SH/T 3537 的规定。

9.2.3 当采用 TOFD 检测方法进行检测时，检测工艺应执行 NB/T 47013.10 的规定，且应符合下列条件:

- a) 设备焊缝壁厚应等于或大于 12mm;
- b) 管道焊缝壁厚应等于或大于 16mm 且等于或大于 DN200。

10 焊缝返修

10.1 焊缝表面缺陷应用砂轮打磨，打磨部位应与母材圆滑过渡。

10.2 焊缝返修应执行经评定合格的焊接工艺。

10.3 热处理后进行返修的焊缝，返修完毕应重新进行热处理。

10.4 焊缝内部缺陷可采用砂轮打磨或碳弧气刨清除，并修磨成宽度均匀、表面平整、便于施焊的凹槽，且两端有一定坡度。

10.5 返修部位的焊缝应按原检测方法和合格标准重新检测。

10.6 焊缝同一部位的返修次数不宜超过 2 次，对于 2 次以上的返修，应经施工单位技术负责人批准。

10.7 焊缝的返修应及时作好返修记录。

附录 A
(资料性附录)

国内常用低温钢板、钢管及锻件低温冲击试验

表 A 给出了国内常用低温钢板、钢管及锻件的低温冲击试验要求。

表 A 国内常用低温钢板、钢管及锻件低温冲击试验要求

序号	标准号	钢号	厚度 mm	冲击韧性试验		备注
				温度 ℃	冲击功 A_{kv} J	
1	GB 3531—2014	16MnDR	6~60	-40	≥47	钢板
			>60~120	-30		
2	GB 3531—2014	15MnNiDR	6~60	-45	≥60	钢板
3	GB 3531—2014	09MnNiDR	6~120	-70	≥60	钢板
4	GB 150—2011 GB 3531—2014	15MnNiNbDR	10~60	-50	≥60	钢板
5	GB 150—2011 GB 3531—2014	08Ni3DR	6~100	-100	≥60	钢板
6	GB 150—2011 GB 3531—2014	06Ni9DR	6~40	-196	≥100	钢板
7	GB 19189—2011	07 MnNiVDR	10~60	-40	≥80	钢板
8	GB 19189—2011	07MnNiMoDR	10~50	-50	≥80	钢板
9	GB 24510—2009	9Ni490	≤50	-196	≥40	钢板
10	GB 24510—2009	9Ni590A	≤50	-196	≥50	钢板
11	GB 24510—2009	9Ni590B	≤50	-196	≥80	钢板
12	GB 150—2011	09MnD	≤8	-50	≥47	钢管
13	GB 150—2011	09MnNiD	≤5	-70	≥47	钢管
14	GB/T 18984—2003	16MnDG	≤25	-45	≥21	低温钢管
15	GB/T 18984—2003	10MnDG	≤25	-45	≥21	低温钢管
16	GB/T 18984—2003	09DG	≤25	-45	≥21	低温钢管
17	GB/T 18984—2003	09Mn2VDG	≤25	-70	≥21	低温钢管
18	GB/T 18984—2003	06Ni3MoDG	≤25	-100	≥21	低温钢管
19	NB 47009—2010	16MnD	≤100	-40	≥47	锻件
			100~300	-45		
20	NB 47009—2010	20MnMoD	≤300	-40	≥47	锻件
			300~700	-30		
21	NB 47009—2010	08MnNiMoVD	≤300	-40	≥60	锻件
22	NB 47009—2010	10Ni3MoVD	≤300	-50	≥80	锻件
23	NB 47009—2010	09MnNiD	≤300	-70	≥60	锻件
24	NB 47009—2010	08Ni3D	≤300	-100	≥47	锻件

附录 B
(资料性附录)

美国 (ASME) 常用低温钢板、钢管、锻件

表 B.1、表 B.2 及表 B.3 分别给出了美国 (ASME) 常用低温钢板、钢管及锻件的牌号与冲击韧性试验温度和冲击功值。

表 B.1 美国 (ASME) 常用低温钢板

序号	标准号	钢号	钢板厚度 mm	冲击韧性试验				备注
				温度 ℃	试样 方向	冲击功 J	侧膨胀值 (横) mm ^a	
1	ASME Section II Part A SA516	SA516 Gr. 55	<50	-51	纵向	≥18	—	细晶粒钢及低温高合金钢
			50~125	-46				
		SA516 Gr. 60	≤25	-51	纵向	≥18	—	
			25~125	-46				
		SA516 Gr. 65	≤25	-51	纵向	≥18	—	
			25~50	-46				
			50~75	-40				
			75~125	-32				
			≤25	-46	纵向	≥20	—	
			25~50	-40				
2	ASME Section II Part A SA537	SA537 cl.1	50~75	-35	纵向	≥20	—	细晶粒钢及低温高合金钢
			75~125	-29				
			≤25	-62				
			25~64	-60				
		SA537 cl.2	64~75	-60	纵向	≥18	—	
			75~100	-60				
			≤64	-68				
			64~75	-60				
			75~100	-46				

表 B.1 美国 (ASME) 常用低温钢板 (续)

序号	标准号	钢号	钢板厚度 mm	冲击韧性试验				侧膨胀值 (横) ^a mm	备注
				温度 °C	试样 方向	冲击功 A _{KV} J	侧膨胀值 (横) ^a mm		
3	ASME Section II Part A SA612	SA612	≤25	-50	纵向	≥20	—	细晶粒钢及低温高合金钢	
4	ASME Section II Part A SA662	SA662 Gr.A	25~50	-75	纵向	≥13	—	细晶粒钢及低温高合金钢	
		SA662 Gr.B	25~50	-60		≥13	—		
		SA662 Gr.C	25~50	-50		≥15	—		
5	ASME Section II Part A SA724	SA724 Gr.A	≤25	-50	纵向	≥20	—	细晶粒钢及低温高合金钢	
		SA724 Gr.B	≤25	-50	—	—	≥0.38		
6	ASME Section II Part A SA203	SA203 Gr.A	≤50	-90	纵向	≥13	—	镍系低温钢	
		SA203 Gr.B	50~75	-75		—	—		
			≤50	-90		—	—		
		SA203 Gr.D	50~75	-75		—	—		—
			≤50	-150		—	—		—
		SA203 Gr.E	50~75	-125		—	—		—
			≤50	-150		—	—		—
		SA203 Gr.F	50~75	-125		—	—		—
			75~100	-160		—	—		—
		7	ASME Section II Part A SA353	SA353		≤50	-320		—
SA553 Type I	≤50			-320	—	—	—	—	低温镍钢 (9Ni)
8	ASME Section II Part A SA553	SA553 Type II	≤50	-320	—	—	—	—	低温镍钢 (8Ni)
		SA645	≤50	-275	—	—	—	—	低温镍钢 (5Ni)

^a 三个冲击试样均应满足表列横向侧膨胀值。

表 B.2 美国 (ASME) 常用低温钢管

序号	标准号	钢号	最低冲击 试验温度 ℃	试样尺寸 (厚×宽×长) mm		侧膨胀值 (横) ^a mm	备注
				10×10×50	5×10×50		
				冲击功 A_{kv} J			
1	ASME Section II Part A SA333	SA333 Gr.1	-45	≥18	≥9	—	管道用管
		SA333 Gr.3 (3.5Ni)	-100	≥18	≥9	—	
		SA333 Gr.4	-100	≥18	≥9	—	
		SA333 Gr.6	-45	≥18	≥9	—	
		SA333 Gr.7	-75	≥18	≥9	—	
		SA333 Gr.8 (9Ni)	-196	—	—	0.38	
		SA333 Gr.9	-75	≥18	≥9	—	
		SA333 Gr.10	-60	≥18	≥9	—	
		SA334 Gr.1	-45	≥18	≥9	—	
		SA334 Gr.3 (3.5Ni)	-100	≥18	≥9	—	
2	ASME Section II Part A SA334	SA334 Gr.6	-45	≥18	≥9	—	换热器用管
		SA334 Gr.7	-75	≥18	≥9	—	
		SA334 Gr.8 (9Ni)	-196	—	—	0.38	
		SA334 Gr.9	-75	≥18	≥9	—	

^a 三个冲击试样均应满足表列横向侧膨胀值。

表 B.3 美国 (ASME) 常用低温锻件

序号	标准号	钢号	抗拉强度 MPa	最低冲击 试验温度 ℃	冲击功 A_{kv} J	侧膨胀值 (横) ^a mm	备注
1	ASME Section II Part A SA350	LF1	415~585	-29	≥18	—	试样长轴平行于主锻造方向。圆盘形锻件取切向试样
		LF2	485~655	-46	≥20	—	
		LF3	485~655	-101	≥20	—	
		LF5 CI 1	415~585	-59	≥20	—	
		LF6 CI 1	455~495	-50	≥20	—	
		LF6 CI 2	515~655	-50	≥27	—	
		LF9	435~605	-73	≥18	—	
		LF787 CI 2	450~585	-59	≥20	—	
		LF787 CI 3	515~655	-73	≥20	—	
		Gr. I	415~585	-30	≥18	—	
2	ASME Section II Part A SA765	Gr. II	485~655	-45	≥20	—	试样长轴平行于主锻造方向。圆盘形锻件取切向试样
		Gr. III	485~655	-100	≥20	—	
		Gr. IV	550~725	-30	≥20	—	
		Ty I	≥690	-196	—	≥0.38	
3	ASME Section II Part A SA522	Ty II	≥690	-170	—	≥0.38	试样长轴平行于主锻造方向

^a 三个冲击试样均应满足表列横向侧膨胀值。

附录 C
(资料性附录)
日本常用低温钢板、钢管、锻件

表 C.1、表 C.2 给出了日本 (JIS 标准) 常用低温钢板、钢管及锻件的牌号与冲击试验温度和冲击功值。

表 C.1 日本常用低温钢板

序号	标准号	钢号	钢板厚度 mm	最低使用温度 ℃	冲击功 (纵) A_{kv} J	备注
1	JIS G3126—2004	SLA235A	6~50	-30	$\geq 1/2 A_{kv\max}^a$	细晶粒钢及低温高强度钢
2	JIS G3126—2004	SLA235B	6~50	-45		
3	JIS G3126—2004	SLA325A	6~38	-45		
4	JIS G3126—2004	SLA325B	6~38	-60		细晶粒钢及低温高强度钢
5	JIS G3126—2004	SLA365	6~38	-60		
6	JIS G3126—2004	SLA410	6~38	-60		细晶粒钢及低温高强度钢
7	JIS G3127—2005	SL2N255	6~50	-70	低温镍钢	
8	JIS G3127—2005	SL3N255	6~50	-101	≥ 21	低温镍钢
9	JIS G3127—2005	SL3N275	6~50	-101	≥ 21	低温镍钢
10	JIS G3127—2005	SL3N440	6~50	-110	≥ 27	低温镍钢
11	JIS G3127—2005	SL5N590	6~50	-130	≥ 41	低温镍钢
12	JIS G3127—2005	SL9N520	6~50	-196	≥ 34	低温镍钢
13	JIS G3127—2005	SL9N590	6~100	-196	≥ 41	低温镍钢

^a $A_{kv\max}$ 系 3 个冲击试样在断口脆性百分率均为零的温度下的 A_{kv} 平均值。

表 C.2 日本常用低温钢管及锻件

序号	标准号	钢号	试验温度 ℃	试样尺寸 (厚×宽×长) mm			备注	
				10×10×50	7.5×10×50	5×10×50		
				冲击功 A_{kv} J				
1	JIS G3460—2006	STPL380	-45	≥21	≥18	≥14	管道管	
2		STPL450	-100					
3		STPL690	-196					
4	JIS G3461—2006	STBL380	-45	≥21	≥18	≥14		换热器管
5		STBL450	-100					
6		STBL690	-196					
7	JIS G3204—1988	SFVQ3	-30	≥47	合金钢锻件			
8	JIS G3205—2006	SFL1	-30	≥21	碳素钢和合金钢锻件			
9		SFL2	-45	≥27				
10		SFL3	-101	≥27				

注：锻件的试样长轴平行于主锻造方向，圆盘形锻件取切向试样。

附录 D
(资料性附录)
常用低温钢焊接材料选用

表 D 给出了常用低温钢焊条选用的推荐表。

表 D 常用低温钢焊条选用推荐表

钢 号	焊条电弧焊	
	焊条型号	焊条牌号示例
16MnD 16MnDR	E5016-N1 E5015-N1	J506RH J507RH
15MnNiDR	E5015-1 E5018-1	W607
09MnNiD 09MnNiDR	E5016-N5 E5015-N5	—
08MnNiMoVD 07MnNiMoDR 07MnMoVR	E5016-N3 E5015-N3	J607RH
09MnD	E5015-N3	W607
20MnMoD	E5016-G E5015-G E5515-G	J506RH J507RH J556RH
10Ni3MoVD	E6015-G	J607RH
08Ni3D	E5015-N7 E5016-N7	—
9Ni	ENiCrMo-6	Ni-Cr-Nb-Ti

附录 E
(资料性附录)
常用低温钢焊接材料化学成分

表 E 给出了常用低温钢焊接用焊条的化学成分。

表 E 常用低温钢焊接用焊条化学成分

单位为%

焊条型号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	其他
E4310	0.20	1.20	1.00	0.040	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E4311	0.20	1.20	1.00	0.040	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E4315	0.20	1.20	1.00	0.040	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E4316	0.20	1.20	1.00	0.040	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E4318	0.03	0.60	0.40	0.025	0.015	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E4327	0.20	1.20	1.00	0.040	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5010	0.20	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5011	0.20	1.25	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5015 E5016	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5016-1	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5018	0.15	1.60	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5018-1	0.15	1.60	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5027	0.15	1.60	0.75	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—
E5048	0.15	1.60	0.90	0.035	0.035	0.30	0.20	0.30	0.08	—

表 E 常用低温钢焊接用焊条化学成分 (续)

单位为%

焊条型号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	其他
E5716	0.12	1.60	0.90	0.030	0.030	1.00	0.30	0.35	0.08	—
E5010-P1	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	—
E5518-P2	0.20	1.20	0.60	0.03	0.03	1.00	0.30	0.50	0.10	—
E5545-P2	0.12	0.90~1.70	0.80	0.03	0.03	1.00	0.20	0.50	0.05	—
E5518-3M2	0.12	1.00~1.75	0.80	0.03	0.03	0.90	—	0.25~0.45	—	—
E5515-3M3	0.12	1.00~1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	—	0.40~0.65	—	—
E5516-3M3	0.12	1.00~1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	—	0.40~0.65	—	—
E5518-3M3	0.12	1.00~1.80	0.80	0.03	0.03	0.90	—	0.40~0.65	—	—
E5015-N1	0.12	0.60~1.60	0.90	0.03	0.03	0.30~1.00	—	0.35	0.05	—
E5016-N1	0.12	0.6~1.60	0.90	0.03	0.03	0.30~1.00	—	0.35	0.05	—
E5028-N1	0.12	0.6~1.60	0.90	0.03	0.03	0.30~1.00	—	0.35	0.05	—
E5515-N1	0.12	0.6~1.60	0.90	0.03	0.03	0.30~1.00	—	0.35	0.05	—
E5516-N1	0.12	0.6~1.60	0.90	0.03	0.03	0.30~1.00	—	0.35	0.05	—
E5015-N2	0.08	0.40~1.40	0.50	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—
E5016-N2	0.08	0.40~1.40	0.50	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—
E5018-N2	0.08	0.40~1.40	0.50	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—
E5515-N2	0.12	0.40~1.40	0.80	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—
E5516-N2	0.12	0.40~1.40	0.80	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—

表 E 常用低温钢焊接用焊条化学成分 (续)

单位为%

焊条型号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	其他
E5518-N2	0.12	0.40~1.40	0.80	0.03	0.03	0.80~1.10	0.15	0.35	0.05	—
E5015-N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10~2.00	—	0.35	—	—
E5016-N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10~2.00	—	0.35	—	—
E5515-N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10~2.00	—	0.35	—	—
E5516-N3	0.10	1.25	0.60	0.03	0.03	1.10~2.00	—	0.35	—	—
E5516-3N3	0.10	1.60	0.60	0.03	0.03	1.10~2.00	—	—	—	—
E5518-N3	0.10	1.25	0.80	0.03	0.03	1.10~2.00	—	—	—	—
E5015-N5	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5016-N5	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5018-N5	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5028-N5	0.10	1.00	0.80	0.025	0.020	2.00~2.75	—	—	—	—
E5515-N5	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5516-N5	0.12	1.25	0.60	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5518-N5	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	2.00~2.75	—	—	—	—
E5015-N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—
E5016-N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—
E5018-N7	0.05	1.25	0.50	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—
E5515-N7	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—

表 E 常用低温钢焊接用焊条化学成分 (续)

单位为%

焊条型号	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	其他
E5516-N7	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—
E5518-N7	0.12	1.25	0.80	0.03	0.03	3.00~3.75	—	—	—	—
E5515-N13	0.06	1.00	0.60	0.025	0.020	6.00~7.00	—	—	—	—
E5516-N13	0.06	1.00	0.60	0.025	0.020	6.00~7.00	—	—	—	—
E5518-N3M3	0.10	0.80~1.25	0.60	0.02	0.02	0.8~1.10	0.10	0.40~0.65	0.02	Cu0.10 Al0.05
E308-15	0.08	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	9.0~11.0	18.0~21.0	0.75	—	Cu≥0.75
E308-16										
E309-15	0.15	0.5~2.5	0.90	0.040	0.030	12.0~14.0	22.0~25.0	0.75	—	Cu≥0.75
E309-16										
EXX15-G	—	≥1.00	≥0.80	—	—	≥0.50	≥0.30	≥0.20	—	—
EXX16-G	—	≥1.00	≥0.80	—	—	≥0.50	≥0.30	≥0.20	—	—

附录 F
(资料性附录)
AWS 常用低温焊条

表 F 给出了美国焊接学会 (AWS) 常用低温钢焊条的类别、熔敷金属化学成分及力学性能。

表 F AWS 常用低温焊条

焊条类别	特征和用途	熔敷金属化学成分 %										熔敷金属拉伸试验		熔敷金属冲击试验	
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	抗拉强度 MPa	伸长率 %	试验温度 °C	冲击功 J		
E8016-C1	这些低氢焊条用来提供有较高强度, 但在空气中淬硬或在-175°F (-115 °C) 低温下有较高缺口韧性的熔敷金属。按规定, 钢中的镍含量有五个名义等级, 即 1%Ni、1.5%Ni、2.5%Ni、3.5%Ni 和 6.5%Ni。碳含量提高到 0.12%, 强度提高, 允许将这些 Ni 钢焊条分类为 E801Y-CX。然而, 较低含量的碳可改善低温性能, 也可与诸如 ASTM A203 Gr.E、ASTM A352 LC3 和 LC4 类别的镍钢母材相匹配。因此, 应根据预期应用场合和需要的力学性能等因素来确定是否应选择“L级”	≤0.12	≤1.25	≤0.60	≤0.03	≤0.03	—	—	2.00~2.75	550	19	-59	≤27		
E8018-C1		≤0.12	≤1.25	≤0.80	≤0.03	≤0.03	—	—	2.00~2.75	550	19	-59	≤27		
E7015-C1L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	2.00~2.75	480	25				
E7016-C1L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	2.00~2.75	480	25				
E7018-C1L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	2.00~2.75	480	25				
E8016-C2		≤0.12	≤1.25	≤0.60	≤0.03	≤0.03	—	—	3.00~3.75	550	19	-73	≤27		
E8018-C2		≤0.12	≤1.25	≤0.80	≤0.03	≤0.03	—	—	3.00~3.75	550	19				
E7015-C2L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	3.00~3.75	480	25	-101	≤27		
E7016-C2L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	3.00~3.75	480	25	-101	≤27		
E7018-C2L		≤0.05	≤1.25	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	3.00~3.75	480	25	-101	≤27		
E8016-C3		≤0.12	0.40~1.25	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	550	24	-40	≤27		
E8018-C3		≤0.12	0.40~1.25	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	550	19	-40	≤27		
E7018-C3L		≤0.08	0.40~1.40	≤0.50	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	480	25	-51	≤27		
E8016-C4		≤0.10	≤1.25	≤0.60	≤0.03	≤0.03	—	—	1.10~2.00	550	19	-51	≤27		
E8018-C4		≤0.10	≤1.25	≤0.80	≤0.03	≤0.03	—	—	1.10~2.00	550	19	-51	≤27		
E9015-C5L	≤0.05	0.40~1.00	≤0.50	≤0.03	≤0.03	—	—	6.00~7.25	620	17	-115	≤27			

附录 G
(资料性附录)
AWS 常用低温焊丝

表 G 给出了 AWS (美国焊接学会) 低温焊丝类别、熔敷金属化学成分及力学性能。

表 G AWS 常用低温焊丝

焊丝类别	特征和用途	熔敷金属化学成分 %										熔敷金属拉伸试验		熔敷金属冲击试验	
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	抗拉强度 MPa	伸长率 %	试验温度 °C	冲击功 J		
ER7XT8-Ni1	这些焊丝焊缝的熔敷金属具有 0°F (-73 °C) 低温下有较高缺口韧性。Ni 含量分成三个等级, 即 1%Ni、2.25%Ni、3.25%Ni。EXXTX-Ni(X) 类焊丝常常用于要求优越韧性的结构用途	≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	480~620	20	-29	≤27		
ER7XT6-Ni1		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	480~620	20	-29	≤27		
ER6XT1-Ni1 ER6XT1-Ni1M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	410~550	22	-29	≤27		
ER8XT1-Ni1 ER8XT1-Ni1M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	550~690	19	-29	≤27		
ER8XT5-Ni1 ER8XT5-Ni1M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	0.80~1.10	550~690	19	-51	≤27		
ER8XT1-Ni2 ER8XT1-Ni2M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	1.75~2.75	550~690	19	-40	≤27		
ER8XT5-Ni2 ER8XT5-Ni2M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	1.75~2.75	550~690	19	-60	≤27		
ER9XT1-Ni2 ER9XT1-Ni2M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	1.75~2.75	620~760	17	-40	≤27		
ER7XT8-Ni2		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	1.75~2.75	480~620	20	-29	≤27		
ER8XT8-Ni2		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	1.75~2.75	550~690	19	-29	≤27		
ER8XT5-Ni3 ER8XT5-Ni3M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	2.75~3.75	550~690	19	-73	≤27		
ER9XT5-Ni3 ER9XT5-Ni3M		≤0.12	≤1.5	≤0.80	≤0.03	≤0.03	≤0.15	≤0.35	2.75~3.75	620~760	17	-73	≤27		

表 G AWS 常用低温焊丝 (续)

焊丝类别	特征和用途	熔敷金属化学成分 %										熔敷金属拉伸试验		熔敷金属冲击试验	
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	抗拉强度 MPa	伸长率 %	试验温度 °C	冲击功 J		
ERNi1	这些焊丝焊缝的熔敷金属具有-100°F (-73 °C) 或更低温度下有较高缺口韧性。Ni 含量分成三个等级, 即 1%Ni、2.25%Ni、3.25%Ni 钢	≤0.12	0.75~1.25	0.05~0.30	≤0.02	≤0.02	≤0.15	≤0.30	0.75~1.25	—	—	—	—		
ERNi1K		≤0.12	0.80~1.40	0.40~0.80	≤0.02	≤0.02	—	—	0.75~1.25	—	—	—	—		
ERNi2		≤0.12	0.75~1.25	0.05~0.30	≤0.02	≤0.02	—	—	2.10~2.90	—	—	—	—		
ERNi3	EXXTX-Ni(X) 类焊丝常用于要求优越韧性的结构用途	≤0.13	0.60~1.20	0.05~0.30	≤0.02	≤0.02	≤0.15	—	3.10~3.80	—	—	—	—		
ERNi4		0.12~0.19	0.60~1.00	0.10~0.30	≤0.015	≤0.02	—	0.10~0.30	1.60~2.10	—	—	—	—		
ERNi5		0.12	1.20~1.60	0.05~0.30	≤0.02	≤0.02	—	0.10~0.30	0.75~1.25	—	—	—	—		
ERF1	这些焊丝含有 0.5% 和 2% 之间的镍与 0.25% 和 0.5% 之间的 Mo。当要求强度和良好的缺口韧性组对时, 用于焊接高强度、低合金或微合金结构钢	0.07~0.15	0.90~1.70	0.15~0.35	≤0.025	≤0.025	—	0.25~0.55	0.95~1.60	—	—	—	—		
ERF2		0.10~0.18	1.70~2.40	0.20	≤0.025	≤0.025	—	0.40~0.65	0.40~0.80	—	—	—	—		
ERF3		0.10~0.18	1.70~2.40	0.30	≤0.025	≤0.025	—	0.40~0.65	0.70~1.10	—	—	—	—		
ERF4	这些焊丝采用 Cr、Ni 和 Mo 的组合来达到许多高强度、低合金或微合金结构钢所要求的强度水平和缺口韧性	0.16~0.23	0.60~0.90	0.15~0.35	≤0.025	≤0.03	0.40~0.60	0.15~0.30	0.40~0.80	—	—	—	—		
ERF5		0.10~0.17	1.70~2.20	0.20	≤0.01	≤0.015	0.25~0.50	0.45~0.65	2.30~2.80	—	—	—	—		
ERF6		0.07~0.15	1.45~1.90	0.10~0.30	≤0.015	≤0.015	0.20~0.55	0.40~0.65	1.75~2.25	—	—	—	—		

附录 H
(资料性附录)
低温用焊条冲击试验规定

表 H 给出了低温用焊条冲击试验的规定。

表 H 低温用焊条冲击试验规定

焊条型号	试验温度 ℃	延伸率 %	冲击功 J
E4310	-30	≥20	≥27
E4311	-30	≥20	
E4315	-30	≥20	
E4316	-30	≥20	
E4318	-30	≥20	
E4327	-30	≥20	
E5010	-30	≥20	
E5011	-30	≥20	
E5015 E5016	-30	≥20	
E5016-1	-45	≥20	
E5018	-45	≥20	
E5018-1	-45	≥20	
E5027	-30	≥20	
E5048	-30	≥20	
E5716	-30	≥16	
E5010-P1	-30	≥20	
E5518-P2	-30	≥17	
E5545-P2	-30	≥17	
E5518-3M2	-50	≥17	
E5515-3M3	-50	≥17	
E5516-3M3	-50	≥17	
E5518-3M3	-50	≥17	
E5015-N1	-40	≥20	

表 H 低温用焊条冲击试验规定 (续)

焊条型号	试验温度 ℃	延伸率 %	冲击功 J
E5016-N1	-40	≥20	≥27
E5028-N1	-40	≥20	
E5515-N1	-40	≥17	
E5516-N1	-40	≥17	
E5015-N2	-40	≥20	
E5016-N2	-40	≥20	
E5018-N2	-50	≥20	
E5515-N2	-40	≥20	
E5516-N2	-40	≥20	
E5518-N2	-40	≥20	
E5015-N3	-40	≥20	
E5016-N3	-40	≥20	
E5515-N3	-50	≥17	
E5516-N3	-50	≥17	
E5516-3N3	-50	≥17	
E5518-N3	-50	≥17	
E5015-N5	-75	≥20	
E5016-N5	-75	≥20	
E5018-N5	-75	≥20	
E5028-N5	-60	≥20	
E5515-N5	-60	≥17	
E5516-N5	-60	≥17	
E5518-N5	-60	≥17	
E5015-N7	-100	≥20	
E5016-N7	-100	≥20	
E5018-N7	-100	≥20	
E5515-N7	-75	≥17	

表 H 低温用焊条冲击试验规定 (续)

焊条型号	试验温度 ℃	延伸率 %	冲击功 J
E5516-N7	-75	≥17	≥27
E5518-N7	-75	≥17	
E5515-N13	-100	≥17	
E5516-N13	-100	≥17	
E5518-N2M3	-40	≥17	
<p>注 1: 测定五个冲击试件的吸收能量, 去掉一个最大值和一个最小值, 余下的三个值中两个不小于 27J, 另一个不小于 20J, 三个值的平均值不小于 27J。</p> <p>注 2: 如果焊条型号中附加了“U”, 按 1 方法测定, 三个值中仅允许一个值小于 47J, 但不应小于 32J, 三个值的平均值不应小于 47J。</p>			

本规范用词说明

- 1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中华人民共和国石油化工行业标准

石油化工低温钢焊接规范

SH/T 3525—2015

条文说明

2015 北 京

修 订 说 明

SH/T 3525—2015《石油化工低温钢焊接规范》，经工业和信息化部 2015 年 4 月 30 日以第 28 号公告批准发布。

本规范是在 SH/T 3525—2004《石油化工低温钢焊接规程》的基础上修订而成，上一版的主编单位是中国石化集团第十建设公司，主要起草人员是张桂红、吴忠宪。

本规范修订过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了我国工程建设焊接领域的实践经验，同时参考了国外先进技术法规、技术标准，通过试验取得了一些重要技术参数。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《石油化工低温钢焊接规范》编制组按章、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

1 范围	35
3 术语和定义	35
4 材料验收	35
6 焊前准备	36
7 焊接工艺	36
8 焊后热处理	36
9 焊接检验	36

石油化工低温钢焊接规范

1 范围

为了适应现场低温钢焊接的需要，规范名称改为《石油化工低温钢焊接规范》，扩大了低温钢焊接的适用范围，覆盖了天然气和煤化工等领域。

3 术语和定义

根据有关资料，低温钢的定义温度有 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。日本标准中规定 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为低温，西德的 DIN 标准定义低温用钢工作温度在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，也有的资料提到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为低温。美国的 ASME 规范对低温没有明确的定义，但他将 -20°F ($-29\text{ }^{\circ}\text{C}$) 作为一个控制指标，无论对于容器还是管道都是一致的。

GB 150 对低温压力容器的定义是低于或等于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，GB 50517《石化金属管道工程施工质量验收规范》规定低温管道为设计温度小于 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，所以在本规范中就不作统一的规定，当进行容器的焊接时，以低于或等于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为低温容器，当进行管道的焊接时，以小于等于 $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为低温管道。

4 材料验收

4.1 一般规定

4.1.1 钢中存在微量的磷、硫、砷、锡、铅、铋等元素及氮、氧、氢等气体，对钢的韧性起有害作用。镇静钢的含氧量低，且具有细晶粒组织，使金属有较高的断裂强度而作为低温用钢。另外淬火时效和应变时效，都使钢的脆性转变温度升高，增加低温脆断的敏感性，因此对时效敏感的沸腾钢不能作为低温用钢。

4.1.3 工程上用缺口试样的冲击试验来评价低温钢的韧性，低温夏比（V 型缺口）冲击试验值是低温钢的一个非常重要的指标。

4.1.5 特性数据主要指化学成分分析、拉力试验、冲击试验、水压试验、压扁试验、扩口试验、超声波检测、涡流试验等获得的数据。本条强调了订货合同中规定的项目，并非所有的特性数据。

4.2 钢材验收

4.2.2 规定了奥氏体不锈钢使用的要求，适用于制造低温容器、管道等的奥氏体不锈钢材料，当满足条款的要求时，可不进行低温冲击韧性试验。

GB 150 及 ASME 第八—1、ASME B31.3 的 323.2.2 对此都有相关的规定。

ASME 第八卷第一分册 UHA 规定铬镍奥氏体不锈钢满足下列条件，可免除母材和热影响区的冲击试验：

——最低金属设计温度（MDMT）高于或等于 -320°F ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时，材料牌号为 304、304L、316、316L、347；

——最低金属设计温度（MDMT）高于或等于 -320°F ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时，不在上款中所列牌号，但含碳量不超过 0.10% 的材料；

——最低金属设计温度（MDMT）高于或等于 -55°F ($-48\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时，含碳量超过 0.10% 的材料。

ASME B31.3 的 323.2.2 规定下列情况冲击试验可不要求：

——对于奥氏体不锈钢母材含碳量不超过 0.1%，焊接没有使用填充材料，设计最小温度高于或等于 $-101\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-150°F) 时；

——对于奥氏体焊缝，其含碳量不超过 0.1%，使用的填充材料符合 AWS A5.4、A5.9、A5.11、

A5.14 及 A5.22, 设计最小温度高于或等于 -101°C (-150°F) 时;

——对于奥氏体焊缝, 其含碳量超过 0.1%, 使用的填充材料符合 AWS A5.4、A5.9、A5.11、A5.14 及 A5.22, 设计最小温度高于或等于 -46°C (-50°F) 时。

4.5 材料管理

目的是一方面以防施工过程中低温钢材料与碳钢材料混用, 另一方面防止焊接材料管理不当, 对焊接质量会造成不利影响。

6 焊前准备

6.2 组对定位

6.2.3 对于临时支架、卡具等与焊件接触部分, 主要强调对母材的影响, 特别是连接焊缝部分熔入母材, 造成对母材成分的稀释, 一般要求焊材使用正式焊接时使用的焊接材料, 这里也充分考虑到经济实用原则。

6.2.5 质量等级要求为 1 级的管道是指按 GB 50517《石油化工金属管道工程施工质量验收规范》中的管道分级 SHA1、SHB1 和 SHC1, 检测比例为 100%。

7 焊接工艺

7.2 预热

5Ni、8Ni、9Ni 钢的预热温度大于或等于 10°C 是根据 ASME B31.3 的相关条款而确定, ASME B31.3 规定如果环境温度低于 32°F (0°C), 要求对 5Ni、8Ni、9Ni 钢进行预热的温度是 50°F (10°C)。

7.3 焊接

7.3.2 低温钢焊接时, 除了要防止出现裂纹外, 关键是要保证焊缝和过热区的低温韧性, 这是低温钢焊接工艺的一个根本出发点, 解决热影响区韧性途径只是控制焊接线能量, 因此推荐选择较小的焊接线能量。焊接线能量应根据焊接工艺评定来选择, 选择时尽量选择工艺评定的下限。

厚壁低温钢焊接采用多层多道焊的焊接工艺, 焊接材料的摆动弧度要求尽量小, 并且要求层间、道间接头尽量错开, 一般要求错开 30mm 以上, 以尽量避免焊接时热循环产生的层间应力集中。

7.3.4 低温钢焊接时, 要求严格控制层间及道间温度, 在焊接工艺评定时, 要求控制上限, 在满足焊接质量要求, 尽量采用小的层间温度, 但有预热要求时, 温度不得低于预热要求最低的温度, 厚壁不锈钢焊接的层间、道间温度不得高于 150°C 。

8 焊后热处理

8.1 1.5Ni~9Ni 钢都属于低温镍钢, 一般情况 1.5Ni~3.5Ni 采用同材质焊材, 因此预热温度较高, 需要进行热处理。而 5Ni、8Ni、9Ni 钢一般采用奥氏体焊接材料, 一般不预热、不热处理。

9 焊接检验

9.1 外观检查

低温钢多数在低温状态下使用, 焊缝外观成形对管道的使用性能有较大影响, 焊接完毕的焊缝进行外观质量检查尤为重要, 应控制咬边、弧坑、未焊满、夹渣等缺陷和焊缝余高。

9.2 无损检测

9.2.3 本次修订增加了 TFOD (衍射时差法超声波) 的检测方法。由于 TOFD 效率较高、对环境影响小, 且对厚壁管易产生的缺陷敏感, 因此对于超过一定壁厚的管径较大的低温钢管道, 在条件允许情况下, 推荐优先采用 TOFD 进行检测。