核电站中奥氏体不锈钢与碳钢异种钢焊接

中国核电工程有限公司 （北京 100840） 孙 占

【摘要】 核电站安装中经常出现碳钢或低合金钢与奥氏体不锈钢焊接，两种母材化学成分、冶金性能、物理性能等方面的差异，导致接头金属的化学成分、金相组织不均匀，出现因合金元素稀释引发的脆性组织。通过选择合适的焊接方法和焊接材料，控制焊接工艺，从而获得综合力学性能良好的异种钢接头。

国家核电发展规划指出到2020年，核电厂址容量可以满足运行4000万kW、在建1800万kW的目标，这标志着我国进入了核电发展新阶段。众所周知，核电重在安全，焊接是核电安装和设备制造的关键技术和重要环节，焊接接头的性能直接影响整个核电站的安全运行。核电站中设备、工艺管道由于工作环境和运行介质不同，通常由碳钢、低合金钢、奥氏体不锈钢以及镍基合金等材料制备，因此难以避免出现异种材料之间焊接。

对于奥氏体不锈钢（如：Z2CN18—10、Z2CND18—12（N））与碳钢或低合金钢（如P280GH、TU42C等）焊接，除了防止异种钢母材自身焊接问题，如奥氏体不锈钢的焊接热裂纹、应力腐蚀开裂、焊接接头σ相脆化问题，碳钢、低合金钢的结晶裂纹、冷裂纹问题，而且异种钢两种材料的化学成分、冶金相容性、物理和化学性能存在较大区别，两种材料焊接必定使得接头金属化学成分、金相组织不均匀，出现碳扩散引发的低塑性过渡层，合金元素稀释产生的脆性组织，这都给异种钢焊接带来了困难。

一、异种钢的焊接性

1. 冶金相容性的差异

冶金相容性指两种材料在晶格类型、晶格参数、原子半径以及原子的外层电子结构等方面的差异，两种金属材料在冶金学上是否相容，取决于它们在液态和固态的互溶性以及在焊接过程中是否产生金属间化合物（脆性相）。碳钢由铁素体和少量渗碳体组成，其中铁素体为体心立方组织，渗碳体为密排六方组织。奥氏体不锈钢为面心立方的奥氏体组织。两种材料晶格类型不同，但均为铁基金属，液态和固态互溶性较好。

2. 物理性能的差异

金属性能主要是指物理性能、化学性能及力学性能差异，其中影响焊接性的以物理性能差异为主，它们通过影响焊接热循环过程、结晶条件，进而影响接头质量。奥氏体不锈钢物理性能与碳钢相比，具有如表1所述特点。

表1 碳钢与奥氏体不锈钢物理性能比较

物理性能 / 材料	线膨胀系数	电阻率	热导率	磁性
碳钢	小	小	大	有磁性
奥氏体不锈钢	大（比碳钢大40%）	大（约为碳钢的5倍）	小（约为碳钢的1/3）	无磁性

线膨胀系数相差较大时，会造成接头较大的焊接残余应力和变形，易使焊缝及热影响区产生裂纹；两种材料热性能差异大时，会使熔化情况不一致，造成焊接困难；奥氏体不锈钢无磁性，碳钢有磁性，易使电弧不稳定，影响焊缝成形。

二、异种钢的接头特点

1. 焊缝稀释现象和接头凝固过渡层的形成

稀释是异种钢焊接的主要表现，焊接时由于电弧力

的搅拌作用，除了熔合线附近的狭窄区域外，母材和填充金属之间能够比较充分地混合。焊缝金属的成分主要取决于两个因素：母材与填充金属各自的化学成分和它们各自在焊缝中所占的比例，也就是母材的稀释率。碳钢中不含或含很少合金元素，它对焊缝的稀释作用使得焊缝中奥氏体元素含量降低，焊缝中可能出现马氏体组织，其组织呈板条状，分布具有方向性，比非方向性分布的奥氏体组织脆性大，韧性差，恶化接头性能，甚至产生裂纹。

焊缝熔池边缘的液态金属温度较低，流动性较差，且液态停留时间短，机械搅拌作用较弱，熔池靠近焊缝边界的很窄一个范围内，存在一个不完全混合区，填充金属与母材在化学成分上差异越大，不完全混合区越明显，成分浓度梯度越显著，这是因熔池凝固特性而造成的。这个过渡层中的高硬度马氏体组织使该部位脆性增加，塑性显著降低，从而降低了焊接结构的可靠性。低塑性带的宽度随所用焊材不同而各异，一般为 0.2 ~ 0.6mm。

2. 碳迁移过渡层的形成及其对高温性能的影响

碳钢与奥氏体不锈钢异种钢焊接过程、焊后回火处理及高温运行过程中，碳钢侧的碳会通过焊缝边界向低碳高合金焊缝中迁移，在焊缝边界（熔合线）两侧形成碳迁移过渡层：碳钢侧母材上形成脱碳层，高铬钢焊缝侧上形成增碳层。碳钢侧脱碳层母材由于碳元素减少，珠光体组织变成铁素体组织并软化，同时促使脱碳层的晶粒长大，沿熔合区生成一层粗晶粒的结晶层。焊缝增碳层中碳除溶入焊缝以外，剩余的碳元素则以铬的碳化物形态析出而使组织硬化。碳的扩散迁移对接头的常温和高温瞬时强度的不良影响较小，但对接头持久强度影响较大，随着碳扩散的发展，接头在熔合区发生脆性断裂的倾向增大。此外在高温下长期运行过程中，在脱碳层上还容易产生晶间腐蚀。

3. 应力场分布的不均匀性

异种钢接头焊接残余应力呈不均匀性分布，原因如下：①奥氏体不锈钢导热系数只有碳钢的 1/3，导热性差异引起焊接热循环变化，导致温度场和应力场分布不均匀。②奥氏体不锈钢线膨胀系数比碳钢大 30% ~ 50%，熔合线部位存在热应力。异种钢接头在周期性加热和冷却条件下工作时，承受严重的热交变应力，加上原有内应力，容易沿碳钢一侧熔合区产生热疲劳裂纹，导致接头过早断裂。

三、焊接工艺控制

（1）焊接方法的选择　各种焊接方法的焊接特点如表 2 所示。

表 2　各种焊接方法的焊接特点

焊接方法		焊接特点
熔化焊	焊条电弧焊	焊缝稀释明显，稀释率约在 30% 以下
	埋弧焊	热效率高、熔深大、机械化操作程度高，焊接质量稳定，其稀释率可在 10% ~75% 内变动
	熔化极气体保护焊	稀释率也可在 10% ~50% 之间变动
	钨极气体保护焊	电弧稳定、热输入量易于调节、焊缝成形美观、容易实现全位置自动化焊接，稀释率一般在 30% 以下
压力焊	爆炸焊	能将各种物理、化学性能相差很大，很难用熔化焊方法来连接的不同金属实现连接，如铝与钢、铝与铅等
	扩散焊	在真空或保护气体中加热和保温，通过原子相互扩散而形成牢固的冶金连接。扩散焊中母材不发生熔化和宏观塑性变形
钎焊		两母材不熔化而只有熔化温度较低的钎料熔化，因而不存在稀释现象，一般用于接头强度要求不高的焊接部件

考虑核电核岛焊接施工空间有限和大部分焊接接头强度要求不低于母材强度，压力焊方法对于核电异种钢焊接并不适用。钎焊主要用于核电站接头强度要求不高，且运行温度低的情况，如核电仪表管铜管与钢管，铜管与铜管焊接。碳钢与奥氏体不锈钢焊接主要采用熔化焊，在选择熔化焊方法时，除考虑到生产条件和生产效率外，还应考虑选择熔合比最小，即稀释率最低的焊接方法。核电安装现场碳钢与奥氏体不锈钢焊接主要采用焊条电弧焊和钨极气体保护焊。

（2）焊接材料的选择　一般焊材选择原则：能克服碳钢对焊缝金属稀释作用；抑制碳化物形成元素的不利影响；过渡层尺寸最小；保证接头常温和高温使用性能（综合力学性能）；接头内不产生冷、热裂纹；良好的工艺性能和生产效率，低成本。

核电设备及管道异种钢焊接通常在碳钢侧预堆焊

E309L，再用 E308L 进行焊接。不锈钢焊条 E308L 和 E309L 化学成分如表 3 所示，E309L 的高镍铬元素含量可以在一定程度上缓解碳钢母材对焊缝的稀释作用，保留足够的奥氏体形成元素，避免马氏体组织出现，保证接头强度，但不能避免接头出现碳迁移过渡层和接头应力分布不均匀现象。

表 3 奥氏体不锈钢焊条化学成分（质量分数） （%）

化学成分 / 焊材	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Cu	V	Fe	N	Ta + Nb	δ 铁素体计算值
E 308L（Z 19—9L）熔敷金属	≤0.035	≤0.90	≤2.50	≤0.025	≤0.025	9.00 ~ 12.00	18.00 ~ 21.00	≤0.50	≤0.20	—	—	—	—	—	5 ~ 15
E 309L（Z23—12L）熔敷金属	≤0.030	≤0.90	≤2.50	≤0.025	≤0.025	11.00 ~ 14.00	22.00 ~ 25.00	≤0.50	≤0.20	—	—	—	—	—	8 ~ 18

对于高温工作（300℃以上）的碳钢与奥氏体不锈钢接头，通常采用镍基合金做填充金属或过渡层，镍合金在温度周期变化环境中有如下优点：①能容许多种母材稀释而不产生裂纹敏感组织。②对碳的溶解度低，可以减少碳从碳钢迁移到焊缝内部。③镍基合金填充金属 ER Ni—Cr 3 的线膨胀系数接近于碳钢母材，焊缝界面处产生的应力比奥氏体不锈钢填充金属小很多。④同时界面处的金属具有足够的抗氧化能力和高的蠕变断裂强度。

但镍基合金也存在着易产生热裂纹和抗晶间腐蚀不稳定现象，这一般通过控制焊材 Cr、Nb、Mo 元素含量减缓。Cr 是镍基合金具有较好的抗晶间腐蚀性能的基本条件，Cr 含量（质量分数）宜控制在 18% ~22%。Nb 在镍基合金中可消除 Si 的有害作用，细化晶粒，提高熔敷金属的抗裂性，Nb 含量控制在 2% ~3%。另外添加少量 Mo，可以有效抑制奥氏体的镍基合金焊缝多边化裂纹的发生与发展。核电站高温工作的重要设备及部件异种钢接头通常采用镍基合金焊材，如蒸发器、稳压器 XX 管嘴和安全端焊接时，在 16MND5 碳钢侧预堆焊 E Ni - Cr - Fe3 焊材，进行热处理后开坡口，再采用 E Ni - Cr - Fe3焊材与 Z2CND18. 12（N）母材对接，如图 1 所示。

（3）选择小的焊接热输入　焊接热输入越大即母材熔入焊缝越多，熔合比越大，接头焊接热影响区增宽，容易造成碳钢侧焊缝熔合线附近产生脱碳层，焊缝晶粒粗大，对焊接接头的塑性和韧性不利。采用小电流、快速、多层焊等工艺进行焊接，控制小的熔合比。采用小热输入焊接，冷却快，过热区易产生的马氏体组织，可以通过控制合理的层间温度来避免。

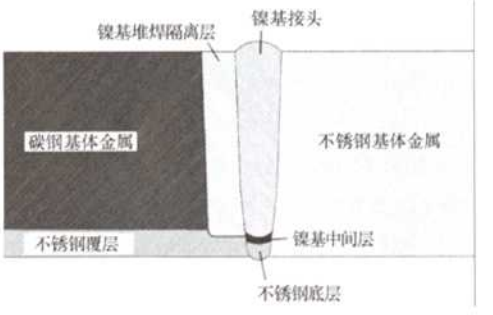


图 1　碳钢和不锈钢接头示意图

（4）焊前预热和焊后热处理　采用合适的预热温度、焊接层间温度可以降低焊缝和热影响区的冷却速度，减少焊接接头的淬硬倾向，促使扩散氢溢出焊接区，有效的预防冷裂纹产生。异种钢接头焊后是否进行热处理需要具体情况具体分析：当奥氏体不锈钢接头加热到 450 ~ 850℃ 时，晶界处析出高铬碳化物（Cr23C6），引起晶粒表层形成贫铬区，在腐蚀介质的作用下形成晶间腐蚀。此外，650 ~850℃温度区间，奥氏体不锈钢焊缝发生铁素体转变成脆性 σ 相现象，导致接头脆化，加热时间越长 σ 相析出越多。而对于淬硬倾向大的碳钢或合金钢，必要时需进行焊后热处理，以防止出现淬硬组织，降低焊接残余应力和防止出现冷裂纹。

（5）加强焊后无损检验　焊接完成后，要对焊缝进行外观检查，不允许存在咬边、焊瘤和气孔等缺陷。24h 后，需对焊缝及热影响区进行表面液体渗透检验和射线探伤检验。随着焊接接头 RCCM 规范等级的提高，无损检验检验比例增加，验收标准也更加严格，为保证异种钢接头性能，可以考虑进行 100% 的表面 PT 和 RT 检验，同时按照 RCCM 1 级焊缝要求进行验收。

（下转第 32 页）

（续）

序号	试验种类	试验结果（DILLIMAX890T相互拼焊）	评定结果	试验结果（WELDOX900E相互拼焊）	评定结果	试验结果（DILLIMAX890T和WELDOX900E相互拼焊）	评定结果	试验结果（WELDOX700E相互拼焊）	评定结果	备注
4	背弯2	15°裂纹	合格	27°微裂	合格	30°裂纹	合格	30°完好	合格	—
5	侧弯1	25°微裂	合格	20°裂纹	合格	15°裂纹	合格	180°完好无开口角	合格	—
6	侧弯2	30°完好	合格	25°裂纹	合格	25°裂纹	合格	20°裂纹	合格	—
7	纵弯	180°完好无开口角	合格	180°完好无开口角	合格	160°微裂开口20°	合格	180°完好无开口角	合格	—
8	拉伸1	抗拉强度890MPa	合格	抗拉强度900MPa	合格	抗拉强度855MPa	合格	抗拉强度705MPa	合格	—
9	拉伸2	抗拉强度895MPa	合格	抗拉强度905MPa	合格	抗拉强度875MPa	合格	抗拉强度720MPa	合格	—
10	冲击1	冲击吸收功169J	合格	冲击吸收功90J	合格	冲击吸收功212J	合格	冲击吸收功286J	合格	焊缝区
11	冲击2	冲击吸收功120J	合格	冲击吸收功110J	合格	冲击吸收功242J	合格	冲击吸收功290J	合格	焊缝区
12	冲击1	冲击吸收功173J	合格	冲击吸收功105J	合格	冲击吸收功138J	合格	冲击吸收功234J	合格	熔合区
13	冲击2	冲击吸收功162J	合格	冲击吸收功128J	合格	冲击吸收功262J	合格	冲击吸收功200J	合格	熔合区
14	冲击1	冲击吸收功144J	合格	冲击吸收功115J	合格	冲击吸收功164J	合格	冲击吸收功280J	合格	热影响区
15	冲击2	冲击吸收功152J	合格	冲击吸收功151J	合格	冲击吸收功118J	合格	冲击吸收功260J	合格	热影响区

通过评定结果看出，各项试验项目均能达到质量指标要求，其中异种钢材焊接后的抗拉强度比同种钢材焊接的数值要低，但是在指标要求的范围之内，其中四种试件的冲击吸收功数值都偏高。

6. 高强钢材在混凝土泵车行业中的应用

（1）混凝土泵车的市场需求　近年来国家大量投入基础建设，特别是加大了对中西部基础设施建设的投资，加上诸如“西电东送”、“南水北调”、高速公路及京沪高速铁路等大型项目的建设实施，再加上大量的城市建设和规模扩大，对混凝土泵车的需求量越来越大，相应对混凝土泵车的工作性能、泵送能力、泵送高度、综合质量的要求也越来越高。

（2）高强钢材在混凝土泵车行业中的发展　由于混凝土泵车是高空作业的特种工程车辆，结构件的强度要满足工作状态的作业要求，所以混凝土泵车上的主要结构件（包括：臂架、支撑台、回转台、支腿以及连杆）全部采用高强钢材。高强钢结构件的焊接质量很大程度的影响着泵车的质量。随着泵车行业制造技术的不断提升，国内涌现出一批制造混凝土泵车的企业单位，分别有：三一重工、中联重科、山推楚天及福田重机等一系列知名企业。其中国内制造混凝土泵车的标杆企业——三一重工，制造技术已经达到了国际先进水平。另外，2009年北京工程机械展览会上还推出了混凝土泵车的楷模——72m混凝土泵车（称之为世界之最）。混凝土泵车的发展离不开高强钢，更离不开高强钢的焊接技术。高强钢材在混凝土泵车行业中应用会越来越广泛。**MW**

（20100919）

（上接第27页）

四、结语

通过对碳钢或低合金钢与奥氏体不锈钢异种钢焊接分析，得出以下几点结论：

（1）异种钢母材冶金相容性和物理性能差异，致使异种钢焊接比同种钢焊接困难。

（2）异种钢焊接接头出现稀释和合金化现象，易出现马氏体组织、接头组织和应力分布不均匀，碳迁移引起的低塑性区域降低了接头性能。

（3）采用焊条电弧焊和钨极气体保护焊方法，在碳钢侧预堆焊E309L，再用E308L进行焊接。对于重要高温运行部件，可以采用镍基合金作焊接填充材料。

（4）采用小的焊接热输入，合适的预热和焊后热处理工艺，提高焊后无损检验比例和验收标准可以确保异种钢接头性能。**MW**

（20101022）