

# 浅析 Ti35 合金材料焊接接头质量控制

贾开斌 丁凌 李政辉 张帅 龚庆

(中国核工业二三建设有限公司 浙江 海盐 314300)

**摘要:** Ti35 合金具有良好的力学性能、焊接性能、成型性能、冷(热)加工性能,其优良的耐腐蚀性能,在我国工业现代化建设中得到了广泛应用。本文对 Ti35 合金材料焊接接头质量控制方法进行研究,确保焊接接头的力学性能和可靠性,提高 Ti35 合金材料的焊接质量。

**关键词:** Ti35 合金材料; 焊接接头; 质量问题; 质量控制

## 0 引言

Ti35 合金作为新型材料,其优异的耐腐蚀性能优于不锈钢材料,在我国冶金行业、装备制造业、石油、化工及石化行业等领域中关键设备、压力容器、压力管道的理想材料。

## 1 Ti35 合金的特点与应用

Ti35 合金是以钛为基加入钽元素组成的合金,钽元素的抗化学腐蚀能力极强,属于优质耐蚀材料。Ti35 合金在强酸、碱溶液中形成一层致密而稳定的氧化膜,是关键设备、压力容器、压力管道的最佳防腐蚀材料,极大保障了设备、压力容器、管道运行过程中的安全性。

Ti35 合金的焊接质量直接影响其工厂的关键设备、压力容器、压力管道的整体运行质量。因此,焊接接头作为焊缝质量的关键控制点,其质量合格与否显得极为重要。Ti35 合金材料焊接应根据国家相关标准规范要求,编制出合理可行的焊接工艺评定报告及焊接作业指导书,并严格按焊接作业指导书对焊接的先决条件、焊接过程和焊后无损检验等进行接头质量控制。

## 2 Ti35 合金材料焊接接头质量问题和原因分析

以 Ti35 合金管材(以下简称“管道”)生产厂为例,在生产中的某批次 Ti35 合金压力管道中,通过对此批次管道抽样进行焊接,并对焊缝进行射线检测,确定其焊接接头性能是否符合规范要求。

### 2.1 焊接热源

管道生产厂采用直流正接 TIG 焊接方法,该焊接方式具有很好的气密保护性,且电弧稳定,热输入易控制。为有效保证焊接质量,并降低层道间焊缝产生气孔的风险,选用高纯度( $\geq 99.999\%$ )的氩气作为保

护气。

### 2.2 接头质量问题

#### 2.2.1 接头型式

Ti35 合金管道接头型式为管对接接头,规格为 DN25、DN40。采用小管坡口机加工焊缝坡口,组对后坡口角度为  $\alpha: 55^\circ \pm 5^\circ$  的 V 形坡口,根部间隙  $b: 2 \sim 4\text{mm}$ ,钝边  $p: 0 \sim 2\text{mm}$ ,接头型式如图 1 所示。

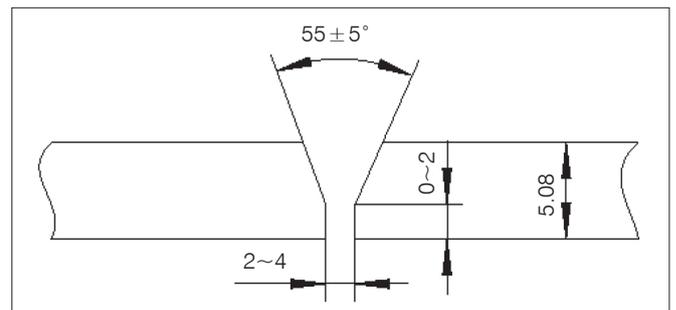


图 1 Ti35 合金管道接头型式

#### 2.2.2 人员及焊材

焊接操作人员、焊接检验人员及无损检测人员,均已取得国家标准规范要求的从业资格证书,并在管道焊接及无损检验过程中,依据相应的国家标准规范履行其职责。

Ti35 合金焊接所使用的焊丝,其焊接性能满足国家标准 Q/NIN 1550-2014 的相关要求,对于焊材的进厂验收、入库、分发使用,均严格按照相关标准规范要求执行。

#### 2.2.3 焊接工艺参数

焊接作业指导书是依据生产厂焊接工艺评定报告编制而成,用于指导焊接施工。焊接工艺参数见表 1。

#### 2.2.4 焊接接头质量问题

生产厂对焊接完成的 50 道焊接接头,通过射线检测方式,其中 DN25 规格检测 37 道, DN40 规格检测 13 道,结果显示: DN25 规格 12 道焊缝不合格, DN40

表1 焊接工艺参数

焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流		电弧电压 / V	焊接速度 / (cm/min)	氩气纯度 / %	线能量 / (kJ/cm)
		型号	直径	极性	电流 / A				
1/3	GTAW	Ti35HS	$\phi$ 2.0	直流正接	60 ~ 120	8 ~ 12	8 ~ 10	$\geq$ 99.999	2.88 ~ 10.8
2/3	GTAW	Ti35HS	$\phi$ 2.0	直流正接	70 ~ 130	9 ~ 13	11 ~ 14	$\geq$ 99.999	2.7 ~ 9.21
3/3	GTAW	Ti35HS	$\phi$ 2.0	直流正接	70 ~ 130	9 ~ 13	11 ~ 14	$\geq$ 99.999	2.7 ~ 9.21

规格5道焊缝不合格。放射线检测底片中,接头缺陷主要表现为气孔、未熔合、凹陷、夹渣、咬边,导致焊接接头性能不满足标准规范要求。

### 2.3 接头质量问题原因分析

#### 2.3.1 产生气孔的原因

气孔缺陷对焊缝性能有较大影响,在降低焊接接头有效面积的同时,也降低了焊接接头的机械性能。通过射线底片显示,Ti35管道焊接接头气孔多为密集气孔、条形气孔及单个圆形气孔,气孔产生原因如下。

(1) 密集气孔焊接作业时,焊工所配备的氩弧把内部钨极夹因使用时间较长出现形变扭曲导致氩气流紊乱不均匀,带空气进入熔池;

(2) 条形气孔多见于焊道层间两侧,产生原因是焊道之间上层焊缝的熔池铁水未能将下层焊缝间的夹沟填满,形成熔合不良,气体未能溢出,形成条形气孔;

(3) 单个圆形气孔是焊接过程中氩气对熔池保护不到位,空气中的水分以及其他有害气体进入焊缝熔池未能及时溢出;

(4) 焊接部位存在油脂或灰尘、杂物,以及机械加工坡口时存在加工工具污染坡口的因素。

#### 2.3.2 产生未熔合的原因分析

未熔合产生的三种形式以及原因如下:

(1) 根部未熔合,采用焊接作业指导书中电流选择偏小,打底时,钨极伸出长度达不到坡口根部,停留时间不足,导致出现根部未熔合;

(2) 坡口未熔合,主要出现在多层多道焊中,焊缝坡口侧有锈垢及污物,层间清渣不彻底等,焊接人员在焊接过程中,电弧未在坡口两侧稍作停顿,导致熔池铁水未能与母材充分熔合,形成坡口未熔合;

(3) 层间未熔合,是下层焊缝与上层焊缝间的未熔合,其下层焊缝余高较高,在焊接上层焊缝时,因下层焊缝余高未打磨,焊接热输入偏低,导致上层焊缝熔池与下层焊缝余高两侧熔深不足,形成层间未熔合;

(4) 焊接过程中由于焊道层间清洁度达不到要求,也是导致Ti35合金制管道在焊接过程中出现未熔合缺陷问题的原因之一。

#### 2.3.3 产生凹陷的原因分析

凹陷是指接头表面或者接头背面,焊缝金属填充低于母材表面的局部凹陷部分。凹陷产生的形式及原因有:

(1) 接头(正)表面的凹陷,主要产生的位置是立焊到平焊位置且在焊接接头的中间部位,钨极在摆动过程中中心部位停留时间过短,焊缝金属填充不足,焊接时接头搭接不充分而形成凹陷;

(2) 接头(反)背面的凹陷填充时,电流过大,焊接速度过慢,将上层焊道融化而形成的凹陷部位。

#### 2.3.4 产生夹渣的原因分析

(1) 焊接工艺电流偏小,速度快,熔池金属冷却时,熔渣无法及时溢出;

(2) 坡口侧未打磨干净,焊缝清洁度不达标,焊层间氧化皮及杂质未打磨干净;

(3) 熔敷金属与母材间断续未充分熔合,夹渣物与铁水分离不及时,导致夹渣。

#### 2.3.5 产生咬边的原因分析

咬边会使母材金属的有效截面减少,在咬边处造成应力集中,从而降低了焊接接头的强度,且咬边处因应力集中易形成裂纹,从而破坏整体结构的稳定性。咬边产生原因主要有:

(1) 焊接工艺电流调节较大,电弧过长;

(2) 电弧在焊缝两侧停顿时间短且焊接速度较快,液态金属未能填满焊缝熔池造成咬边。

## 3 提高Ti35合金材料焊接接头质量的措施

### 3.1 材料检验

材料检验包括Ti35合金材料和焊接材料的复验。Ti35合金材料可根据相关规定,对材料通过光谱分析、金相检验以及力学性能复验等。焊接材料的复验是对熔敷金属的力学性能检验以及焊材化学成分检验等。两者均复验合格后,方可用于产品焊接。

### 3.2 优化Ti35合金材料焊接接头工艺评定

Ti35合金材料的焊接工艺评定可靠性,对编制焊接作业指导书至关重要,也是直接影响Ti35合金材料焊接的重要因素之一。因此,应严格根据相关标准规

范编制焊接工艺评定,通过优化焊接接头的坡口间隙、焊接电流等方式,确定可靠、合理的焊接工艺参数。

### 3.3 焊前先决条件准备

#### 3.3.1 图纸和工艺

焊接人员在焊接前应通过焊接工程师组织的焊接技术交底,交底内容应明确 Ti35 合金材料焊接的质量控制重点、难点、控制措施及质量要求。焊接人员需熟知生产图纸施工顺序、焊接工艺参数、层间温度控制要求等,这是确保 Ti35 合金焊接质量控制的重要环节。

#### 3.3.2 建立符合清洁度要求的焊接场所

建立 Ti35 合金材料焊接隔离区,要求区域内无污染、无灰尘、无金属粉尘和无铁离子污染的洁净环境,隔离区应有良好的防风措施,并且施焊前应对隔离区进行清洁度检查,保证合格后再进行焊接。

#### 3.3.3 焊接组对前的检查

(1) 焊缝坡口采用坡口机打磨,避免氧化,打磨完成后,为确保焊缝坡口的清洁度,应使用对 Ti35 合金母材无影响且灵敏度等级较高的渗透剂进行液体渗透检验,对焊缝坡口表面进行缺陷检查;

(2) 组对前,对坡口内外表面以及管道的内部用 99.999% 的氩气进行吹扫,且必要时,应使用丙酮擦洗坡口及其两侧 20 ~ 50 mm 范围内的区域后,再进行液体渗透检验,确保坡口内外清洁度;

(3) 焊丝在使用前必须用绸布蘸丙酮擦洗,确保焊丝表面清洁度;擦拭后的焊丝放置在专用的焊丝筒中,严禁与其他焊丝混装,以防止铁离子污染焊丝;

(4) 检查焊机、氩气表检定合格证的有效时间,保证焊机、氩气表的有效性;

(5) 焊接保护气体使用纯度不得低于 99.999% 的氩气,管道焊接时必须待管道内部空气被高纯氩气置换完成后进行;

(6) 钨极打磨使用钨极削磨器,小电流焊接时钨极打磨出小的夹角和尖角,大电流焊接时打磨出适当的夹角,端部打磨成大角度、圆角。钨极伸出保护瓷嘴长度,对接焊缝时钨极伸出保护瓷嘴长度一般保持在 5 ~ 6mm,焊接角焊缝时钨极伸出保护瓷嘴长度最好为 7 ~ 8mm,利于氩气对熔池保护。

### 3.4 焊接过程中的质量控制

#### 3.4.1 焊接方法

采用直流正接 TIG 焊接方法,严格根据焊接作业指导书要求制备焊缝的坡口角度、根部间隙及钝边等。

#### 3.4.2 点固焊

管道焊接应在管道内部空气被高纯氩气置换完成后进行点固焊。点固焊处不允许有表面缺陷及氧化现象。

在发现焊缝表面出现氧化现象时。应先将点固处的氧化打磨清理干净。同时焊接时用保护拖罩保护。点固焊完后,用铰刀将点固点两侧打出斜坡以利于焊接接头。

#### 3.4.3 焊接过程中的质量控制

焊接过程严格依据焊接作业指导书要求进行焊接,打底焊接时,起弧点应在引弧板处进行引弧。打底焊道完成后,使用内窥镜检查焊缝背面成形及背部余高。为防止层间接头处弧坑缩孔、气孔,应增加熔池停留时间,利于铁水填满弧坑以及氢气泡逸出熔池。多层多道焊接时,在下层焊缝余高过高的情况下,应将焊缝余高打磨平整,焊接时电弧在坡口两侧注意停留,保证焊缝圆滑过渡,避免出现层间和坡口未熔合。起弧接头需等到熔池内铁水流动性正常后方可填充金属,收弧接头需打磨 1:4 缓坡,接头完成熔池扩大后需继续添加铁水,再向前移动收弧。

多层多道焊过程中焊道的层间温度会随之升高,钛及钛合金吸收氢、氧、氮的能力也随着层间温度的升高而上升,在 250℃ 左右开始吸收氢,400℃ 左右开始吸收氧,600℃ 左右开始吸收氮,如果氩气保护效果不好,这些气体被熔池吸收后,且熔池未能及时将气体溢出,将会形成气孔,引起焊接接头应力集中,严重时形成裂纹降低焊缝强度。因此,要严格控制焊缝层间温度,使用红外线测温仪对焊缝表面温度进行检测。为防止层间温度过快上升,可在焊口两侧 500mm 处设置液氮制冷盒,以此降低焊接过程中焊道的温升速度,液氮制冷盒外部必须进行包裹防护,在焊接过程中,用红外线测温仪对制冷盒处进行温度监测。

经研究表明,Ti35 合金焊接接头产生冷裂纹与焊接接头中氢的扩散有关。为防止氢化物对焊接接头以及热影响区的影响,在进行盖面焊缝前,应及时撤走液氮制冷盒,在焊接完成后,应采取缓冷措施,使焊接接头中的氢向外溢出,降低焊接接头中的氢含量。

### 3.5 焊接接头的质量检验

Ti35 合金管道焊接每道工序都应设置质量控制点。质量检验员及焊接工程师应对每道工序进行监督,经检验合格并在施工记录中签字确认后,转入下道工序。对达不到规定要求的工序,严禁焊接,经整改完成并经检验合格后方可作业。

### 3.6 可靠性检验方法

Ti35 合金材料的焊接完成后,应采用 100% 的射线检验,射线检验过程中应采用 Ti35 合金专用的像质计,生产厂采用 NB/T 47013.2-2015《承压设备无损检测》B 级高灵敏度射线检测技术进行检测,质量等级为

(下转第 40 页)

制失灵的情况,另外,分布式电火花线切割机床控制系统的性能较高,性价比也较高,具有极大的推广价值,在未来的电加工业中,尤其是高速走丝线切割机床的优化和升级中能够发挥较大的作用,使用前景十分明朗。

#### 参考文献:

- [1] 邹逸君, 汤维磊, 蔡宇, 等. 一种基于物联网的电火花线切割机床远程监控管理授权系统[J]. 电加工与模具, 2018(01): 17-19+29.
- [2] 黎毅锋, 刘智, 刘俊, 等. 基于电火花线切割工艺的发动机连杆裂解槽加工技术综述[J]. 制造技术与机床, 2021(08): 108-112.
- [3] 吴国兴, 张保全, 陈以祥, 等. 第二十届中国国际模具技术和设备展览会模具制造装备评述[J]. 电加工与模具, 2021(02): 15-21.
- [4] 潘伯郁. 往复走丝电火花线切割机床智能自适应采样控制系统和纳秒级高频电源的研发及应用[J]. 电加工与模具, 2020(06): 25-28.
- [5] 聂成艳, 王应, 吴悦, 等. 转型期电加工机床市场

的嬗变与出路——来自企业的思考与展望[J]. 电加工与模具, 2019(S1): 1-18.

- [6] 彭世康, 杜轩宇, 刘桂贤, 等. 双槽电火花线切割机床电气系统研制及工艺研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(22): 2585-2590.
- [7] 马晓欣, 王新明, 刘丽娟, 等. 利用数控电火花线切割机床和车床加工带凸台齿轮的工艺分析[J]. 时代农机, 2017, 44(05): 121+151.
- [8] 叶军, 陈德忠, 肖荣诗, 等. 第十四届中国国际机床展览会特种加工机床评述[J]. 电加工与模具, 2015(04): 1-12.
- [9] 黎毅锋, 刘智, 刘俊, 等. 基于分时模糊控制法的单丝双连杆应力槽线切割加工控制研究[J]. 控制工程, 2022(03): 1-7.
- [10] 吴国兴, 肖荣诗, 林峰, 等. 第十七届中国国际机床展览会特种加工机床评述[J]. 电加工与模具, 2021(03): 6-18.
- [11] CIMT 2021 特种加工机床评述专家组. 第十七届中国国际机床展览会特种加工机床评述[J]. 世界制造技术与装备市场, 2021(03): 52-63.

(上接第36页)

I级合格。经射线检验合格后,还应通过耐压试验、气密性试验、泄漏性试验以确保焊接接头质量。

### 3.7 缺陷焊缝的返修

对于Ti35合金制管道射线检验不合格的焊缝,应按相关标准规范制定《Ti35合金焊缝返修和补焊管理规定》,严格根据规定进行返修工作。通过射线底片缺陷状态,分析其产生的原因,由责任焊接工程师出具详细具体的返修方案。返修方案中应明确返修过程中的质量控制要点,方案报焊接负责人、技术总工程师审批通过后实施,操作人员应严格遵守返修方案要求进行返修作业。

返修过程中,应对每层焊缝进行液体渗透检验,通过渗透、清洗、显像、观察4个步骤检查焊缝表面,焊接工程师和无损检验人员对返修焊缝进行互检合格后,再进行下层焊缝的作业,直至返修完成并通过射线检验,从而确保返修焊缝的质量。

## 4 结语

Ti35合金焊接通过改进、创新新型焊接保护工装,

具有无损检测合格率高、焊接效率高、焊缝力学性能好的优点。液氩制冷盒能有效控制Ti35合金管道焊接时焊缝及热影响区的温升,在提高焊接过程中氩气的保护效果同时,有效降低了焊接接头的氢元素含量,降低裂纹产生的风险。

通过焊接工程师加强Ti35合金焊接技术交底工作,制定可靠的质量控制及预防措施,在焊口组对、焊接过程中的各个环节,对Ti35合金管道的焊接质量进行层层把控。焊接人员严格按焊接作业指导书规定要求执行作业,选择可靠、合理的焊接工艺参数,在焊接过程中防范可能出现的质量问题。同时,专业质量检验人员采用科学的质量控制方法,通过焊接过程中自检、互检、专检的“三检制”方式,以及无损检测交叉并用的检查方法,提高Ti35合金材料的焊接接头质量。

#### 参考文献:

- [1] 吴武华. 核燃料化学工艺学[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.