固溶处理对 Inconel600 合金 TIG 接头组织和性能的影响

王 刚[1,2]，尹立孟[1]，姚宗湘[1]，李 东[1]，王金钊[1]，陈志刚[1,2]

（1. 重庆科技学院 冶金与材料工程学院，重庆 401331；2. 材料腐蚀与防护四川省重点实验室，四川 自贡 643000）

摘 要：研究了 Inconel600 镍基合金 TIG 接头在不同温度下固溶处理的组织、力学性能及耐腐蚀性。结果表明，随固溶处理温度增加，其硬度、强度下降，塑形增加；低温下固溶处理，热影响区会形成粗大块状的 $Cr_{23}C_6$ 碳化物，使耐蚀性能下降；1250℃固溶处理时，晶粒粗大，晶界变粗，平直度增加，且晶界上杂质元素偏析严重，导致耐蚀性下降。所以其最合理的固溶处理温度为 1050～1150℃。

关键词：Inconel600 合金；TIG 焊接接头；固溶温度；耐蚀性能

DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 2017. 05. 061

中图分类号：TG444.74;TG113　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-3814(2017)05-0221-04

Influence of Solution Treatment on Microstructure and Properties of Inconel600 Alloy TIG Welded Joint

WANG Gang[1,2], YIN Limeng[1], YAO Zongxiang[1], LI Dong[1], WANG Jinzhao[1], CHEN Zhigang[1,2]

(1. School of Metallurgy and Materials Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 2. Material Corrosion and Protection Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, China)

Abstract: The effects of solution treatment under different temperatures on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of Inconel600 alloy TIG welded joints were studied. The results show that with the increase of solution treatment temperature, the hardness, tensile strength of Inconel600 welded joints decrease and the plasticity increases. When the welded parts is solid solution treated at low temperature, the coarse block $Cr_{23}C_6$ carbides are formed in the heat affected zone and the corrosion resistance decreases. When solid solution treated at 1250 ℃, the corrosion resistance also decreases because of coarse grains and serious segregation of impurity elements on grain boundaries.The most reasonable temperature of solution treatment for Inconel600 alloy TIG welded joints is 1050-1150℃.

Key words: Inconel600 alloy; TIG welded joint; solution treatment temperature; corrosion resistance

Inconel600 合金是一种以固溶强化为主的 Ni-Cr-Fe 型高温镍基合金，具有耐腐蚀、耐热和抗氧化性，被广泛应用于化学工业、核动力工业中。由于该材料具有较高的热裂纹敏感性，容易出现气孔，同时镍的热导率和电阻率大，焊接中散热比较困难，容易引起晶粒粗大，从而降低焊接接头的力学性能和耐腐蚀性能[1-2]。笔者参与的某 10 万吨 / 年离子膜烧碱项目，介质主要为高纯盐酸、NaOH 溶液、HCl 气体、过热蒸汽等，其中 Inconel600 高镍管道部分焊后出现明显的耐蚀性下降问题。本文通过对比研究不同固溶处理温度下该合金 TIG 接头金相组织变化规律，分析引起耐蚀性下降的原因，并给出了合理的消除腐蚀缺陷的固溶处理温度，保证了该工程的顺利验收。

1 试样材料与方法

试验所用材料为 ϕ300 mm×8（壁厚）mm 的 Inconel600 合金管道。在 Inconel600 焊接过程中若热输入过大，易形成方向性强的单相奥氏体组织而产生热裂纹；此外，由于镍基合金液体金属粘度大，流动性较差，易产生气孔夹杂等缺陷，进而影响接头的耐腐蚀性能。针对上述问题，试验采用 TIG 焊，钨极规格为 ϕ2.4 WC，填充材料选用 ϕ2.4 mm ER/NiCr-3 焊丝。母材及焊丝化学成分如表 1 所示。

试样坡口如图 1 所示。坡口采用合金磨头进行

收稿日期:2016-05-17

基金项目: 腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金项目(2015CL12); 重庆市基础与前沿研究项目(cstc2015jcyjA 50017)

作者简介:王刚(1973-),男,四川仪陇人,讲师,硕士,主要研究方向:金属材料焊接工艺及性能研究;电话:13635468385; E-mail:wwg_16@163.com

表 1 母材及焊丝化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base metal and weld wire (wt%)

	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Si	Cu	Al	Ti	Nb	P	S
母材	67.2	21.8	10	0.129	0.18	0.35	≤0.005	0.12	0.0641	≤0.005	≤0.005	≤0.005
ER /NiCr-3	≥67	18~22	≤3.0	≤0.1	2.5~3.5	≤0.5	≤0.5	-	≤0.7	2~3	≤0.03	≤0.015

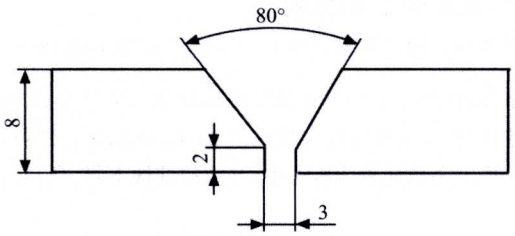

图 1 坡口(mm)
Fig.1 Welding groove (mm)

机械加工,严禁使用氧-乙炔火焰切割。焊接时进行背面充氩保护以防止氧化,保护气体为纯度大于99.99%,含水量小于50mg/L的纯氩气。施工环境为相对湿度小于60%,风速小于2m/s,温度高于15℃。具体焊接工艺参数[2]见表2。

表 2 焊接工艺参数
Tab.2 Welding parameters

焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(mm·min^{-1})	气体流量 /(L·min^{-1})
120	14	100~150	10~12

焊后沿垂直焊缝方向取样,按GBT/228-2002标准取拉伸试样。金相试样经研磨抛光后,采用腐蚀液(100mLHCl+100mLC_2H_5OH+5g$CuCl_2$)腐蚀150s,然后采用LEICA DM2500M光学显微镜以及FEI QUANTA250扫描电子显微镜对接头的组织进行观察。使用联尔HV-1000型维氏硬度计对接头的硬度进行测量,载荷为1kg,加压时间为15s;通过测量5个数据取平均值得到接头的拉伸性能和显微硬度。

2 试验结果与讨论

2.1 固溶处理对焊接接头组织的影响

图2为1100℃×1h固溶处理TIG接头的显微组织。从图中可以看出,Inconel600焊接接头热影响区(HAZ)主要为单相A晶粒,熔合区为大量较细小

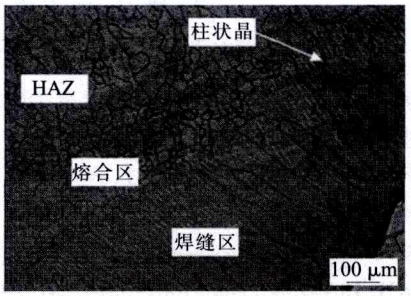

图 2 1100℃×1 h 固溶处理的 TIG 接头显微组织
Fig.2 Microstructure of TIG welded joint under solid solution treated at 1100℃×1 h

的半熔化胞状晶粒,焊缝为依附半熔化晶粒联生、结晶长大的,粗大的方向性很强的柱状晶。

图3为不同温度下固溶处理接头的显微组织。从图中看出,经过焊接的不均匀加热过程,焊态组织的高温HAZ的晶粒明显粗大,见图3(a);在HAZ和熔合区晶粒内和晶界形成了不同形态的碳化物,粗块状的碳化物$M_{23}C_6$主要在晶界。低于1100℃固溶处理,该碳化物体积进一步增加,见图3(b),当固溶处理温度提高到1100℃时,该碳化物在晶界基本消除。这是由于在固溶加热过程中,碳、铬、钼等合金元素在奥氏体晶粒内的扩散速率不同,碳向晶界的扩散速度大于铬、钼,造成碳在晶界处偏聚,并形成$M_{23}C_6$碳化物,使HAZ的硬度增大;$M_{23}C_6$碳化物的稳定温度一般在850~900℃,当超过该温度并保持足够的时间,碳化物重新分解为自由的C、Cr原子,均匀分布于晶粒内。另一种呈弥散状的细小、均匀分布于晶粒内的为(Ti,Nb)C碳化物,其含量和分布对接头的力学性能也有直接影响。接头中还有主要分布于母材和HAZ中的呈白色光亮的物质γ′相,其主要成分为Ni_3Al,其晶体结构与γ基体相同,为面

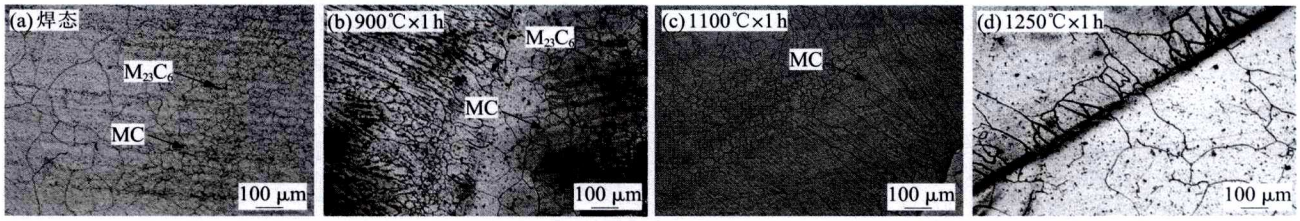

图 3 不同温度下固溶处理接头显微组织
Fig.3 Microstructure of welded joints under solid solution treated at different temperatures

心立方结构(FCC),是镍基合金的强化相[3-4]。由图 3 可以看出，在 1100℃及以下温度范围内下固溶处理,奥氏体晶粒长大不明显,当温度超过 1100℃时,熔合区和焊缝晶粒急剧长大，奥氏体晶粒变得越粗大,且晶界更平直,(Ti,Nb)C 强化相碳化物也已消除,见图 3(d),故其硬度和强度明显下降。

图 4 为不同温度下固溶处理接头的 SEM 形貌及能谱分析。由图 4(a)可以看到块状的 $M_{23}C_6$ 碳化物和焊缝枝晶间的白色颗粒状组织。对这些白色颗粒进行能谱分析(见图 4(c)),得知这些白色颗粒是 γ′相,主要由镍、铬和钛元素等组成。在扫描电镜下还可以看到尺寸比 γ′相稍大但数量很少的析出相(见图 4 (b)),通过能谱分析，结果显示这主要是(Ti,Nb)C 型碳化物，该碳化物的稳定温度为 1200℃以下，所以当固溶处理温度达到 1250℃,(Ti,Nb)C 基本分解成自由的原子。

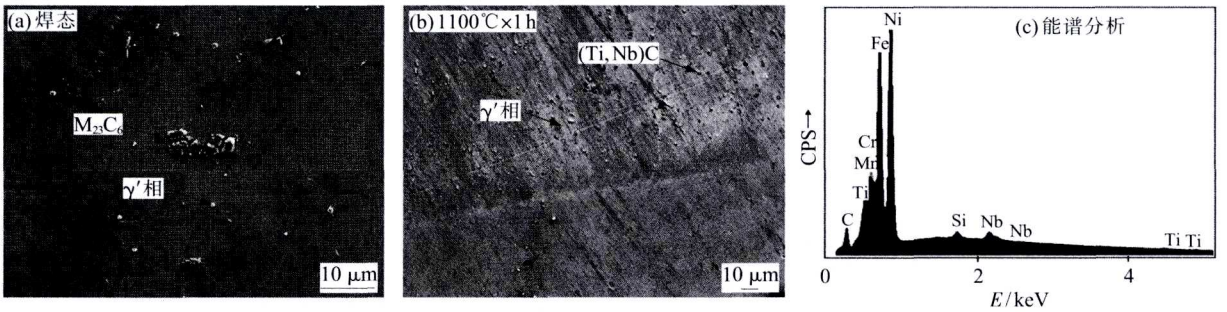

图 4 不同温度下固溶处理接头的 SEM 形貌及能谱分析

Fig.4 SEM and ESA of welded joints under solid solution treated at different temperatures

2.2 固溶处理对焊接接头力学性能的影响

表 3 为不同温度下固溶处理接头的力学性能。从表可以看出，各种状态下 HAZ 硬度均低于焊缝,这是由于受到焊接不均匀加热的作用,HAZ 的组织发生了明显的变化,Cr 和 Mo 元素在晶界富集,使晶粒内固溶强化作用减弱。这说明 HAZ 处发生的元素偏聚和组织变化对接头的力学性能影响较大,固溶处理能有效改善整个焊接接头的性能。

表 3 不同温度下固溶处理接头的力学性能

Tab.3 Mechanical properties of welded joints under solution treated at different temperatures

序号	状态	HV10				$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A (%)
		母材	HAZ	熔合区	焊缝			
1	焊态	223	193	207	202	352	628	26.5
2	900℃固溶处理	213	198	214	203	363	679	30.6
3	1100℃固溶处理	167	173	175	186	319	634	49.9
4	1250℃固溶处理	160	154	145	157	312	621	70

从表 3 可以看出,900℃固溶处理时，接头的强度和硬度均高于焊态，分析可能是该温度刚达到 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 碳化物的分解温度,使碳化物分解不充分，同时分解出的 Cr、C 原子来不及均匀化形成局部范围富集所造成。随着固溶处理温度的增加,接头的硬度、强度都呈下降趋势,尤其是当固溶处理温度在 1100℃以上时,硬度下降趋势更为明显,而伸长率逐渐增加。这是因为在焊接过程中形成的粗大的 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ 碳化物的稳定温度为 850～900℃,而弥散相(Ti,Nb)C 稳定温度可达 1200℃,在 1100℃以下时,(Ti,Nb)C 未发生分解，当温度超过 1200℃后,弥散状的碳化物才开始分解,其强化效果逐渐降低,导致硬度、强度下降,伸长率增加;而且固溶处理温度超过 1100℃后,奥氏体的晶粒严重长大,在冷却过程中因无组织转变，在室温下形成粗大的奥氏体,使其硬度、强度进一步降低。

2.3 固溶处理对接头耐腐蚀性的影响

对不同状态下的金相试样按 GB1223-75 进行 C 法晶间腐蚀实验,即浸入 10%草酸($C_2H_2O_4\cdot 2H_2$)溶液中进行晶间腐蚀实验,溶液温度为 40℃,试验时间为 2min。

产生晶间腐蚀的原因是碳在晶粒间的扩散速度大于合金元素，如果焊后在敏化温度区间停留时间过长,导致碳在晶界聚集形成 $Cr_{23}C_6$,而靠近晶粒边界附近则形成贫铬区,使其耐蚀性下降。Inconel600 合金固溶处理的目的是将镍基合金焊接接头加热到 $Cr_{23}C_6$ 稳定温度以上,使其分解,然后快速冷却,在很短的时间通过敏化温度区域使过饱和碳来不及大量析出，贫铬区来不及充分形成而降低晶间腐蚀的敏感性。图 5 为不同温度下固溶处理接头的晶间腐蚀结果。从图 5(a)可以看出,由于 TIG 焊的热源集中度高,热输入小,其接头耐腐蚀能力较强,晶界清晰,无平直的腐蚀沟,晶粒间呈台阶状,但在晶界附近有密集的 $Cr_{23}C_6$ 碳化物分布，如长时间在敏化温

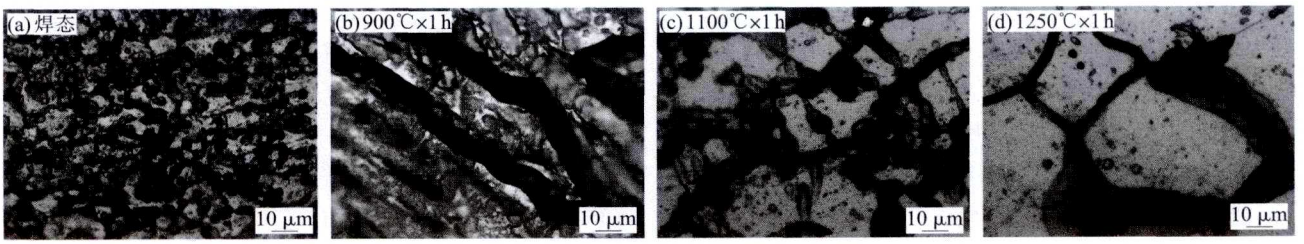

图 5 不同温度下固溶处理接头的晶间腐蚀结果

Fig.5 Intergranular corrosion results of welded joints under solution treated at different temperatures

度工作可能发生腐蚀失效。900℃固溶时，因温度升高使原子的扩散能力增强，已形成的 $C_{23}C_6$ 未完全分解并进一步聚集长大，同时奥氏体晶粒比焊态出现明显粗化，使接头出现严重的晶间耐蚀缺陷，形成了粗大且平直的腐蚀沟，晶粒被腐蚀沟完全包围，如图 5(b)所示。当温度达到 1100℃时，$Cr_{23}C_6$ 碳化物充分溶解((Ti,Nb)C 碳化物仍处于稳定状态)，金属化合物对位错的钉扎作用减弱，合金元素扩散速率加快，使成分均匀化，虽然晶粒尺寸相对焊态增大，但因晶界上和晶粒内部碳化物偏聚相对较少，在相同介质和腐蚀条件下晶界上未见连续的腐蚀沟，如图 5(c)所示；该接头耐腐蚀性和综合力学性能最好。温度增加到 1250℃，$Cr_{23}C_6$ 碳化物已完全分解，弥散强化相(Ti,Nb)C 也分解成自由的原子，使奥氏体中自由的碳浓度增加，同时温度升高导致晶粒严重粗大，晶界变粗、平直度增加，且晶界上杂质元素偏析严重，因此整个晶界上都出现了很深的沿晶腐蚀沟，如图 5(d)所示。因此，焊后对 Inconel600 合金进行(1050～1150)℃×1h 的固溶处理比较合理[5-6]。

3 结论

(1) 焊后固溶处理对 Inconel600 焊接接头力学性能有较大影响。随固溶温度的增加其硬度、强度下降，伸长率增加。

(2) Inconel600 焊接接头的 HAZ 主要为单相 A 晶粒。900℃固溶处理时，形成粗大块状的 $Cr_{23}C_6$ 碳化物，奥氏体晶粒长大不明显；当超过 1100℃固溶处理时，熔合区和焊缝晶粒急剧长大，奥氏体晶粒变得越粗大，晶界更平直。

(3) 焊后固溶处理能改善 Inconel600 焊接接头的耐蚀性，900℃固溶处理时，$Cr_{23}C_6$ 进一步聚集长大，耐蚀性下降；1100℃固溶处理时，$Cr_{23}C_6$ 碳化物充分溶解，合金成分均匀，晶界上和晶粒内部碳化物偏聚相对较少，其耐蚀性最好；1250℃固溶处理时，因晶粒粗大，晶界变粗、平直度增加，晶界上杂质元素偏析严重，导致耐蚀性下降。所以合理的固溶处理温度为(1050～1150)℃×1h。

参考文献：

[1] 张悦悦，马佳荣，苏诚，等. 固溶处理对 617B 镍基高温合金晶粒长大的影响[J]. 热加工工艺，2013，42(6)：161-163.

[2] 曾莉，王岩，李莎，等. 热加工参数对 GH4700 镍基合金组织的影响[J]. 热加工工艺，2013，42(5)：5-7.

[3] 叶欣，华学明，王敏，等. 镍基 Inconel-718 合金 TIG 焊部分熔化区组织变化[J]. 金属学报，2014，50(8)：109-116.

[4] 王涛，郑振太，董天顺，等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对 Inconel601H 镍基合金焊缝晶粒大小的影响 [J]. 焊接学报，2014(4)：109-112.

[5] 杨仁杰，刘文. Inconel617 镍基合金焊接接头热影响区组织和性能分析[J]. 上海金属，2015，37(4)：26-29.

[6] 赵雪会，白真权，冯耀荣. 热处理温度及析出相对镍基合金腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报，2012，33(8)：39-44.

通告

关于本刊网址和邮箱的通告

近期有作者反映，有网站冒用本刊网名：热加工工艺，致使其投稿失误，但其很快发觉不对，便迅速与本刊电话沟通，证实那个网站盗用本刊网名，但网址不同。

为了大家能把稿件一次性准确地投向本刊，本刊特此通告：本刊网名：热加工工艺；本刊网址：www.rjggy.com 及 www.rjggy.net。凡与此不一致者，不是本刊网页。

另外，本刊邮箱为：rjggy@vip.163.com。凡与此不一致者，不是本刊邮箱。

如您在网络上发现与本刊网页、邮箱有关的疑问，欢迎您与本刊积极联系，以维护各方权益。