

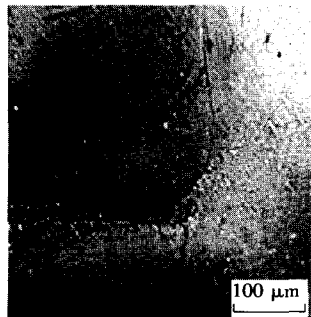


图2 镍钎焊钢管复层焊缝区金相组织(未腐蚀)

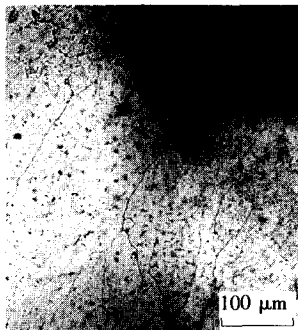


图3 镍钎焊钢管复层焊缝区金相组织

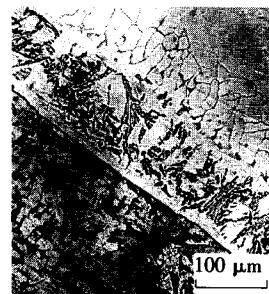


图4 镍钎焊钢管热影响区钎焊层金相组织

2 实验结果及分析

2.1 复合钢管焊缝及热影响区金相分析

2.1.1 镍钎焊 复层焊缝区是碳钢、不锈钢、钎料和焊缝金属四种材料的交接区,金相组织比较复杂。该区中镍钎焊层尾部熔入焊缝金属中,尾端变得圆钝(图2);低熔点的镍钎料还沿晶界深入焊缝金属中(图3)。

在热影响区,镍钎料结晶组织呈现为菊花状共晶,厚度约 $40\ \mu\text{m}$;在其与基材之间有平坦无特征的过渡层,厚度约 $7\ \mu\text{m}$ (图4)。另一侧,镍钎料在整个钎焊层-复层界面上沿晶界进入复层金属中,形成一个晶粒结构明显的宽带。低碳钢基材是典型的魏氏组织(图5)。

非焊缝区低碳钢基材金相组织仍是一般的铁素体加珠光体(图6)。焊缝金属为奥氏体枝晶(图7)。

2.1.2 铜钎焊 在复层焊缝区中,铜钎料结晶组织成网状(图8),并沿晶界进入焊缝金属中,引起沿晶裂纹(图9)。

热影响区铜钎料结晶组织厚度约 $40\ \mu\text{m}$,是较细的共晶组织;在其与基材和复材之间有平坦无特征的过渡层(图10),与复材之间过渡层厚度约 $10\ \mu\text{m}$;与基材之间过渡层厚度约 $5\ \mu\text{m}$ 。热影响区低碳钢基材和焊缝金属金相组织与镍钎焊复合钢管类似。

2.2 复合钢管钎焊层及焊缝维氏硬度分布

2.2.1 镍钎焊 图11,图12 分别是焊缝和热影响

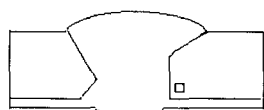
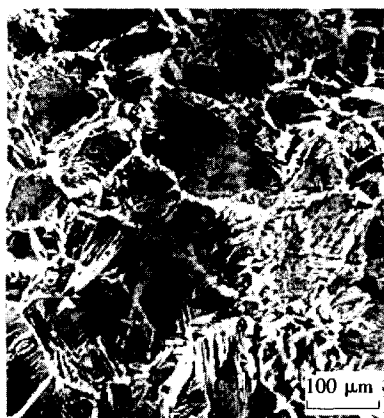


图5 镍钎焊钢管热影响区低碳钢基材金相组织

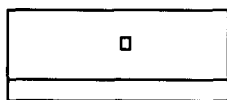
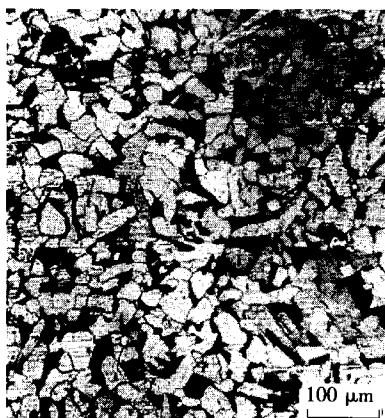


图6 非焊缝区低碳钢基材金相组织

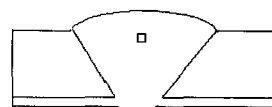
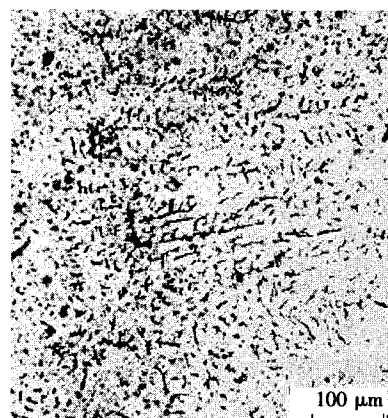


图7 焊缝金属

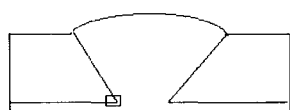
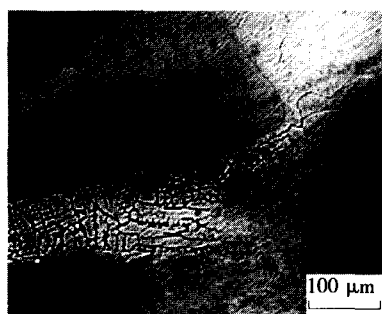


图 8 铜钎焊钢管复层焊缝区金相组织(未腐蚀)

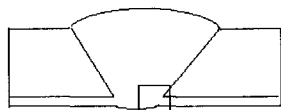
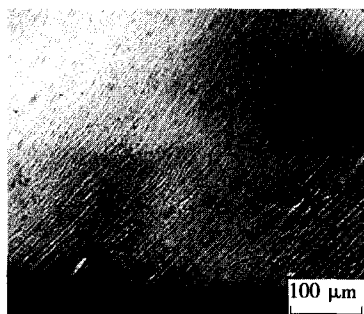


图 9 铜钎焊钢管复层焊缝区中的微裂纹(未腐蚀)

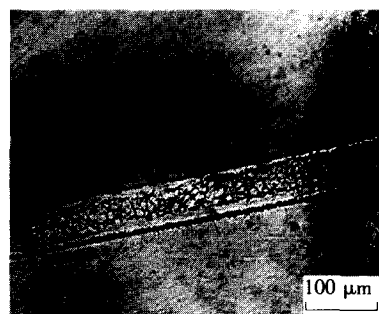


图 10 铜钎焊钢管热影响区钎焊层金相组织(未腐蚀)

区维氏硬度分布(热影响区达到离焊缝 20 mm 以上),钎焊层硬度较均匀($Hv240 \sim 300$)。复层包括其中晶粒结构明显的宽带硬度为 $Hv200 \sim 230$;焊缝金属硬度亦为 $Hv200 \sim 230$ 。低碳钢基材硬度为 $Hv170 \sim 200$ 。图 13 中的曲线形象地表明硬度沿钢管径向的分布,可见过渡层中硬度梯度很小。

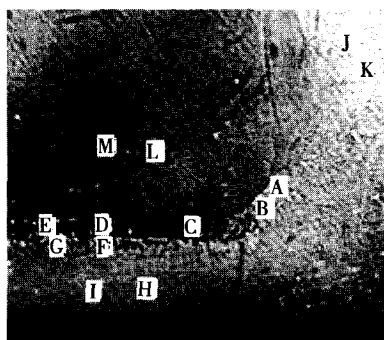


图 11 镍钎焊钢管焊缝维氏硬度分布

各点硬度:A - 279;B - 257;C - 240;D - 241;E - 248
F - 210;G - 234;H - 208;I - 232;J - 200;K - 230;L - 206;M - 185

2.2.2 铜钎焊 图 14,图 15 分别是铜钎焊钢管焊缝和非焊缝区维氏硬度分布。非焊缝区钎焊层硬度在 $Hv440$ 以上,个别测点超过 $Hv600$,两侧过渡层硬度较低。热影响区铜钎焊层硬度明显减小,至其末端,硬度减小到 $Hv240$ 左右。低碳钢基材硬度为 $Hv170 \sim 200$;不锈钢复材硬度为 $Hv200 \sim 230$;焊缝金属硬度亦为 $Hv200 \sim 230$ 。图 16 中的曲线形象地表明硬度沿钢管径向的分布,可见过渡层中硬度梯度很大。

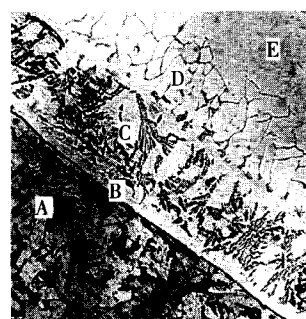


图 12 镍钎焊钢管焊缝热影响区维氏硬度分布

各点硬度:A - ($180 \sim 200$);B - 240;C - ($240 \sim 300$);D - ($200 \sim 230$);E - ($210 \sim 230$)

2.3 复合钢管钎焊层及焊缝微区成分

2.3.1 镍钎焊 钎焊层微区成分及相应的测点位置如表 1 和图 17 所示。钎焊层中的镍和铬,是钎料中所固有的;而铁则是从基层和复层扩散进去的,尤其是两侧过渡区中,扩散进去的铁更多。焊缝金属成分与焊条成分相近。

2.3.2 铜钎焊 铜钎焊钢管钎焊层及焊缝微区成

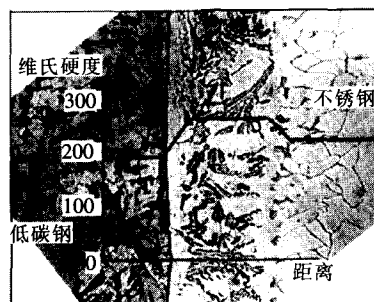


图 13 镍钎焊钢管焊缝热影响区硬度沿钢管径向的分布

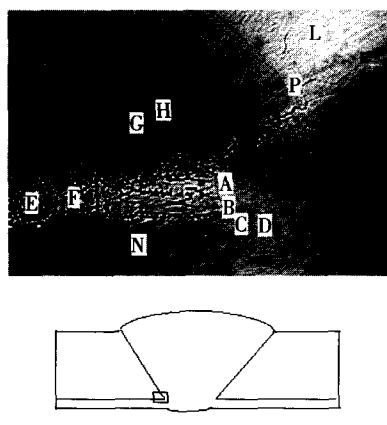


图 14 铜钎焊钢管焊缝区维氏硬度分布
各点硬度:A - 240;B - 216;C - 238;D - 267;E - 285;
F - 280;G - 177;H - 175;L - 234;N - 230;P - 218

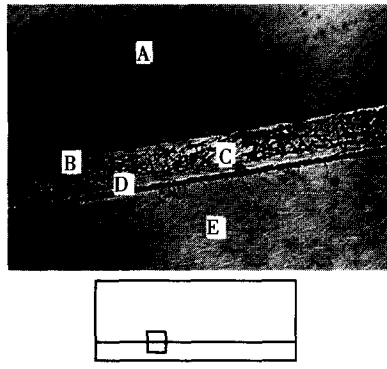


图 15 铜钎焊钢管非焊缝区钎焊层维氏硬度分布
各点硬度:A - 170;B - 350;C - (440 ~ 500);D - (300 ~ 400);E - 200

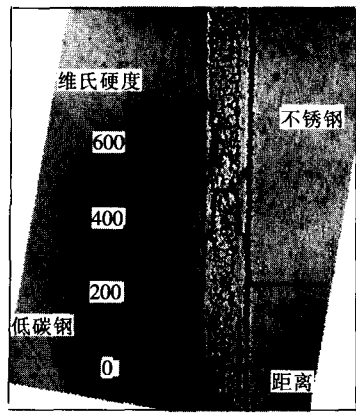


图 16 铜钎焊钢管非焊缝区钎焊层硬度沿钢管径向的分布

表 1 镍钎焊复合钢管钎焊层微区成分

测点位置编号	主要元素重量百分比/%						
	C	O	Si	Cr	Fe	Ni*	Mn
钎焊层 Ni-1	0.44	4.22	4.20	10.92	10.98	68.98	
扩散层 Ni-2		2.42	1.73	10.95	52.40	31.94	0.56
扩散层 Ni-3	0.18	2.30	2.00	8.66	51.34	34.92	0.60

分及相应的测点位置如表 2 和图 18 所示。钎焊层

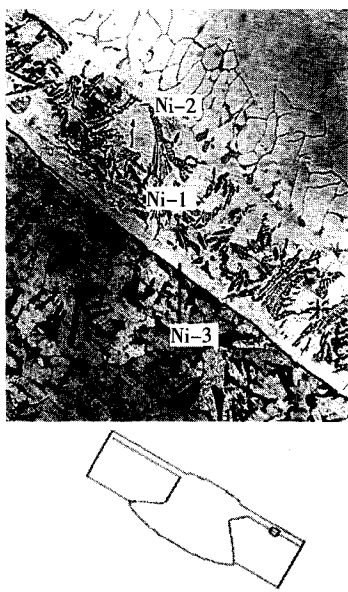


图 17 镍钎焊复合钢管钎焊层测点位置

含有较多的铁和铬,而且离复层愈近,铁和铬的含量愈高,看来主要是从复层扩散进去的。焊缝金属成分则与焊条成分相近。需要说明的是,能谱分析方法本身有多种误差来源,谱线相近的元素可能互相掩蔽,例如本样品中的铜和镍,所以表 2 中的铜含量可能包括一部分镍。

2.4 焊接工艺评定拉伸、弯曲试样的宏观和微观分析

2.4.1 镍钎焊 镍钎焊钢管拉伸试样焊区不发生颈缩,断口在焊区外,是剪切型斜断口,复材与基材

表 2 铜钎焊复合钢管钎焊层及焊缝微区成分

测点位置 编号	主要元素重量百分比/%						
	C	O	Si	Cr	Fe	Ni*	Mn
钎焊层	Cu1	0.27	2.94	2.32	11.32	32.30	50.16
	Cu2	0.34	4.07	2.52	5.55	31.91	53.90
	Cu3	0.24	2.84	1.76	10.74	42.24	41.64 0.55
焊缝	Cu4	0.25	3.38	0.48	15.72	68.71	7.76 1.22
	Cu5	0.28	3.77	0.53	16.11	69.28	8.36 1.26

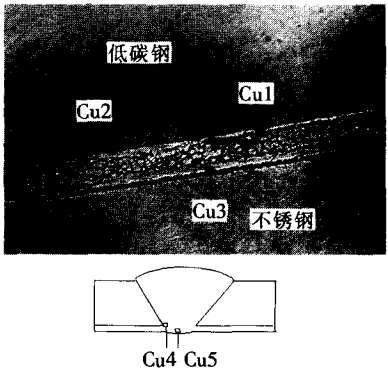


图 18 铜钎焊复合钢管微区成分测点位置



图 19 镍钎焊钢管拉伸试样断口

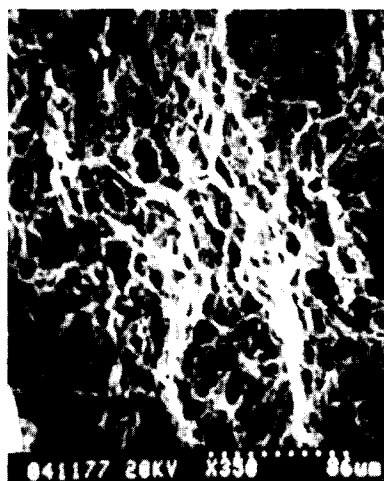


图 20 镍钎焊钢管基材断口微观形貌

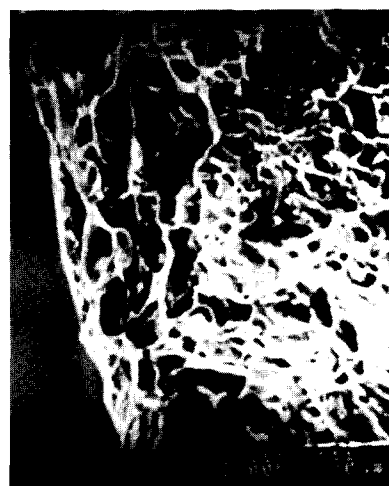


图 21 镍钎焊钢管复材断口微观形貌

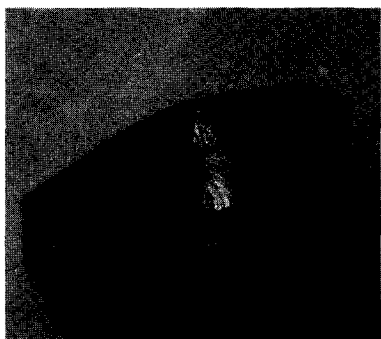


图 22 镍钎焊钢管弯曲试样

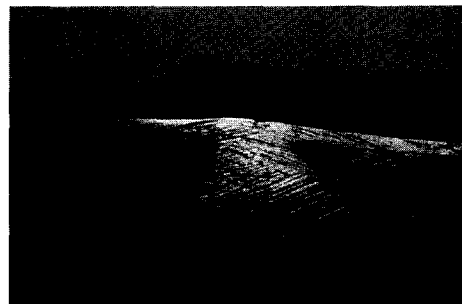


图 23 铜钎焊复合钢管中的焊接裂纹

的断口不连续(图 19)。基材和复材断口微观形貌如图 20、图 21 所示,微观花样都是韧窝。弯曲试样无裂纹和分层脱离(图 22)。

2.4.2 铜钎焊焊接裂纹试件断口分析 在焊接工艺试验中发现铜基合金钎焊复合钢管的可焊性差,易产生焊接裂纹。焊缝剖面如图 23;宏观断口如图 24 所示,裂纹在焊缝金属中发生,断口上可看到裂纹源已锈蚀(断口的右端),从裂纹源向前方发出一系列人字形花样,表明属低能量撕裂。裂纹源微观形貌如图 25 所示,微观花样是韧窝。撕裂区微观形貌如图 26 所示,微观花样是撕裂型韧窝。



图 24 铜钎焊复合钢管中的焊接裂纹断口

2.4.3 铜钎焊钢管用于焊接工艺评定的拉伸、弯曲试样分析 钢管纵向拉伸试样裂纹和断口在焊缝与母材交界处,属剪切型斜断口,断口附近沿钎焊层-复层和钎焊层-基层界面发生分层脱离(图 27)。基材和复材断口不连续,其微观形貌也都是韧窝。钢管纵向切片的弯曲试样,在焊缝与母材交界处及焊缝金属中产生裂纹,并在钎焊层-复层和钎焊层-基层界面发生分层脱离(图 28)。

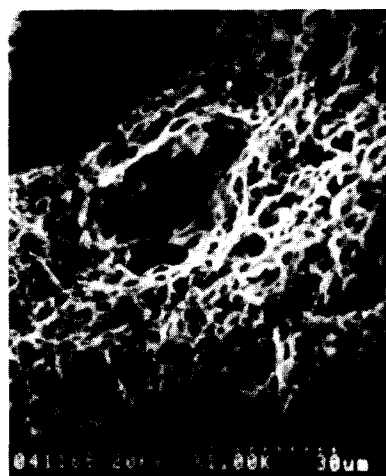


图 25 裂纹源微观形貌



图 26 撕裂区微观形貌

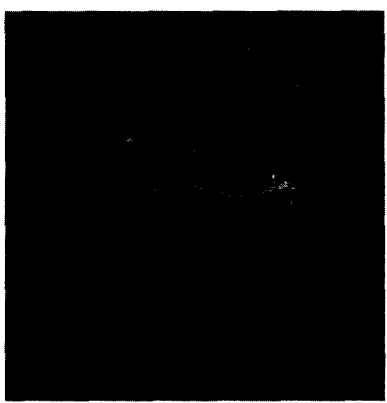


图 27 铜钎焊钢管拉伸试样的裂纹和断口



图 28 铜钎焊钢管弯曲试样

3 讨 论

3.1 钎焊层及其界面

从钢管复合过程来看,在冷拔胀管工艺后,钎焊层与基层和复层之间就有着密切的机械结合。在中频加热时,钎焊层与基层和复层中的元素开始互相扩散。对镍钎焊层而言,铁从基层和复层向钎焊层扩散,镍从钎焊层向基层和复层扩散;对铜钎焊层而言,铁和铬从基层和复层向钎焊层扩散。从而在它们之间形成过渡层,实现了完全的冶金结合。当钎焊加热温度进一步升高时,钎焊层镍基和铜基合金

熔化成液态,在冷却后凝固成亚共晶。

在镍钎焊金相组织中(图 4),复层过渡区和亚共晶中的初生相融合在一起,成为基体。这种完全的冶金结合保证了足够的结合强度,赋予双金属复合钢管以整体性。

镍钎焊层硬度与基层和复层很接近,过渡层中硬度梯度很小,这意味着镍钎焊复合钢管各层力学性能的差别不大,变形基本上是均匀的,在钢管受力时不会产生裂纹和分层剥离,这是镍基钎焊的重要特点。

在铜钎焊金相组织中(图 10),作者认为,过渡层和亚共晶中的基体均为初生相。从二元相图来看,铜-铁系有典型的共晶转变(图 29)^[5],共晶体应该是铜-铁共晶(还含有镍、铬),而初生相是一种铜-铁-镍-铬固溶体。

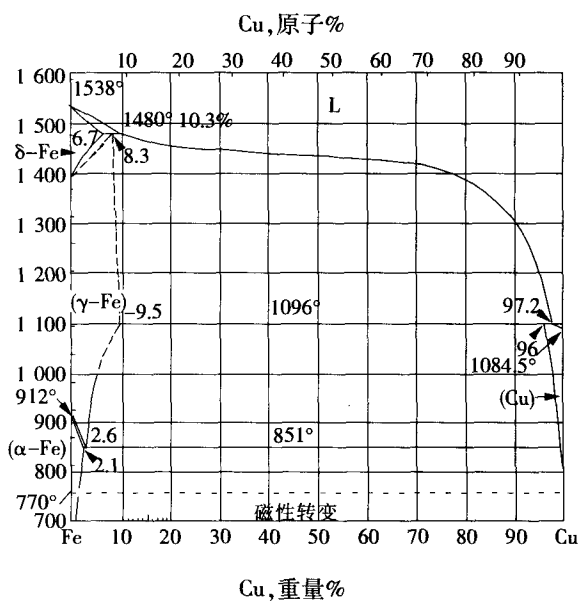


图 29 Cu-Fe 相图

在焊接过程中,钎焊层中的铜进入熔池,当熔池冷却时,焊缝金属凝固;此时低熔点的铜合金仍为液态,沿晶界分布,引起沿晶裂纹,即所谓高温铜脆。

铜钎焊层中,铜-铁共晶加上其它元素的强化作用,其硬度很高;而两侧基层和复层硬度较低,所以过渡层中硬度梯度很大。

3.2 基层、复层、管壁和焊缝

热影响区低碳钢基材的魏氏组织是焊缝区常见组织,是在焊接高温和较快冷却的情况下产生的。同样,由于存在较大的成分过冷,焊缝金属凝固成为奥氏体枝晶。

两种复合钢管管壁与焊缝金属的硬度有所差别,焊缝金属硬度较高,这意味着颈缩和断裂发生在

焊缝区之外。镍基钎焊钢管由于基层和复层都是塑性材料,它们的断口在宏观和微观上都表现为塑性断裂也就不足为奇的了。而铜钎焊钢管焊缝与母材交界处是一个结构突变区,存在很大的应力集中,断口和裂纹往往在焊缝与母材交界处发生。

铜钎焊层硬度明显高于基层和复层,致使受力时钎焊层的变形小于基层和复层,这样一来便引起层间剪切及沿界面发生分层脱离。

4 结 论

镍基钎焊的成功之处乃在于通过扩散形成界面,实现了完全的冶金结合;组成复合钢管的各层以及焊缝金属的硬度等力学性能相近,变形均匀,保证了复合钢管的强韧性和可焊性。

铜基钎焊复合钢管由于高温铜脆而引发焊接裂

纹,且其钎焊层硬度明显高于基层和复层,导致层间剪切及沿界面发生分层脱离,故该铜基合金不宜做复合钢管钎焊料。

参考文献:

- [1] 陈明微,蔡体刚. 国外双金属复合钢管生产概况[J]. 钢管 1997,26(6):23~28.
- [2] 徐静芳,李长印. 复合钢管中镍基合金喷焊层对焊缝裂纹敏感性的影响[J]. 焊接 2004(1):32~34.
- [3] 梁爱玉. 不锈钢复合管的生产开发前景[J]. 焊管, 2001,23(1):4~6.
- [4] 段红伟. 浅述不锈钢复合钢管焊接缺陷的控制[J]. 低温建筑技术,2003(5):81~82.
- [5] 虞觉奇,易文质,陈邦迪,等. 二元合金状态图集[M]. 上海:上海科学技术出版社,1987.

MICROSTRUCTURE OF INTREFACE AND WELDING SEAM IN DUAL – METAL CLAD STEEL PIPE

YANG Ping-sheng¹, YU Jin², KE Yon³, YAN Ming-ming¹, XU Peng¹

(1. Department of Materials Science; 2. Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang 330047, China;

3. Jiujiang Petrochemistry Company, Jiujiang 332004, China)

Abstract: A study was carried out on the microstructure of interface and welding seam in dual – metal clad steel pipe. And its inferences on technological and service properties were studied. The metallographic analyze, composition analyze of micro region and fracture surface analyze were conducted. The results show that the interface between nickel solder and steel is metallurgical joint by diffusion. The hardnesses of solder and inside layer, outside layer are near each other. These guarantee weld ability and the compound steel pipe to be tough. In the Cu – based solder steel pipe, high temperature copper brittleness occurs, and leads to intergranular crack. The hardness of solder layer is obviously higher than that of inside and outside steel layer, causing un harmonizing deformation with each other and shear between layers. That causes interfaces to separate. So the Cu – based solder is not a good solder.

Key words: dual – metal clad steel pipe; Cu – based solder; Ni – based solder; microstructure; weld ability; tough

喜 讯

在 2005 年中国高等学校自然科学学报研究会开展的“高校科技期刊先进集体”及“高校科技期刊优秀主编(主任)”评选活动中,南昌大学学报(理科版)编辑部荣获“高校科技期刊先进集体”称号,朱学春同志荣获“高校科技期刊优秀主编(主任)”称号。