No. 2

2015

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.2015.02.010

高 AI、Hf 含量对 Ni₃AI 基合金激光焊接性能的影响 *

高海芸^{1a,2},何 润^{1b},张冬云²,鹿 堃²

(1. 皖西学院 a. 材料与化工学院, b. 机械与电子工程学院, 安徽 六安 237012; 2. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘 要:为了研究高 Al、Hf 含量对 Ni₃ Al 基合金焊接性能的影响,采用激光焊接 3 种成分合金,分析焊缝凝固机理,并对比所得裂纹敏感性,同时从预热温度、激光光源性质等方面研究激光焊接工艺。Al 元素成分增加,使合金降低了焊缝裂纹中偏析较严重的 Mo 元素含量,并使凝固过程的脆性温度范围减小,离共晶区较远,致使凝固组织($\gamma+\gamma'$)共晶相减少。Hf 元素含量增加使枝晶间得到良好的填充,使其相变成细密羽毛状($\gamma+\gamma'$)共晶体,明显降低合金的裂纹敏感性。通过调节母材预热温度,激光波长,在冷却速度较快时能够在一定程度上降低裂纹的敏感性,但仍未完全消除裂纹。而采用波长较短、光斑面积较大的半导体激光焊接得到无裂纹焊缝。

关键词:激光加工; Ni₃ Al 基合金; 金属间化合物; 裂纹

中图分类号: TG174.44; TG113.263 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2015)02-0090-11

Effects of High Al and Hf Content on Weldability of Ni₃Al Based Alloy by Laser Welding

GAO Hai-yun^{1a,2}, HE Run^{1b}, ZHANG Dong-yun², LU Kun²

(1a. Department of Material and Chemical Engineering, 1b. Department of Mechanical and Electronic Engineering, West Anhui University, Lu'an 237012, Anhui; 2. Laser Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: Influence of high Al and Hf content on the laser welding properties of Ni_3 Al base alloy was investigated. Three types of alloys with different compositions were used to analyze the weld solidification mechanism and the crack sensitivity. The laser welding process was studied from such parameters as preheating temperature, laser source properties, etc. It is found that with the increase of Al centent, the segregation of Mo content in the weld crack was reduced, and the brittle temperature range got smaller during the solidification process to result in a decrease of the solidified structure $(\gamma + \gamma')$ eutectic phases in the remote eutectic area. Meanwhile, with the increase of Hf element content, the crack sensitivity was reduced by a fine plume $(\gamma + \gamma')$ eutectic was generated from good interdendritic filling. Therefore, the crack sensitivity could be reduced to some extent by adjusting the preheating temperature and laser wavelength due to the high cooling speed, however, some small cracks still existed, which would disappear if welding with semiconductor laster of shorter wavelength and larger spot is used.

Keywords: laser processing; Ni₃ Al based alloy; intermetallic compound(IMC); crack

0 引 言

Ni₃ Al 金属间化合物一直作为重要的镍基高温合金得到广泛的应用,它具有高熔点、抗高温

氧化性能好、耐腐蚀、蠕变抗力好以及高的比强 度等主要优点,而且还具有峰值温度以下屈服强 度的正温度效应的特点。这些优点使得其在民

收稿日期: 2014-09-23; 修回日期: 2015-01-30; 基金项目: * 六安市定向委托皖西学院市级研究项目(2013LW015)

通讯作者:何润(1984-),男(回),讲师,硕士;研究方向:激光材料加工;Tel:(0564)3305690; E-mail:gaohaiyun19831229@163.com

网络出版日期: 2015-03-11 15:08; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905. TG. 20150311.1508.023. html 引文格式: 高海芸,何润,张冬云,等. 高 Al、Hf 含量对 Ni₃ Al 基合金激光焊接性能的影响 [J]. 中国表面工程,2015,28(2):90-100.

Gao H Y, He R, Zhang D Y, et al. Effects of high Al and Hf content on weldability of Ni₃Al based alloy by laser welding

[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 90-100.

用和军事工业中具有广阔的应用前景[1-6]。但是 Ni₃ Al 基合金脆性,决定了其铸件可焊性很 差[7-8]。通过对 Ni₃ Al 基合金激光焊接的研究可 以得出,合金元素 Al、Hf 可以提高可焊性,结合 工艺手段,可以获得满足要求的焊缝。国内外大 量科研工作者都对 Ni₃ Al 基合金进行大量的 研究[9-14]。

如果高温合金中 Al, Ti 的含量较低并未形 成共晶时,焊接热裂纹倾向小,如增加其含量,形 成 γ' 相 沉 淀 强 化, 就 会 导 致 热 裂 纹 倾 向 增 大[15-16]。同时高温合金低熔点相对热裂纹的影 响也是不容忽视的[17-18]。晶粒度大的母材,焊缝 中成分偏析以及 $(\gamma+\gamma')$ 相的存在,是热裂纹产生 的主要原因[19]。对于 Ni₃ Al 基合金焊接,冶金方 面和焊接工艺方面都对裂纹的敏感性起着很重 要的作用[20-21]。

文中研究了 Al、Hf 元素对 Ni。Al 基合金的 焊接性能的影响,对比不同成分合金的焊缝裂纹 敏感性,并分析其焊缝凝固机理,同时从预热温 度、激光光源性质等方面进一步研究了激光焊接 工艺。

1 材料和方法

试验材料是 Ni₃ Al 基铸造合金 MX246A 合 金,通过对合金 Al、Hf 元素的质量分数进行微 调,制作2号和3号合金,用以研究凝固温度区间 与低熔点共晶对焊接性能的影响,成分如表 1 所示。

表 1 MX246A、2 号和 3 号合金的主要元素成分

Table 1	Elements	compositions	of th	e MXZ46A	, No. 2	and No	o. 3 alloy	

(w/%)

Alloy	Al	Cr	Zr	В	С	Ti	W	Mo	Y	Hf	Ni
MX246A	8. 2	7.8	0	0.05	0.1	1	2	4	0.01	0.5	Bal.
No. 2 alloy	10.0	7.8	0	0.05	0.1	1	0	2	0.01	0.5	Bal.
No. 3 alloy	8.2	7.8	0	0.05	0.1	1	2	4	0.01	1.2	Bal.

1.1 合金母材组织

图 1 为 MX246A 合金组织,有过共晶合金组 织,其中颜色发亮的是 γ'相(即 Ni₃ Al 相),被腐蚀 较暗的为 γ 相。合金组织主要由枝晶干和枝晶间 两部分组成,枝晶干的基体为 γ' ,其上面均匀弥散 分布有网状 γ 相,枝晶间基体为 $(\gamma'+\gamma)$ 共晶。此 外,晶界上还存在少量的碳化物和硼化物,碳化物 颗粒尺寸较小,约 1~15 μm,硼化物含量极少。

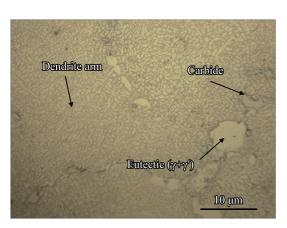


图 1 MX246A 合金的组织

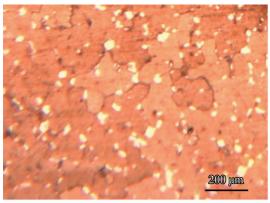
Fig. 1 Microstructure of the MX246A alloy

而 2 号合金显微组织和相组成与 MX246A 基本相同,但枝晶干与枝晶间所占比例不同,枝 晶间的共晶成分明显增多,主要是因为对合金中 Ni-Al 比例的调节,使其在 Ni-Al 系合金相图中 成分更靠近共晶点,导致枝晶间的 $(\gamma + \gamma')$ 共晶 增多,而在枝晶干区域中,γ′含量也较多,并且在 整个合金中的含量大约占到90%以上。

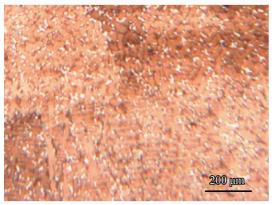
为研究晶粒度对 MX246A 合金焊接性能的 影响,选不同晶粒度的合金,图 2 为不同晶粒度 合金材料的显微组织,它们的相组成基本相同, 但晶粒粗细有一定区别,主要是因为枝晶干和共 晶成分所占比例不同,图 2(a)中枝晶干比重较 多,共晶相成分较少;而图 2(b)的枝晶干比重少, 共晶相成分较多。

1.2 焊接试验

采用3种设备对材料进行平板自熔焊试验。 分别是:Nd:YAG 固体激光器(德国 Rofin-sinar 公 司 2 500 W 灯泵浦固体激光器)(波长 1.06 μm,透 镜焦距为 120 mm); Slab CO₂ 激光加工系统(采 用 300 mm 焦距的旋转抛物面反射聚集镜聚焦) 和 HPDL-4D01 半导体激光器。



(a) Coarse grain



(b) Fine grain

图 2 不同晶粒度 MX246A 合金显微组织 Fig. 2 Microstructure of the MX246A alloy with different grain sizes

1.3 试样制备

用 Ar 作为保护气体,其流量 15 L/min。激光光斑焦点位于工件的表面,试验选用厚度为 0.8 mm,2 mm 的试样,用激光进行扫描,将所得组织以及能谱成分进行对比分析。

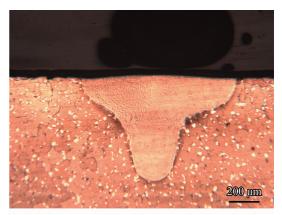
2 MX246 系列激光焊接

2.1 MX246A 材料激光焊接工艺性能

图 3 为在相同参数下(功率 1 000 W,速度 0.5 m/min)激光焊接两种晶粒度(粗晶晶粒度 为一6.9,细晶晶粒度为一4 级)的试样,图 3(a)为粗晶试样,所得焊缝熔深深,实现了激光深熔焊,而图 3(b)为细晶的试样,表现为熔深较浅的热导焊,细晶焊缝枝间相较多,而粗晶中焊缝枝间相较少。晶粒较大时,所获得焊缝的熔深也大。这是由于晶粒度不同,所造成的材料导热状态、表面状态、对激光的吸收率等方面的差异造成的。当功率在 1 500 W 以上,细晶的材料才实现深熔

焊接。

试验还发现,母材的晶粒组织对焊缝的晶粒组织的生长具有遗传性,熔池凝固往往按母材晶粒的生长方向,因此母材的晶粒度对焊缝晶粒度有一定的决定性。母材焊缝交界处是裂纹发生的敏感区域,母材晶粒粗大会使晶界偏析程度更重,而细化母材晶粒有助于减小晶界偏析,降低晶界杂质含量,影响焊接质量。



(a) Coarse grain



(b) Fine grain

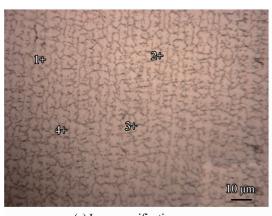
图 3 功率 $1\ 000\ W$ 和速度 $0.5\ m/min$ 时制备的不同晶 粒度的焊缝形貌

Fig. 3 Morphologies of the different grain sizes welded at 1 000 W and 0.5 m/min

2.1.1 MX246A 合金焊缝凝固特点

2.1.1.1 低速度扫描凝固特点

图 4 为低速扫描(0.2 m/min)时焊缝区微观形貌,其枝间相含量较多且相互连通,图 4(a)为焊缝组织,树枝晶较小,图 4(b)为扫描电镜下对树枝晶微区形貌的进一步观察,发现枝晶间相呈簇状,彼此连通,这说明在熔池凝固后期的固液阶段时,低速扫描时的枝间液相有着更好的流动性和填充性,可以降低焊缝裂纹的敏感性。



10 µm

(a) Low magnification

(b) High magnification

图 4 低焊速焊缝区的微观组织

Fig. 4 Microstructure of the weld zone under low welding speed

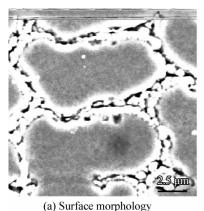
表 2 为对低速焊接的凝固组织中枝晶干和 枝晶间区域(图 4(a)中)进行能谱点分析结果,发 现枝晶间 Hf 元素明显上升,说明低速下 Hf 元素 填充枝间,延迟裂纹产生。

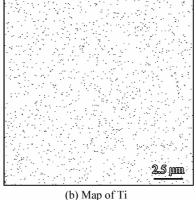
之后再测得的元素面分布结果(见图 5)。结果表明:低速扫描时 MX246A 合金焊缝树枝晶中,Ti、Hf 元素在枝晶间偏聚,Cr 和 Mo 偏聚不大。

表 2 低焊速焊缝能谱分析结果

Table 2 EDS results of the weld under low welding speed (w/%)

Point	Element									
FOIII	Al	Ti	Cr	Ni	Mo	Hf				
1	7.01	1.50	6.86	77.77	3.39	3.47				
2	4.72	1.33	7.48	72.05	3.60	10.82				
3	8.32	1.69	6.76	79.68	2.27	1.27				
4	5.43	1.23	6.90	79.95	3.01	3.47				





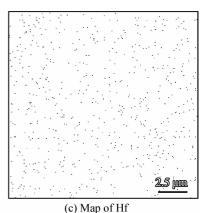


图 5 低速扫描时焊缝区的 Ti 和 Hf 元素分布

Fig. 5 Distribution of Ti and Hf in weld zone under low welding speed

2.1.1.2 高速度扫描凝固特点

图 6 为高速扫描(2 m/min)时焊缝区微观形貌,图 6(a)为焊缝组织,树枝晶较为粗大,枝晶间相呈粒状,而且彼此孤立;图 6(b)为扫描电镜下对此组织进一步观察的结果。

从图中可以看出:枝晶间相比例较少,这说明在焊缝凝固过程中,树枝晶晶间的液相流动性

较差,对枝晶间区域不能有效填充,与低速扫描组织相比,其焊缝组织稀疏,枝间相含量少而且呈粒状分散分布。

表 3 是高速焊接下凝固组织选取 4 点(如图 6(a)所示)的枝晶偏析分析结果,发现枝晶间 Hf 元素变化不大,说明高速下 Hf 元素并未填充满枝间,产生了裂纹。

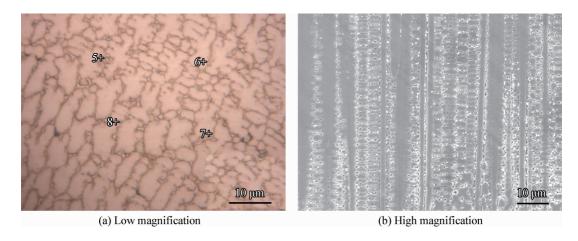


图 6 高焊速时焊缝区的微观组织

Fig. 6 Microstructure of the weld zone under high welding speed

表 3 高焊速 YSZ 脱落区域表面元素的含量

Table 3 Surface element contents of the YSZ spallation area under high welding speed (w/%)

Λ	Element										
Area -	Al	Ti	Cr	Ni	Mo	Hf					
5	7.88	1. 17	8.28	76.87	2.90	2.90					
6	6.65	2.83	8.19	71.96	7.69	2.69					
7	4.59	1.70	9.92	78.84	4.07	0.88					
8	9.02	1.18	7.96	78.31	3.53	0					

图 7 为高速扫描与低速偏析对比,可见高速扫描 MX246A 合金,焊缝树枝晶偏析状态与低速趋势大致相同,焊缝树枝晶 Ti、Hf 元素在枝晶间偏聚,但 Mo、Cr 在枝晶间的偏聚程度变大。

图 8 所示高速扫描时元素面分析结果,表明,Ti、Hf、Mo元素在枝晶间偏聚,并且偏聚程度

明显增大。而以前试验得出, Mo 元素高对材料的抗裂性产生不利影响。所以,焊接过程中应尽量减少 Mo 元素的偏聚,同时应注意焊缝的保护,避免熔池氧化。

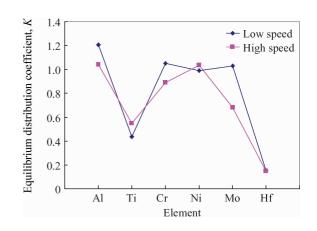


图 7 不同扫描速度下焊缝树枝晶偏析状态 Fig. 7 Dendritic segregation of the weld under different speeds

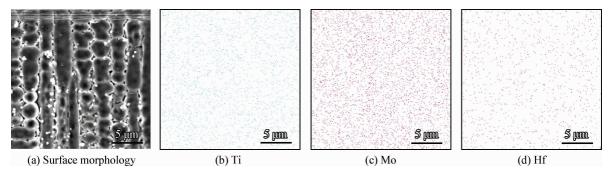


图 8 高焊速时焊缝区的各元素分布

Fig. 8 Element distribution of the weld zone under high welding speed

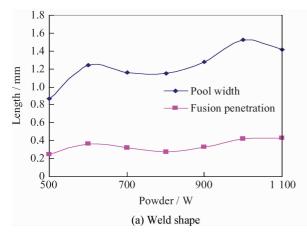
2.2 富 Al 合金的焊接性

2号合金 Al 元素含量增加,使合金成分更接 近共晶点,在母材组织中共晶相数量明显的增 加。经试验测得,2号合金平衡凝固温度区间比 MX246A 合金的凝固温度区间减少了 15 ℃ 左右。

2.2.1 富 Al 合金的低速焊接

用低焊速扫描晶粒度小的2号合金发现,在 功率 1 500 W 以上,扫描速度过慢试样会被切 断,在未完全断裂区焊缝中心有纵向裂纹,说明 断裂是由纵向裂纹贯穿焊缝所致,用提高焊速和 降低功率的方法可以避免切断现象。

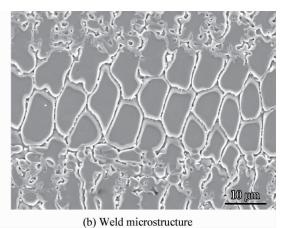
选择更小功率进行低焊速试验,但小功率难 以达到深熔阈值,只能以热导焊方式进行, 图 9(a)为在扫描速度 0.1 m/min 时的焊缝形状



统计得出,在低速扫描时功率增加,焊缝熔宽变 大,但熔深增大不明显,始终在 0.5 mm 以下。

对低焊速焊缝观察,发现热导焊材料的抗裂 性能较好,所有参数下均未发现裂纹。图 9(b)是 2号合金低速焊缝组织,并未发现所预期的因脆 性温度区间变小所带来的更多枝晶间共晶相,显 微组织反而以枝晶干为主,几乎没有枝间相,可 见枝间相的缺失使得合金的裂纹倾向增大。

表 4 为 2 号合金焊缝组织中任意选取枝晶干 和枝晶间进行元素成分测定,平均枝晶干与枝晶 间成分,元素成分,并计算平衡分配系数,图 10 为计算结果与 MX246A 合金对比,合金元素的偏 析趋势大致相同,2号合金焊缝中 Mo 的偏析较 大,但就 Mo 元素含量与 MX246A 合金相比已经 减少了很多。



低速扫描时焊缝的形状和组织

Shape and microstructure of the weld under low welding speed

表 4 2 号合金凝固组织的元素分布状态

Element distribution of the solidification structure in No. 2 alloy Table 4

(w/%)Area Αl Τi Cr Ni Мо Hf Interdendritic 21.21 1.71 4.44 71.29 0.75 0.6 Dendrite arm 4.23 74.73 18.97 1.19 0.88 0 Interdendritic 4.83 74.08 0.75 19.38 0.90 0.05 Dendrite arm 17.70 0.87 4.64 76.47 0.32 0 Interdendritic 12.03 1.45 5.55 79.14 0.73 1.1 Dendrite arm 74.67 18.84 0.49 5.17 0.83 () Interdendritic 16.61 4.84 4.69 70.92 1.73 1.21 Dendrite arm 16.79 0.93 4.44 76.65 0.93 0.25 Interdendritic average 17.31 2.23 4.88 73.86 0.99 0.74 Dendrite arm average 18.08 0.87 4.62 75.63 0.74 0.06 Equilibrium distribution coefficient, K 1.04 0.39 0.95 1.02 0.75 0.08

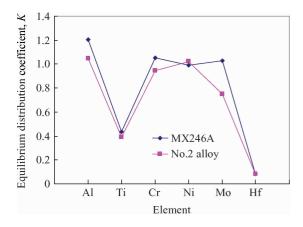


图 10 MX246A 合金与 2 号合金偏析状态比较 Fig. 10 Comparison of the segregation state between MX246A and No. 2 alloy

2.2.2 富 Al 合金的高速焊接

对比高速扫描和低速扫描时焊缝的结晶状态有很大不同。图 $11 \to 2$ 号合金在 $Slab CO_2$ 激光扫描下的焊缝组织,其中图 11(a)(c) 是低速 (0.1 m/min) 的焊缝平磨面,结晶均匀,组织细密,出现的少量柱状晶也被树枝晶包围。图 11(b)(d) 是高速下的焊缝平磨面,焊缝组织以不同生长方向的柱状晶为主,呈块状排列,晶粒都比较粗大,彼此之间界限非常明显,晶界形状比较平直,十分有利于裂纹的扩展,可在晶界处观察到不同程度沿晶裂纹。这是由于高焊速下形成方向性很明显的柱状晶,导致枝间相形态由细密的羽毛状 $(\gamma+\gamma')$ 共晶体变成粒状 γ' 相,产生裂纹。

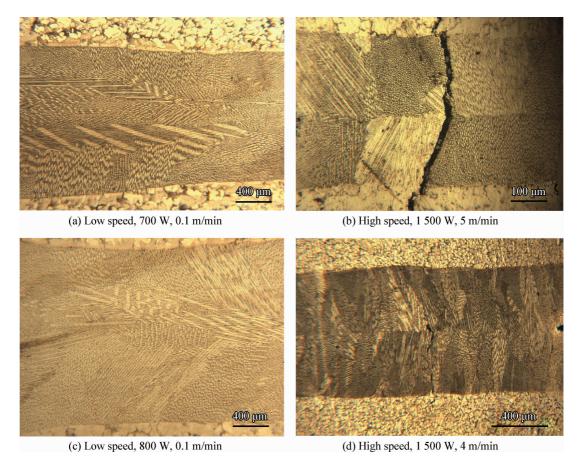


图 11 不同扫描速度下焊缝的结晶状态

Fig. 11 Crystallized state of the weld under different welding speeds

2.2.2.1 预热对焊接裂纹的影响

试验将材料在加热炉(300℃,600℃)中保温 30 min 后对其焊接。所得焊缝在显微镜下观察 并计算微观裂纹敏感性,进行比较,结果如图 12 所示。将合金预热至 600 ℃后,裂纹敏感性与预 热至 300 ℃时相比并没有明显的降低,只有在高 功率、高焊速时有较为明显的改善效果。在高功率、高焊速时,材料的冷却速度较快,而对母材预热能够使焊缝的冷却幅度减小,从而降低冷却速度,使焊缝凝固过程中所产生热应力减小。而功率较小或焊速较低时,焊缝的冷却速度本身就很小,因此预热对冷却速度的改变能力就不会很大。

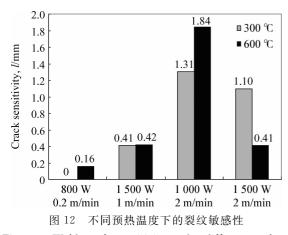


Fig. 12 Weld crack sensitivity under different preheating temperatures

2.2.2.2 光源性质对焊接性的影响

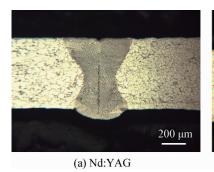
试验中用了3种激光加工系统对材料焊接,不同激光器激光波长、聚焦状态都有较大区别,反映到焊接性能上也有一定影响。其中Nd:YAG固体

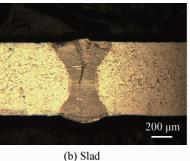
激光器波长较短,因此材料对 Nd: YAG 激光吸收率也较高,但其光束质量比 SlabCO₂ 激光器稍差。Slab CO₂ 激光器波长较长,材料的能量吸收率较低,采用 300 mm 焦距聚焦镜时,焦斑半径为0.132 mm。如用无离焦量焊接,当材料对激光吸收能量相同时,对比 Nd: YAG 激光器, SlabCO₂ 激光焊缝熔宽较小,通常在 1.5 mm 以下,但由于其较高的能量密度,其焊缝熔深却较大,所以就容易得到窄而深的焊缝,如图 13 所示。

试验中选择半导体激光器对材料进行扫描,由于半导体激光器波长更短(0.8 μm),实验得到了较大熔深。

2.2.3 富 Al 合金的焊缝凝固过程分析

图 14 为高倍扫描电镜对 2 号合金焊缝进行观察,发现高速扫描与低速扫描时焊缝凝固组织类似,枝晶干占据了晶体大部分,枝晶间只有少量的粒状 γ' 相。





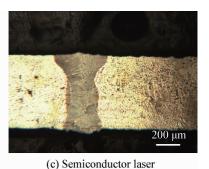
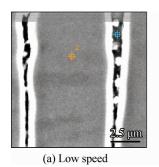


图 13 高功率密度高焊速时的焊缝形状

Fig. 13 Weld shapes under high power density and high speed



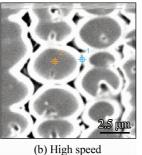


图 14 2 号合金的焊缝形貌

Fig. 14 Weld morphology of the No. 2 alloy

2.3 富 Hf 合金的焊接性能

在镍基合金焊接过程中发现,在凝固后期枝晶间的富 Hf 熔体具有很好的流动性、浸润性和趋肤效应,是有利于提高合金焊接性的因素[15]。

因此,在 MX246A 合金的基础上,在不改变合金高温性能的前提下适当增加 Hf 元素的含量,以期通过 Hf 元素的作用,提高合金可焊性。

2.3.1 富 Hf 合金焊缝裂纹率

用不同参数对 MX246A 和 3 号合金进行激 光平板扫描焊,观察焊缝裂纹并计算裂纹敏感性,如图 15 所示,在低焊速下,3 号合金对焊接性能改善比较显著,得到了无裂纹焊缝,Hf 元素枝晶间能够进行良好的填充,随之焊速增加,Hf 元素枝晶间填充远不及枝晶间距,裂纹敏感性增大。但在焊速增加后,材料的抗裂性能优势逐渐不明显。

图 16 为 MX246A 合金和 3 号合金进行激光焊接(激光功率为 800 W,扫描速度为 0.2 m/min) 所得到的微观组织,其中 16(a)为 MX246A 合

(w/%)

金,16(b)为3号合金,结果显示在 MX246A 合金 所获得的低裂纹深熔参数下对3号合金进行试验,发现3号合金平磨面及横截面上都没有焊接

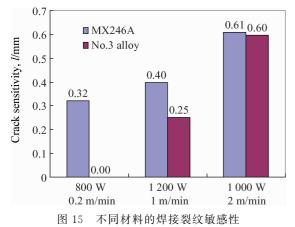
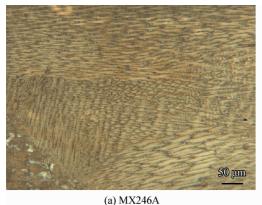


Fig. 15 Crack sensitivity of different alloys

裂纹,说明3号合金焊接性能较好,获得了良好的无裂纹深熔焊缝。

2.3.2 富 Hf 合金焊缝偏析状态

表 5 为 3 号合金焊缝组织中任意选取枝晶干和枝晶间进行元素成分测定,平均枝晶干与枝晶间成分,并计算平衡分配系数。图 17 为 3 种合金焊缝组织成分偏析,可见增加 Hf 元素使 Ti、Mo的偏析程度降低,根据之前的试验可知 Mo 元素的偏析会导致裂纹的发生,而 3 号 Mo 元素偏析较小,这有利于裂纹的控制。图 18 为高低不同焊接速度情况下枝晶间 Hf 元素含量,低焊速3 号枝晶间区域 Hf 元素含量是两种合金的两倍左右,在高焊速时 Hf 元素含量均较低,3 号合金中含量仍然略高于另两种合金。枝晶间较高的 Hf 的趋肤效应,从而降低焊缝的裂纹倾向。



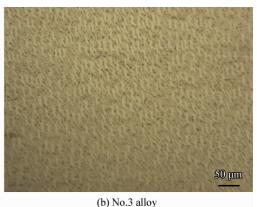


图 16 MX246A 与 3 号合金焊缝比较

Fig. 16 Comparison of the weld of the MX246A and No. 3 alloy

表 5 3 号合金凝固组织的元素分布状态

Table 5 Element distribution of the solidification structure in No. 3 alloy

Table 5 Element (Table 3 Element distribution of the solutineation structure in 100.3 andy							
Area	Al	Ti	Cr	Ni	Mo	Hf		
Interdendritic	10.72	1.15	12.57	71.25	2.14	2.18		
Dendrite arm	15.97	0.98	7.40	73.96	1.11	0.58		
Interdendritic	12.69	1.06	8.64	74.97	1.17	1.46		
Dendrite arm	16.78	1.36	8.39	71.78	1.69	0		
Interdendritic	15.99	0.89	7.99	73.24	1.16	0.74		
Dendrite arm	16.88	1.09	7.72	72.49	1.29	0.52		
Interdendritic	9.30	1.75	9.11	76.87	1.78	1.19		
Dendrite arm	15.54	0.19	7.14	74.55	1.84	0.75		
Interdendritic average	12.16	1.21	9.58	74.08	1.56	1.61		
Dendrite arm average	16.29	0.90	7.66	73.20	1.48	0.46		
Equilibrium distribution coefficient, K	1.34	0.75	0.80	0.99	0.95	0.29		

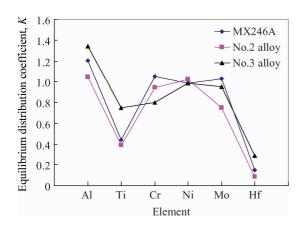


图 17 不同合金焊缝的偏析状态

Fig. 17 Segregation state of different alloy weld

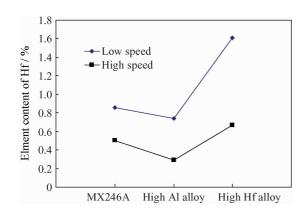


图 18 3 种焊缝枝晶间的 Hf 元素含量 Hf content of interdendritic weld in the three

3 结 论

Fig. 18

alloys

文中主要研究了 Al、Hf 元素对 Ni₃ Al 基合金的焊接性能的影响,对比不同成分合金的焊缝裂纹敏感性,并分析焊缝凝固机理。同时从预热温度、激光光源性质等方面进一步研究了激光焊接工艺,结论如下:

- (1) Al 元素的增加虽然使合金成分上更接近共晶点,但由于焊缝凝固的不平衡性造成伪共晶区偏移,焊缝残余液相成分反而离共晶区较远,致使凝固组织(γ+γ')共晶相减少。
- (2) Hf 元素的增加在焊缝凝固后期对枝晶间区域实现了良好的填充,而且枝晶间最终固相形态由粒状 γ'相变成了细密的羽毛状(γ+γ')共晶体,以上原因综合作用使得合金的裂纹敏感性明显降低。
 - (3) 对材料进行预热能够降低焊缝的冷却速

度,仅在冷却速度较快时能够在一定程度上降低 裂纹的敏感性,但仍然没有完全消除裂纹。

(4) 采用波长较短、光斑面积较大的半导体激光器能够在热导焊的机理下增加焊缝的熔深熔宽,并保持较大的焊缝成型比,得到无裂纹组织。

参考文献

- [1] James C Williams, Starke, E A. Progress in structural for aerospace system [J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5775-9.
- [2] Sauthoff G. Multiphase intermetallic alloys for structural applications [J]. Intermetallics, 2000, 8(9/10/11): 1101-9.
- [3] Kayacana R, Varol R, Kimilli O. The effects of pre- and post- weld heat treatment variables on the strain- age cracking in welded Rene 41 components [J]. Materials Research Bulletin, 2004, 39(14/15); 2171-86.
- [4] Li H X, Jones R H. Effect of pre-welding heat-treatments on welding a two-phase Ni₃ Al alloy [J]. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1995, 192; 563-569.
- [5] 李运菊、Ni₃Al 的显微组织与压缩性能 [D]. 西安: 西安理工大学, 2002.

 Li Y J. Microstructure and compressive property of Ni₃Al alloys [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2002 (in Chinese).
- [6] 张勇钢,韩亚芳,陈国良,等. 金属间化合物结构材料 [M]. 北京: 国防工业出版社,2001.

 Zhang Y G, Han Y F, Cheng G L, et al. Intermetallic compound structure material [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001 (in Chinese).
- [7] Li J, Wang H M. Microstructure and mechanical properties of rapid directionally solidified Ni-base superalloy Rene 41 by laser melting deposition manufacturing [J]. Materials Science and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2010, 527(18/19); 4823-9.
- [8] David S A, Jemian W A, Liu C T, et al. Welding and weldability of nickel-iron aluminides [J]. Welding Journal, 1985, 64(1): 22-28.
- [9] Rush M T, Colegrove P A, Zhang Z. An investigation into cracking in nickel-base superalloy repair welds [J]. Advanced Materials Research, 2010, 89-91; 467-472.
- [10] Sidhu R K, Richards N L, Chaturvedi M C. Post-weld heat treatment cracking in autogenous GTA welded cast Inconel dagger 738LC superalloy [J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(2): 202-213.
- [11] Maguire M C, Edwards G R, David S A. Weld ability and hot ductility of chromium modified Ni₃Al alloys [J]. Welding Journal, 1992, 71(7): 231-242.
- [12] 魏标志,钱百年,李忠库,等. 含 Zr 的 Ni₃ Al 合金中焊接

热裂纹机理的研究 [J]. 材料科学与工程, 1999, 17(2): 52-57

Wei B Z, Qian B N, Li Z K, et al. Hot cracking in welds of Ni₃ Al alloys containing Zr [J]. Materials Science and Engineering, 1999, 17(2): 52-57(in Chinese).

- [13] 肖旋,许辉,秦学志,等. 3 种铸造镍基高温合金热疲劳行为研究 [J]. 金属学报,2011, 47(9): 1129-34.

 Xiao X, Xu H, Qing X Z, et al. Thermal fatigue behaviors of three cast nickel base super alloys [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(9): 1129-34 (in Chinese).
- [14] 郑运荣,蔡玉林,阮中慈,等. Hf 和 Zr 在高温材料中作用 机理研究 [J]. 航空材料学报,2006(3):25-34. Zheng Y R, Cai Y L, Ruan Z C, et al. Investigation of effect mechanism of hafnium and zirconium in high temperature materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006(3): 25-34 (in Chinese).
- [15] 郑运荣. 铪对铸造镍基高温合金焊接裂纹的影响 [J]. 焊接学报, 1988(3):161-170.

 Zheng Y R. Influence of Hf on weld craking for nikel base superallots [J]. Transactions of The China Welding Institution, 1988(3): 161-170 (in Chinese).
- [16] Li H X, Jones R H. Effect of pre-welding heat-treatments on welding a 2-phase Ni₃ Al alloy [J]. Materials Science

- and Engineering A-structural Materials Properties Microstructure and Processing, 1995, 192: 563-569.
- [17] Zhang X E, Cao X, Luo H L, et al. Simulation of Ni₃ Albased alloy and investment casting process of its thin wall parts [J]. Proceedings of the Fourth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies, 2006 (1): 101-108.
- [18] Chen G H, Chen C. Investigation of the heat-affected zone fracture in Ni₃Al welds [J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(5): 1076-82.
- [19] 熊建刚, 胡席远, 陈祖涛. 激光焊接铸造镍基高温合金工艺研究 [J]. 中国激光, 1996, 23(12): 1107-11.

 Xiong J G, Hu X Y, Cheng Z T. Study on laser welding of cast nickel-base superalloy [J]. Chinese Journal of Laser, 1996, 23(12): 1107-11 (in Chinese).
- [20] 毛智勇. 金属间化合物 Ni₃ Al 的电子束焊接性研究 [J]. 航空制造技术, 1999 (S1): 34-37.

 Mao Z Y. Study on EBW weldability of intermetallic compound Ni₃ Al [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1999(S1): 34-37 (in Chinese).
- [21] Molian P A, Yang Y M, Srivatsan T S. Laser-welding behavior of cast Ni₃ Al intermetallic alloy [J]. Journal of Materials Science, 1992, 27(7): 1857-68.

(责任编辑:陈茜)

第十届海峡两岸工程材料研讨会将在内蒙古包头举行

由中国机械工程学会材料分会和台湾大学共同发起和组织,于 2002 年 11 月在台湾大学首次成功举办了"海峡两岸第一届应用材料研讨会",为两岸工程材料的学术交流和研讨、增进两岸同胞的感情、建立相应的联系、达到两岸资源互享、共同开发出更优异材料及材料应用技术奠定了良好的基础。随后,于 2004 年~2014 年相继举办了第二届至第九届两岸工程材料研讨会。

在两岸科技学术交流更为密切的情况下,为进一步繁荣两岸在工程材料方面的研究、开发及应用, "第十届海峡两岸工程材料研讨会"将于 2015 年 8 月 14-16 日在内蒙古自治区包头自治区包头市召开,会议由中国机械工程学会材料分会和内蒙古科技大学共同承办。

本届研讨会的主题为"工程材料研究及其产业应用"。研讨会将包括大特邀报告、分主题邀请报告和交流等。会议还将安排丰富多彩的学术参观、技术访问等活动。征集的论文要求为未在正式刊物公开发表的原始研究成果及综合评述等。

(摘自 中国机械工程学会网站)