

焊丝成分对国产 Invar 合金 GTAW 接头组织差异性的影响

程立宏¹, 周裕琦¹, 王建峰¹, 李柱², 穆战², 占小红^{1,✉}

1 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106

2 西安钢研功能材料股份有限公司, 西安 710000

采用钨极惰性气体保护焊 (Gas tungsten arc welding, GTAW) 工艺完成 15 mm 厚国产 Invar 合金的焊接, 研究了焊丝成分对接头组织差异性的影响。结果表明: 三种焊丝所获得的显微组织均由焊缝边缘垂直于熔合线生长的粗大柱状晶和焊缝中部的等轴晶组成, 等轴晶内部的亚晶结构明显细化。使用不同成分焊丝后在焊缝形成的析出相种类、形态与分布位置存在较大差别。采用添加 0.40%Ti 的焊丝在晶界析出较多规则的块状颗粒, 而添加 1.42%Nb 的焊丝在亚晶界析出白色链状或柱状连续相。析出相不仅能作为异质形核的核心或钉扎晶界的质点细化晶粒, 还可以作为沉淀相阻碍位错运动从而提高焊缝强度。试样拉伸结果表明: 焊丝加入 0.40%Ti、1.42%Nb 后, 接头的抗拉强度大幅提升, 分别达到 638.2 MPa 和 653.5 MPa, 相较原始焊丝分别提高 60.6%、64.4%。断口形貌表明采用含铌焊丝 (1.42%Nb) 后断口韧窝尺寸和深度增大, 接头断裂模式由脆性断裂转变为韧性断裂, 说明 Nb 元素对 Invar 合金接头组织细化、力学性能改善具有显著作用。

关键词 国产 Invar 合金 焊丝成分 显微组织 力学性能 断口形貌

中图分类号: TG422.3 **文献标识码:** A

Effect of Welding Wire Composition on Microstructure Inhomogeneity of Domestic Invar Alloy GTAW Joint

CHENG Lihong¹, ZHOU Yuqi¹, WANG Jianfeng¹, LI Zhu², MU Zhan², ZHAN Xiaohong^{1,✉}

1 College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2 Xi'an Gangyan Special Alloy Co., Ltd., Xi'an 710000, China

The influence of wire composition on the microstructure varieties of joints was studied by using gas tungsten arc welding (GTAW) process. Results showed that the microstructure of welded joint obtained by using the three welding wires are featured coarse columnar crystals grown perpendicular to the fusion lines and equiaxed crystals in the middle of weld, cellular subcrystals in equiaxed crystals are remarkably refined. There was a large differences in the type, morphology and distribution position of precipitated phases formed when using welding wires of different composition. When using the welding wire with 0.40%Ti, more regular bulk particles were precipitated at the grain boundary, and if using the welding wire with 1.42%Nb, a white chain or columnar continuous phase were precipitated at the subgrain boundary, which not only enabled the core of heterogeneous nucleation or the particle that nails the grain boundary to refine the grain, but also hindered dislocation motion to strengthen the welded joint. The tensile test results showed that the tensile strength of the joints with 0.40%Ti addition or 1.42%Nb addition to the welding wire reached 638.2MPa or 653.5 MPa respectively, which are 60.6% and 64.4% higher than that of conventional welding wire. When the specimen was welded with the welding wire that with Nb (1.42%Nb) addition, the size depth of the fracture ligament increased, and the joint fracture mode changed from brittle fracture to ductile fracture, indicating that Nb plays a significant role in the microstructure refinement and mechanical properties improvement of Invar alloy joints.

Key words domestic Invar alloy, wire composition, microstructure, mechanical properties, fracture morphology

0 引言

随着航空航天飞行器领域的快速发展, 轻质、高强、抗疲劳的复合材料在新一代民航制造业中占据主导地位^[1], 复合材料的应用比例已成为衡量航空装备先进性和技术水平的重要指标之一^[2-3]。复合材料构件通常需要在加热加压条件下通过相应的模具固化成型, Invar 合金由于其接近复合材料的低热膨胀系数, 被大量用于制造复合材料热压模具^[4]。然而, 我国的 Invar 合金主要依赖进口, 国产化率不足 5%, 仅有极少企业实现 Invar 合金国产化^[5]。

目前针对 Invar 合金焊接性能提升的研究主要集中在焊接工艺方面^[6-10]。占小红等^[11]研究 Invar 合金 MIG 焊接发现, 焊缝中 Si、Mn 元素分布均匀, Fe 元素含量增加而 Ni 元素含量降低, 焊接接头的强度达到母材强度; 张超等^[12]研究了

工艺参数对 25 mm 厚 Invar 合金激光-TIG 复合焊缝成形质量的影响规律, 选用最优参数组合得到成形良好的焊缝; Zhao 等^[13]研究不同摆动频率下 Invar 合金激光焊接接头的显微组织和力学性能, 发现光束摆动造成的涡流对熔池具有搅拌作用, 当摆动频率为 50 Hz 时接头抗拉强度与伸长率较不摆动时分别提高 5.77% 和 23.70%; Jiao 等^[14]通过电弧增材制备沉积态 Invar 合金, 发现析出相主要为 (Nb, Ti)C 和 NbC, 热处理后 NbC 含量增加是样品强度提高的主要原因。以上研究主要采用自熔或单一焊丝工艺焊接, 部分研究微量元素对合金的影响规律。陈小龙等^[15]讨论了前过渡元素 Ti、Nb 等添加对 Fe-Ni 基合金物相结构的影响, 指出加入 Ti 后合金抗高温氧化性能会降低, 加入 Cr、Mo 能起到固溶强化的作用, 提升合金的硬度与强度; 任航等^[16]在激光增材制造 GH4169 合金中加入 Nb, 发现随着 Nb 添加量增加, 基体 γ 的

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (NF2022003)

This work was financially supported by the Special Fund for Basic Scientific Research of the Central Universities (NF2022003).

✉ xiaohongzhan_nuaa@126.com

23080151-1

DOI: 10.11896/cldb.23080151

含 Nb 量增加,同时合金固溶强化作用增强;王诗洋等^[17]通过自行设计焊丝成分解决镍基高温合金可焊性较差的问题,发现提高 Nb 含量能有效提升晶界液膜的愈合能力,降低焊接敏感性,较低 Cr、Mo 含量能使接头的持久寿命提升。

为了提高 Invar 合金焊接接头性能,大多数研究主要依靠工艺参数优化的方法,但通过焊丝元素改善接头性能的研究较少。鉴于此,本工作对国产 Invar 合金进行钨极惰性气体保护焊接 (Gas tungsten arc welding, GTAW),研究不同焊丝成分对焊缝显微组织差异性的影响,以期对国产 Invar 合金

的实际应用提供借鉴。

1 实验

试验所用母材为西安钢研功能材料股份有限公司提供的国产 Invar 合金,规格为 200 mm×100 mm×15 mm,选用三种性能较优的焊丝作为填充金属,直径均为 2.4 mm。根据主要添加元素的不同,将三种焊丝分别记为原始焊丝、含钛焊丝(质量分数 0.40% Ti)与含铌焊丝(质量分数 1.42% Nb),国产 Invar 合金及三种焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 国产 Invar 合金及三种焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions (wt. %) of domestic Invar alloy and three kinds of welding wires

材料	C	Mn	Si	Ni	Al	Ti	Nb	Fe
国产 Invar 合金	0.02	0.45	0.18	35.97	0.002	0.02	—	余量
原始焊丝	0.03	0.36	0.16	36.10	0.02	—	—	余量
含钛焊丝(0.40%Ti)	0.21	0.36	0.20	36.05	0.07	0.40	—	余量
含铌焊丝(1.42%Nb)	0.22	0.40	0.15	37.17	0.02	0.03	1.42	余量

考虑到板材较厚,为保证焊缝熔透性并节省焊材,两块板材各开 30° 的 V 型坡口,钝边高度 2 mm。根据前期试验摸索确定五层六道的焊缝填充策略,焊接过程如图 1 所示。

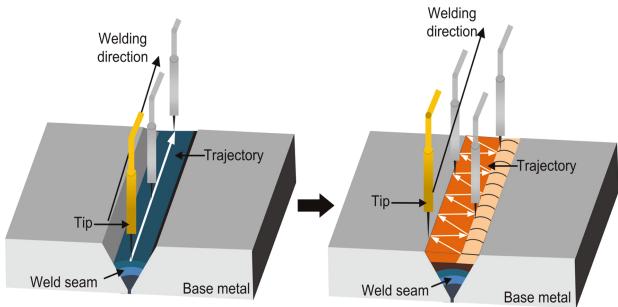


图 1 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the welding process

板材焊接前需去除表面油污与氧化层,首先使用角磨机和砂纸清理坡口两侧,随后用乙醇溶液对打磨后的表面进行擦拭。试验开始前通过点固的方式防止板材发生翘曲变形,同时便于起弧和防止焊漏。焊接过程采用纯氩气(纯度不低

于 99.9%)作为保护气,控制层间温度不高于 120 ℃,具体焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 v/(m·min ⁻¹)	氩气流量 Q/(L·min ⁻¹)	层间温度 T/℃
180~200	0.06	10	100~120

焊接完成后选取成型较好处使用线切割机切取金相、拉伸试样,对金相试样依次选用 180/400/800/1 000 和 1 200 号的水砂纸进行研磨,直至表面划痕方向一致,并在 W1.5 抛光膏下进行抛光处理。然后用王水试剂(HCL 与 HNO₃ 体积比为 3:1)与 5% 硝酸酒精溶液蚀刻样品。采用耐可视 NM900RF 型金相显微镜和配有能谱仪探头的 JSM-6360LV 扫描电镜对焊缝显微组织、第二相成分和拉伸断口形貌进行分析。使用 UTM5000 电子万能试验机在室温下以 2 mm/min 速度进行拉伸,为探明接头实际抗拉强度,对拉伸试样焊缝区域开半圆形缺口^[18],拉伸、金相试样尺寸如图 2 所示。

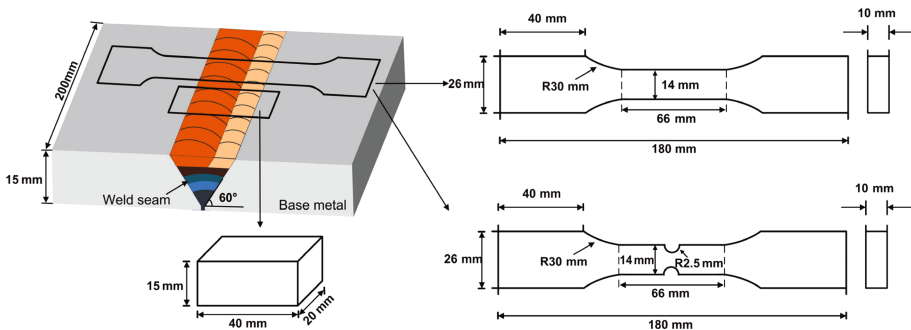


图 2 焊接金相、拉伸试样取样位置与尺寸

Fig. 2 The specific sampling location and size of tensile strength test parts

2 结果与分析

2.1 XRD 分析

将国产 Invar 合金与三种不同成分焊丝的焊接试样标记

为#1(原始焊丝)、#2(0.40% Ti)与#3(1.42Nb%)。图 3 为 15 mm 厚国产 Invar 合金 GTAW 焊接接头 XRD 谱。对其衍射峰进行标定发现,三种接头内部均为单一的 γ 相,其对应的晶面为(111)、(200)、(220),说明添加合金元素并未改变

合金的晶体结构。通常衍射峰的强度和峰形尖锐程度表明合金结晶度的高低和物相所占体积分数的大小^[19]。#1(原始焊丝)试样相较母材衍射峰强度增大,说明 FCC 晶相含量升高;加入 0.40%Ti 元素后试样的(200)峰值增大,(111)峰值减小,其原因为引入 Ti 原子后形成其他择优取向的第二相,加强了(200)峰;加入 1.42%Nb 元素后对比衍射峰位置发现,该试样较母材衍射峰向左偏移,可能为引入 Nb 原子后合金晶体结构发生畸变引起。由于析出相尺寸小、含量少,未能在 XRD 图谱中检测到特殊衍射峰谱,后续将通过 SEM 及 EDS 能谱进一步分析。

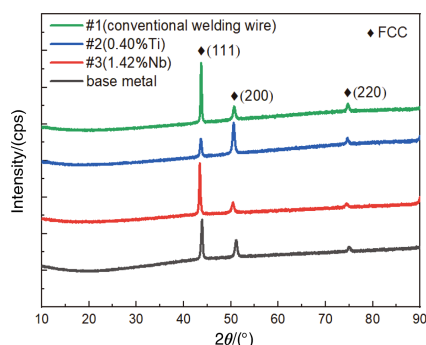


图3 不同焊丝接头的 XRD 谱(电子版为彩图)

Fig. 3 XRD patterns of different wire joints

2.2 焊接接头显微组织

图4为母材(Base metal, BM)显微组织,国产 Invar 合金晶粒多为等轴多边形,平均晶粒直径在 15~19 μm。母材主要由奥氏体晶粒组成,在外界载荷作用下,奥氏体发生不同程度塑性变形消耗和吸收部分能量,改善母材韧性。由于焊接过程冷却速度远大于平衡冷却速度,焊后铁素体来不及析出,因此焊缝组织全部为奥氏体。

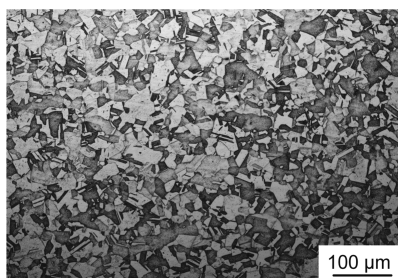


图4 国产 Invar 合金母材显微组织

Fig. 4 Microstructure of BM of domestic Invar alloy

图5为三种不同焊丝下接头显微组织,可以清晰地看到焊缝(Welding zone, WZ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)与母材(BM)三个区域。焊缝边缘为垂直于熔合线生长的粗大柱状晶,由半熔化的母材晶粒向焊缝中间生长,呈现联生结晶的特征。焊缝不同晶粒形态取决于凝固界面前沿的成分过冷度,靠近母材区域温度梯度大、成分过冷度小,异质形核质点较少,柱状晶沿着最优取向不断长大。热影响区晶粒较母材明显粗大,这是由于过高的 Ni 含量使马氏体相变温度降到室温以下,冷却过程中奥氏体晶粒没有发生重结晶,晶粒未得到细化,同时 Invar 合金导热系数小、散热能力差,导致晶粒容易过热长大。不同接头热影响区宽度相近,均在 210~260 μm,说明焊接过程工艺稳定,波动较小。

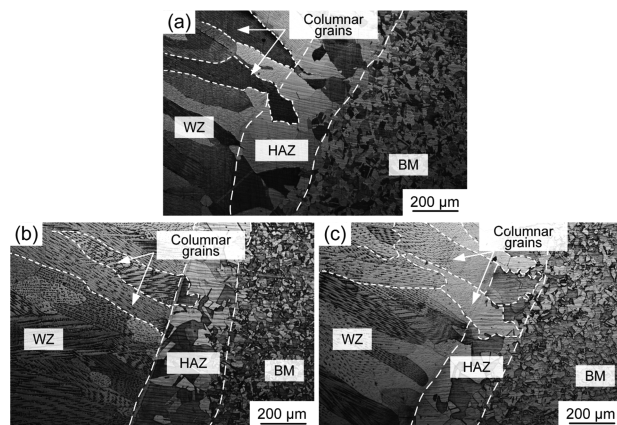


图5 不同焊丝接头显微组织:(a)原始焊丝,(b)0.40%Ti,(c)1.42%Nb

Fig. 5 Microstructure of different welding joints: (a) conventional welding wire, (b) welding wire with 0.40%Ti, (c) welding wire with 1.42%Nb

国产 Invar 合金 GTAW 焊接接头不同区域的显微组织类型与分布有所不同。因此将 15 mm 多层多道焊接接头分为打底层(第一层)、填充层(第二至四层)、盖面层(第五层)三个区域进行研究。为了更清晰地观察接头晶粒内部亚晶结构,使用 5%硝酸酒精溶液腐蚀金相,图6为不同焊丝接头打底层显微组织,在接头中心区域观察到等轴亚晶结构,等轴亚晶附近生长胞状树枝晶,树枝晶主干上存在短小的二次枝晶臂。对比不同接头打底层显微组织发现,与原始焊丝试样相比,#2(0.40%Ti)试样打底层等轴亚晶数目增多,而细小的等轴亚晶有利于提高接头性能;#3(1.42%Nb)试样焊丝与前两个试样相比等轴亚晶数目更多、尺寸更为细小,等轴亚晶边缘平滑,在受力变形时对基体的割裂程度较小,可以更好地提高接头力学性能。

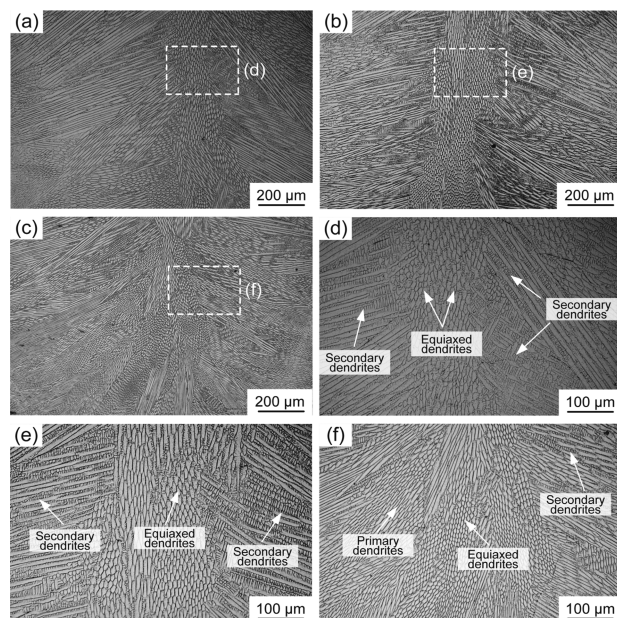


图6 不同焊丝接头打底层显微组织:(a,d)原始焊丝;(b,e)0.40%Ti;(c,f)1.42%Nb

Fig. 6 Microstructure of backing layer in different welding joints: (a,d) conventional welding wire, (b,e) 0.40%Ti, (c,f) 1.42%Nb

图7为三种不同焊丝接头填充层显微组织,焊缝中心为细小的等轴亚晶。使用边长 100 μm 的正方形框选三组试样

中填充层等轴亚晶尺寸最细小区域进行数目统计^[20]。#1(原始焊丝)、#2(0.40%Ti)、#3(1.42%Nb)试样填充层所选区域等轴亚晶数目分别为67、94、128,平均等轴亚晶尺寸分别约为6.9 μm 、5.8 μm 、5.0 μm ,与#1相比,#2试样填充层等轴亚晶细化15.9%,#3试样填充层等轴亚晶细化27.5%,说明加入Ti、Nb合金元素对接头等轴亚晶具有细化作用;细小的等轴亚晶不但降低焊接接头的脆性,还将塑性变形分散在更多晶粒内进行,提高接头的塑韧性。

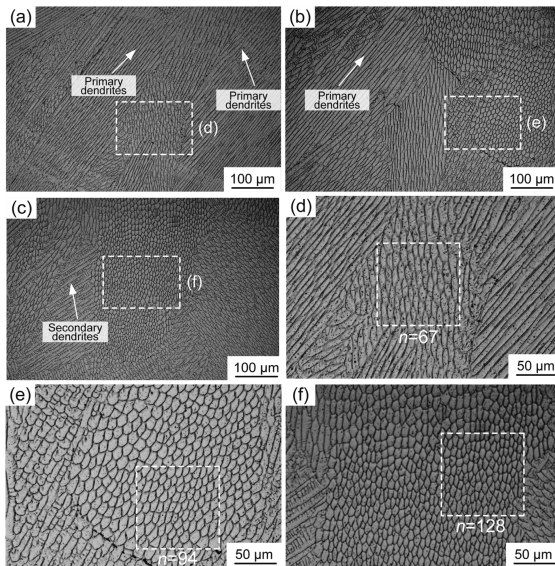


图7 不同焊丝接头填充层显微组织:(a,d)原始焊丝;(b,e)0.40%Ti;(c,f)1.42%Nb

Fig. 7 Microstructure of filling layer in different welding joints: (a,d) conventional welding wire, (b,e) 0.40%Ti, (c,f) 1.42%Nb

图8为不同焊丝接头盖面层显微组织,该区域主要由等轴晶与柱状晶组成。#1(原始焊丝)、#2(0.40%Ti)、#3(1.42%Nb)试样盖面层所选区域等轴亚晶数目分别为81、115、172,平均等轴亚晶尺寸分别为6.3 μm 、5.3 μm 、4.3 μm 。与#1试样相比,#2试样盖面层等轴亚晶细化15.8%,

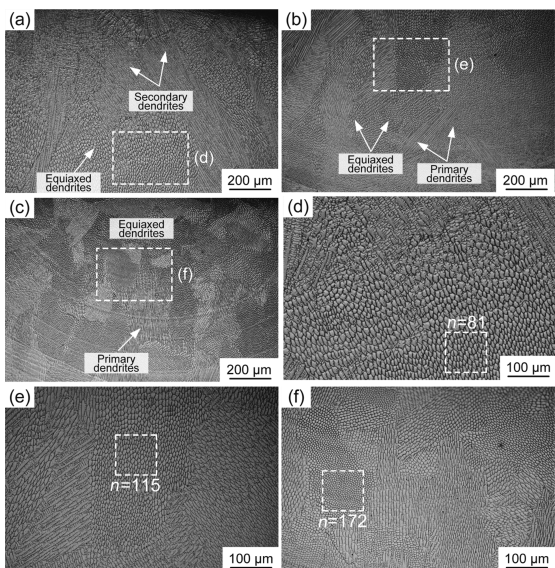


图8 不同焊丝接头盖面层显微组织:(a,d)原始焊丝;(b,e)0.40%Ti;(c,f)1.42%Nb

Fig. 8 Microstructure of cover layer in different welding joints: (a,d) conventional welding wire, (b,e) 0.40%Ti, (c,f) 1.42%Nb

#3试样盖面层等轴亚晶细化31.7%。可见加入0.40%Ti、1.42%Nb元素后等轴亚晶得到不同程度的细化,含铌焊丝的细化效果更显著。

图9为3种不同焊丝接头焊缝区域扫描电镜形貌以及EDS测试位置,对P1—P6点进行EDS元素测试,结果如表3所示。#1(原始焊丝)焊缝区域观察到亚晶界以及微孔,未观察到明显析出相。这些微孔在受到外力作用时容易转变成成为裂纹源,不同微孔萌生的裂纹不断汇合扩展,最终导致试样断裂。分别对亚晶界P1点与亚晶界内P2点进行成分测试,发现合金元素无明显差异,仅有Si、Mn元素在亚晶界上的含量略高于内部,其他元素含量变化不明显。

表3 EDS测试结果(质量分数,%)

Table 3 Results of EDS tests (wt. %)

位置	Ni	Mn	Si	C	Ti	Nb	可能相
P1	37.06	0.94	0.48	0.32	—	—	γ 相
P2	35.85	0.85	0.43	0.41	—	—	γ 相
P3	19.02	0.16	0.24	5.26	42.59	—	TiC、 γ' 相
P4	35.94	0.78	0.25	3.53	16.32	—	TiC、 γ' 相
P5	23.26	0.23	0.36	3.41	—	38.72	NbC、 γ'' 相
P6	30.14	0.33	0.19	1.90	—	14.51	NbC、 γ'' 相

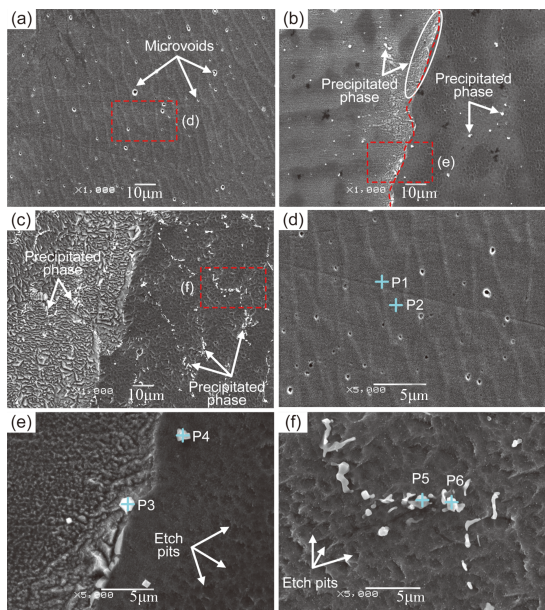


图9 不同焊丝接头焊缝区域SEM形貌:(a,d)原始焊丝;(b,e)0.40%Ti;(c,f)1.42%Nb

Fig. 9 SEM morphology of WZ microstructure in different welding joints: (a,d) conventional welding wire, (b,e) 0.40%Ti, (c,f) 1.42%Nb

#2(0.40%Ti)试样晶界处析出较多规则块状颗粒,结合焊丝成分与P3、P4点能谱分析,该处颗粒包含TiC、 γ' ($\text{Ni}_3\text{-(Al,Ti)}$)等。Ti为强碳化物形成元素,易与C结合生成TiC在晶界析出,但Invar合金中C含量仅为0.02%,不足以消耗所有Ti元素,剩余Ti元素与合金中Ni、Al元素结合生成 γ' 相^[21-22],由于Al元素较少并未检测出。孙中华和Xing等的研究指出,Ti在Invar合金晶界处以TiC等形式存在,一定程度上阻碍晶粒长大^[23-25],进一步验证了析出相成分。沿 γ 相(100)面析出的 γ' 相与基体的错配度仅为0.03%,因而具有较高的组织稳定性,能够起到细化晶粒、钉扎晶界的作用^[26-28]。

#3 (1.42%Nb) 试样中亚晶界处析出较多白色链状或柱状连续相,根据 P5、P6 点能谱结果推断析出相包含 NbC、 γ' (Ni₃Nb) 等。Jiao 和 Yang 等研究发现,Fe-Ni 合金中加入微量 Nb 元素后在晶界上析出 NbC、 γ' 等复合夹杂物^[14,29-30]。Nb 为强碳化物形成元素,能够与游离的 C 原子结合生成富 Nb 颗粒 NbC^[31],起到净化晶界的作用;同时加入 Nb 能与 Ni 反应生成 γ' 相。王鑫^[32]的研究结果指出, γ' 相与基体 γ 相错配度较小为 4.96%,在焊缝凝固时可以作为异质形核的核心从而细化晶粒。

另外#2、#3 试样在高倍下观察到腐蚀坑,不同晶粒内腐蚀坑形状不同,这与腐蚀的晶面有关^[33]。如(110)晶面为矩形,(111)晶面为三角形。在腐蚀条件相同的情况下,腐蚀坑密度与位错密度几乎相对应^[34-35]。加入 Ti、Nb 元素后观察到较多腐蚀坑说明加入合金元素后位错密度增加,当外力作用时更多的位错参与到变形中,位错在晶界处塞积效果增强,进而提高接头强度。

2.3 焊接接头力学性能

图 10 为国产 Invar 合金不同焊丝接头试样的拉伸性能,#2 (0.40%Ti)、#3 (1.42%Nb) 标准拉伸试样均在母材处断裂,说明焊接接头强度高于母材。为探明接头具体强度,对标准拉伸试样焊缝区域开半圆形缺口,减小焊缝区域横截面积重新进行测试。测得三种焊丝接头试样的抗拉强度分别为 397.5 MPa、638.2 MPa 和 653.5 MPa,延伸率分别为 11.0%、26.2% 和 27.3%,焊丝中加入 0.40%Ti、1.42%Nb 后接头抗拉强度远高于母材,较#1 (原始焊丝) 试样分别提高 60.6%、64.4%,抗拉强度显著提升,同时延伸率也由 11.0% 提升至 27.3%。根据霍尔-佩奇公式(式(1)),加入 Ti、Nb 元素后焊缝等轴亚晶得到细化,晶粒越细小晶界所占比例越高,对位错运动的阻碍作用增强,试样接头强度提高;同时晶粒数目增多,晶内变形协调越容易,因此材料的塑性也会有所强化。对比拉伸结果发现,#3 试样焊接接头的拉伸性能最优。

$$\sigma_s = \sigma_i + Kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中: σ_s 为材料的屈服强度, σ_i 、 K 为与材料有关的常数, d 为晶粒尺寸。

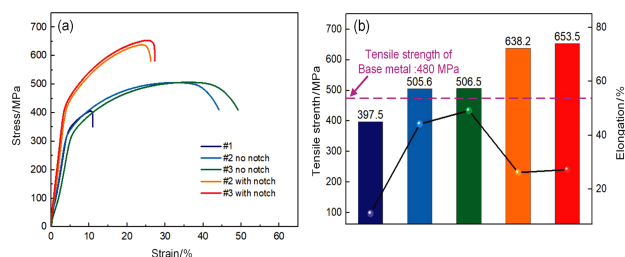


图 10 不同焊丝接头试样的拉伸性能(电子版为彩图)

Fig. 10 Tensile properties of welded joints with different wires

图 11 为三种不同焊丝接头拉伸试样的断口形貌,从图中可以看到#1 拉伸试样断口表面比较平整,未观察到颈缩现象,说明该试样塑性较差,与拉伸试验结果相吻合。观察断裂内部,该区域断口呈现冰糖状形貌,为典型的沿晶断裂特征,表明#1 试样拉伸断裂模式为脆性断裂。#2 拉伸试样添加 Ti 元素后断口在低倍显微镜下出现颈缩说明接头塑性得

到改善,对内部区域进行放大观察,发现断口处存在大量较浅韧窝,其内部有较小第二相颗粒。#3 拉伸试样加入 Nb 元素后断口内部出现较大韧窝,韧窝深度增加,说明试样的塑性变形能力较强,接头断裂模式属于韧性断裂。

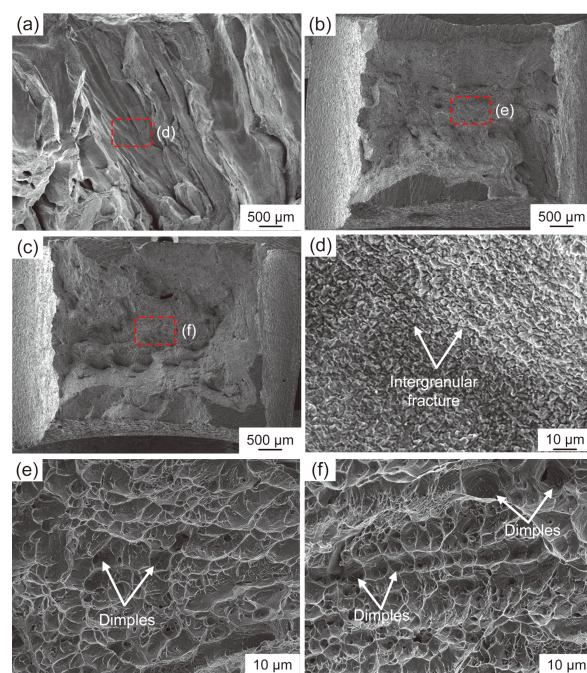


图 11 不同焊丝接头的断口显微形貌:(a、d) 原始焊丝;(b、e) 0.40%Ti;(c、f) 1.42%Nb

Fig. 11 Microstructures of joint fracture with different welding wires:(a, d) conventional welding wire, (b, e) 0.40%Ti, (c, f) 1.42%Nb

加入 Ti、Nb 元素后析出的 TiC、 γ' 、NbC、 γ' 等相不仅作为异质形核的核心或钉扎晶界的质点细化晶粒,还可以作为沉淀相阻碍位错运动从而提高焊缝强度。进一步对比不同析出相特征发现,加入 Ti 元素后析出相呈规则块状零散分布于晶界处,韧窝浅、尺寸较小,加入 Nb 元素后析出相连续聚集于亚晶界处,韧窝深、尺寸大,在提高焊缝强度的同时对焊缝的塑性亦有较好的改善。

3 结论

(1) 在相同 GTAW 工艺下,选用 3 种焊丝获得了成形良好的 15 mm 国产 Invar 合金焊接接头。焊缝显微组织为垂直熔合线生长的粗大柱状晶与中部的等轴晶,热影响区晶粒发生粗化。使用加入 0.40%Ti、1.42%Nb 合金元素的焊丝后接头晶粒得到细化,等轴亚晶细小圆润。

(2) 采用加入 0.40%Ti、1.42%Nb 焊丝获得的接头内析出相种类、形态与分布位置存在较大差别。使用含 0.40%Ti 元素焊丝后在晶界析出规则块状颗粒 (TiC、 γ' 相),使用含 1.42%Nb 元素焊丝后亚晶界析出白色链状或柱状连续相 (NbC、 γ' 相),析出相通过细化晶粒与阻碍位错运动强化接头性能。

(3) 三种焊丝接头的抗拉强度分别为 397.5 MPa、638.2 MPa 和 653.5 MPa,延伸率分别为 11.0%、26.2% 和 27.3%。选用含 0.40%Ti、1.42%Nb 元素的焊接接头强度较母材分别提高 32.9%、36.1%,断口出现大量韧窝,接头塑性得到提高,其中含铌焊丝获得的接头性能最优。

参考文献

- Du S Y. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1), 1 (in Chinese).
杜善义. *复合材料学报*, 2007, 24(1), 1.
- Sun Z Q, Wu A R. *Materials Reports*, 2015, 29(11), 61 (in Chinese).
孙振起, 吴安如. *材料导报*, 2015, 29(11), 61.
- Fang Y W, Wang X F, Sun C, et al. *Composites Science and Engineering*, 2014, 2, 69 (in Chinese).
方宜武, 王显峰, 孙成, 等. *玻璃钢/复合材料*, 2014, 2, 69.
- Wang Y H, Chen J, Zhan X H, et al. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014(11), 93.
王玉华, 陈洁, 占小红, 等. *航空制造技术*, 2014, (11), 93.
- Yao H L, Zhu M L, Tan S Y. *Science & Technology Review*, 2023, 41(6), 21 (in Chinese).
姚海琳, 朱美玲, 谭舒耀. *科技导报*, 2023, 41(6), 21.
- Chen J, Zhan X H, Chen J C, et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(5), 1010 (in Chinese).
陈洁, 占小红, 陈纪城, 等. *中国有色金属学报*, 2016, 26(5), 1010.
- Zhao Y, Wu A P, Yutaka S, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(12), 89 (in Chinese).
赵玥, 吴爱萍, Yutaka S, 等. *焊接学报*, 2011, 32(12), 89.
- Zhan X H, Zhang D, Wei Y H, et al. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97, 124.
- Wang X J, Chai T X, Zhao Q S, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(4), 19 (in Chinese).
王希靖, 柴廷玺, 赵青山, 等. *焊接学报*, 2014, 35(4), 19.
- Zhao M J, Guo Z F, Chen S H, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2014, 30(11), 1155.
- Zhan X H, Liu X B, Wei Y H, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 244, 97.
- Zhang C, Yu S F, Shu R T, et al. *Modern Manufacturing Engineering*, 2022(5), 79 (in Chinese).
张超, 余圣甫, 束润涛, 等. *现代制造工程*, 2022(5), 79.
- Zhao J Y, Wang J Y, Kang X F, et al. *Optics and Laser Technology*, 2023, 158, 108831.
- Jiao G H, Fang X W, Chen X M, et al. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317, 117994.
- Chen X L, Li W S, Lou M, et al. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(9), 32 (in Chinese).
陈小龙, 李文生, 娄明, 等. *材料工程*, 2022, 50(9), 32.
- Ren H, Liu F C, Lin X, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(10), 3289 (in Chinese).
任航, 刘奋成, 林鑫, 等. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(10), 3289.
- Wang S Y, Liu S W, Hou X Y, et al. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(3), 31 (in Chinese).
- 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. *焊接学报*, 2023, 44(3), 31.
- Meng S H, Li L Q, Si C J, et al. *Crystals*, 2022, 12, 977.
- Gao Y, Yu Z H, Yan Y W, et al. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(2), 91 (in Chinese).
高炜, 余竹煊, 阎亚雯, 等. *材料工程*, 2023, 51(2), 91.
- Chen D, Liu T, Zhao Y Q, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10), 202 (in Chinese).
陈丹, 刘婷, 赵艳秋, 等. *中国激光*, 2021, 48(10), 202.
- Wang C S, Wang T T, Tan M L, et al. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(2), 135.
- Gilles R, Mukherji D, Eckerlebe H, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 612, 90.
- Sun Z H, Sun D Z, Liu J, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2017, 38(4), 87 (in Chinese).
孙中华, 孙道柱, 刘洁, 等. *材料热处理学报*, 2017, 38(4), 87.
- Yang X H, Chen W Q, Hao Z Q. *Journal of Materials Engineering*, 2010(9), 7 (in Chinese).
杨晓华, 陈伟庆, 郝占全. *材料工程*, 2010(9), 7.
- Xing Z Q, Pang J Y, Zhang H W, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 943, 169149.
- Yuan J P. Effect of deformation and heat treatment on the microstructure and properties of Invar alloy. Master's Thesis, Central South University, China, 2005 (in Chinese).
袁均平. 变形及热处理对因瓦合金组织与性能的影响. 硕士学位论文, 中南大学, 2005.
- Du K, Zhang Y, Zhang Z W, et al. *Materials Science and Engineering, A*, 2022, 855, 143848.
- Hu H L, Zhao M J, Rong L J. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 47(12), 152.
- Yang T, Zhao Y L, Fan L, et al. *Acta Materialia*, 2020, 189, 47.
- Yang X H, Chen W Q, Yuan S Q. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 41(1), 136 (in Chinese).
杨晓华, 陈伟庆, 袁守谦. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 41(1), 136.
- Cai K H, Ding S S, Zhang X Y. *Journal of Functional Materials*, 2004, 35, 1764 (in Chinese).
蔡凯洪, 丁绍松, 张晓义. *功能材料*, 2004, 35(增刊1), 1764.
- Wang X, Zhang J F, Zhang Y H, et al. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2009, 33(5), 670 (in Chinese).
王鑫, 张建福, 张羊换, 等. *稀有金属*, 2009, 33(5), 670.
- Ma B J. Research on composition design of welding wire, microstructure and properties of welds for low expansion Invar alloy, Master's Thesis, Hebei University of Technology, China, 2018 (in Chinese).
马宝军. 低膨胀因瓦合金焊丝成分体系设计及熔敷金属组织性能研究. 硕士学位论文, 河北工业大学, 2018.
- Visconti P, Jones K M, Reshchikov M A, et al. *Applied Physics Letters*, 2000, 77(22), 3532.
- Muto D, Araki T, Naoi H, et al. *Physica Status Solidi*, 2005, 202(5), 773.

(责任编辑 翁其能)



程立宏, 2022年6月毕业于南京航空航天大学, 并获得工学学士学位。现为南京航空航天大学材料科学与技术学院硕士研究生, 在占小红教授的指导下进行研究。目前主要研究领域为轻合金激光焊接与数值模拟。



占小红, 通信作者, 南京航空航天大学材料科学与技术学院教授、博士研究生导师。2008年哈尔滨工业大学焊接专业博士毕业, 2008年7月加入南京航空航天大学工作至今。目前主要从事轻合金激光焊接相关方向的工艺、建模仿真、装备等领域的研究工作。发表SCI论文140余篇, 申请专利90余项。其中, 在 *Materials & Design*, *Journal of Materials Processing Technology*, *Journal of Crystal Growth*, *Science and Technology of Welding and Joining*, *Materials Science and Engineering A* 等期刊发表论文多篇。