

锈、垢等清理干净直至露出金属光泽,并用丙酮清理坡口及坡口附近 20 mm 以内区域。在进行焊接前,将焊剂 CJ301 均匀地涂于坡口两侧。采用氧丙烷火焰及电弧预热,预热要在坡口 30 mm 外,防止钎剂熔化。采用 NiCr/NiSi 热电偶丝测量试板预热温度。

本文分别作了预热 300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃ 和 700 ℃ 的焊接试验。由于试板较厚,试验中采用三道焊。

2 试验结果及分析

2.1 焊接接头组织形貌

预热可以缓解焊接接头的拘束应力,减小焊接裂纹倾向。但是,随着预热温度的提高,也带来一系列的问题。最直观的就是预热温度过高带来的试板处于红炽状态,焊接环境恶劣,操作人员很难持续工作,一般需要两个操作者轮流工作,生产效率低。同时,试板氧化和变形严重。

图 1 为预热 700 ℃ 时的焊件表面情况。从图中可以很明显地看到焊完后试板表面有一层黑色的氧化皮,并且这层氧化皮在焊件冷却过程中剥落。而在其它几种预热温度时,焊件焊完后表面只发黑,没有出现厚的氧化皮及剥落现象。

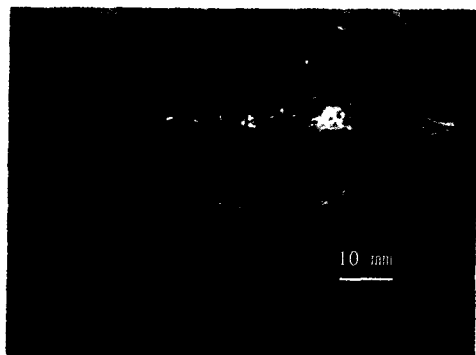


图 1 预热 700 ℃ 焊件表面形貌照片

图 2 所示为焊接接头截面的宏观形貌。从图中可以明显地看出,预热 400 ℃ 时,接头几乎没有变形。随着预热温度的提高,焊接接头的变形增大。与钢板变形不同,紫铜变形向上凸起呈弓形。这是由于预热时紫铜膨胀,预热温度越高,膨胀量越大,同时冷却时收缩量也越大。而且,由于试板较厚,采用多道焊,试板底层先冷却收缩导致变形。

图 3 所示为不同预热温度时母材的微观组织特征。可以看出,预热温度为 300 ℃、400 ℃、500 ℃ 时,对母材基本没有影响,晶粒平均半径约为 50 μm。但是预热温度为 600 ℃ 和 700 ℃ 时,母材晶粒长大很快,其直

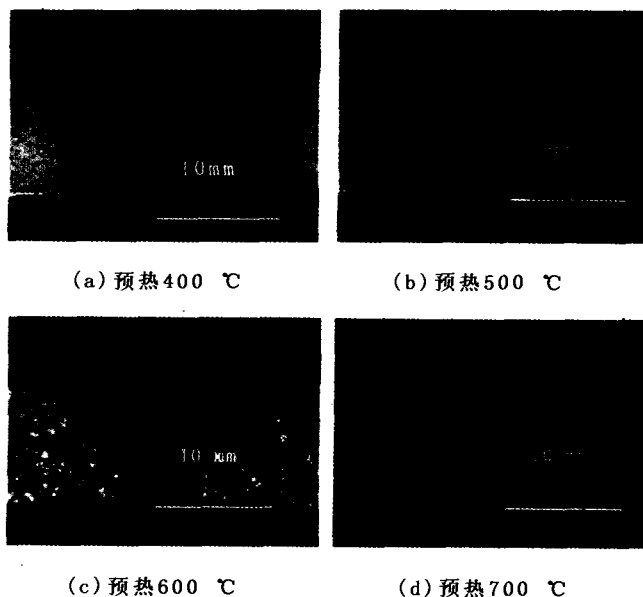
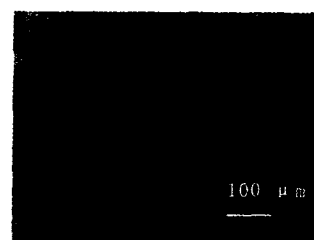


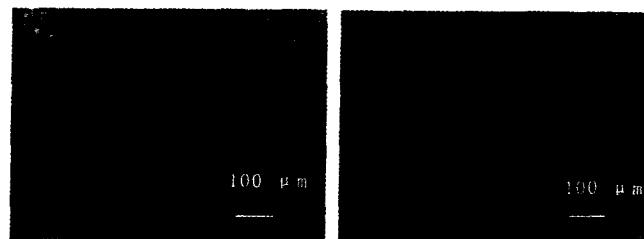
图 2 不同预热温度时焊接接头的变形情况

径分别为 100 μm 和 200 μm。母材晶粒过于粗大,将对整个焊件的性能产生不良影响。

图 4 所示为热影响区微观组织。从图中可以看出,预热 400 ℃、500 ℃ 和 600 ℃ 的热影响区晶粒大小差不多,

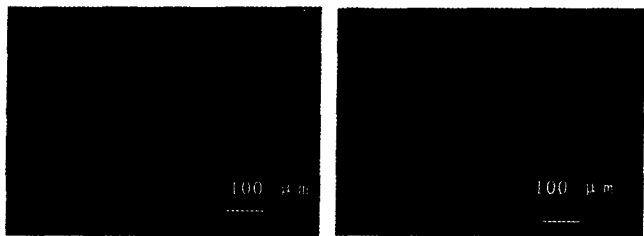


(a) 预热 300 ℃



(b) 预热 400 ℃

(c) 预热 500 ℃



(d) 预热 600 ℃

(e) 预热 700 ℃

图 3 不同预热温度时母材的微观组织

平均直径 $150\ \mu\text{m}$;但它们比预热 $300\ ^\circ\text{C}$ 的热影响区晶粒大 2 倍,其平均直径为 $80\ \mu\text{m}$;预热至 $700\ ^\circ\text{C}$ 时,热影响区晶粒严重长大,直径约为 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 。

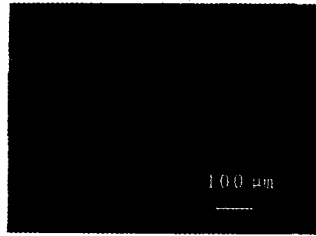
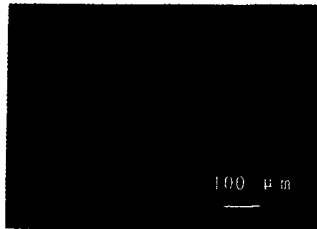
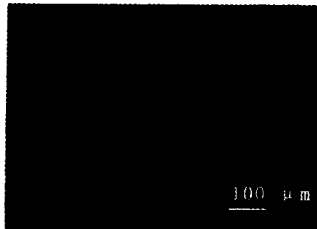
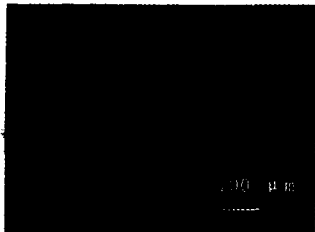
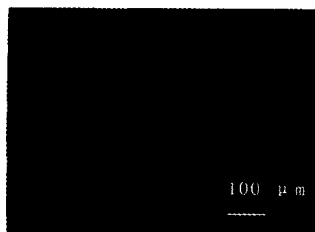
(a) 预热 $300\ ^\circ\text{C}$ (b) 预热 $400\ ^\circ\text{C}$ (c) 预热 $500\ ^\circ\text{C}$ (d) 预热 $600\ ^\circ\text{C}$ (e) 预热 $700\ ^\circ\text{C}$

图 4 不同预热温度时热影响区的微观组织

图 5 所示为不同预热温度时,焊缝的微观组织。从图中可以看出,预热温度为 $300\ ^\circ\text{C}$ 、 $400\ ^\circ\text{C}$ 、 $500\ ^\circ\text{C}$

时,焊缝晶粒大小接近,平均直径 $200\ \mu\text{m}$ 。预热 $600\ ^\circ\text{C}$ 时,晶粒直径长至 $300\ \mu\text{m}$ 。预热温度达到 $700\ ^\circ\text{C}$ 时,焊缝晶粒非常粗大,平均直径可以达到 $400\ \mu\text{m}$ 。

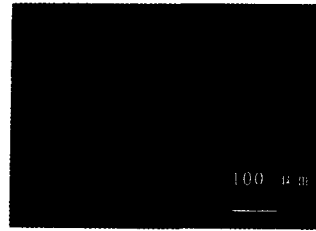
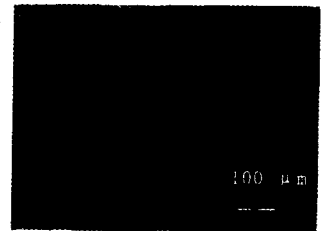
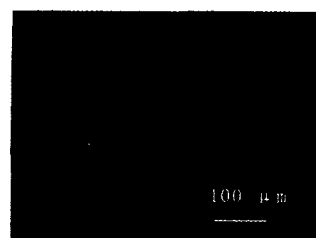
(a) 预热 $300\ ^\circ\text{C}$ (b) 预热 $400\ ^\circ\text{C}$ (c) 预热 $500\ ^\circ\text{C}$ (d) 预热 $600\ ^\circ\text{C}$ (e) 预热 $700\ ^\circ\text{C}$

图 5 不同预热温度时焊缝金属微观形貌

2.2 焊接接头裂纹分析

图 6 为预热 $300\ ^\circ\text{C}$ 、 $600\ ^\circ\text{C}$ 和 $700\ ^\circ\text{C}$ 时的焊接接头

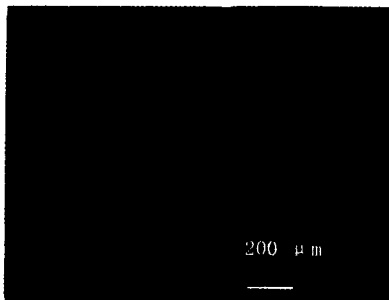
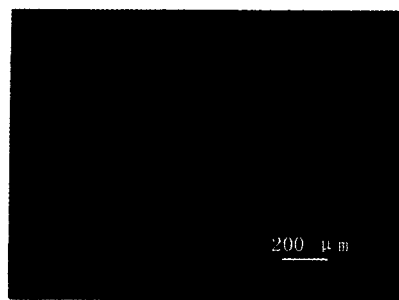
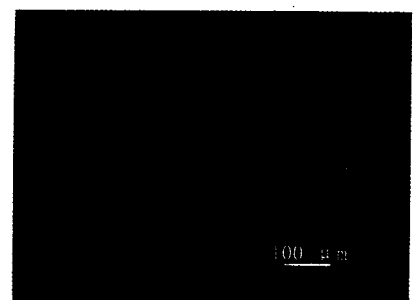
(a) $300\ ^\circ\text{C}$ (b) $600\ ^\circ\text{C}$ (c) $700\ ^\circ\text{C}$

图 6 不同预热温度时焊接接头的结晶裂纹形貌

裂纹情况。对焊接试样观察发现,预热 $300\ ^\circ\text{C}$ 、 $400\ ^\circ\text{C}$ 和 $500\ ^\circ\text{C}$ 时,焊缝中的裂纹差别不大。但是,随着预热温度的提高,焊缝中的热裂纹在数量和尺寸上均减少。

预热至 $600\ ^\circ\text{C}$ 和 $700\ ^\circ\text{C}$ 时,裂纹宽度只有 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。焊缝中的裂纹主要集中在焊缝的中下部,一般为结晶裂纹。这是由于在打底及填充焊时,焊缝中的热输入不

足引起焊缝金属冷却过快而导致产生裂纹的。

值得注意的是,当预热温度达到 700 ℃时,虽然焊缝中只存在少量微观裂纹,但是焊接试板处于红炽状态,不仅焊接操作困难,而且焊件氧化和变形严重。该焊接工艺在工业生产中应用困难。

2.3 焊接接头力学性能

每种焊接接头取三个拉伸试样进行拉伸试验,加载速率为 5 mm/min。拉伸试验结果如表 1 所示。图 7 为焊接接头抗拉强度的对比图。对比各组数据可以发现,每种焊接接头中均有强度较低的试件,这是由于焊

表 1 焊接接头的拉伸试验结果

试件类型	试件号	抗拉强度 σ_b /MPa	断裂位置	断裂原因
预热 300 ℃	1	215	热影响区	屈服断裂
	2	99.1	焊缝	裂纹
	3	91.4	焊缝	裂纹
预热 400 ℃	1	203.5	焊缝	微裂纹
	2	166.7	焊缝	裂纹
	3	99	焊缝	裂纹
预热 500 ℃	1	210	焊缝	夹杂
	2	146	焊缝	裂纹
	3	97	焊缝	裂纹
预热 600 ℃	1	211.4	焊缝	微裂纹
	2	204.7	熔合区	微裂纹
	3	185.8	热影响区	屈服断裂
预热 700 ℃	1	210.3	热影响区	屈服断裂
	2	207.7	热影响区	屈服断裂
	3	200.1	热影响区	屈服断裂
母材	1	228.1		

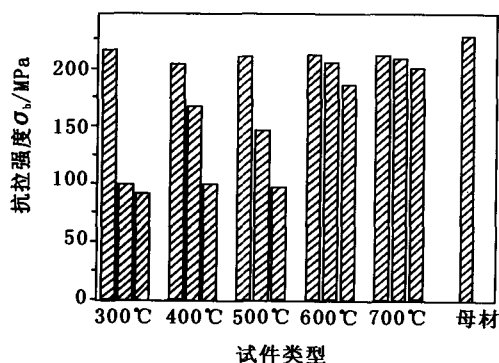


图 7 不同预热温度焊接接头抗拉强度对比

缝中的裂纹所致。预热温度升高,焊接接头中的裂纹减少,断裂主要是由于焊缝中的微裂纹导致。预热至 700 ℃时,微裂纹已不影响接头断裂,这时拉伸试件在热影响区屈服断裂。

3 结 论

(1) 10 mm 厚紫铜板 TIG 焊时,预热可以减小焊接接头中的结晶裂纹倾向,但是即使预热至 700 ℃,仍不能消除焊接接头中的结晶裂纹。

(2) 高温预热使得焊接环境恶劣,焊件表面氧化严重。

(3) 测试结果表明,焊缝中的结晶裂纹使得焊接接头的抗拉强度不稳定。

(4) 从试验结果可以看出,在紫铜厚板 TIG 焊接中采用预热技术,可以很好地解决热输入不足的问题,但是对于结晶裂纹不能彻底消除。因此,预热 TIG 焊接工艺还不能应用于厚板紫铜重要构件的焊接生产,有必要研究不预热 TIG 焊接技术及相应的控制结晶裂纹的措施。

参 考 文 献

- 1 刘长江,唐耀阳,崔西会.气轮机冷凝器封头的 TIG 钎焊.焊接,2005(2):44~45
- 2 季 杰,马学智.铜及铜合金的焊接性.焊接技术,1999(2):13~15
- 3 胡永旺,刘学明.插接母线铜排的 TIG 焊工艺.焊接技术,1996(5):13~14
- 4 申有才.大界面紫铜母线钨极氩弧焊焊接工艺.化工建设工程,2001,23(4):25~34
- 5 范金友,刘靖涛,韩廷忠.紫铜板的焊接.机械工程师,2001(12):60~61
- 6 Spiller K R. Welding copper by the gas shielded arc processes. Metal Constr Brit Weld J, 1970, 2(2):45~53
- 7 Salahaddin Anik, Lutz Dorn. Metallophysical processes in the welding of copper and copper alloys - welding methods. Welding and Cutting, 1988(9):E139~E143

(收稿日期 2005 04 19)

作者简介: 闫久春,1964 年出生,博士,教授,主要研究方向为新材料特种连接技术。焊接冶金过程控制及数值模拟,承担国家自然科学基金、国家 863 项目多项,获省部级二、三等奖励 3 项,发表 SCI 论文 20 余篇。