

稀土元素钇对 Inconel 625 高温合金等离子弧焊接接头组织与性能影响

张忠科^{1,2}, 纪宝成¹, 陈荣耀¹, 刘丽娜¹

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 利用等离子焊接技术对加入钇(Y)金属粉末的镍基高温合金 Inconel 625 (100 mm×50 mm×4 mm) 板材进行对接自熔焊接试验。通过光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、力学性能测试等进行测试分析。结果表明: 当焊接电流 95 A、焊接速度 110 mm/min、等离子气流量 3 L/min、钇元素含量 0.3wt% 时接头成型最佳; 焊缝区组织为细小等轴晶, 加入钇元素后, 热影响区出现更为细小、均匀的晶粒; 焊接接头中析出大量的 Laves 相和碳化物相(MC)以及富钇相(Y-riched); 随着钇元素含量的增加, 接头抗拉强度、屈服强度、延伸率先增后减, 在钇元素含量为 0.3wt% 时, 试样抗拉强度最高为 776.59 MPa, 屈服强度最高为 595.68 MPa, 接头延伸率为 46.60%, 其整体性能高于不加稀土的合金, 拉伸和冲击断口均为韧性断裂; 在不加 Y 时, 焊缝区硬度最大, 钇元素加入后焊缝区的硬度显著下降。

关键词: 稀土元素钇; 镍基高温合金; 等离子弧焊接; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456; TG146.1+5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2025)05-1283-08

1 引言

高温合金,即以铁、镍、钴为主要成分,具备在 600 °C 或更高的温度和一定压力环境下持久运行的一种金属材料。同时具备出色的高温强度、卓越的抗氧化和抗热腐蚀特性,以及优秀的耐疲劳性能和断裂韧性等多种优秀性能^[1-2]。Inconel 625 是一种典型镍基变形高温合金^[3],以钼、铌为主要强化元素,通过在时效过程中从基体中析出强化相 γ' 相,可以起到强化作用。Inconel 625 在航空发动机、宇航结构以及化工设备的生产中有着广泛的应用。

对 Inconel 625 合金及其相关镍基高温合金的研究已成为国内外研究者关注的焦点,根据不同的环境和工作条件要求,采用各种方法焊接 Inconel 625 合金进行研究产生了诸多成果。李乐等^[4]采用搅拌摩擦焊处理结合强制冷却技术,成功地在镍基高温合金表面制备出了纳米晶层。为了研究纳米晶粒对液化裂纹的影响,对搅拌区域进行了激光重熔处理。通过显微分析,深入研究了纳米晶粒的细化机制,并分析了纳米晶粒抑制液化裂纹的作用机理。魏振伟等^[5]采用手工钨极氩弧焊方法对 GH536 管材进行单面焊制备试样,对析出相形貌、分布、成分进行分析。发现固溶态 GH536 由 γ 基体、大量 M_6C 及少量 $M_{23}C_6$ 组成。焊后,大量 M_6C 在晶内弥散析出,在

晶界和李晶界上不连续析出,原有的碳化物长大。Wang 等^[6-7]使用脉冲激光技术对镍基高温合金进行了补焊试验。焊接后测定了焊缝的微观组织演变、裂纹行为和力学性能。在适当的焊接参数下,焊缝熔合区和热影响区均未形成裂纹。但将激光能量设置得太高会导致焊缝中心线开裂或焊缝熔合区的晶间开裂。Bu 等^[8]对镍基高温合金 Inconel 601 采用钨极氩弧焊和固溶处理后的微观组织进行研究。原始焊缝的显微结构特征为粗大的柱状晶粒,随着固溶处理温度增加,碳化物逐渐溶解到奥氏体基质中,并使得粗大等轴奥氏体晶粒变细。Kumar 等^[9]尝试使用镍基填充焊丝的钨极电弧焊工艺在镍基高温合金与不锈钢之间产生可靠的接头。接头的强度高于较弱的母材(不锈钢)。宏观结构和微观结构显示出母体金属和填充线之间的适当熔合和结合。在熔化边界处形成部分熔融区,在熔化边界附近形成次级相(富钼相)。Arash 等^[10]研究了 ZhS6U 镍基高温合金在电子束焊接修复过程中容易发生凝固开裂的问题。在焊前热处理循环中,析出物的形貌和尺寸的变化改变了高温合金释放 EBW 后基相冷却引起的拉应力的能力,导致母合金对应力释放的抵抗力更大。母材中的应力集中导致热影响区液化裂纹和焊缝区凝固裂纹的产生。

稀土元素是一类在镍基高温合金中广泛使用的固溶

收稿日期: 2024-05-26

基金项目: 甘肃省科技重大专项(18ZD2GC013); 甘肃省知识产权计划项目(22ZSCQ052)

作者简介: 张忠科,男,1978年生,博士,副教授,兰州理工大学材料科学与工程学院,甘肃 兰州 730050, E-mail: zhangzke@lut.cn

强化元素。它们可以通过促进沉淀相的形成和增加晶格缺陷密度来增强合金的力学性能和耐蠕变性能,还可以改善合金的热处理工艺和抗氧化性能^[11]。在钢铁、有色金属和特种金属等工业中,稀土元素的应用已经取得了许多重要的进展,如提高钢的强度和韧性、改善铝合金的耐腐蚀性和高温性能等。Wang等^[12]通过添加稀土Sm并在1080℃的温度下钎焊来改善Ni基填充合金的性能,稀土Sm的加入可以细化填充合金的晶粒,提高填充合金的硬度,降低金刚石焊接后的热损伤。Bazyleva等^[13-14]研究发现在结构金属间镍基合金冶炼中掺杂钇和/或铈可提高1200℃温度下的热强度、1100和1200℃温度下的耐热性。

等离子弧焊是一种高效、高质量的焊接方法,适用于镍基高温Inconel 625焊接过程中^[15]。本实验采用等离子加粉技术对4 mm Inconel 625合金焊接,研究不同稀土元素添加量下焊接接头的组织和性能,对高温合金和稀土元素的应用提供参考。

2 实验

试验选取长度为100 mm、宽度为50 mm、厚度为4 mm的镍基高温合金Inconel 625板材作为母材,材料的供货状态为冷轧,母材的化学成分如表1所示。添加的稀土元素为钇(Y)金属粉末,纯度为99.9%。试验焊机所用型号为PHM-500,在使用PHM-500型焊机进行焊接试验时需要与其配套的水冷机CA-01配合使用。

使用较粗的砂纸对母材焊接位置及周围1~2 cm处进行打磨,去除板材表面的氧化膜、油污及线切割后表面残留物质,接着使用丙酮溶液对板材进行擦拭,最后用无水乙醇清洁表面。在对Inconel 625合金进行焊前清理后进行钇金属粉末的添加,将聚乙烯醇与水的混合物水浴加热至粘稠胶状,加入定量Y粉,搅拌混合均匀。以混合液的体积确定涂敷Y元素的含量。涂抹均匀后等待凝固,待凝固后进行焊接试验。前期进行对Inconel 625薄板对接自熔焊焊接参数的调整,找到最优参数。表2是本次试验使用的焊接参数。

将焊好的焊接接头切割取样,金相样使用500~7000#的砂纸认真打磨,然后使用金刚石抛光剂进行抛光将试样抛光至表面无明显划痕。随后在配置好的腐蚀液(80 mL HCL+40 mL 乙醇+5 g CuSO₄)中浸泡150 s,冲洗干净后吹干。利用金相显微镜、拉伸试验机等仪器进行相关试验,研究不同钇(Y)金属粉末含量的等离子焊接接头的微观组织和力学性能。

3 结果与分析

3.1 等离子加稀土元素焊接接头宏观形貌

Inconel 625等离子加稀土元素焊接焊缝表面成形和截面宏观形貌如图1所示。从图中可以看出,稀土元素Y为0wt%、0.2wt%、0.3wt%、0.4wt% 4种不同参数下焊缝表面成型均有所不同,焊接接头完全熔透,焊缝整体形状为“上宽下窄”,具有典型的等离子焊缝特征。与不添加及少量添加钇元素相比,在含量0.3wt%时焊缝表面成形良好纹路规则,背部成形良好,焊接接头熔宽增加。但随着钇元素的过量加入,焊缝表面成形不规整,焊缝表面缺陷较多,表面纹路不规则,且呈现坑状下陷,但背面成形尚可,接头熔宽持续增加。在焊接过程中观察到,在没有钇元素加入时,熔池液体呈大滴状,流动缓慢,流动性差,而随着钇元素的加入熔池中溶液波动幅度变大,流动加快。而当含量在0.4wt%及以上时,焊接发生少量飞溅,且随着含量增加,飞溅变大。以上试验现象的原因可能是钇元素的加入对Inconel 625等离子焊接熔池具有“搅动”作用^[16-17],这种作用虽然会使焊缝背面成形不光滑,焊缝背面余高下降,熔宽增大,但将会使熔池成分更均匀。而过量(>0.4wt%)的钇元素又会使这种“搅动”作用加剧,使焊缝成形质量变差,且随着钇元素的增加,焊缝成型质量越差。

3.2 等离子加稀土元素焊接接头微观组织

不同稀土元素含量下的Inconel 625焊接接头的微观组织如图2所示。通过分析对比,母材的奥氏体等轴晶区域的晶粒大小与原始板材的晶粒大小一致,这是由于相比于钨极氩弧焊而言等离子焊接时电弧收缩程度大,焊接过程的线能量较小,并没有影响到距离焊缝比较远

表1 母材化学成分

Table 1 Chemical composition of base material (wt%)

Cr	Ti	Nb	Fe	Mo	Al	Si	Mn	P+S	Cu	W+C	Ni
21.50	0.11	3.27	4.56	8.76	0.15	0.025	0.18	0.01	0.13	0.045	Bal.

表2 焊接试验参数

Table 2 Parameters of welding experiment

No.	Y content/wt%	Plasma gas flow/L·min ⁻¹	Welding current/A	Protective gas flow/L·min ⁻¹	Welding speed/mm·min ⁻¹
1	0.2	3	95	8.5	110
2	0.3	3	95	8.5	110
3	0.4	3	95	8.5	110

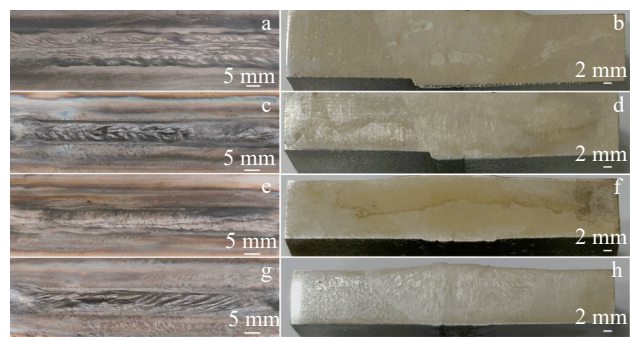


图1 不同稀土元素添加量下的等离子焊接接头表面和横截面形貌
Fig.1 Surface (a, c, e, g) and cross section (b, d, f, h) morphologies of plasma welded joints with different Y addition: (a–b) 0wt%, (c–d) 0.2wt%, (e–f) 0.3wt%, and (g–h) 0.4wt%

的母材组织。从图2中观察到,母材区均表现晶粒较小,组织均匀的特点,表现出典型的镍基合金组织,包括奥氏体等轴晶和少量的孪晶晶粒组织,这些孪晶组织有的具有完整的晶粒结构,有的只是截止在晶粒中。从图2a、2c、2e、2g观察可知,Inconel 625合金的焊缝区域存在胞状等轴晶结构以及粗大的树枝晶结构。在焊缝区由于快速凝固和高温热输入,可以看到胞状晶与奥氏体等轴晶结构以及粗大的树枝晶结构。焊缝中心的树枝晶组织这一区域的组织由于熔化和混合,通常呈现出非均匀的结构。其中,主要有类似于宽分界带的沿晶结构和晶粒较大的横晶结构。与母材不同的是,等离子焊接接头中的等轴晶区通常比较窄,呈现为沿晶间隔分布。在不加钇元素 Inconel 625 焊接接头的焊缝区,由于快速凝固和高温热输入,可以看到胞状晶与奥氏体等轴晶结构以及粗大的树枝晶结构;当含量为0.3wt%时可以看到此时的树枝晶已经开始变小,这是由于钇粉被添加到 Inconel 625 焊接材料中时,它会在焊接熔池中溶解并分

布均匀。随着焊接的进行,焊接熔池中的温度逐渐升高,钇元素开始发挥作用。由于钇元素具有一定的亲晶取向性,钇元素会在晶界处聚集起来,从而阻碍晶界的运动和扩散,进而减缓树枝晶晶体生长速率,使晶体生长趋向细小,从而会产生细晶效应。在焊缝区出现更为致密、更为细小、更为连续的组织结构,然而过量的钇元素导致焊接接头中Laves相和其他夹杂物的含量增加。

图2b、2d、2f、2h是热影响区,观察图2可以知道,焊接接头的热影响区没有明显的晶粒组织长大。在焊缝与母材的分界线融合线处,该区域的主要晶粒组织是微小胞状晶且垂直于分界线。但是焊接的高温热输入导致细小胞状晶有长成树枝晶的可能,热影响区的晶粒组织相比于未进行等离子焊接的母材组织有很大的晶粒增大倾向,这是由于热影响区在等离子焊接过程中过热导致的。而晶粒的大小会明显影响焊接接头的塑性和韧性。对比图2b和2f,添加钇含量0.3%相比零添加,热影响区的晶粒产生了细化,添加量0.3%的平均粒径是57.38 μm ,而钇含量0%的平均粒径是78.99 μm ,细化了36.7%。细化晶粒可以改善合金的强韧性。由于焊接速度较快,焊接热输入小且 Inconel 625 导热能力差,因此在焊接结束后焊缝区和热影响区存在较大的温度梯度,热影响区冷却过快,晶粒无法长大,成分过冷作用不明显,导致该区域的主要晶粒组织是微小胞状晶且垂直于焊缝与母材的分界线。

3.3 等离子加稀土元素焊接接头析出相

图3和图4分别为母材和钇含量0.3wt%下焊接接头各区域的SEM照片和析出第二相的EDS能谱。由图3a可知,母材基体上分布着许多数量较多且体积细小的颗粒状析出物,对其进行EDS检测分析,结果如图4a,这是一种以(Nb,Ti)C为主的MC型碳化物。其中铌、碳为主要

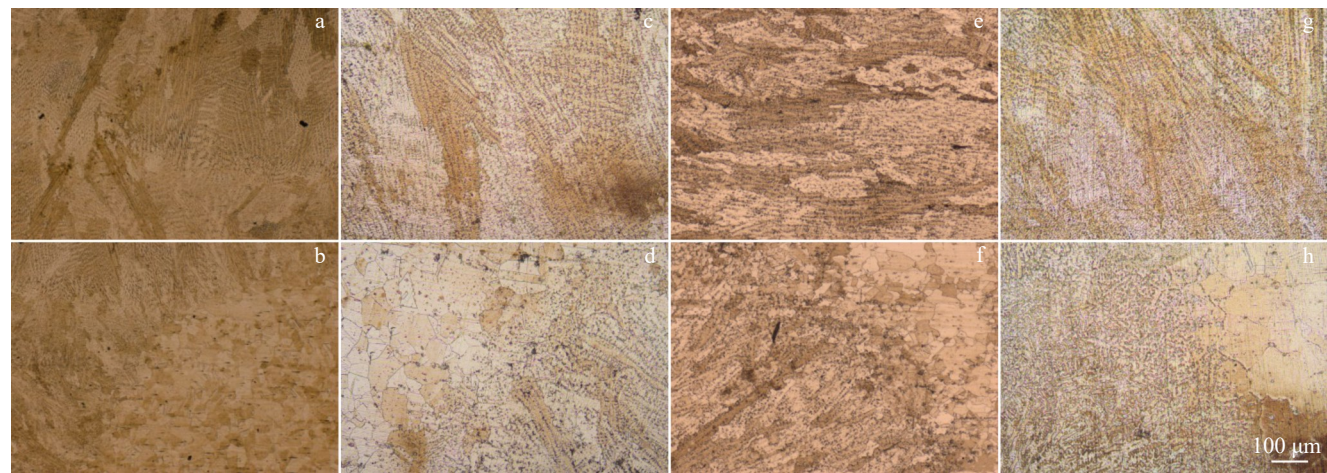


图2 不同稀土元素添加量下焊接接头焊缝区和热影响区显微组织
Fig.2 Microstructures of weld zone (a, c, e, g) and heat affected zone (b, d, f, h) of welded joints with different Y addition: (a–b) 0wt%, (c–d) 0.2wt%, (e–f) 0.3wt%, (g–h) 0.4wt%

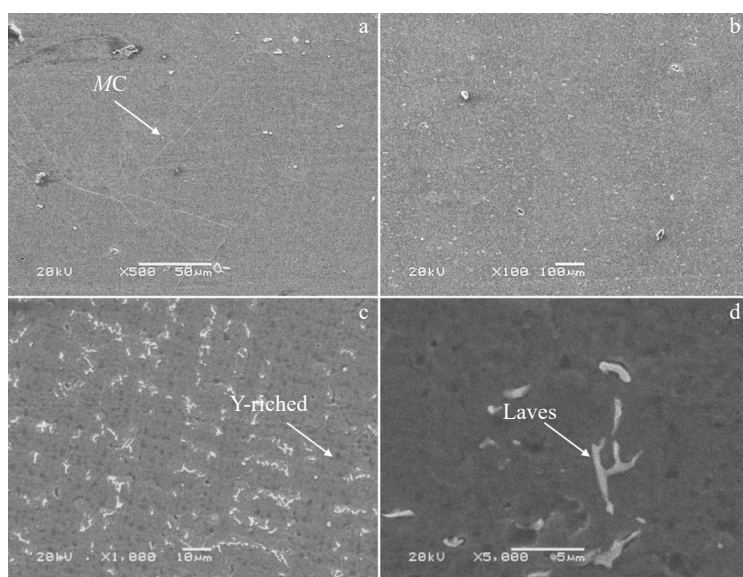


图3 Y含量0.3wt%焊接接头不同区域SEM照片

Fig.3 SEM images of welded joint with Y content of 0.3wt%: (a) base metal, (b) weld zone, and (c-d) enlargement of weld zone

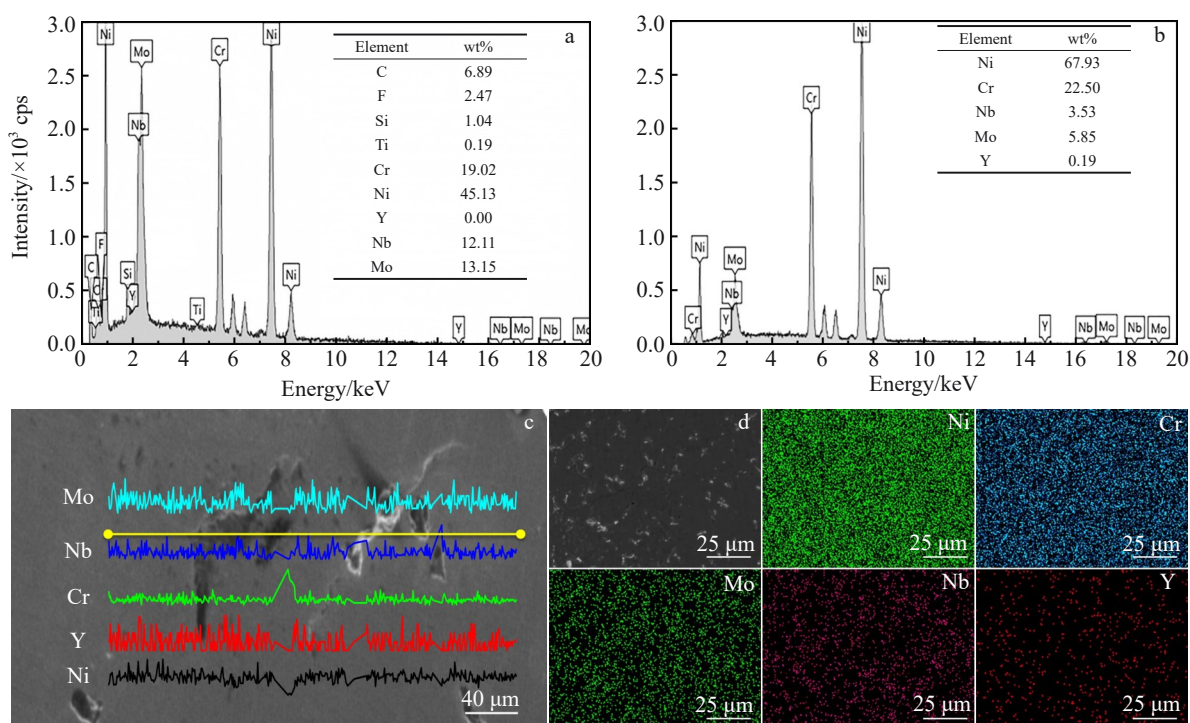


图4 焊缝区第二相EDS能谱分析结果

Fig.4 EDS spectrum analysis of second phase in the weld zone: (a) point analysis of base metal, (b) point analysis of weld zone, (c) line scanning, and (d) mappings

元素,形成MC型碳化物NbC,该析出相对Inconel 625母材具有良好的性能改善作用。母材基体以合金元素凝固时伴随着的固溶强化作用来提高合金的力学性能和耐腐蚀性能^[18-19]。等离子弧焊接接头的焊缝区和焊缝区域的局部放大如图3b、3c所示,从SEM照片中观察可知,无论是焊缝边缘区还是焊缝中心区域均存在大量形状各异

的白色析出相。对其中一个体积粗大不规则白色析出相放大观察如图4d所示,对其进行EDS检测分析结果显示,这是一种含大量Nb、Mo的白色析出相,通过对焊接过程中存在的析出相种类进行比对可知这是Laves相。此外,从图3c可以看出有少量灰黑色小块状颗粒析出,使用EDS对其进行能谱检测,结果如图4b所示,灰黑色

块状颗粒可能是Y相 $\text{Ni}_3(\text{Y,Nb})/\text{Ni}_3(\text{Y,Mo})$ ，可能是一种富钇相。对焊接接头焊缝区进行EDS线扫、面扫结果如图4c、4d所示，钇元素在焊缝区均有分布且分布较为均匀。这些含钇元素化合物具有细小的晶粒和较高的硬度，可以提高焊缝区域的力学性能和抗腐蚀性能^[20]。

3.4 等离子加稀土元素焊接接头力学性能

3.4.1 等离子加稀土元素焊接接头拉伸性能

对Y含量为0wt%，0.2wt%，0.3wt%，0.4wt%的试件进行拉伸性能测试，探究钇元素含量对Inconel 625合金等离子弧焊接接头拉伸性能的影响。拉伸速率为1 mm/min，拉伸结果如图5和表3。

图5a和5b分别对应不同钇元素含量断裂位置及应力-应变曲线。母材试样断在中间偏左，钇元素含量在0wt%、0.2wt%和0.4wt%均断在中间焊缝区，而钇元素含量0.3wt%的试样断在靠近熔合线的母材区。不管在何种参数下产生的断裂，其试样均发生了不同程度的颈缩现象。所有的拉伸断口呈现典型的韧性断裂^[21]，断口特征且断口方向为45°。结合焊接接头显微组织观察可知，该参数组合下细小的胞状晶和条状胞状晶是焊接焊缝中的主要晶体结构。对比实验可知，随着Y元素含量的增加，其试件抗拉强度、屈服强度与形变量先增后减，在为0.3wt%时，试样抗拉强度最高776.59 MPa，屈服强度最高595.68 MPa，延伸率最高46.60%，其整体性能高于零添加自熔焊；在含量大于0.3wt%时，焊接接头的整体性能大幅下降。0%时，是普通自熔Inconel 625等离子焊接

接头，适量添加稀土元素钇可使其整体性能高于自熔焊。填粉后的抗拉强度达到了776.59 MPa比不填粉的自熔焊焊接接头强度729.00 MPa高。且添加适量Y元素的焊接接头强度相对于Inconel 625母材的抗拉强度838.42 MPa达到了92.6%，而零添加自熔焊焊接接头强度只达到了86.9%，提高了6%。与此同时屈服强度提升5%，延伸率提升2%。

图6是不同条件下Inconel 625合金等离子焊接接头的拉伸断口SEM照片。通过对焊接接头的断口进行SEM观察，可以进一步了解钇元素的加入对其组织结构和断裂性质的影响。结果表明，当无钇元素(0wt%)添加的Inconel 625镍基合金焊接接头发生断裂时，断口形貌表现为韧窝型断口，韧窝大而深。韧窝是材料在微小的区域内发生塑性变形并因此产生显微空洞，空洞随后经形核、长大、聚集后会相互连接，因此会在断口表面处留下痕迹，为微孔聚集型断裂方式，是典型的韧性断裂。在添加适量钇(0.3wt%)元素后，焊接接头的断口形貌表现出更为明显的韧窝区，并且韧窝区呈现出细小、均匀的结构。相对于未添加钇元素的焊接接头，添加钇元素后的接头在断裂时呈现出更多的韧性，并且细小的晶粒结构有利于阻止裂纹的扩展和破坏。同时，在断裂面上也可以看到更为平滑和连续的特征，表明钇元素的加入能够显著提高焊接接头的断裂韧性。但是过量的钇元素(0.4wt%)的断口，其韧窝相比较0.3wt%钇元素添加量的焊接接头，明显增大并且在韧窝周围分布着明显的撕裂

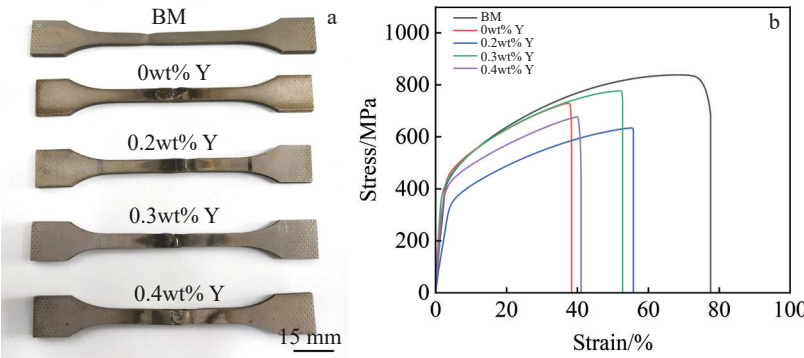


图5 断裂位置图与拉伸曲线
Fig.5 Fracture location diagram (a) and stress-strain curves (b)

表3 焊接接头性能和断裂位置

Table 3 Properties and fracture locations of welded joints

No.	Yield strength, $R_{p0.2}$ /MPa	Tensile strength, R_m /MPa	Elongation, A /%	Fracture position
Base metal	643.11	838.42	55.68	Base metal
1 (0wt% Y)	559.18	729.00	45.23	Welded seam
2 (0.2wt% Y)	486.55	634.31	39.36	Welded seam
3 (0.3wt% Y)	595.68	776.59	46.60	Base metal
4 (0.4wt% Y)	519.23	676.92	42.31	Welded seam

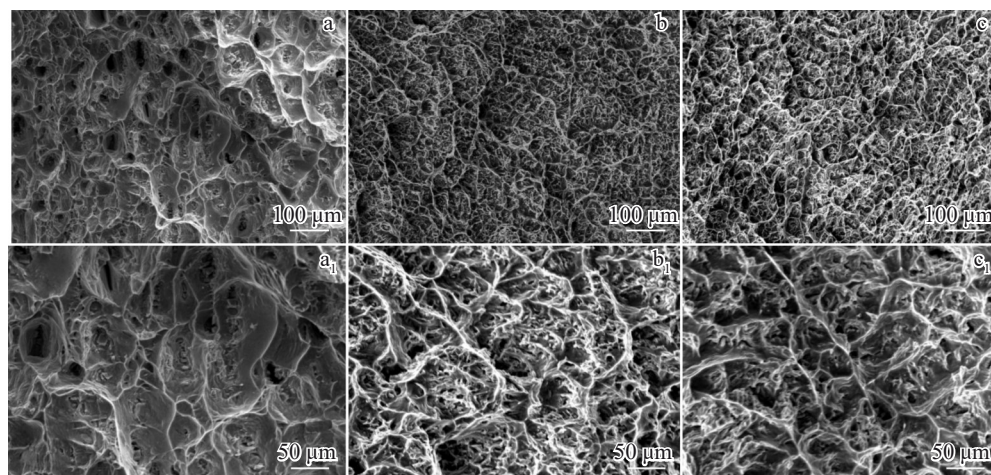


图6 稀土Y元素不同添加量下的拉伸断口SEM照片

Fig.6 SEM images of tensile fracture under different addition amounts of rare earth Y elements: (a, a₁) 0wt%, (b, b₁) 0.3wt%, and (c, c₁) 0.4wt%

脊,而且在韧窝底部发现大量第二相颗粒Laves相。焊缝中析出的Laves相是一种富含Nb元素的低熔点脆性相,在对焊接接头进行拉伸试验时,Laves相会成为开裂时的裂纹源,导致焊接接头力学性能下降,并且析出时会大量的消耗合金中的固溶强化元素Nb^[22-23],使得接头韧性降低,在两方面的共同作用下导致焊接接头力学性能降低,降低焊缝的可塑性和韧性,使其易于发生裂纹和断裂。

3.4.2 等离子加稀土元素焊接接头冲击性能

冲击试样为10 mm×55 mm×2.5 mm的小型标准冲击试样,在冲击试样截取完成后,使用JB-750W型冲击试验机进行室温冲击试验,记录各试件的冲击功。焊接接头在室温下的冲击韧性是衡量接头室温下塑性韧性的重要指标,如图7为添加适量钕金属粉末和没有添加钕金属粉末焊缝区(WZ)与热影响区(HAZ)室温下冲击功的对比。可以看出,添加适量钕金属粉末后的Inconel 625合金等离子焊接接头的热影响区和焊缝的冲击功都有所增加。如图所示,钕元素的加入对

Inconel 625等离子焊接接头焊缝处冲击性能的影响也是先增后减,在含量为0.2wt%、0.3wt%时,焊缝区的冲击性能高于自熔焊的焊缝区冲击性能,而随着钕元素含量的再升高,冲击性能不断下降甚至低于自熔焊的焊缝区冲击性能。当钕的含量在0.3wt%左右时,接头的冲击韧性达到最大值。但钕元素含量超过0.3wt%时又会对接头的冲击性能产生负面影响,导致强韧性下降。

添加0.3wt%Y金属粉末的焊接接头冲击断口SEM照片图8所示。从图中可以看出母材、焊缝和热影响区的冲击断口均存在大量的韧窝,这表明这3个断裂全是典型的韧性断裂。从图8a、8b可以看出,在未加入钕元素时,热影响区与焊缝区的冲击断口存在大量韧窝,而焊缝区的韧窝相比于热影响区略小且浅,韧窝的形状能够反映材料的冲击韧性,韧窝越小且浅,其冲击韧性越好,与冲击试验数据相符。从图8c、8d可以看出,在加入0.3wt%的钕元素后,最明显的是其撕裂脊出现了规则的分布,分布密集且排列整齐,韧窝分布均匀;其次是焊缝区与热影响区的韧窝形态相对于图8a、8b,明显变小变

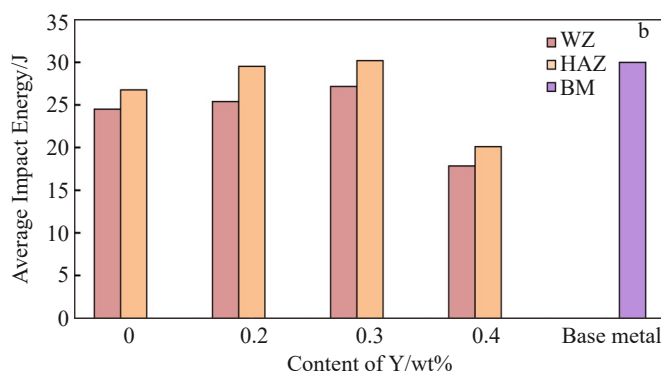
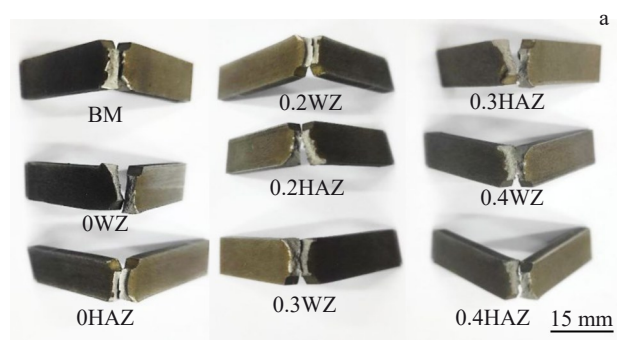


图7 母材和钕含量0wt%、0.2wt%、0.3wt%、0.4wt%试样各区域冲击后形貌和平均冲击功

Fig.7 Morphology (a) and average impact energy (b) of different regions in base material and samples with Y content of 0, 0.2wt%, 0.3wt%, 0.4wt% after impact

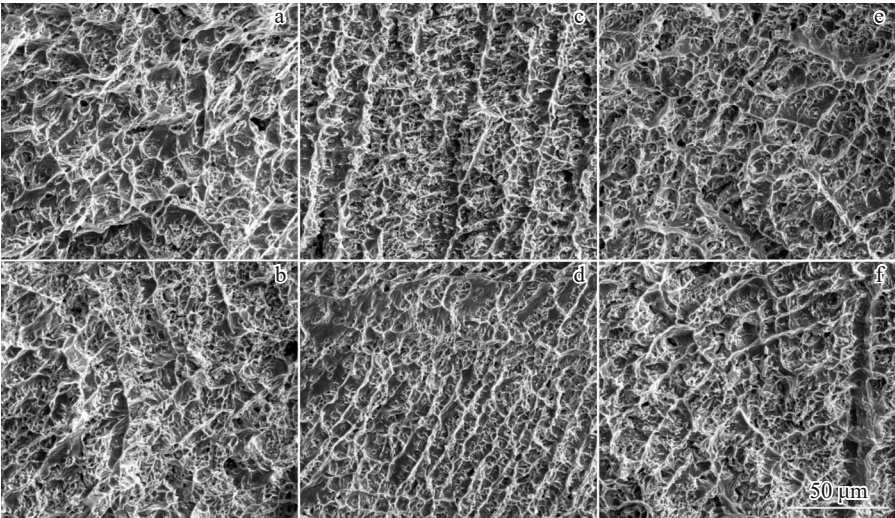


图8 不同Y含量试样冲击断口形貌

Fi.8 Impact fracture topography of samples with different Y contents: (a–b) HAZ and WZ of 0wt%; (c–d) HAZ and WZ of 0.3wt%; (e–f) HAZ and WZ of 0.4wt%

浅,证明各区域的冲击性能是优于未加入钇元素试样的,与试验数据相符;最后,0.3wt%的焊缝区相比于热影响区韧窝形状也是略小,焊缝区的冲击韧性比热影响区低。从图8可以看出,在0.4wt%时,其热影响区与焊缝区的韧窝再次变大,且撕裂脊分布也不如图8c、8d分布有序均匀,其冲击韧性也是再次下降,证明在0.4wt%时,钇元素的添加量也是略微过量。

3.4.3 等离子加稀土元素焊接接头显微硬度

对0wt%和0.3wt%的试件进行显微硬度测试,探究钇元素含量对Inconel 625等离子弧焊接接头硬度的影响,每个试样试验参数为:载荷0.2 kg、保载时间15 s、测试点间距0.5 mm、压头下压速度40 μm/s,共计32处,距焊缝正中央8 mm偏焊缝正面处开始。如图9所示为两组试样的硬度曲线,曲线所示两种等离子焊接接头的焊缝区硬度都高于母材区硬度。在0wt%时,焊缝区硬度最大,钇元素加入后焊缝区的硬度显著下降,在0.3wt%时焊缝区硬度明显低于零添加焊接接头。试验表明,材料硬度

随着钇元素含量的增加,焊缝处的硬度呈现出降低的趋势。

4 结论

1)添加0.3wt%的稀土元素可实现等离子弧焊接头最佳成形,呈现上宽下窄的特征,熔宽随稀土元素含量增加而增大。

2)焊接接头组织包含母材区的奥氏体等轴晶,焊缝区的胞状等轴晶和粗大的树枝晶结构,以及热影响区的微小胞状晶。添加Y元素后,焊接接头晶粒更加细密,焊缝区主要含有Nb、Ti,以及第二相MC相、Laves相和富钇相,而母材以MC相为主。

3)Y元素的添加显著提高了Inconel 625合金等离子焊接接头的力学性能。当钇元素含量为0.3wt%时,接头的力学性能达到最佳,抗拉强度、屈服强度、延伸率和焊缝冲击韧性均显著提升,但整体硬度略有下降。当钇元素含量大于0.4wt%时,接头的力学性能开始下降,强度、韧性和塑性变形能力均减弱,整体力学性能低于未添加钇元素的接头。

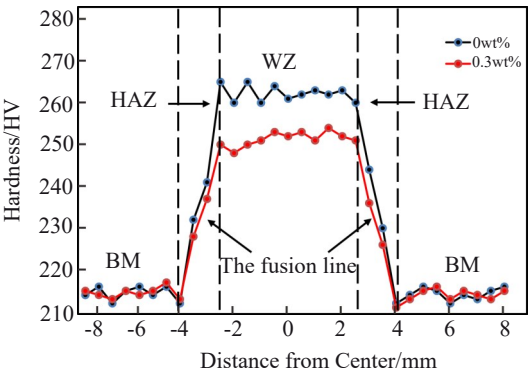


图9 Inconel625焊接接头硬度分布

Fig.9 Hardness distribution of Inconel625 welded joints

参考文献References

[1] Song Zhikun(宋志坤), Liu Yuanfu(刘元富), Chen Deqiang(陈德强) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51(7): 2654

[2] Sun Xiaofeng(孙晓峰), Song Wei(宋巍). *Acta Metallica Sinica* (金属学报)[J], 2021, 57(11): 1471

[3] Manohar Reddy Mattli, Adnan Khan, Penchal Reddy Matli et al. *Materials Today Communications*[J], 2020, 25: 101564

[4] Li Le(李乐), Lu Yuanyuan(路媛媛), Tang Feng(唐峰) et al. *Journal of Welding Technology*(焊接学报)[J], 2019, 40(1): 151, 168

- [5] Wei Zhenwei(魏振伟), Tao Chunhu(陶春虎), Gu Yuli(顾玉丽) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2015, 35(6): 41
- [6] Wang Huei-Sen, Huang Chih-Ying, Ho Kuen-Sen *et al. Materials Transactions*[J], 2011, 52(12): 2197
- [7] Jurado M, Altamirano G, Acevedo J L *et al. MRS Advances*[J], 2019, 4(63): 3463
- [8] Bu X Z, Shan P, Luo Z *et al. China Welding*[J], 2011, 20(2): 32
- [9] Kumar R, Varma A, Kumar Y R *et al. Manufacturing Processes*[J], 2022, 37(2): 136
- [10] Khakzadshahandashti A, Rahimpour M R, Shirvani K *et al. Journal of Mineral Metallurgy and Materials*[J], 2019, 26(2): 251
- [11] Li Yiming(李一鸣), Ji Yunping(计云萍), Kang Xueliang(康学良) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2022, 51(9): 3510
- [12] Wang N, Tian J, Sun H W *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2023, 26: 315
- [13] Bazyleva O A, Arginbayeva E G, Echin A B *et al. Applied Research of Inorganic Materials*[J], 2017, 8(1): 14
- [14] Bazyleva O A, Arginbaeva E G, Shestakov A V *et al. Inorganic Materials: Applied Research*[J], 2019, 10(6): 1314
- [15] Srinivas K, Vundavilli P R, Manzoor H M. *High Temperature Materials and Processes*[J], 2022, 41(1): 683
- [16] Jing Fengting(敬凤婷), Chen Rongchun(陈荣春), Zhang Yinghui(张迎晖) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2021, 45(6): 39
- [17] Tian Wei(田伟), Chang Song(常松), Zhou Changshen(周长申) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2021, 46(8): 30
- [18] Zhang Chi(张弛), Dang Qian(党乾), Liu Guohuai(刘国怀) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2023, 37(3): 106
- [19] Chen Guoqing(陈国庆), Zhang Ge(张戈), Liu Zheng(刘政) *et al. Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2021, 64(12): 20
- [20] Alessandra Vieira Guimarães, Rosa Maria Sales da Silveira, Luiz Henrique de Almeida *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2020, 776: 139023
- [21] Cui Li(崔丽), Gao Yan(高艳), Gu Changshi(顾长石) *et al. Journal of Beijing University of Technology*(北京工业大学学报)[J], 2018, 44(6): 953
- [22] Liu Lei(刘磊). *Study on Microstructure Evolution and Fatigue Creep Life Prediction of Nickel-Based Superalloys*(镍基高温合金微观组织演化及疲劳蠕变寿命预测研究)[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022
- [23] Chen Jianjun(陈建军), Ding Yutian(丁雨田), Wang Kun(王琨) *et al. Acta Metallurgica*(金属学报)[J], 2021, 57(5): 641

Effect of Rare Earth Element Yttrium on Microstructure and Properties of Plasma Arc Welding Joints of Inconel 625 Superalloy

Zhang Zhongke^{1,2}, Ji Baocheng¹, Chen Rongyao¹, Liu Lina¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Plasma welding technique was used to weld the nickel based superalloy Inconel 625 plate (100 mm×50 mm×4 mm) with yttrium (Y) metal powder. The samples were characterized by OM, SEM and mechanical properties test. The results show that the joint formation is optimal when the welding current is 95 A, the welding speed is 110 mm/min, the plasma gas flow is 3 L/min and the content of yttrium element is 0.3wt%. The microstructure of the weld zone is fine equiaxed crystal, and the finer and more uniform grains appear in the heat affected zone after adding yttrium element. A large amount of Laves phase, carbide phase (MC) and yttrium-rich phase (Y-riched) are precipitated in welded joints. With the increase in yttrium content, the tensile strength, yield strength and elongation of the joint increase first and then decrease. When the yttrium content is 0.3wt%, the tensile strength of the sample is the highest of 776.59 MPa, the yield strength is the highest of 595.68 MPa, and the elongation is the highest of 46.60%. The overall property of the sample is higher than that without adding rare earth. Both tensile and impact fractures are ductile fractures. When the yttrium content is 0%, the hardness of weld zone is the highest, and the hardness of weld zone decreases significantly after the addition of yttrium element.

Key words: rare earth element yttrium; nickel-based superalloy; plasma arc welding; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Zhang Zhongke, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, E-mail: zhangzke@lut.com