

# 镍基合金 N06600 的焊接工艺

**摘要：**本文根据镍基合金 N06600 材料的特点，针对有害气体对镍基材料焊接时的影响、焊缝金属流动性差、焊接熔深浅等分析该材料的焊接性能，论述镍基合金 N06600 管道的焊接工艺。

**关键词：**镍基合金 N06600；焊接性能分析；焊接工艺

## 一. 概述

我单位承建的四川维尼纶厂 30 万吨/年醋酸乙烯项目整合甲醇装置中，氧气管道、天然气管道采用镍基合金 N06600 材料，管道的主要规格有： $\phi 325 \times 17.5$ 、 $\phi 114 \times 6.0$ 、 $\phi 89 \times 11.0$ 、 $\phi 48 \times 10$  等。针对镍基合金 N06600 材料焊接难度大，合格率偏低的现象，进行焊接性能分析、制定出焊接工艺并指导焊接作业。

## 二. 材料特性

镍基合金 N06600 材料是 Inconel 系列中的 Ni-Cr-Fe 固溶强化耐蚀合金，在化学、石油、湿法冶金、航天等许多领域广泛应用。其特点是熔点高、耐热、耐腐蚀、强度高，具有良好的抗氧化性能、力学性能和加工性能；象奥氏体不锈钢一样，镍基合金 N06600 材料显微组织也是奥氏体，固态没有相变，母材和焊缝金属的晶粒不能通过热处理细化。其化学成分见表 1，力学性能见表 2。

表 1 N06600 材料的化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	S	Si	Ni	Cr	Cu	Fe
$\leq 0.15$	$\leq 1.0$	$\leq 0.015$	$\leq 0.5$	$\geq 72$	14~17	$\leq 0.5$	6~10

表 2 N0600 材料的力学性能

屈服强度/MPa	抗接强度/MPa	延伸率 $\delta$
355	695	32

## 三. 焊接性分析

镍基合金 N06600 材料焊接时，有害气体对焊缝金属性能有很大的影响，焊件表面的污染物质对焊缝金属性能有很大的影响，容易产生焊接热裂纹；限制热输入，熔池流动性差和熔深较浅等，给焊接带来不利因素。

### 1. 有害气体对镍基合金材料焊接时的影响

常温下，镍基合金材料是比较稳定的，随着温度升高，它的性能开始变化，其吸收氮、氢、氧的能力随之上升。镍基合金材料在 500℃ 高温空气中出现轻度氧化，当温度达到 750℃ 时，则剧烈氧化。随着焊缝含氧量上升，焊缝的抗拉强度和硬度明显上升，而塑性明显下降，焊缝因氧的污染而变脆。同时由于镍的氧化物的熔点比镍本身的熔点高出了近 45%，即当镍熔熔化（熔点 1446℃）的时候，氧化镍（熔点 2090℃）还远远没有达到其熔点。所以，在表面上没有完全清除的氧化镍，掺杂在熔池中就会形成夹渣。为防止焊接区域表面的氧化物和避免脆化元素溶入其中，焊接区域表面的清洁工作必须清理彻底。

氮在高温液态金属的溶解度随氧的分压增加而增大，氮对焊缝强度、硬度、塑性的影响比氧更为显著，就是说氮的污染脆化作用比氧更为严重，氮对焊缝的影响主要是对冲击韧度降低。

由于难以避免气体杂质污染所引起的焊接接头脆化，在进行镍基合金材料焊接时对其工艺提出了特殊的要求。采用钨极氩弧打底焊和手工电弧焊盖面是比较合理的焊接方法，但必须注意，通常的焊枪结构和工艺是不足以保证焊接接头质量的。因为一般焊枪结构所形成的气体保护层只能保护焊接熔池不受空气污染，对已凝固而处在高温状态的焊缝及其热影响区则无保护作用。处于这种状态的镍还有很强的吸收空气中氮和氧的能力，势必引起焊缝变脆，而使塑性严重下降。焊缝背面若不采取有效保护，也将产生类似结果，处于高温熔化的熔池和熔滴金属更易被气体杂质污染。因此，必须采取一系列的保护措施，来提高镍基合金材料的焊接质量。

在进行手工钨极氩弧焊焊接时，滞后停气时间应稍长。在重新起弧前剪去焊丝末端，以免将残留在末端上的氧化物带入熔池。采用较大的气罩（如喷嘴直径选大一个的型号  $\phi 12$ ）以便把熔池最大限度地屏蔽在保护气流之中，焊接过程中或者焊接结束后，始终把焊丝的热端留在熔池中。

### 2. 焊件表面的污染物质对镍基合金材料焊接时的影响

焊件表面的清洁性是成功地焊接镍基合金 N06600 材料的一个重要的要求，焊接表面的污染物主要是表面的氧化皮和引起脆化的元素；镍基合金表面氧化皮的熔点比母材高得很多，常常在焊缝金属中可能形成夹渣或细小的不连续氧化物，这类氧化物不连续特别细小，一般射线探伤或着色渗透也检查不出来。脆化元素一般有：S、P、Pb、Sn、Zn 等，焊接时它们与 Ni 形成低熔点共晶，产生热裂纹。

### 3. 焊接热裂纹

镍基耐蚀合金具有较高的热裂纹敏感性。热裂纹分为结晶裂纹、液化裂纹和高温失塑裂纹。结晶裂纹最容易发生在焊道弧坑，形成火口裂纹。结晶裂纹多半沿焊缝中心纵向开裂，也有垂直于焊波。液化裂纹多出现在紧靠熔合线的热影响区中，有的还出现在

多层焊的前焊缝中。高温失塑裂纹既可能发生在热影响区中，也可能发生在焊缝中。各种热裂纹有时是宏观裂纹，且有宏观裂纹时常伴随有微观裂纹，但有时仅有微观裂纹。

#### 4. 限制热输入

采用高热输入方法焊接镍基耐蚀合金可能产生不利影响。在热影响区产生一定程度的退火和晶粒长大。高热输入可能产生过度的偏析、碳化物的沉淀或其他的有害的冶金现象。这就可能引起热裂纹或降低耐蚀性。

在选择焊接方法和焊接工艺时还必须考虑母材的晶粒尺寸。由于粗大晶粒的晶界存在较多的碳化物和促进液化裂纹的金属间化合物，因而就增大了热裂纹倾向。

#### 5. 镍基合金 N06600 材料焊接时熔池流动性差

镍基合金焊缝金属不像钢焊缝金属那样容易润湿展开。即使增大焊接电流也不能改进焊缝金属的流动性，反而起着有害作用。焊接电流超过推荐范围不仅使熔池过热，增大热裂纹敏感性，晶粒粗大降低耐腐蚀性，而且使焊缝金属中的脱氧剂蒸发，出现气孔。焊条电弧焊时，过大的焊接电流也使焊条过热并引起药皮脱落，失去保护作用。

由于焊缝金属流动性差，不易流到焊缝两边。为获得良好焊缝成形，有时采用摆动工艺。但这种摆动是小摆动，摆动距离不超过焊丝或焊条直径的 3 倍。有时焊条电弧焊即使采用摆动工艺也发现有缺陷。缺陷主要有：咬边和未融合。为了消除这些缺陷，焊工在摆动到每一侧极限位置时，要稍停顿一下，以便足够的时间使熔化的焊缝金属与母材充分熔合，并且填满咬边部位。在焊条电弧焊时要采用的另一个重要的工艺措施就是焊接电弧应尽可能的短。

#### 6. 镍基合金 N06600 材料焊接时熔深较浅

焊接过程中，镍基合金固有特性决定了其熔深较浅，单纯靠调整焊接参数不能解决这个问题。根据反复试验克服熔深浅的方法是修改传统的坡口形式，坡口角度在  $55^{\circ} \sim 65^{\circ}$ ，焊缝间隙大约在  $2 \sim 3.5\text{mm}$ ，钝边大约在  $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 。

#### 7. 镍基材料焊缝不允许出现内凹

镍基材料焊接比碳钢和不锈钢对焊缝表面的要求更为严格，镍基材料焊接时，一定要焊成凸形焊道。镍基材料焊接出现开裂的大部分案例是由于凹形焊道的应力集中造成的。

#### 8. 镍基材料焊接时其他注意事项

镍基合金材料焊接过程中的层间温度不宜过高，一般要求在  $100^{\circ}\text{C}$  以下；镍基合金材料焊接一般不需要预热和后热处理。

## 四. 镍基合金 N06600 管道的焊接工艺

### 1. 焊接工艺和焊材选用

管道施工中焊接是非常重要的工序，直接影响管道的安装质量，为提高焊接质量，保证管道内的清洁度，焊接时采用钨极氩弧焊打底，手工电弧焊填充、盖面的焊接工艺。焊丝选用 ERNiCr-3，焊条选用 ENiCrFe-1。焊条烘烤 200~250℃，并在施焊过程中使用保温筒保持焊条干燥。采用钨极氩弧焊打底焊时，焊缝背面应采取氩气保护措施。焊接过程中，焊丝的加热熔化端应始终置于保护气中。表 3 为镍基合金 N06600 管道焊接材料的选择，表 4 为管道对接焊缝焊接工艺参数；表 5 为镍基焊材化学成分，表 6 为镍基焊材的力学性能。

表 3 管道焊接材料选择

焊接方法	焊接材料	
	牌 号	规 格
手工氩弧焊	焊丝：ERNiCr-3	φ 2.4mm
手工电弧焊	焊条：ENiCrFe-1	φ 3.2mm

表 4 管道对接焊缝焊接工艺参数

焊缝层次	焊接方法	填充材料		焊接电流		电弧电压 (V)	焊接速度 (cm/min)	线能量 (J/cm)
		牌号	直径	极性	电流 (A)			
打底层	GTAW	ERNiCr-3	φ 2.4	正接	90~120	10~13	4~7	7714~23400
中间层	SMAW	ENiCrFe-1	φ 3.2	反接	80~110	18~22	9~3	6646~16133

表 5 镍基焊材化学成分

焊丝（条）牌号	C	Si	P	S	Mn	Cr	Ti	Cu	Ni	Fe
ERNiCr-3	0.04	0.07	0.003	0.001	2.90	19.8	0.30	0.01	72.7	1.5
ENiCrFe-1	0.045	0.44	0.005	0.003	2.56	16.35	/	0.01	69.43	8.14

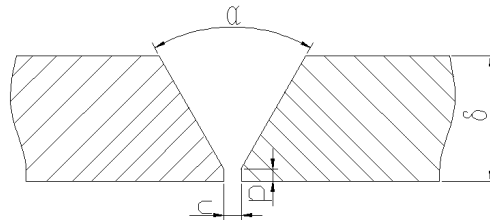
表 6 镍基焊材力学性能

焊丝（条）牌号	屈服强度 /MPa	抗接强度 /MPa	延伸率 δ
ERNiCr-3	358	593	38%
ENiCrFe-1	262	420	44%

## 2. 坡口形式的选择

管道坡口应选用大角度和小钝边的形式，采用等离子加工或机械加工方法加工，管道切口表面应平整，无裂纹、重皮、毛刺、凹凸、缩口、熔渣、氧化物及铁屑等，切口断面倾斜偏差不应大于管子外径的 1%，且不超过 3mm。必须用磨光机磨去影响焊接质量

的表面层，并将凹凸不平处打磨平整。焊前将坡口内外壁 50mm 范围内用不锈钢丝刷、砂轮片清洗干净，去除污物毛刺等，并用丙酮清洗坡口表面，层间彻底清理熔渣、粉尘。坡口加工完毕，要检查坡口表面质量，坡口形式如图 1 所示。



$$c=2\sim 3.5\text{mm}, p=0.5\sim 1\text{mm}, \alpha =55^{\circ}\sim 65^{\circ}, \delta =6.0\sim 17.5\text{mm}$$

### 3. 焊件的组对

焊件组对前，应用手工或机械方法清理，管材内、外表面的坡口两侧 20mm 范围内不得有油污、毛刺、锈斑、氧化皮等有害物质。焊缝组对时，应使内壁平齐，其错边量不得超过壁厚的 10%。

### 4. 定位焊

定位焊要求与正式焊接工艺相同，定位焊长度一般为 10~15mm，高度为 3mm，且不超过管壁的 2/3，焊肉不应有裂纹等缺陷，在施焊第一层前用磨光机将定位焊焊肉两侧磨成缓坡型，便于接头。

### 5. 手工钨极氩弧焊打底焊

(1) 采用直流正接方法，选用  $\Phi 2.4\text{mm}$  的钨极，钨极伸出长度 3~5mm，焊缝不预热，层间温度  $\leq 100^{\circ}\text{C}$ ，喷嘴直径 12mm。焊接前应先用氩气将管子内的空气置换干净后再进行焊接。采用高频引弧，焊枪在焊接时要尽量垂直于焊件，这样能更好的控制熔池的大小，而且可使喷嘴氩气均匀的保护熔池不被氧化。镍基材料导热性、铁水流动性不好，容易热量集中。所以，焊接时采用小电流、摆幅不要过大，两边应稍作停顿，确保两边溶好。

(2) 焊接时钨极端部离焊接件距离 2mm 左右，焊丝要顺着坡口沿着管子的切点送到熔池的前端，利用熔池的高温将焊丝融化，两边稍作停顿，焊丝均匀的、连续送进熔池向前施焊。

(3) 在填丝过程中，焊丝不能与钨极接触或直接深入电弧的弧柱区，否则造成焊缝夹钨和破坏电弧稳定；焊丝端部应置于保护气氛中，重新焊接前焊丝端部应剪去。管子对接固定焊缝全位置焊接时，为防止仰焊内部焊缝内凹，打底层采用仰焊位置内填丝，立、平焊部位外填丝方法进行施焊。

(4) 收尾处打磨成斜坡形，焊至斜坡时，暂停给丝，先用电弧把斜坡出预热并融化成熔孔，迅速加焊丝使焊缝封闭。收弧时要填满弧坑，气体延时保护，避免焊缝在高温

下被大气污染。

## 6. 焊条电弧焊填充、盖面焊接

(1) 焊接前和层间必须进行坡口处理，每一层焊道完成后均应彻底清除焊道表面的熔渣并进行检查，消除各种表面缺陷，检查合格后方可焊接下一层。严禁采用普通砂轮片进行修磨，以免坡口处理不干净，杂质熔入熔池。由于镍基管道合金成分特性、熔点等有区别，当电流过大时熔池高温区间停留过长，使低熔点物聚集，在拉伸应力作用下形成开裂。

(2) 焊接时应采用较小热输入、短弧、小摆动的操作方法以保持电弧电压的稳定，层间温度应在 100℃ 以内。镍基合金焊材所形成的熔池流动性差，焊接电流不宜过大，所以熔池搅动困难。由于电流较小，如果焊条角度不正确，熔池热量保证不了，电弧熔深较浅，造成熔池两边夹渣。所以焊接过程中，焊条角度必须保证 80° ~ 100°，采用轻微摆动焊把来搅动熔池，但搅动的幅度不要超过焊条直径的 3 倍。

(3) 由于镍基材料熔深浅、铁水粘稠、流动性不好等特点，严禁采用大的焊接工艺参数进行焊接。否则熔池高温停留时间过长，使弧坑内铁水出现成分偏析和较大的内应力，造成星状热裂纹。

(4) 焊缝表面严禁有电弧擦伤，且不得有焊件表面引弧或试弧，在焊接中确保起弧的质量，收弧时应在弧坑点焊几点，将弧坑填满，使弧坑不要急速冷却，防止弧坑热裂纹。多层焊的层间接头应相互错开，每条焊缝应一次连续焊完。

## 五. 结束语

通过制定合理的焊接工艺，川维 30 万吨/年醋酸乙烯项目整合甲醇装置顺利地完成了镍基合金 N06600 管道的焊接工作，焊缝射线检测 468 张片，一次合格 461 张片，合格率达到 98.5%，为该装置投产一次成功创造了条件，并为以后同类管道焊接起到一定的指导作用。

### 参考文献

- [1] 陈剑虹 主编，焊手册 第 2 版，机械工业出版社，2001
- [2] 李亚江、陈茂爱、孙俊生 主编，实用焊接技术手册，河北科学技术出版社，2002