铜-不锈钢套管式结构件的焊接

陕西宝鸡有色金属加工厂装备设计制造公司 (721014) 张日恒

1. 问题的提出

如图1所示的铜-不锈钢套管式构件图样要求采用熔化焊接组焊，而内管与外管不锈钢及法兰盘铜合金之间虽然具有焊接性，但此类结构的焊接的确十分少见。因内、外管材质不同，其热导率、比热容等参数相差悬殊，对焊接工序及焊接工艺都提出了较高的要求。为此我们做了工艺模拟试验，焊接排序为①②③④。第一次试验发现在第④道焊缝焊完后，在①、④焊缝中均产生了极为严重的裂纹。

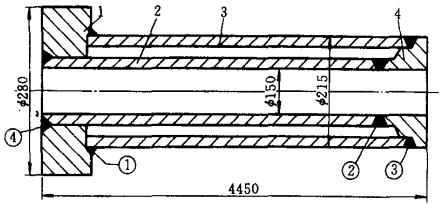

图1 铜-不锈钢套管式构件的结构示意图

1. 法兰 (T2) 2. 内管 (T2)

3. 外管 (1Cr18Ni9Ti) 4. 连接头 (T2)

2. 裂纹产生的原因分析

裂纹的产生主要是在焊接过程中产生了较大的内应力。分析其原因是由于纯铜材料的抗拉强度比较低，内应力超过了材料的抗拉强度极限所致。据有关资料表明，铜及铜合金的力学性能是随温度的变化而变化的，铜在450～600℃温度区间时，其强度较低、塑性较差，在加热或焊接过程中，如果在该温度区间内停留的时间较长，且工件中拉应力较大时，则容易产生裂纹。

内应力的来源主要有以下两个方面：

(1) 焊接应力 焊接是一个不均匀的局部加热、熔化、冷却的过程，在焊接中难免要产生焊接应力。焊接应力的大小随着焊接材料、焊接接头的结构、工件的厚度、焊接方法、焊接工艺参数、焊接条件及焊工技术水平等因素的变化而变化。在其他条件相同时，采用对接接头形式组焊，焊接残余应力最小；采用角接接头形式组焊，焊接残余应力最大。由于该构件的焊缝①、④均属于角接接头形式，所以在组焊过程中产生了较大的焊接残余应力。

(2) 温差应力 外管采用不锈钢材料(1Cr18Ni9Ti)，内管及其他零件采用纯铜材料(T2)。较厚的纯铜材料在进行焊条电弧焊接时，要求对工件采取预热措施，且预热温度较高；而不锈钢材料焊接时，一般不需要预热。不锈钢与纯铜的物理性能相差较大（不锈钢与纯铜的物理性能比较如下表所示），在套管式这样的封闭结构组焊(尤其是进行预热焊接)时，就容易产生温差应力。

纯铜与铁及不锈钢的物理性能比较表

金属	熔点/℃	密度/g·cm^{-3}	热导率/W·(m·K)$^{-1}$		比热容/J·(kg·K)$^{-1}$ (20℃)	线膨胀系数/10^{-6}·K^{-1} (20～100℃)	表面张力×10^5N/cm^{-1}	收缩率(%)
			20℃	1000℃				
T2	1083	8.94	393.6	326.6	0.3849	16.4	1300 (1200℃)	4.7
Fe	1538	7.85	54.8	29.3	0.4602	14.2	1835 (1550℃)	2.0
1Cr18Ni9Ti		7.93	15.95 (100℃)	22.15 (500℃)	0.5	16.7		

由上表可看出：T2与1Cr18Ni9Ti这两种材料的物理性能相差较大，尤其是密度、比热容、热导率等。其中，热导率相差更为悬殊。

在焊接预热过程中，如果只给法兰加热而不给其他件加热，这样在加热时内、外管受热后温度均要升高，但由于法兰是直接加热，其温度升高较快；而内管及其他零件是靠热传导、热对流、热辐射的方式进行预热的，温度升高速度较慢。又由于内、外管的热导率相差较大，造成内、外管在加热过程中的温度梯度严重不均，也就是说，在加热或焊接过程中内、外管处于高温区的时间长度不同。

纯铜热导率高，处于高温区的时间就长；而不锈钢热导率低，则其处于高温区的时间较短。正是由于这两个方面的原因，造成内、外管的热膨胀速度不同步，尤其是长度方向的伸长不同步，纯铜内管比外管伸长量大。

在第一次试验施工中，我们按图样的组焊尺寸加工，并按上述方法进行焊接预热。在焊接焊缝④之前对内、外管的伸长量之差进行了测量，发现内管比外管多伸长 15～20mm。试验采用强制方法将其焊成一体，因此，在内管中产生了很大的焊接应力。

3. 裂纹产生的机理分析

由以上的分析可知，在预热升温及焊接过程中产生了较大的内应力。而纯铜本身的抗拉强度又比较低，当内应力超过了材料的抗拉强度时，就产生了裂纹；另一方面，铜及铜合金的力学性能是随温度的变化而变化的，其变化关系如图 2 所示。

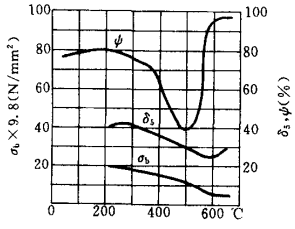

图 2　铜及铜合金力学性能与温度的关系

由图 2 可见，铜在 450～600℃温度区间时，其强度较低、塑性较差，故将这一温度区间称为脆性区。在加热或焊接时，若在脆性区停留的时间较长时，如果工件中拉应力较大，则容易产生裂纹。

在焊接的预热升温过程中，若采用强制方法使内、外管同步伸长，则焊缝①受剪切应力作用，而焊缝②及纯铜内管受压应力的作用，焊缝③及不锈钢外管受拉应力作用（如图 3 所示）。随着温度的升高，各作用力不断增大，构件内各零件先发生弹性变形，当工件的温度升高到一定值时，系统内各零件陆续发生塑性变形。

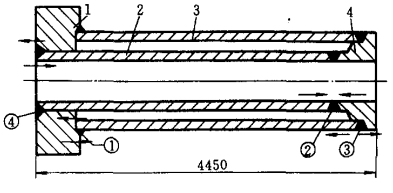

图 3　各焊缝的应力分布示意图

1. 法兰（T2）　内管（T2）

3. 外管（1Cr18Ni9Ti）　4. 连接头（T2）

当焊缝温度升至脆性区范围内，如果焊缝中的拉应力或剪应力分别超过了焊缝金属的抗拉强度或抗剪强度极限值时，就在焊缝中产生了裂纹。随着工件温度的进一步升高，纯铜内管产生的压应力越来越大，相应的内管产生的压缩塑性变形就越来越大。

在焊缝④焊接过程中，构件内各件除了承受因加热产生的各应力外，还要承受因焊接而产生的应力。在焊接刚结束后，停止对工件预热，工件温度不再上升而开始下降。此时在构件内，纯铜内管所受的压应力及不锈钢外管所受的拉应力达到了较大的数值。

在焊后的冷却过程中，随着工件温度的降低，系统内各零件逐渐收缩。由于纯铜的导热性好，冷却速度较快，所以纯铜内管的收缩较快，而不锈钢外管的收缩则较慢。此时，纯铜内管所受的压应力及不锈钢外管所受的拉应力逐渐减小。随着温度的进一步下降，因纯铜内管加热过程中产生了不可逆的压缩塑性变形，其尺寸要进一步收缩，在随后的冷却过程中，纯铜内管中会产生拉应力，而不锈钢外管中产生压应力，这样在冷却至室温时，在焊缝④及焊缝①中产生了与加热过程中方向相反的剪应力，在焊缝③及不锈钢外管中产生了压应力，在纯铜内管及焊缝②中产生了拉应力（如图 4 所示）。

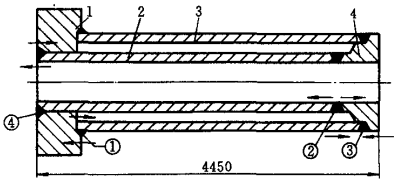

图 4　冷却后各焊缝应力分布示意图

1. 法兰（T2）　内管（T2）

3. 外管（1Cr18Ni9Ti）　4. 连接头（T2）

当温度下降至脆性区温度范围内时，如果焊缝中的拉应力或剪应力分别超过了焊缝金属的抗拉强度或抗剪强度的极限值时，就在焊缝中产生了裂纹。

4. 裂纹产生的部位分析

通过以上的分析，在预热升温、焊接及焊后冷却过程中，各条焊缝及零件中均产生了内应力。但裂纹一般不会出现在焊接母材中，往往产生于焊缝

中。这是由于焊缝的组织属于铸造组织，存在各种组织偏析和成分偏析，是焊接接头的薄弱部位的缘故。现分析如下：

（1）焊缝①　属于角焊缝，在其焊接过程中会产生较大的焊接应力，存在较大的裂纹倾向。而预热及焊后冷却过程中，又会产生温差应力，此应力与原来的焊接应力相叠加，产生焊缝裂纹的倾向更大。

焊缝①的预热温度要经过材料的脆性区，此时，焊缝金属的强度较低、塑性较差，便可能在该焊缝中产生裂纹。

（2）在焊缝②的焊接过程中，产生了焊接拉应力。在预热焊接焊缝④的过程中也要产生了新的拉应力，这两种拉应力相互叠加，产生焊缝裂纹的倾向增大。但由于构件长度较大，该焊缝离预热的高温区较远，其温度较低（通常达不到材料的脆性区温度范围内），焊缝熔敷金属的强度较高、塑性较好，一般不会产生裂纹。但是，如果构件长度较短也会产生焊缝裂纹。

（3）焊缝④属于角焊缝，由于在其焊前预热过程中，在温差应力的作用下，纯铜内管发生了较大的压缩塑性变形而导致在焊后冷却过程中产生了较大的剪切应力。当该焊缝的温度经过材料的脆性区温度范围时，较大的剪切应力容易使脆弱的焊缝金属产生裂纹。

5. 防止裂纹产生的措施

通过以上的分析，此构件的焊缝裂纹是由内应力引起的，而内应力的主要来源于焊接组装过程中的焊接应力及预热、焊接和焊后冷却过程中的温差应力。由此可见，要防止焊缝裂纹的产生，就要采取措施来控制组焊过程中的焊接应力及温度变化过程中的温差应力。

（1）组焊焊接应力的控制　在焊接工序安排上，要先焊接焊缝①、②、③，最后焊焊缝④。

在组焊过程中，应采取合理的焊接工艺，来控制焊接应力的大小。焊接工艺主要包括：焊接接头的设计、焊接方法的选择、焊接工艺参数的选择、焊工操作及工艺措施等。

例如，采取上述合理的焊接工序分步组焊的焊接顺序可以减小焊接残余应力，若在焊缝①、焊缝②、焊缝③焊接之后，分别对工件进行消除应力退火，则焊接残余应力就可以完全消失或大大减小；在焊缝④的组焊过程中，采取必要的工艺措施控制温差应力，也可以大幅度地减小综合的焊后内应力。

（2）焊接应力的控制分析　焊接应力的控制主要是在满足图样技术要求的前提下，尽可能使焊缝的数量及尺寸减小。在施焊过程中，尽可能采用小的焊接工艺参数。

（3）焊接过程中温差应力的控制分析　就是在组焊的预热、焊接、焊后冷却过程中保证构件的内、外管同时伸长与收缩的情况下，要求内、外管尽可能地自由伸长与收缩。这样，可以防止纯铜内管在预热过程中产生压缩塑性变形，可大大减小温差应力，从而有效地降低了焊缝裂纹倾向。

采用的方法有两种：一种是采用冷却的方法把变形（包括受热膨胀及冷却收缩）控制在同种金属材料之间，使内、外管同步自由伸缩；另一种是通过加热的方法使内、外管同步自由伸缩。如果采用后一种方法时，会对加热控制提出较高的要求，可操作性差，一般情况下建议不采用为好，可以采用第一种冷却的方法。

6. 结论

通过模拟试验及分析，在此构件的产品生产过程中采用了相应的对策生产出了合格的产品。

模拟试验得出了如下结论：

（1）在铜-不锈钢封闭式套管构件焊接生产中出现的焊缝裂纹是由焊接残余应力及温差应力的共同作用引起的。

（2）实践证明，采用合理的焊接工艺及冷却方法可以减小（或消除）焊接应力和温差应力，从而可有效地防止焊缝裂纹的产生。热　（20031203）

纳米晶的用途

由于非晶、纳米晶软磁材料具有优异特性，因而在不同的应用中，弥补了硅钢和铁氧体材料的不足，使各类电子产品提高到一个新水平，不但提高了效率，而且具有明显的节能效果。

非晶、纳米晶材料还可以作为互感器、电抗器、传感器、滤波器等器件的铁芯材料，应用范围还涉及到我们日常生活中的家用电器、铁路系统的机车空调、电力机车的逆变电源、铁路信号传感等；另外还在航天、航空、航海等多项军工和国家高科技项目中被定型采用。

高效、节能是每个生产厂家产品追求的目标，纳米晶材料为逆变焊机提供了理想的材料，极大地促进了我国逆变焊机的发展。