浅析MONEL400与不锈钢管道的异种钢焊接

张育卓　路滨　唐元生

【摘要】我公司在某液空项目施工过程中，有一批镍铜合金MONEL400和奥氏体不锈钢TP304L材料的异种钢接头焊接。我们针对两种材料的特性进行研究分析，选择合理的焊接材料和焊接工艺，并进行了焊接工艺评定。根据焊接工工艺评定编制焊接工艺规程，顺利完成了异种钢接头的焊接。为此类异种钢焊接积累了经验。

关键词：MONEL400；不锈钢TP304L；焊接性分析；电弧偏吹

1. 概述

MONEL400属于镍铜合金，是一种单相固溶体Ni-Cu合金，它在很多介质环境下有良好的耐蚀性能。从轻微的氧化性介质环境到中性环境，到适宜的还原性环境，都有良好的耐蚀性能。其特性可以归纳为如下几点：①在海洋和化工环境下有良好的耐蚀性能。②对氯离子应力腐蚀开裂很不敏感。③从零度以下到550℃都有良好的力学性能。④良好的加工和焊接性能。

TP304不锈钢是以Cr、Ni为主要合金元素的奥氏体不锈钢，它最明显的特征是没有磁性。其塑韧性很好，具有良好的焊接性，焊接时一般不需要采取特殊的工艺措施。线膨胀系数大（比碳钢约大50%），而导热系数小（约为碳钢的1/3），均与碳钢和低合金钢差别较大，导致焊接应力比较大，因此在冷却时产生的收缩应力大，故产生的变形大。且熔池流动性差，成形较差，特别是全位置焊接时更为突出。两种材料的化学成分对比如

背面强制成形，以此实现U肋焊缝单面焊双面成形和全熔透的效果，以期大幅提高U肋焊缝的抗疲劳性能。武汉天高熔接公司进行了该技术的研究开发，目前已完成了试验室阶段工作。

该技术工装设备相对简单，焊接工效高，但因须采用大电流的焊接工艺，焊接变形会相应增加。若要在实际产品的焊接中实现焊缝的全熔透，对于焊接坡口精度和焊接参数的稳定性要求较高，此外焊缝背面在衬垫侧被迫成形，需关注其成形质量的稳定性和一致性问题。U肋单面焊双面成形技术的应用效果有待在实际产品中的验证。

6. 结语

U肋角焊缝是正交异性钢桥面板的关键承力焊缝，疲劳开裂问题突出，该焊缝数量多，质量要求高。我国桥梁建设者和焊接工作者把握重大工程实践机遇，锐意进取，勇于创新，在正交异性钢桥面U肋焊接技术水平上赶超发达国家。

近十年来，各大钢桥制造厂全面配置了自动化、智能化焊接装备，推行了金属粉芯药芯焊丝、双丝气保焊等高效化焊接材料与工艺，将先进的超声相控阵检测技术应用于U肋角焊缝的无损检测，成功开发应用了U肋内焊技术，以全新的技术途径解决焊缝疲劳耐久性问题。

作者简介：张华等，武船重型工程股份有限公司。

MW 20170728

表1所示。

2. 焊接性分析

（1）MONEL400管道焊接性分析　①镍基MONEL400材料熔点高会导致钨极氩弧焊电弧在焊缝短时间内不能形成熔池，铁液由于熔点高较为粘稠，流动性差，表现在焊接时电弧移动到那个位置，铁液跟随电弧流动到哪里，焊接时容易造成夹渣等缺陷。这就要求焊工手持焊枪移动，停顿电弧要稳、准。宜采用大坡口、小钝边特点的接头形式。②有较大的热裂纹倾向，合金元素与Ni、Fe作用生成低熔物质，特别是Ni、P、 S亲和力很强，易形成低熔共晶物分布于晶界，形成热裂纹。③容易产生气孔，氧、氢、二氧化碳在液态MONEL400合金中溶解度较大，但在冷却时溶解度显著减少，而且液态合金流动性偏低在焊接快速冷却凝固结晶条件下，极易产生气孔。

（2）TP304L管道焊接性分析 TP304奥氏体不锈钢管道焊接时具有熔点高、铁液流动性差、导热性差、焊缝易氧化变色等特性。同时不锈钢导热性差，焊缝极易氧化变色，特别是焊缝及热影响区呈暗灰氧化色时，铁液流动发涩，造成焊纹凌乱，咬边严重。

3. 焊接材料的选择

经过对比分析，打底钨极氩弧焊焊丝选用牌号ERNiCu—7，焊条牌号选用 ENiCu—7，化学成分如表2所示。

4. 焊前准备

（1）考虑到镍基材料焊接时容易出现磁偏吹，焊接设备采用逆变式交直流焊机。

（2）坡口角度为65°～70°，不留钝边，并将坡口及其内、外边缘两侧20mm范围内的油污、水等杂质清理干净。修磨时采用不锈钢专用磨片。

（3）按焊接工艺指导书要求的尺寸进行装配、定位焊。定位焊时，采用搭桥点焊方法或采用不锈钢小板块进行连接点固，坡口间隙3.0～3.8mm。考虑到焊接时焊接变形大，因此焊缝平焊位置的间隙要比仰焊位置的大一点，即所说的上大下小。点焊完的焊缝用胶带封死，管口两端用硬胶皮或用海绵堵死，一端留下充气口便于充氩（见图1）。

5. 焊接工艺

（1）钨极氩弧焊打底　将焊机模式调至钨极氩弧焊，极性直流正接。焊接时为水平固定全位置焊接，焊接难度较大，为防止焊缝内凹，打底层我们采用仰焊内填丝法，立、平焊位置外填丝法进行施焊。

焊接过程中管膛内充氩保护，氩气流量每分钟25L。引弧前，应先将管膛内空气置换满足焊接要求后再进行焊接。焊接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。焊丝端部不得抽离保护区，以免氧化，影响质量。水平固定焊接时由过6点处10mm起焊，不论什么位置的焊接，钨极尽量垂直管子的轴心，这样才能更好的控制熔池的大小，而且可使喷嘴均匀的保护熔池不被氧化。

焊接时钨极端部距离熔池2mm左右，焊丝要顺着坡口沿着管子的切点送到熔池的前端，利用熔池的高温把焊丝熔化。电弧

表 1　管道材料化学成分对比（质量分数）　（%）

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Fe	Cu
MONEL400	≤0.3	≤2.0	≤0.5	≤0.024	≤0.020	≥63.0	—	≤2.5	28.0～34.0
TP304L	≤0.035	≤2.0	≤0.75	≤0.030	≤0.040	8.0～13	18～20	余量	—

表2　焊材的化学成分（质量分数）　（%）

化学成分	C	Mn	Fe	P	S	Si	Cu	Ni	Al	Ti	其他
焊丝	0.04	3.37	0.23	0.004	0.001	0.21	28.34	65.3	0.08	2.23	<0.50
焊条	0.05	3.47	0.23	0.01	0.02	0.21	29.00	64.40	0.190	1.35	<0.50

（a）坡口点固

（b）焊缝封堵

图1　焊缝点固及封堵

引燃后，在坡口一侧预热，待金属熔化后立即滴一滴焊丝形成金属，然后电弧摆到坡口另一端，给送第二滴熔滴，再用焊丝连接两焊滴连接形成焊缝的根基。电弧作横向摆动，两边稍作停留，焊丝继续均匀的送进熔池向前施焊。仰焊部位接头时，用电弧熔化已焊完的接头，待出现熔孔时给送焊丝，前两滴可以多给点焊丝，避免接头内凹，过后按正常焊接。打底焊缝成形如图2所示。

12点收尾处打磨成斜坡状，焊至斜坡时暂停送丝，用电弧把斜坡处熔化成熔孔，最后收口。注意在焊道收尾处，减小内部保护气体流量到每分钟3L，以防止因气压过大而使焊缝接头内凹。收弧时容易产生热裂纹，注意采用衰减的方式熄弧，还可以采用连续断弧，将弧坑引至坡口的边缘，防止产生热裂纹（见图3）。

由于这两种母材焊接时变形大，易产生热裂纹，所以焊接过程中需控制热输入量，采用小热输入，小电流焊接，冷却速度快，使其在敏化温度区停留时间短，有利于防止晶间腐蚀。焊接时，热输入小，焊接应力和焊接变形就小，和有利于防止应力腐蚀和热裂纹，为此多层多道焊时，严格控层间温度在100℃左右。

（2）焊条电弧焊工艺　如果采用直流焊条电弧焊时，容易在焊道上产生电弧偏吹，电弧偏向TP304L一侧，熔化的铁液很难与母材MONEL400熔合，造成夹沟易出现气孔夹渣缺陷。由于采用改变地线夹的位置、减小焊接电流、调整焊条角度等方法都不能克服偏吹现象，所以焊条焊接时采用交流电弧焊，可以有效克服偏吹现象，使焊接能正常进行。

焊条电弧焊填充盖面时，应在焊缝坡口上引弧，避免在母材表面引弧，以免打伤表面，降低抗腐蚀性。收弧时采用反复断弧收尾法，这样可防止收弧处产生弧坑裂纹。

仰立焊位焊接时，电弧长度保持1~2mm的高度。如果焊条与工件距离高，焊接过程中电弧不稳定，金属飞溅严重，药皮保护性差，会使焊缝成形不良。焊条摆动要均匀，摆动不超过焊条直径的两倍。每根焊条焊完后，再接一根焊条引弧要过收弧处6mm，引弧成功后，移到收弧处，这样的接头形式良好，也不会产生夹渣，焊缝的高低基本上一样。

焊接时，焊条与管子的角度要正确，焊接时上爬坡和平焊位采用反月牙形摆动，两侧稍作停留稳弧，中间速度稍快，这样可以避免焊缝凸起，不平整。填充时，要注意坡口边缘不要被电弧擦伤，以备盖面层焊接。盖面时应在坡口边缘稍作停顿，以保证熔池与坡口更好地熔合，防止咬边。焊接过程中，焊条摆动幅度和频率要适应，以保证盖面层焊缝表面尺寸和边缘熔合整齐。焊接参数如表3所示。

图2　打底焊缝成形

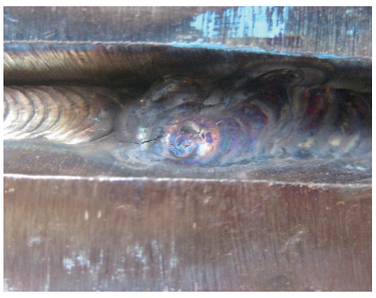

图3　收弧裂纹

表3　焊接参数

焊道/焊层	焊接方法	填充金属		焊接电流		电弧电压	焊接速度	热输入
		牌号	规格/mm	极性	A	/V	/cm·min^{-1}	/J
1	GTAW	ERNiCu－7	ϕ2.4	DC/EN	75～85	8～14	4～10	≤11.7
2～n	SMAW	ENiCu－7	ϕ3.2	AC	75～90	20～28	5～12	≤16.1

6. 结语

MONEL400与不锈钢TP304L焊接的关键点在于控制焊道的热输入，如果电流过大，温度过高很容易产生热裂纹，因此在施工中要严格按焊接工艺执行。我公司在某液空项目此类异种钢接头管道安装施工中，选用优秀焊工，运用上述焊接工艺进行焊接。经X射线探伤，焊口一次抽检合格率达100%，焊缝外观焊波均匀整齐，与母材过渡圆滑，呈银白色，受到了业主的高度好评。

参考文献：

[1] 梁祝年.焊接工程师手册[M].北京：机械工业出版社，2004.

作者简介：张育卓等，中石化第十建设有限公司。

MW 20170616