引用格式：孙建，谷文举，张丽炜，等．等离子弧焊接热处理对1J85坡莫合金焊接接头微观组织及磁性能的影响[J]．材料工程，2026，54(1)：178-186.
SUN Jian，GU Wenju，ZHANG Liwei，et al. Influence of plasma arc welding heat treatment on microstructure and magnetic properties of 1J85 permalloy welded joints[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(1)：178-186.

等离子弧焊接热处理对1J85坡莫合金焊接接头微观组织及磁性能的影响

孙　建[1]，谷文举[2]，张丽炜[2]，姚秀聪[2]，耿燕飞[1]，陈希章[1*]
（1 温州大学 机电工程学院，浙江 温州 325035；2 浙江正泰电器股份有限公司 低压电器研究院，浙江 乐清 325600）

摘要：针对1J85坡莫合金焊接过程中磁性能恶化的问题，采用等离子弧直焊(plasma arc welding，PAW)和等离子弧焊接热处理(plasma arc heat treatment welding，PAHTW)两种工艺对1.5 mm厚环形1J85坡莫合金开展对比实验，系统探究两种工艺对焊接接头微观组织和磁性能的影响。采用光学显微镜、扫描电镜、能谱分析及软磁性能测试等手段对比分析接头的微观组织、元素分布、磁导率及矫顽力。结果表明：PAW工艺下，焊缝接头的形貌呈上宽下窄的漏斗状结构；PAHTW工艺下，焊缝区形成多层次区域分界，晶粒显著长大，胞状亚晶数量减少，晶界密度降低。能谱分析显示，焊缝区非磁性元素Si的含量较PAW工艺减少约50%。与PAW工艺相比，PAHTW处理后接头的初始磁导率从40.12 mH/m提升至78.81 mH/m，最大磁导率从72.63 mH/m提升至113.41 mH/m，矫顽力从1.70 A/m降低至1.24 A/m。

关键词：磁屏蔽；1J85坡莫合金；焊接接头；等离子弧焊接热处理；微观组织；磁性能
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000442　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000442
中图分类号：TG444　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)01-0178-09

Influence of plasma arc welding heat treatment on microstructure and magnetic properties of 1J85 permalloy welded joints

SUN Jian[1]，GU Wenju[2]，ZHANG Liwei[2]，YAO Xiucong[2]，GENG Yanfei[1]，CHEN Xizhang[1*]
（1 School of Mechanical and Electrical Engineering，Wenzhou University，Wenzhou 325035，Zhejiang，China；2 Institute of Low Voltage Electrical Appliances，Zhejiang Chint Electrics Co.，Ltd.，Yueqing 325600，Zhejiang，China）

Abstract：This study addresses the issue of magnetic property degradation during the welding of 1J85 permalloy. Comparative experiments are conducted on 1.5 mm thick annular 1J85 permalloy using two processes：plasma arc welding (PAW) and plasma arc heat treatment welding (PAHTW)，to systematically investigate the effects of these processes on the microstructure and magnetic properties of welded joints. The microstructure，elemental distribution，magnetic permeability and coercivity of the joints are analyzed using optical microscopy，scanning electron microscopy，energy-dispersive spectroscopy，and soft magnetic property testing. The results show that under the PAW process，the morphology of the weld joint exhibits a funnel-shaped structure with a wider top and narrower bottom；under the PAHTW process，multi-layered regional boundaries are formed in the weld zone，with significant grain growth，reduced number of cellular subcrystals，and decreased grain boundary density. Energy-dispersive spectroscopy analysis indicates that the content of the non-magnetic element Si in the weld zone relatively reduces by approximately 50% compared with that in the PAW process. Compared with the PAW process，after PAHTW treatment，the initial magnetic permeability of the joint increases from 40.12 mH/m to 78.81 mH/m，the maximum magnetic permeability increases from 72.63 mH/m to 113.41 mH/m，and the coercivity decreases from 1.70 A/m to 1.24 A/m.

Key words: magnetic shielding; 1J85 permalloy; welded joint; plasma arc heat treatment welding; microstructure; magnetic property

磁感应强度的饱和值B_s、磁导率μ和矫顽力H_c是评估磁性材料性能的核心参数。具有较低矫顽力和较高磁导率的材料可以在外部磁场的影响下迅速进行磁化和退磁，因此定义为软磁材料[1]。1J85坡莫合金的Ni含量约为80%（质量分数，下同），具有单相面心立方（FCC）结构和低磁致伸缩系数，是一类高磁导合金[2]。坡莫合金主要用于电子设备和通信设备中的电磁屏蔽应用，以减少电磁干扰和确保设备的电磁兼容性。同时，优异的磁性能使其成为制作变压器核心、磁性放大器和抑制电流的扼流圈等磁性导向组件的首选材料[3]。Kim等[4]指出坡莫合金在汽车仪表等领域具有广泛的使用价值。结构复杂的坡莫合金器件因体积和形状限制，传统成形技术难以实现，因此焊接技术在其制造中具有重要的应用潜力。焊接过程涉及母材熔化与凝固，这一过程对坡莫合金的软磁性有一定的负面影响。热处理是改善坡莫合金磁性能的有效方式之一。李晨隽[5]研究了高初始磁导率1J85合金的热处理工艺，指出1J85合金的最佳热处理工艺：将温度升至1150 ℃并保持4 h，然后以超过500 ℃/h的速率快速冷却至300 ℃。目前有关坡莫合金焊接的研究相对较少，但对镍基合金焊接性能的研究有助于对坡莫合金焊接性的研究。例如，张忠科等[6]研究了等离子弧对Inconel 625合金的焊接，结果表明，接头的微观组织主要由奥氏体等轴晶及垂直于熔合线生长的胞状晶组成。此外，Zhang等[7]使用Nimonic 80A合金板材进行电子束焊接，发现焊接接头的拉伸性能和硬度低于基材，这主要归因于焊接过程中的微观结构变化。张伊诺等[8]使用等离子弧增材制造技术制备出晶粒较大的坡莫合金，并指出焊接电流较低时，表面存在大量气孔，成型质量不佳。Mikler等[9]采用激光近净成形（laser engineered net shaping，LENS）技术对软磁合金进行沉积实验，分析了合金的微观组织特征、相形成机制及磁性能。研究结果表明LENS技术可用于软磁合金的增材制造，但合金存在微孔隙。Zhang等[10]通过选择性激光熔化制备坡莫合金，结果表明：$FeNi_3$相有助于提高饱和磁化强度。Schoenrath等[11]研究了Ni-21.5Fe坡莫合金的选区激光熔化，结果表明，试样内部残余应力水平高，存在裂纹和孔洞缺陷，因此饱和磁化强度较差。坡莫合金在熔化和凝固过程中，由于内部存在孔洞、杂质等缺陷，其软磁性能会严重恶化。因此，需要一种高效的焊接方法来提升坡莫合金焊缝的软磁性能。智能化等离子弧再造系统能够精确控制热输入，并在保护气体环境中进行焊接，可有效避免杂质污染，显著减少焊接缺陷，从而大幅提升焊缝的软磁性能。此外，恰当的热处理也有助于改善坡莫合金的磁性能。因此，将热处理过程融入焊接过程，从逻辑上是可行且有效的方法。

本工作利用智能化等离子再制造系统，采用等离子弧直焊（PAW）和等离子弧焊接热处理（PAHTW）两种焊接工艺对1J85环形坡莫合金开展焊接实验。通过光学显微镜、扫描电镜等手段进行显微组织观察，并结合能谱分析技术研究焊缝区域的组织演变规律，同时通过软磁性能测试分析工艺参数对晶粒生长及磁导率、矫顽力等磁性能指标的影响机制，为1J85坡莫合金焊接工艺的优化提供理论依据和重要的参考。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

本工作使用的焊接母材为未经热处理的环形1J85坡莫合金，其尺寸为外径40 mm、内径32 mm、厚度1.5 mm。母材的化学成分如表1所示 。

表1　1J85坡莫合金化学成分（质量分数/%）

Table 1　Chemical compositions of 1J85 permalloy (mass fraction/%)

Ni	Mo	Mn	Si	S+P	Fe
79.0-81.0	4.8-5.2	0.3-0.6	0.15-0.3	≤0.02	Bal.

1.2　实验方法

采用PAW和PAHTW两种工艺对1.5 mm厚1J85坡莫合金环形样件进行焊接实验。焊接设备包括但不限于KUKA20R1810-2机器人、飞马特电源Transmig550i。图1为焊接过程示意图。焊枪内部构造示意图如图1(a)所示，氩气为等离子气体和保护气体。在氩气流速为15 L/min的条件下进行焊接，可以有效防止焊接过程中的氧化和飞溅。焊枪的最低移动速度为60 mm/min，直焊焊接电流为35 A，焊接热处理工艺参数如表2所示，焊接路径如图1(b)所示。

焊接后，分别对两种不同工艺参数下的焊接接头进行组织与性能的分析。试样的取样方式如图1(c)所示，金相试样经过研磨、抛光后采用20 g $CuSO_4$+

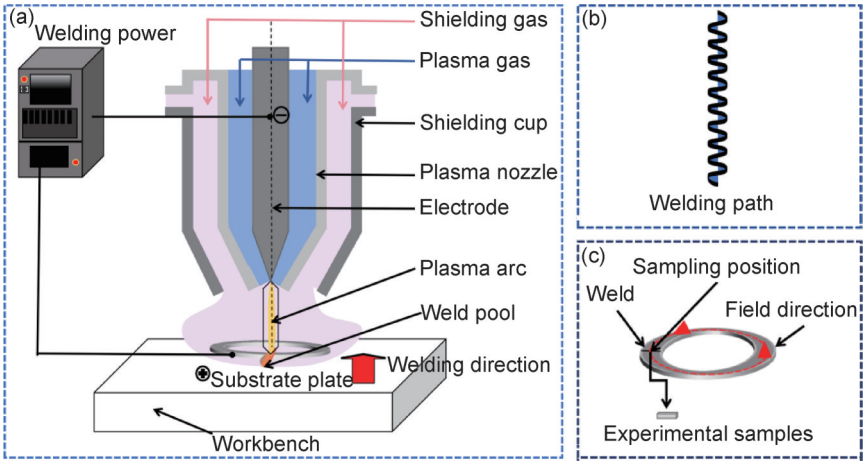


图1 焊接过程示意图

(a)焊接枪头内部构造示意图;(b)焊接路径;(c)取样位置

Fig.1 Schematic diagrams of welding process

(a)schematic diagram of internal structure of welding torch;(b)welding path;(c)sampling location

表2 等离子弧焊接热处理工艺参数

Table 2 Parameters of plasma arc heat treatment welding process

Process	Argon flow rate/(L·min^{-1})	Welding current/A	Welding voltage/V	Welding speed/(mm·min^{-1})	Number of program executions
Preheating	15	25	10	60	3
Welding	15	40	10	80	1
Post-heating	15	20	10	80	3

4 mL HCL+20 mL H_2O试剂进行腐蚀,腐蚀时间约为25 s。采用光学显微镜(OM,BX53M)观察接头微观组织;通过扫描电镜(SEM,SU8010)配套的能谱仪测定样品元素分布;采用Ultima Ⅳ X射线衍射仪进行XRD测试,X射线辐射源为CuKα,衍射角为20°~100°,测试电压为40 kV,测试电流为150 mA,扫描速度为5 (°)/min,测得数据用Jade软件进行物相分析。为评估焊接接头的软磁性能,使用软磁直流测试系统(TD8220)将线圈缠绕在环形焊接试样上,然后施加电流形成磁场,采用直流测量装置在磁场中测试环形焊接试件的软磁性能。

2 结果与分析

2.1 接头组织分析

2.1.1 宏观形貌

图2为焊接接头整体形貌。在PAW工艺条件下得到的焊接接头金相结构如图2(a)所示,可以看出,接头明显划分为3个不同区域:母材(base metal,BM)、焊缝区(weld zone,WZ)和热影响区(heat affected zone,HAZ)。焊缝区的形态为自上而下逐渐变窄的漏斗状结构,此区域的晶粒细小且呈胞状。在热影响区,由于受到高温的影响,晶粒尺寸随温度的升高而增大,最终形成粗大的晶粒结构[12]。此外,该区域中越靠近焊缝的部分,晶粒尺寸越大,而靠近BM的部分,其晶粒结构则与BM趋于一致。

在PAHTW焊接工艺下得到的接头金相结构如图2(b)所示,可知从焊缝到热影响区再到BM展示出明显的多层次区域分界。此焊接工艺特征在于使用等离子弧对接头进行多次焊接,造成焊缝顶部持续受热并发生二次重熔,因此在焊缝顶部形成较窄的二次焊缝,该焊缝结构整体仍为典型的漏斗状。与PAW工艺相比,PAHTW工艺下的热影响区更广泛,主要由粗大的奥氏体晶粒构成,且晶界变得模糊,这种结构的形成与焊接过程中的高温持续影响密切相关。

2.1.2 微观组织

图3为在PAW工艺下焊缝中心区域及熔合线附近显微组织。从图3(a),(c)可以观察到,焊缝区内分布着众多胞状亚晶。从图3(d)可以观察到焊缝中心区胞状亚晶的尺寸比熔合线附近胞状亚晶的尺寸稍大。使用Image Pro Plus软件测得焊缝中心区胞状亚晶的平均尺寸为(28±3) μm,熔合线附近的则为(17±3) μm。图4进一步展示这两个区域亚晶尺寸分布情况。焊缝中心区域胞状亚晶尺寸较大的原因是,焊缝中心经历更高的温度,使其有更多的时间生长。

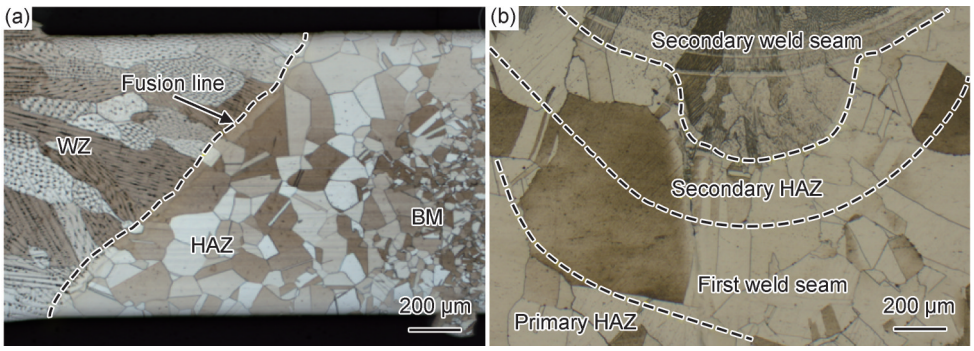


图2　焊接接头形貌　(a)PAW;(b)PAHTW

Fig.2　Morphologies of welded joint　(a)PAW;(b)PAHTW

胞状亚晶的形成主要由于发生成分过冷,成分过冷的发生条件为液相的实际温度 T 低于或等于液相线温度 T_L,该条件可通过式(1)近似表示为[13]:

$$\frac{G}{R}\leqslant\frac{mC_0}{D}\frac{1-k_0}{k_0} \tag{1}$$

式中:G 为液相中温度梯度;R 为结晶速率;m 为液相线斜率;C_0 为合金中溶质浓度;k_0 为分配系数;D 为溶质在液相中的扩散系数。

在一定的溶质浓度下,温度梯度与界面生长速率的比值 G/R 是决定成分过冷程度的关键参数。当 G/R 较小,即温度梯度 G 降低或界面生长速率 R 提高时,成分过冷程度增大。随着 G/R 的减小,焊缝的凝固组织依次经历从胞状晶到胞状枝晶、再到柱状枝晶、最后到等轴枝晶的转变[14]。

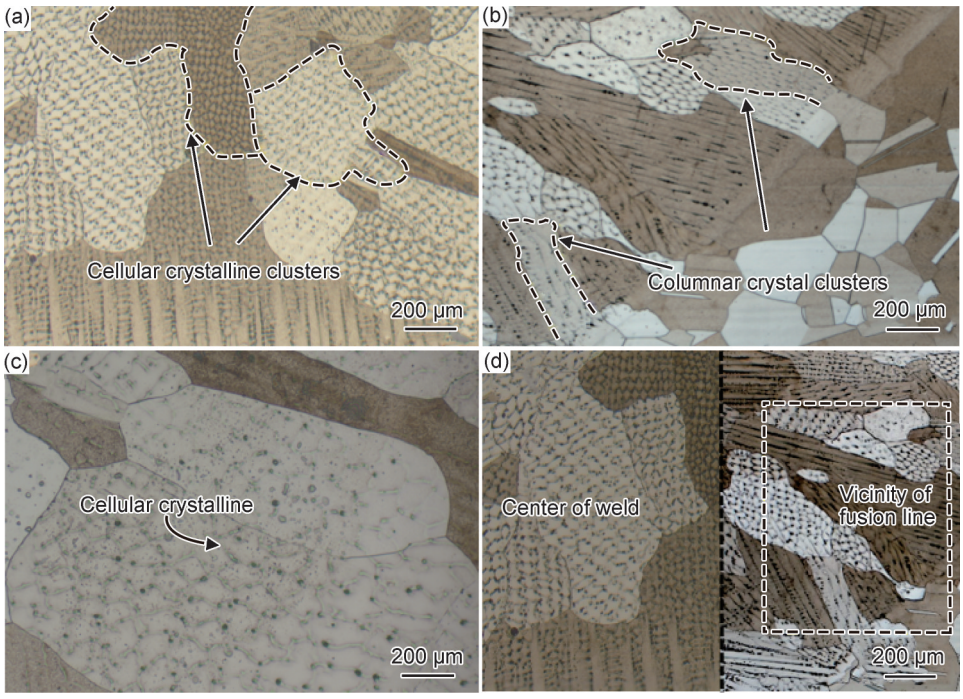


图3　PAW焊接接头微观组织

(a)焊缝区中部;(b)柱状晶簇;(c)胞状亚晶;(d)焊缝区与熔合线附近胞状亚晶对比

Fig.3　Microstructures of PAW welded joint

(a)middle of weld zone;(b)columnar crystal clusters;(c)cellular crystalline;

(d)comparison of cellular substructure between WZ and vicinity of fusion line

在典型焊接过程中,熔池的结晶通常起始于熔合线,此处因温度梯度 G 较高而界面生长速率 R 较低,难以形成显著的成分过冷状态。通常情况下,新相的形成多依赖于半熔合区域(partially melted zone,PMZ)中尚未完全熔解的BM晶粒,通过联生结晶的机制逐渐生长。在使用PAW对1J85坡莫合金进行焊接后,焊缝区内形成显著的温度梯度,导致该区域出现明显的成分过冷区。这种情形下,固液界面的稳定性受到

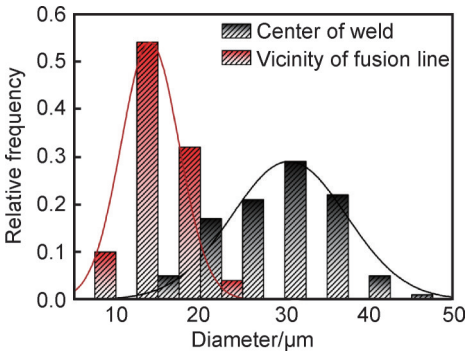


图4 PAW焊接接头焊缝中心与熔合线附近胞状亚晶尺寸分布

Fig.4 Distributions of cellular substructure size in weld center and vicinity of fusion line of PAW welded joint

影响，从而使熔池内的结晶过程表现出不连续性。图3(b)为熔合线附近的微观结构，可以观察到许多平行排列的柱状晶在液相区的过冷部分持续生长，其生长方向垂直于熔合线。这些柱状晶体间存在竞争生长的现象，其中与最高温度梯度不一致的晶粒最终停止生长，被具有更优生长方向的晶粒所取代[15]。随着这些晶核的长大，它们逐渐演变成一系列平行排列的晶粒。

图5为PAHTW焊接接头微观组织。PAHTW工艺与PAW工艺的主要差异在于增加了焊接前的预热和后热处理环节。在PAHTW处理中，预热阶段使用较低的电流和焊接速度，并进行多次焊接，从而使得焊缝附近的材料能够在正式焊接前吸收更多的热量，形成较宽的热影响区。如图5(a)所示，该区域宽度与PAW工艺下热影响区的范围相当，且主要由较粗的奥氏体构成。后热处理采用较低电流进行，导致焊缝大部分区域未达到再熔化的条件。然而，由于焊缝顶部受热较为集中，此处发生局部熔化并随即出现二次熔化现象。因此，在焊缝最上层形成二次焊缝，其内部结构以细小的胞状亚晶为主，熔合线处以柱状晶为主。此外，二次焊缝的双侧形成二次热影响区。虽然后热处理阶段的电流强度较低，产生的热量并不能使一次焊缝区域内的胞状亚晶结构全部长大。但从宏观视角观察，一次焊缝的形貌与使用PAW工艺的接头相似，其微观组织却经历了显著的转变，表现为焊缝内大部分胞状亚晶因热影响显著增大，从而导致晶界密度的降低。在一次焊缝与热影响区的交界处，柱状晶与胞状亚晶的直径相当。热影响区主要由粗大的奥氏体构成，柱状晶较少。如图5(c)所示，在相同的腐蚀条件下，一次焊缝残留的胞状亚晶相较于二次焊缝区更为模糊。相关研究表明[16]，焊接接头中的晶界不同于传统的位错墙，其形成的原因与熔化和凝固有关。焊接过程中，材料经历熔化和凝固过程会导致元素发生偏析，如元素Mo。PAHTW有利于促进1J85坡莫合金接头热影响区内元素分布的均匀化，即胞状晶界更加模糊[15]。

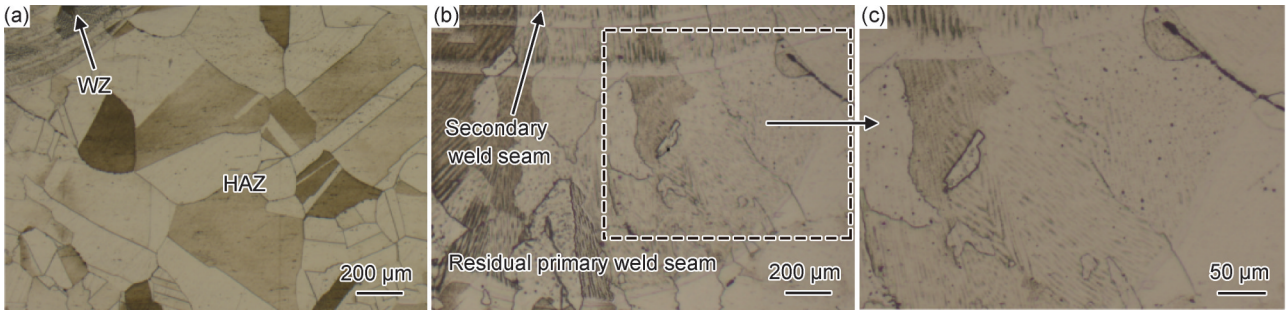


图5 PAHTW焊接接头微观组织

(a)热影响区；(b)柱状晶簇；(c)焊接区

Fig.5 Microstructures of PAHTW welded joint

(a)heat affected zone；(b)columnar crystal clusters；(c)weld zone

2.2 接头物相分析

图6为1J85坡莫合金BM、PAW以及PAHTW三种状态下焊接接头的XRD谱图。可知，在所有样品中观察到的物相均为γ(Fe，Ni)和$FeNi_3$，表明在PAW和PAHTW工艺下，熔池在凝固和随后的结晶过程中未有新相的形成。与母材相比，PAW和PAHTW工艺处理的焊缝区域X射线衍射峰半高宽(full width at half maximum，FWHM)略有增大，PAW工艺下焊缝接头的(111)、(200)、(220)衍射峰FWHM分别为0.247°、0.353°、0.281°，PAHTW工艺下焊缝接头对应衍射峰FWHM分别为0.169°、0.256°、0.274°，均大于母材的0.126°、0.246°、0.227°。FWHM的增加表明焊缝区存在微观结构缺陷或残余应力[17]，导致软磁性能的退化，具体表现为矫顽

力的增加和磁导率的下降。Kim 等[18]指出，对于1J85高Ni含量的合金，磁晶各向异性常数K_1为负值，即磁化的优选方向为[111]晶向，由于[111]晶向对应(111)晶面，因此有理由认为(111)衍射峰的衍射强度降低导致磁化难度增大。在PAHTW焊缝中的[111]衍射峰明显强于PAW，表明在磁性能方面有所改善。

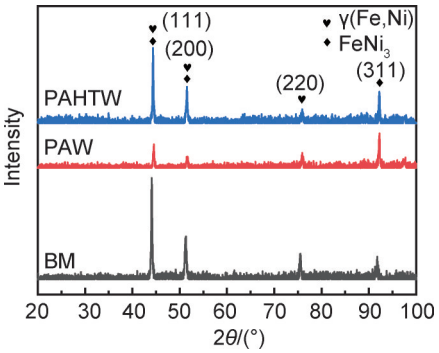


图6　焊接接头XRD谱图

Fig.6　XRD patterns of welded joint

2.3　接头元素分析

为进一步分析焊接接头的显微组织与元素分布，通过SEM观察PAW与PAHTW工艺下的焊接接头。图7为PAW接头SEM图。由图7(a)可知，BM的SEM图像表现出相对较低的对比度，这是由于BM中元素分布较为均匀。相比之下，采用PAW工艺的焊缝区内，晶界和晶粒内部对比度明显，特别是在胞状亚晶处观察到白色偏析区，如图7(b)～(d)所示。对图7中点1～10进行EDS分析，结果如表3所示。晶界处(如点3、5、7)的Mo含量高于晶粒内部(如点2、4、8)，表明Mo元素在晶界发生偏析。Si元素同样显示出向晶界偏析的倾向，但其分布均匀性优于Mo，且不同晶界位置含量波动较大(0.23%～0.37%)。Mo和Si在γ(Fe,Ni)固溶体中的溶解度较低，因此在凝固过程中会偏析到晶界[19]。Ji 等[20]研究了6.5%高硅钢复合板软磁材料在经历热变形后，通过扩散退火处理来降低缺陷并优化元素分布，适当的扩散退火处理显著改善了Si元素在复合板整个厚度方向上的均匀分布，获得了性能更好的高硅钢。Mo含量过高会抑制Fe-Ni合金的饱和磁感应强度，在合适的Mo含量(约5%)下，胞状晶界处Mo含量的增加及胞状亚晶内Mo含量的减少均会削弱接头的软磁性能[21]。Si作为非磁性元素，在再结晶过程中可显著延缓晶界迁移，从而大幅阻碍磁畴的移动与转动。随着Si含量的增加，磁致伸缩系数(λ)和K_1会相应降低，进一步恶化材料的软磁特性[22]。因此，元素偏析现象对1J85坡莫合金的软磁性能产生负面影响。

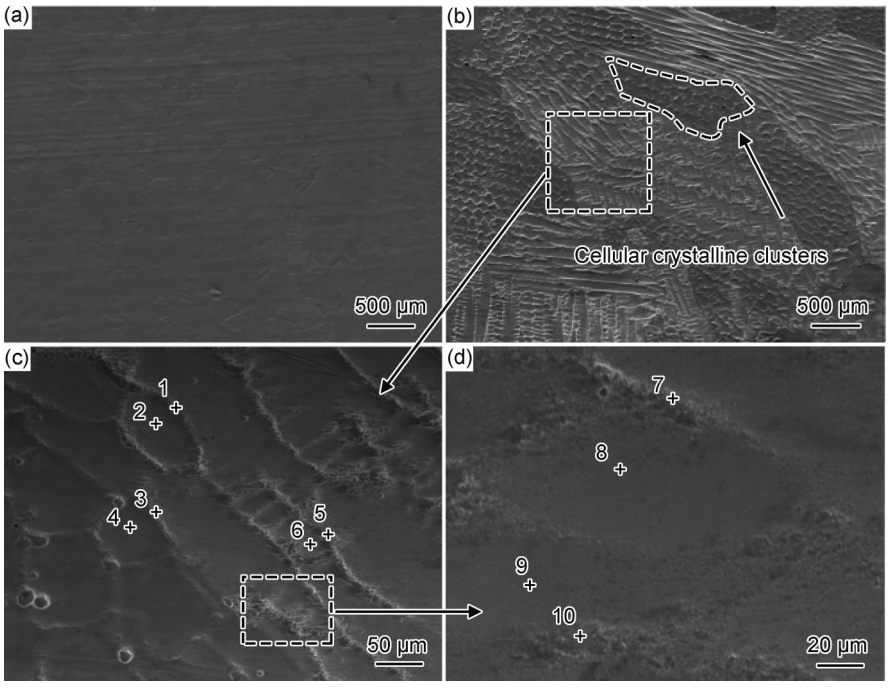


图7　PAW接头SEM图

(a)BM；(b)～(d)焊缝内胞状亚晶簇及柱状晶簇

Fig.7　SEM images of PAW joint

(a)BM;(b)-(d)cellular crystalline clusters and columnar crystals clusters within weld

表 3 图 7 中 PAW 焊缝各点 EDS 结果

Table 3 EDS results of each point on PAW weld in Fig.7

Spot	Mass fraction/%				
	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
1	78.77	5.11	0.49	0.23	15.40
2	80.09	4.87	—	0.25	14.79
3	78.65	5.38	0.50	0.34	15.13
4	79.66	4.71	0.25	0.30	15.08
5	78.28	5.64	0.62	0.37	15.09
6	79.61	4.52	0.38	0.24	15.25
7	77.99	6.26	0.60	0.25	14.90
8	80.37	4.47	0.29	—	14.87
9	80.50	4.63	—	—	14.87
10	79.65	4.55	0.39	0.30	15.10

图 8 为 PAHTW 工艺下 1J85 坡莫合金焊接接头 SEM 图。相较于 PAW 焊缝，PAHTW 焊缝中胞状亚晶间的对比度更低，表明元素分布更均匀。对图 8 中点 11～19 进行 EDS 分析，结果如表 4 所示。PAHTW 焊缝中 Mo 和 Si 的分布较 PAW 焊缝更为均匀，PAHTW 中非磁性元素 Si 的含量最高为 0.24%，而 PAW 中 Si 含量最高达 0.37%，尤其晶界处 Si 含量降低约 50%。这一结果与 SEM 图中 PAHTW 焊缝区对比度降低的现象形成互证。元素分布的均匀性是提升焊接接头软磁性能的关键因素。PAHTW 工艺显著优化 1J85 坡莫合金焊接接头的软磁性能。

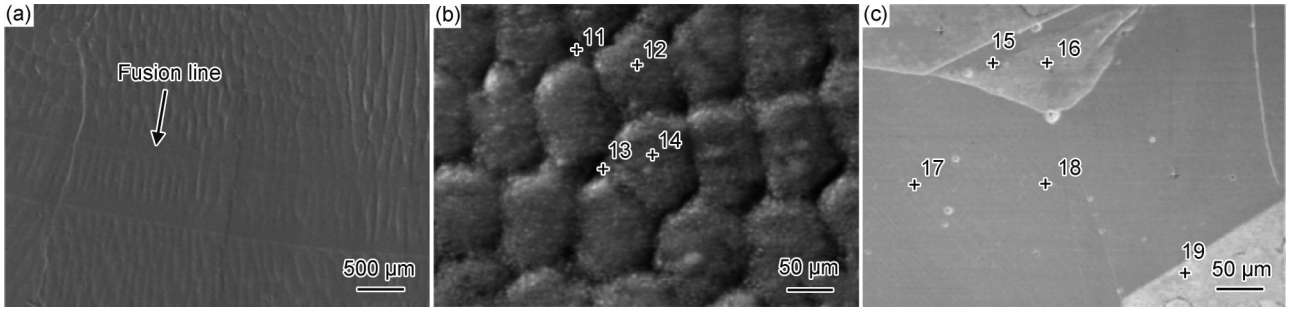


图 8 PAHTW 接头 SEM 图 (a),(b)焊缝区;(c)热影响区

Fig.8 SEM images of PAHTW joint (a),(b)weld zone;(c)heat affected zone

表 4 图 8 中 PAHTW 焊缝各点 EDS 结果

Table 4 EDS results of each point on PAHTW weld in Fig.8

Spot	Mass fraction/%				
	Ni	Mo	Mn	Si	Fe
11	79.43	4.82	0.47	0.16	15.12
12	79.38	4.99	0.47	0.14	15.02
13	79.98	5.01	0.53	0.12	15.36
14	80.10	4.87	0.45	0.17	14.41
15	79.82	5.00	0.31	—	14.87
16	79.63	4.89	0.45	—	15.03
17	79.95	4.61	0.48	0.24	14.72
18	79.54	4.71	0.51	—	15.24
19	79.30	5.00	0.45	0.07	15.18

2.4 接头软磁性能

为了评估不同焊接工艺对 1J85 坡莫合金焊后软磁性能的影响，采用软磁直流测试系统，通过冲击法对各焊接工艺样品的软磁性能进行测定。在实验配置中，环形样件配备两组线圈：一组用作磁化线圈，另一组作为测量线圈，两组线圈的匝数 N_1，N_2 计算公式分别为：

$$N_1=\frac{H_s\times L_e}{I} \tag{2}$$

$$L_e=\pi\frac{D+d}{2} \tag{3}$$

$$N_2=\frac{\phi}{BS} \tag{4}$$

式中：H_s 为外加磁场，A/m；L_e 为有效磁路长度，m；I 为磁化电流，A；D 为环形样品外径，mm；d 为环形样品内径，mm；ϕ 为磁通量，Wb；B 为磁饱和感应强度，T；S 为横截面积，mm^2。计算可知，BM 及焊接样品的磁化线圈 N_1 的圈数均为 36 圈，N_2 的圈数均为 208 圈。不同工艺下样品的磁滞回线测量结果如图 9 所示，表 5 为环形坡莫合金的磁性能数据。可以看出，PAW 工艺样品的初始磁导率为 40.12 mH/m，仅为母材(72.89 mH/m)的 55%，而 PAHTW 工艺样品的初始磁导率达 78.81 mH/m，已与母材相当；最大磁导率方面，PAW 工艺为 72.63 mH/m，PAHTW 工艺提升至 113.41 mH/m，高于母材的 112.77 mH/m；矫顽力方面，PAW 工艺为 1.70 A/m，PAHTW 工艺降至 1.24 A/m，较 PAW 降低 27%；饱和磁通密度方面，PAHTW 工艺为 713.60 mT，高于 PAW 工艺的 697.82 mT 和母材的 699.21 mT，这些数据表明 PAHTW 工艺显著改善了焊接接头的软磁性能。

在软磁材料研究领域中，低矫顽力是其一项核心

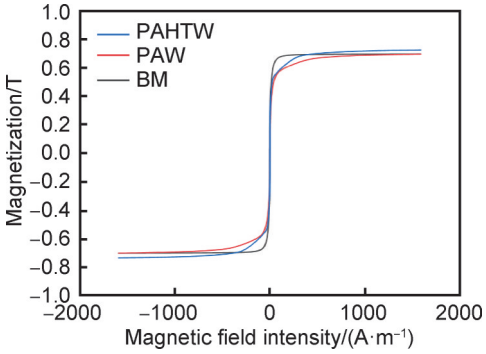


图9　不同工艺下样品的磁滞回线

Fig.9　Hysteresis loops of samples under different processes

表5　环形坡莫合金的磁性能

Table 5　Magnetic properties of annular permalloys

Sample	Initial permeability/ (mH·m^{-1})	Maximum permeability/ (mH·m^{-1})	Coercivity/ (A·m^{-1})	Saturation flux density/ mT
BM	72.89	112.77	1.16	699.21
PAW	40.12	72.63	1.70	697.82
PAHTW	78.81	113.41	1.24	713.60

特性。矫顽力主要受材料微观结构的影响，并与磁晶各向异性紧密关联。在软磁合金的研究中，H_c与K_1和晶粒尺寸D_g之间的关系可用式(5)表示[23]：

$$H_c = 3\frac{\sqrt{\frac{kT_cK_1}{a}}}{J_s}\frac{1}{D_g} \tag{5}$$

式中：k为常量；a为晶格常数；J_s为饱和极化强度。由式(5)可知，K_1值越小或较大D_g可以获得更低的H_c，由于K_1主要取决于材料的化学成分，因此通过调整坡莫合金的D_g可有效降低其H_c。PAHTW工艺下接头的H_c相较于PAW工艺的焊接接头降低了27%。该优化归功于对元素偏析的有效抑制。已有研究表明[16]，元素偏析会妨碍磁畴的移动和旋转，从而不利于材料的软磁性能。由表4结果可知，PAHTW工艺导致接头中非磁性元素Si的含量降低，进而改善磁性能。与PAW焊缝区(图2(a))相比，经过PAHTW工艺处理后(图2(b))，接头焊缝区中细小胞状亚晶被较大的奥氏体晶粒所替代，即D_g增大使得接头H_c下降。

3　结论

(1)PAHTW工艺显著改善1J85坡莫合金焊接接头的软磁性能，初始磁导率提升至78.81 mH/m，矫顽力降至1.24 A/m。

(2)PAHTW 通过预热→焊接→后热工艺调控，促使焊缝区晶粒粗化，胞状亚晶减少，非磁性元素 Si 含量降低约50%，元素分布均匀性提升。

(3)PAW 和PAHTW工艺下焊接接头物相均为γ(Fe，Ni)和$FeNi_3$，表明未有新相形成。在PAHTW工艺下，(111)衍射峰强度强于PAW，表现出更好的磁性能。

参考文献

[1] 计植耀，马跃，王清，等. 高性能软磁合金的研究进展[J]. 材料工程，2022，50(3)：69-80.
JI Z Y，MA Y，WANG Q，et al. Research progress on high performance soft magnetic alloys[J]. Journal of Materials Engineering，2022，50(3)：69-80.

[2] ALI M，AHMAD F. A review of processing techniques for Fe-Ni soft magnetic materials[J]. Materials and Manufacturing Processes，2019，34(14)：1580-1604.

[3] 高硕洪，卢冰文，NOUREDINE F，等. 激光增材制造FeNi坡莫合金及其磁性能研究[J]. 材料研究与应用，2021，15(4)：341-349.
GAO S H，LU B W，NOUREDINE F，et al. Study on laser additive manufacturing of FeNi permalloy and its magnetic properties[J]. Journal of Materials Research and Application，2021，15(4)：341-349.

[4] KIM D H，LEE S B，KO D C，et al. Process design and forming analysis of a permalloy shielding can for instrument clusters[J]. Journal of Materials Processing Technology，2003，135(2/3)：366-374.

[5] 李晨隽. 高初始磁导率合金1J85热处理工艺的研究[J]. 南方钢铁，2000(5)：7-11.
LI C J. Study on the heat treatment process of high initial permeability alloy 1J85[J]. Southern Iron and Steel，2000(5)：7-11.

[6] 张忠科，胡炜皓，雍春军. Inconel 625高温合金等离子弧加丝焊接接头组织与性能[J]. 有色金属工程，2023，13(9)：23-32.
ZHANG Z K，HU W H，YONG C J. Microstructure and properties of Inconel 625 superalloy joints welded by plasma arc wire feed welding[J]. Nonferrous Metals Engineering，2023，13(9)：23-32.

[7] ZHANG H，HUANG C，GUAN Z，et al. Effects of the electron beam welding process on the microstructure，tensile，fatigue and fracture properties of nickel alloy Nimonic 80A[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2018，27(1)：89-98.

[8] 张伊诺，陈祖强，陈林波，等. 基于等离子双丝增材制造技术制备坡莫合金工艺探究[J]. 金属加工(热加工)，2024(3)：7-12.
ZHANG Y N，CHEN Z Q，CHEN L B，et al. Exploration of permalloy manufacturing process based on plasma arc twin-wire additive manufacturing technology[J]. MW Metal Forming，2024(3)：7-12.

[9] MIKLER C V，CHAUDHARY V，BORKAR T，et al. Laser additive manufacturing of magnetic materials[J]. JOM，2017，69(3)：532-543.

[10] ZHANG B，FENINECHE N E，LIAO H，et al. Magnetic properties of *in-situ* synthesized $FeNi_3$ by selective laser melting Fe-80%Ni powders[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2013，336：49-54.

[11] SCHOENRATH H，SPASOVA M，KILIAN S O，et al. Addi-

tive manufacturing of soft magnetic permalloy from Fe and Ni powders: control of magnetic anisotropy[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2019,478:274-278.

[12] 王旭扬,李菊,陶军,等. 焊后热处理对TC11钛合金线性摩擦焊接头组织与性能的影响[J]. 材料工程,2023,51(10):118-125.
WANG X Y, LI J, TAO J, et al. Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and properties of TC11 titanium alloy linear friction welded joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2023,51(10):118-125.

[13] 李小飞,李晓红,熊华平,等. 铝锂合金的焊缝组织与开裂敏感性研究[J]. 航空材料学报, 2007,27(3):55-59.
LI X F, LI X H, XIONG H P, et al. Study on the microstructure and cracking sensitivity of aluminum-lithium alloy welds[J]. Journal of Aeronautical Materials,2007,27(3):55-59.

[14] 崔丽,李晓延,贺定勇,等. Nd:YAG激光焊接对铝锂合金组织和织构的影响[J]. 材料工程, 2012(5):6-9.
CUI L, LI X Y, HE D Y, et al. Effects of Nd:YAG laser welding on the microstructure and texture of aluminum-lithium alloy [J]. Journal of Materials Engineering,2012(5):6-9.

[15] YIN Q, CHEN G, WEI S, et al. Directionally solidified electron beam welding: a novel method to optimize soft magnetic properties for welded permalloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 308:117718.

[16] YIN Q, MA Y, CHEN G, et al. Electron beam welding with *in situ* heat treatment: an effective method for optimization of soft magnetic properties of permalloy [J]. Journal of Manufacturing Processes,2022,77:642-651.

[17] LI B, FU W, XU H, et al. Additively manufactured Ni-15Fe-5Mo permalloy *via* selective laser melting and subsequent annealing for magnetic-shielding structures: process, micro-structural and soft-magnetic characteristics [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 494:165754.

[18] KIM D H, HWANG T, RYU K S, et al. Influence of easy magnetization axis orientation on magnetization reversal in permalloy strips[J].Physica Status Solidi, 2008, 5(1):405-408.

[19] YIN Q, CHEN G, CAO H, et al. Transformation law of microstructure evolution and mechanical properties of electron beam freeform fabricated 321 austenitic stainless steel [J]. Vacuum, 2021,194:110594.

[20] JI S, HAN J T, LIU J, et al. Effect of diffusion annealing on defects reduction of 6.5wt% high silicon steel composite plate after hot deformation [J]. Advanced Materials Research, 2014, 941/944:338-342.

[21] MA J, QIN M, WANG X, et al. Microstructure and magnetic properties of Fe-79%Ni-4%Mo alloy fabricated by metal injection molding[J]. Powder Technology,2014,253:158-162.

[22] BIDULSKÝ R, ACTIS G M, FERRARIS L, et al. The effects of chemical composition on soft magnetic materials behaviour[J]. Acta Physica Polonica A,2010,118(5):802-803.

[23] PFEIFER F, RADELOFF C. Soft magnetic Ni-Fe and Co-Fe alloys-some physical and metallurgical aspects[J].Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1980,19(1/3):190-207.

基金项目:国家自然科学基金(52261135544)
收稿日期:2024-06-18;**录用日期**:2024-08-07
通讯作者:陈希章(1976—),男,教授,博士,研究方向为新材料增材制造,联系地址:浙江省温州市瓯海区茶山街道温州大学南校区机电工程学院机电楼C幢605办公室(325035),E-mail:chenxizhang@wzu.edu.cn

(本文责编:王 晶)