

熔焊工艺在高温合金焊接性能优化的研究现状

王雪融¹, 王诗洋², 马国峰¹, 孙元², 侯星宇²

(1. 沈阳大学, 沈阳市微弧氧化技术及应用重点实验室, 沈阳 110044; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

摘要: 高温合金是一种具有良好的加工性能、疲劳性能和断裂韧性等力学性能的合金材料并在航空航天领域得到了广泛应用。焊接技术作为传统的机械加工工艺与连接方法, 广泛地应用于汽车制造、造船和航空航天等领域, 在国民工业中占据着非常重要的地位。而熔焊工艺是目前研究高温合金应用最多的焊接工艺。然而, 由于服役环境日益严苛, 高温合金化学组成日趋复杂, 焊接难度随之增加, 高温合金的焊接性能受到影响。因此, 高温合金的焊接工艺研究具有重要意义。该文主要介绍了高温合金熔焊工艺的主要研究进展, 以及围绕裂纹形成机理、焊接工艺对焊缝组织及性能的影响开展对熔焊焊接性的研究。与此同时, 提出了解决焊接裂纹的方式, 提高合金各项性能, 为高温合金焊接结构的加工制造提供指导。

关键词: 高温合金; 焊接性; 熔焊工艺; 组织; 性能

中图分类号: TG442;TG401 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20231106002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20231106002)

Research status of fusion welding process in welding performance optimization of superalloy

Wang Xuerong¹, Wang Shiyang², Ma Guofeng¹, Sun Yuan², Hou Xingyu²

(1. Shenyang Key Laboratory of Micro-arc Oxidation Technology and Application, Shenyang University, Shenyang 110044, China;
2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Superalloy is an alloy material with good mechanical properties such as processing performance, fatigue performance and fracture toughness, and it has been widely used in the aerospace field. As a traditional mechanical processing technology and connection method, welding technology is widely used in automobile manufacturing, shipbuilding, aerospace and other fields, and it occupies a very important position in the national industry. The fusion welding process is the most widely used welding process for superalloy. However, due to the increasingly harsh service environment, chemical composition of superalloy becomes complex, welding difficulty is increasing, and welding performance of superalloy is affected. Therefore, it is of great significance to study welding process of superalloy. The main research progress on fusion welding process of superalloy is mainly introduced in this paper, and weldability of fusion welding is studied around crack formation mechanism and influence of welding process on microstructure and properties of welds. At the same time, the way to solve welding crack is proposed to improve properties of superalloy and provide guidance for the processing and manufacturing of welded structure of superalloy.

Key words: superalloy, weldability, fusion welding process, microstructure, properties

0 前言

高温合金是指一类具备优异高温强度, 且在 600 ℃ 以上环境以及特定应力条件下可以长久工作的金属

材料, 也被称为“超级合金”^[1]。由于它的热稳定性好、比强度高、弹性模量高、热膨胀系数小、力学性能好^[2]被广泛应用于航空航天、石油化工等领域^[3]。但是, 其合金中 Al, Ti 等元素活性高, 在冶炼时容易发

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 两机专项子课题 (J2019-VI-0018-0133); 国家自然科学基金面上项目 (52175368); 国家自然科学基金青年项目 (52201054); 重点研发计划子课题 (2021YFB3700401); 沈抚改革创新示范区管理委员会产业创新局揭榜挂帅项目 (2021JH15)。

生氧化(氮化)反应,形成夹杂,影响合金的洁净度。W, Mo, Nb, Al, Ti 等元素的含量较高,易造成偏析及结构不均;合金对保护气体的成分要求极高,加工性能差等缺陷就要求学者们对其焊接工艺展开深入的研究。

在高温合金的实际应用中,焊接技术占主导地位,应用范围最广。一般来说,可以采用氩弧焊、电子束焊、激光焊^[4-5]等工艺。焊接时,焊缝组织是由一种不平衡的快速凝固过程所决定的,并且热影响区的微观结构也会因焊接热输入而发生变化^[6]。目前,国内外学者主要从焊接方式、工艺参数、焊接后焊缝组织性能、接头服役性能等几个方面对高温合金焊接进行了大量的研究,但对熔焊焊接性的研究却很少。该文基于现有文献介绍了高温合金熔焊工艺的主要研究进展;围绕裂纹形成机理、焊接工艺对焊缝组织、性能的影响开展对熔焊焊接性的深入性研究;研究了解决焊接裂纹的方式,为高温合金焊接结构的加工制造提供指导。

该文首先介绍了熔焊工艺主要分为氩弧焊、电子束焊、激光焊并分别对这三种焊接工艺展开介绍;紧接着介绍熔焊的焊接性,从焊接裂纹(凝固裂纹、液化裂纹、应变时效裂纹)入手,研究解决焊接裂纹的方式,同时,介绍了焊接工艺对熔焊焊缝组织与性能的影响;最后得出结论并对未来进行展望。

1 熔焊工艺

1.1 氩弧焊

氩弧焊又称 TIG,它是一种以氩气为保护气体,通过无损耗的焊条与工件间的热交换来实现的一种焊接方法。氩弧焊由于电弧功率小、焊缝形状美观、热量集中且易于调整、适应性强、有高稳定性、经济性好,在焊接加工中显示出了独特的优势^[7]。近年来,氩弧焊技术因其设施简单、可塑性好、效率高、成本低廉、焊缝无焊渣而在各行各业倍受青睐^[8-10]。

氩弧焊又分为直流氩弧焊和脉冲氩弧焊。近年来,国内外学者对直流氩弧焊和脉冲氩弧焊展开了一系列的研究。王涛等学者^[11]采用脉冲氩弧焊对 Inconel 601H 高温合金进行焊接并设计不同工艺参数,研究工艺参数对焊缝晶粒大小的影响,发现:采取适当的工艺参数可以解决焊缝晶粒粗大的问题并提升焊接接头性能,进而提升焊接质量。张晓鸿等学者^[12]采用脉冲氩弧焊方法对 Inconel 690 高温合金进行了

堆焊试验,堆焊过程如图 1 所示,并进一步优化焊接工艺,发现:通过增加峰值电流、脉冲频率和占空比等参数,可以使焊接接头的晶粒细化;采用不同的脉冲处理参数,实现焊接接头的更准确的热输入,从而改善焊接接头的微观结构,并控制沉淀相的形态与分布。王祯等学者^[13]采用直流氩弧焊对 K487 高温合金进行焊接,并研究焊接接头的元素组成和屈服强度,发现:焊接接头与母材的元素分布较为均匀,无显著偏析;焊接接头的室温屈服强度比母材提升不少。许鸿吉等学者^[14]采用直流氩弧焊对 GH4169 高温合金进行焊接,并对其接头高温力学性能和接头组织进行了分析和研究,发现:焊接接头的高温抗拉强度比母材好,但其塑性明显降低,而高温持久性能与母材相近。Janaki Ram 等学者^[15]利用脉冲电流调控 Inconel 718 焊接接头 Laves 相形貌,发现:在焊接过程中,脉冲电流增加了焊接冷却速度,有效地细化焊缝中的晶粒,并能有效地提高接头的拉伸性能。

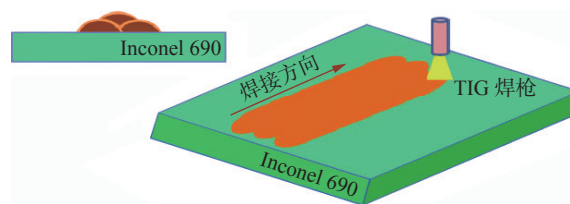


图 1 脉冲氩弧焊平板堆焊示意图^[12]

Fig. 1 Schematic diagram of overlaying on flat plate by pulsed TIG^[12]

根据上述研究可以得知,焊接工艺参数(如焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速度等)会影响高温合金氩弧焊接头的组织及性能。因此,研究影响氩弧焊工艺的影响因素对焊接质量与效率的提升存在着十分重要的现实意义。与此同时,氩弧焊技术存在熔深差、材料成分变化敏感、生产效率低等问题,这些问题严重制约了氩弧焊技术的发展。因此,应加快研发绿色、高效、合理的新型高温合金焊接技术。

1.2 电子束焊

电子束焊是一种利用高能量密度的电子束实现快速焊接的连接方法。其工作原理是利用电子枪的阴极直接或间接地加热并将电子释放出来,然后在高压静电场的加速作用下,电磁场将其聚集起来,形成具有很高能量密度的电子束,将电子束作用在对接焊缝上,将焊缝附近的工件熔化,形成一个熔池,以此来完成对被焊零件的焊接。轰击工件时,大量的

动能转换成热能,因此,电子束焊拥有输入功率密度高、焊接热输入低、焊接后零件变形小、焊缝质量较高等特点^[16],已经在航空发动机制造领域广泛使用。

目前,已大量开展对高温合金电子束焊接的研究。李张辉^[17]对 GH4169 高温合金进行电子束焊接,研究焊接接头在不同温度下的高温疲劳性能,并得出结论:随着温度的升高,焊接接头的疲劳性能先降低后提高。嵇佳佳等学者^[18]对 GH625 高温合金进行电子束焊接,并研究焊接波形与焊缝成形、焊缝组织的关系,结果表明:扫描波形对焊缝表面成形无显著差影响,且焊缝成形均匀。谭观华^[19]对 K418 高温合金进行电子束焊接并研究工艺参数对焊接接头成形和裂纹的影响,并探究裂纹的形成机理,发现:在焊接过程中,由于成分偏析,在枝晶轴间存在大量的碳化物相和低熔点共晶相,会产生裂纹,如图 2 所示,控制焊接速度可以有效地降低焊接裂纹。Devendranath Ramkumar 等学者^[20]运用电子束焊接 Inconel 625 高温合金,得到无缺陷的焊接接头并对焊缝组织进行分析,发现拉伸试验在焊缝断裂,这主要是由于富 Mo 相的偏析,通过冲击试验,发现接头存在脆性相,韧性变差。程林等学者^[21]对 GH3044 与 GH2747 高温合金进行了电子束焊接,利用 SEM、金相分析、拉伸测试等方法对焊缝组织形貌和性能进行了分析,发现

焊缝的强度和显微硬度均大于母材。张子阳^[22]对 IC10/GH3039 高温合金进行电子束焊接,并研究不同焊接速度对焊接接头显微组织及力学性能的影响,发现:在不同焊接速度下,均未出现裂纹缺陷,并且拉伸断裂后焊接接头抗拉强度和断后伸长率远远高于母材。张明敏等学者^[23]对 GH4169 和 GH600 高温合金进行电子束焊接并研究不同焊接工艺对焊缝熔深、熔宽的影响,结果表明:影响熔深的参数依次为电子束流、加速电压和焊接速度,影响熔宽的参数依次为加速电压、电子束流和焊接速度。陆业航等学者^[24]用电子束焊对高温合金进行焊接并对其进行金相分析和显微硬度测试,试验结果表明:高温合金焊缝以奥氏体枝晶为主,近焊缝区母材奥氏体晶粒未长大,焊缝区域的显微硬度因复杂碳化物的熔解显著提高。

由此可见,由于电子束焊接过程中存在很大的温度梯度,从而导致了焊接过程中的局部残余应力的增加。焊缝中的残余应力不仅会导致焊接接头的刚性和稳定性下降,而且会严重影响焊接接头的疲劳强度、抗脆断和耐腐蚀等性能。采用电子束对高温合金进行焊接时,由于电子束快速加热、快速冷却,接头内部存在着显著的温差及合金元素的偏析,导致焊缝内应力集中,加速裂纹萌生和扩展,导致接头力学性能下降。因此,如何有效地控制接头的应力,

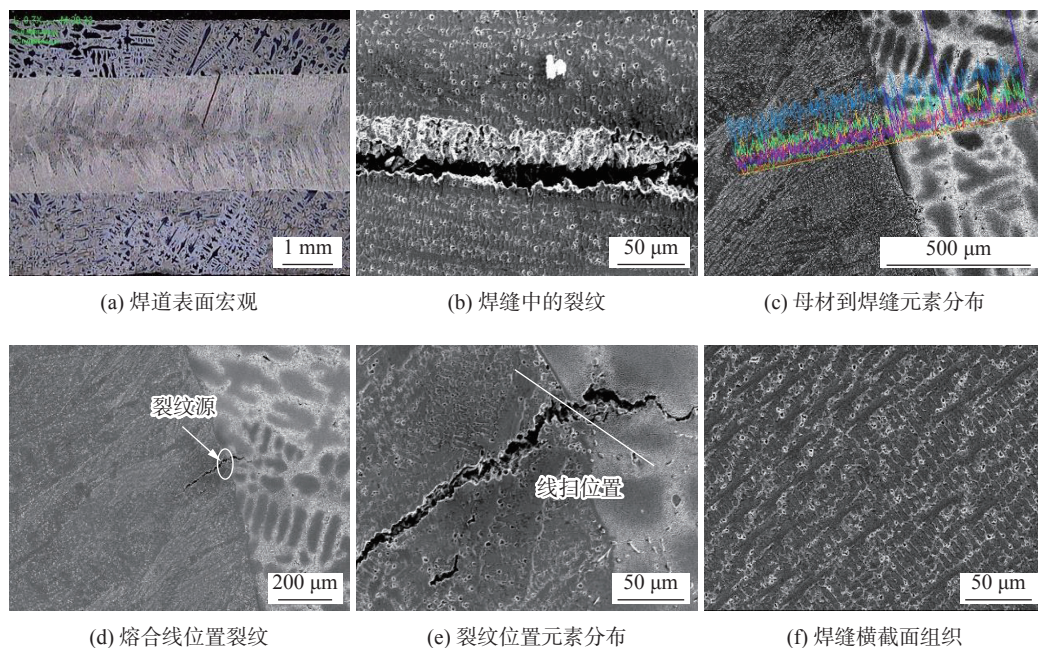


图 2 焊接过程中的裂纹^[19]

Fig. 2 Cracks in welding process^[19]. (a) macro of weld surface; (b) cracks in weld; (c) element distribution from base metal to weld; (d) crack at the position of fusion line; (e) element distribution at the position of crack; (f) cross-sectional microstructure of weld

降低焊接过程中合金的偏析,是改善高温合金焊接接头使用性能的关键。

1.3 激光焊

激光焊能量输入少、热影响区窄、焊后变形少、没有真空环境约束,特别适合在高温合金的焊接中使用^[25]。它的基本原理是:利用光子与材料碰撞产生蒸气,从而避免了残余的能量被反射出去。

目前,激光焊接技术已成为国内外研究的热点,主要对其焊接工艺、微观组织和焊接接头力学性能展开研究。刘喜旺等学者^[26]采用激光焊对 Nb521 高温合金进行焊接并研究不同的焊接工艺参数对焊缝成形及宏观形貌的影响,发现:焊缝熔宽随着焊接速度的增大而变小,焊缝塌陷有所改善,但焊缝连续性变差,并且从图 3 中可以看出焊缝的显微硬度高于母材和热影响区的显微硬度,热影响区的显微硬度与母材硬度相当。聂洪铭等学者^[27]采用激光焊对 TiAl/GH3030 高温合金进行焊接并研究了焊接接头的微观组织和力学性能,发现:焊缝在 TiAl 界面层硬度最高,主要与构成的金属间化合物有关,但这也可能是导致接头力学性能下降发生脆性断裂的主要原因。滕彬等学者^[28]分别采用氩弧焊和激光焊方法对 GH3128 高温合金进行焊接,并对比两种焊接方法对显微组织及力学性能的影响,结果表明:TIG 相比激光焊来说,焊缝的晶粒和分布于枝晶间和晶界处的碳化物尺寸较大,激光焊接头室温抗拉强度较低。丁琪等学者^[29]对 GH4169 高温合金激光焊工艺进行了研究,结果表明:GH4169 高温合金母材焊后时效和固溶时效焊接接头性能相当,与母材在固溶时效状态下的性能也基本相当。敖三三等学者^[30]对 Inconel 601 高温合金进行激光焊接并对其接头的显微组织进行研究,结果表明:焊缝主要由胞状和枝状两种亚结构组成,亚结构内有凝固亚晶界(SSGB)、凝固晶粒边界(SGB)和迁移晶粒边界(MGB),如图 4 所示。步贤政^[31]对 Inconel 601 高温合金进行激光焊接并讨论了该合金焊接接头的微观组织和力学性能,得出结论:焊接接头抗拉强度随着焊接热输入的增大呈现出先增大后减小的趋势,而断后伸长率则随着热输入的增大而增大,并且由于焊缝中存在大量碳化物,接头硬度比母材高。Caiazza 等学者^[32]使用激光焊接 Inconel 625 高温合金并研究焊接工艺参数对材料宏观成形的影响,发现:当焊接热输入为 40 J/mm 时,可以防止裂纹的产生;采用低热输入会导致晶粒

尺寸减小,从而获得更好的力学性能,这是由于快速冷却的结果。

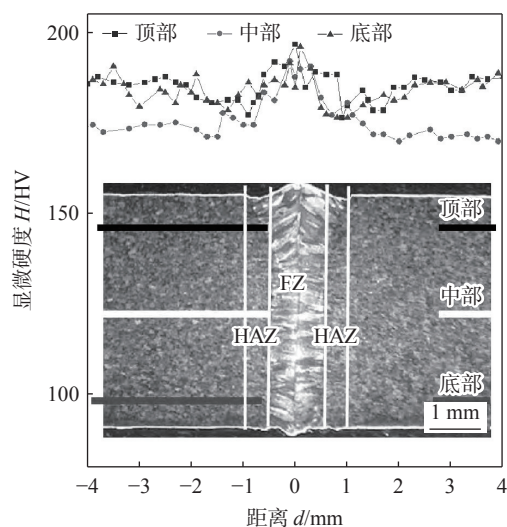


图 3 焊接接头显微硬度分布^[26]

Fig. 3 Microhardness distribution of welded joints^[26]

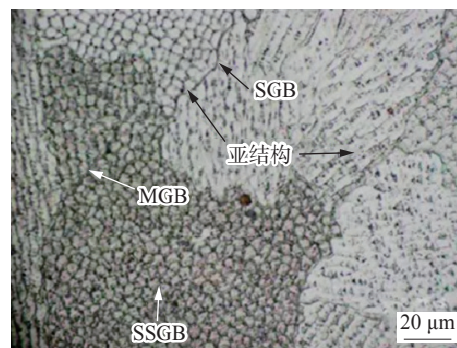


图 4 Inconel 601 焊缝中心处亚结构边界^[30]

Fig. 4 Substructural boundary at the center of Inconel 601 welds^[30]

综上所述,尽管目前已有许多学者在高温合金的激光焊接工艺和焊接接头性能等领域开展了大量的研究,但仍然缺乏系统性,并且对焊接工艺参数的描述很少;另外,激光焊接过程中,激光能量密度越大,熔池失稳越严重,导致焊缝内部气孔增多。因此,如何设计合适的焊接工艺参数及如何减少裂纹的出现是重中之重。

2 熔焊焊接性

焊接性是评价材料连接难度的重要指标。这是一种关于材料对焊接工艺适应性的描述,既包含了焊缝的性能,也包含了焊缝的服役特性。材料的焊接性受到材料、设计、加工及使用环境等多种因素的

影响。金属材料的焊接性是指在一定的工艺参数下,对材料裂纹敏感性,接头组织均匀性,接头力学性能等强性,以及所采用的技术措施的复杂程度等方面的综合评价^[33]。

2.1 焊接裂纹

高温合金的焊接性是制约其应用和推广的重要因素。焊接裂纹是引起焊接结构件破坏的重要因素,不仅严重危害着人员的生命和财产,而且给企业带来了重大的经济损失。由于高温合金中有大量的合金元素存在,导致在高温合金中存在严重的偏析,在冷却过程中形成低熔点共晶,由于低熔点共晶为脆性相,硬度高,容易造成应力集中而产生裂纹^[34]。焊接裂纹又分为凝固裂纹、液化裂纹、应变时效裂纹^[35]。

2.1.1 凝固裂纹

高温合金的凝固裂纹如图 5^[36]所示,凝固裂纹的形成与合金的凝固温度范围有关,温度范围越宽,意味着在凝固阶段形成的糊状区的宽度越大,进而提高裂纹敏感性;并且凝固裂纹的形成还与凝固时枝晶间产生的应力及应变速率有关^[37],通常发生在凝固最后阶段,主要是由枝晶间高熔点的碳化物和凝固后期产生的缩孔造成的^[38]。Adegoke 等学者^[39]在研究 LPBF247LC 高温合金裂纹机理时发现:大量存在的合金元素 Si 在晶界处的偏析扩大了合金的凝固范围,促进了凝固裂纹的形成。Zhou 等学者^[40]通过对 CSU-B1 镍基单晶高温合金进行表征分析,得出:大取向角会对裂纹的产生和扩展起着非常重要的作用,收缩腔和高熔点金属间化合物是引发凝固裂纹的原因。Cieslak 等学者^[41]发现:高温合金凝固过程中 B, P 易偏聚到凝固界面,降低液相表面张力,易产生凝固裂纹,使熔点低的元素在凝固终止处富集,影响合金性能。Osoba 等学者^[42]采用 CO₂ 激光焊对 Haynes 282 高温合金进行焊接,对焊缝显微组织进行观察,在焊缝中未发现凝固裂纹,并提出高温合金中凝固裂纹的消除的原因是由于添加 C 而导致凝固路径的修改。Carter 等学者^[43]发现:镍基高温合金 SLM 成形过程中的开裂在高能量密度条件下以凝固裂纹为主,采用热等静压可以有效的封闭内部裂纹,但对表面裂纹没影响。

2.1.2 液化裂纹

影响液化裂纹的主要因素包括晶界液化及焊接应力。焊接接头的液化裂纹的形成机制主要有两种:

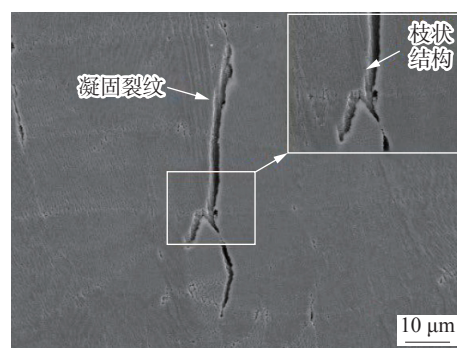
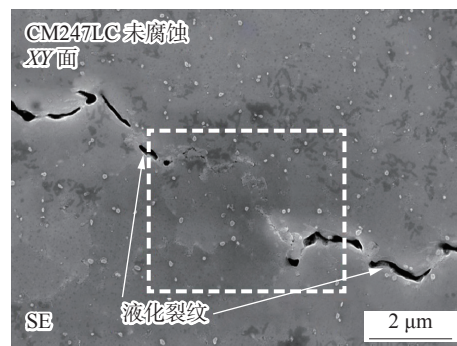


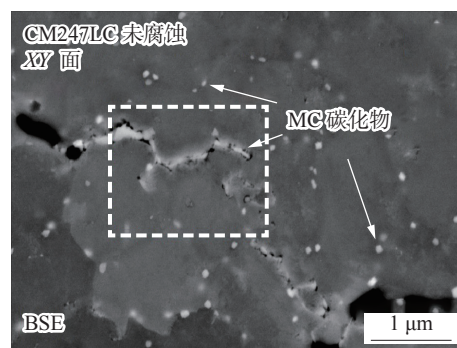
图 5 镍基高温合金中的凝固裂纹^[36]

Fig. 5 Solidification cracks in nickel-based superalloy^[36]

一种是由于组分液化效应,析出相于周围的基体形成低熔点液相使得晶界在焊接过程中出现局部液化;另一种是由于元素偏析引起的晶界局部液化现象^[44]。目前,液化裂纹大部分都出现在热影响区高角度晶界处,当热影响区温度较高时,晶粒内部形成液膜,由于在热循环过程中积累了较大的热应力,液膜可能成为裂纹萌生的场所,加速裂纹沿晶界扩展。典型的液化裂纹通常沿晶界分布,没有枝晶特征,如图 6^[45]



(a) 液化裂纹



(b) 液化裂纹放大图

图 6 液化裂纹及其放大图^[45]

Fig. 6 Liquefaction crack and its magnification^[45]. (a) liquefaction crack; (b) magnification of liquefaction crack

所示。盛家锦^[46]对 IN939 高温合金进行激光熔覆,发现:在焊接过程中,处于热影响区的第二相颗粒与母材之间产生共晶反应,生成低熔点共晶产物并发生液化,在晶界处产生液膜,液膜晶界被拉应力撕开,形成了液化裂纹。热影响区液化裂纹形成机理如图 7 所示^[47],进而得知:焊接过程中热影响区晶界液化并形成液膜,焊后冷却过程中产生热应力和机械应力是热影响区液化裂纹的形成的两个必要条件。Rule^[48]采用搅拌摩擦焊对高温合金进行焊接并研究晶粒尺寸对液化裂纹长度的影响,结果表明:细小的晶粒能抑制液化裂纹扩展,液化裂纹敏感性与其晶粒尺寸线性相关。李乐等学者^[49]对高温合金进行表面纳米化然后进行激光重熔并研究表面纳米化对液化裂纹的影响,结果表明:纳米晶层有效抑制了热影响区液化裂纹的形成。张中平等学者^[50]研究了焊接热影响区液化裂纹的形成原因,结果表明:焊接热影响区的液化裂纹是由低熔点的共晶产物液化所造成。张冬梅^[51]采用激光焊对 Inconel 718 镍基合金进行焊接并对焊接接头的组织与性能进行分析,发现:焊接接头液化裂纹的产生主要受合金成分、晶粒度及应力作用的影响。高海芸^[52]针对 MX246A 合金焊接过程中热裂纹敏感性大的问题进行研究,发现:由于母材中含有较多的低熔点相聚集到晶粒晶界上形成晶间液体,在焊接后期的收缩应力的作用下产生了热影响区液化裂纹。叶欣^[53]采用 TIG 对 Inconel 718 镍

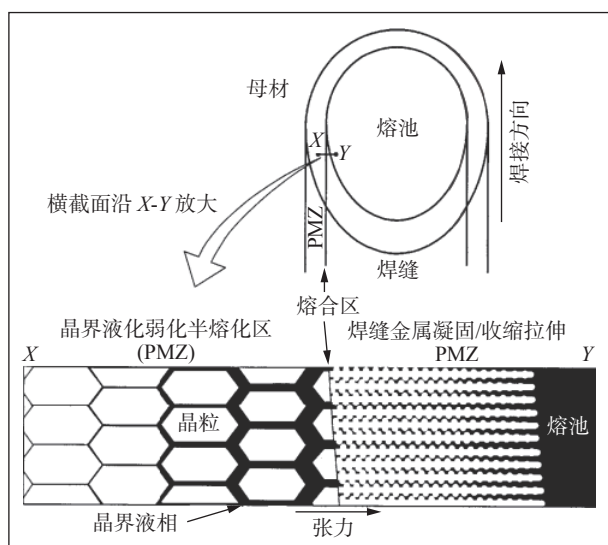
图7 热影响区液化裂纹形成机理^[47]

Fig. 7 Mechanism of liquefaction crack formation in heat affected zone^[47]

基高温合金进行焊接并观察接头的组织性能,发现:在复杂、连续网格结构的树枝晶微观结构中,连续分布于不利受力取向的 γ/Laves 低熔点共晶相,产生细小的微裂纹,这些裂纹尖端应力场相遇时,使之形成较大尺寸的宏观液化裂纹。Gao^[54] 对 Inconel 740H 高温合金进行高功率激光焊接时,观察到了热影响区液化裂纹,这些缺陷随加工条件的变化而变化,这是由于高热输入和匙孔不稳定性造成的。

2.1.3 应变时效裂纹

接头产生应变时效裂纹强化相的析出有关, γ' 相的析出导致合金的硬度升高但变形能力下降^[55]; 应变时效裂纹的产生也和应变的局部积累相关, 应变时效裂纹通常出现在三叉晶界或粗大晶界碳化物等应力集中区域。由于高的残余应力及微观偏析, 在后处理过程中, 镍基高温合金容易在相变过程中的析出应力下产生应变时效裂纹。应变时效裂纹如图 8^[56] 所示, 它的特点是裂纹面比较光洁, 两侧形状近似, 裂纹路径较为曲折, 尺寸可达数百微米, 且贯穿多个沉积层。文明月^[57] 对沉淀强化型 Co-Al-W 基高温合金展开研究, 发现: 应变时效裂纹的形成主要是由于焊后热处理析出了 γ 相, 导致基体变形能力变差, 同时由于焊接件中存在焊接热应力, 最终导致应变时效裂纹形成。尹懿等学者^[58] 对 K438 高温合金补焊热处理裂纹进行了研究, 结果表明: 焊缝中的残余应力和敏感组织决定了应变时效裂纹, 由于 $M_{23}C_6$ 和 M_6C 的存在, 晶界脆性增加, 更容易开裂。Zhang 等学者^[59] 以 GTD-111 高温合金为研究对象, 通过分析不同热处理条件下的焊缝微观结构和力学性能, 结果表明: 在时效条件下, 在时效态和铸造态时的焊接接头存在应变时效裂纹, 但固溶态时就不存在裂纹。

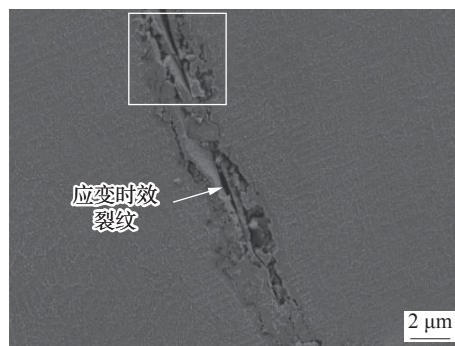


图 8 应变时效裂纹放大图^[56]

Fig. 8 Enlarged view of strain aging cracks^[56]

曹国献^[60]采用手工钨极氩弧焊对 K423A 合金铸件铸造缺陷进行焊接修复研究,并研究其组织性能,发现:最容易出现的裂纹是经过焊后热处理产生的时效裂纹,这是由于 K423A 合金中 Al, Ti 含量太高, Al, Ti 两种元素又是主要沉淀强化元素。Wang 等学者^[61]对真空电子束焊接 IN738LC 高温合金接头进行研究,发现:其具有较高的应变时效裂纹敏感性,焊后热处理后,应变时效裂纹主要沿熔合区的晶界扩展;随着保温温度的升高,裂纹出现的时间迅速缩短,进而得出 γ' 颗粒的析出、时效硬化、氧化诱导脆化和残余应力对熔合区中应变时效裂纹的形成有显著影响。

2.1.4 解决焊接裂纹的方法

焊接裂纹是焊接过程中一种重要的结构形式,它会导致构件的高温蠕变与疲劳,需要通过有效的方法来调控,从而改善性能。近年来,国内外学者已通过焊前预热、焊前热处理、焊后热处理等手段,对其进行了有效控制。

González 等学者^[62]采用 TIG 对预热后的 IN939 高温合金进行焊接并研究了其开裂情况,结果发现:经过焊前预热的合金,由于析出的 γ' 相和碳化物对晶界裂纹敏感性较低,热影响区液化裂纹生成的概率明显下降。韩柯^[63]对 IN738LC 高温合金进行电子束焊接并对焊接接头组织进行分析,发现:焊前热处理可降低液化裂纹敏感性,热影响区晶间液化薄膜厚度增加,且接头残余拉应力逐渐降低,导致热影响区液化裂纹尺寸及数量显著降低。侯星宇^[64]对 Ni-Al-Co-Cr-Ta-W-Re-Hf-Mo 高温合金焊态和焊后热处理两种状态的组织进行对比分析,发现:没经焊后热处理的接头在非等温凝固区中的其他硼化物相与基体的相界面处也萌生了微裂纹,这些裂纹互相连接并继续扩展,最终导致接头断裂。

2.2 焊接工艺对熔焊焊接性的影响

焊接工艺参数(如焊接频率、焊接速度、热输入、焊接电流、电弧电压、占空比等)的不同对焊缝的组织性能影响不同。所以,优化焊接工艺参数对焊接质量的提升至关重要。近年来,研究人员对高温合金的焊接工艺参数进行了研究。

黄菁等学者^[65]采用激光焊接对 Inconel 718 高温合金进行焊接并研究焊接工艺参数(焊接频率、焊接速度)对焊缝质量的影响,发现:随着焊接频率的增加,气孔率先减少再增大;随着焊接速度的提升,焊缝表面成形均匀性越来越好,焊接缺陷减少。程龙

等学者^[66]通过控制热输入调整焊接工艺参数,对高温合金 Inconel 601 进行了焊接,发现:使用较小的热输入焊接,可以提高了焊缝的耐晶间腐蚀能力。任洪辰^[67]对 K417G 高温合金进行了激光焊接试验,分析了不同焊接速度对其接头焊缝成形的影响规律,发现:随着焊接速度的增大,焊缝宽度随之变小,如图 9 所示,同时焊缝的整体显微硬度降低。方连军^[68]采用电子束焊对 GH536 高温合金进行焊接,并研究不同焊接速度对焊缝组织性能的影响,发现:随着电子束流的增大,熔深相应增大,在热输入不变时,可以通过降低焊接速度来增加焊缝的熔深。王冰瑶等学者^[69]采用 MIG 对 GH4169 高温合金进行焊接并分别研究了焊接电流、电弧电压与焊接速度对焊缝硬度的影响规律,发现:电弧电压对焊缝显微硬度影响最大,而焊接电流和焊接速度对显微硬度的影响较小。闫飞等学者^[70]对 GH909 高温合金进行激光焊接并研究焊接速度对焊缝组织性能的影响,发现:随着焊接速度的增加,显微组织偏析减少,焊缝对结晶裂纹的敏感性降低。卢冰等学者^[71]对 GH4169 高温合金进行激光焊接并研究了不同摆动参数对焊缝气孔率、宏观成形、微观组织和显微硬度的影响,结果表明:随着振幅的增大,焊缝的气孔受到明显的抑制,同时熔深也逐渐降低。彭和思等学者^[72]对 K418 进行激光焊接并研究保护气体对焊接质量的影响,发现:焊接过程中保护气体的流量控制至关重要,当保护气体流量约为 12 L/min 时,能起到较理想的保护效果,

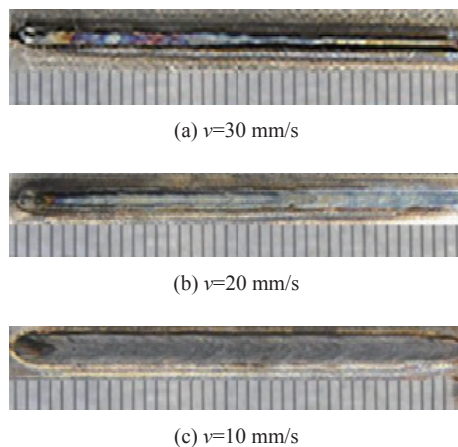


图 9 不同焊接速度下 K417G 高温合金激光焊接焊缝表面形貌^[67]

Fig. 9 Surface morphology of laser weld of K417G superalloy at different welding speeds^[67]. (a) $v=30$ mm/s; (b) $v=20$ mm/s; (c) $v=10$ mm/s

焊缝内残留的气孔较少,焊接质量提升。彭为康等学者^[73]采用电子束焊焊接 JG4356 高温合金,并观察焊接电流、加速电压、焊接速率对焊缝熔深和熔宽的影响,发现:焊缝熔深和熔宽与焊接电流和加速电压成正比关系,与焊接速率成反比。吴承隆等学者^[74]对 GH4169 高温合金进行激光焊接并研究不同的焊接工艺参数(占空比、激光功率、焊接速度)对焊缝力学性能的影响,结果表明:对焊缝力学性能的影响显著程度由大到小依次为占空比、激光功率、焊接速度。Xia 等学者^[75]研究了焊接速度对接头微观结构和力学性能的影响,结果表明:对于镍基高温合金 ERNiCr-3,在较高的焊接速度下观察到较细的柱状晶体结构,在较低的焊接速度下,显微硬度却显著提高,极限抗拉强度也更高;因此,较低焊接速度下的试样具有更好的综合力学性能。

2.3 合金元素对高温合金焊接性的影响

镍基高温合金中有很多元素,主要有 Ni, W, Cr, Co, Mo, Al, Ti, Nb 等^[76]。这些合金元素在合金中主要起强化作用,但不同元素有不同的作用,同种合金的种类和含量都会影响到合金的组织 and 性能。下面分别介绍这些元素的作用和特点。

2.3.1 W, Cr, Co, Mo 元素

W, Cr, Co, Mo 这些元素通常作为固溶强化元素,它们的原子半径与 Ni 的原子半径差别不大,它们能进入奥氏体基体中,通过固溶强化机制起到强化合金的作用^[77]。Cr 在高温合金中起着至关重要的作用,大部分 Cr 固溶在基体相中,只有一小部分进入了增强相 γ 在基体相中,Cr 能够引起基体的晶格畸变,从而增加基体的固溶强度;同时,Cr 在高温合金中的主要作用是提高高温合金的抗氧化性和耐蚀性,因为 Cr 在服役时会生成 Cr_2O_3 ,从而在服役期间生成一层氧化膜保护层,该氧化膜保护层具有抗氧化、抗腐蚀的功能,所以耐腐蚀的高温合金通常包含 Cr 不大于 15%;然而,Cr 又会促进 σ 相的生成^[78],Cr 含量过高也会对合金的服役性能造成不利影响。由于 Co 具有多种功能,因此,在高温合金中,Co 的含量通常超过 10%,Co 能减少基体的层错能,阻碍位错的发生,实现固溶强化^[79-80];Co 能有效地调控晶界上的碳化物形貌,减少第二相碳化物的含量,同时,基体中加入 Co 元素,可以减少 Al 和 Ti 在基体中的溶解度,提高合金的强度。Mo 元素能够促进低熔点共晶相的形成,增加材料的裂纹敏感性^[81]。

2.3.2 Al, Ti, Nb 元素

Al, Ti, Nb 这些元素为沉淀强化元素,主要参与高温合金主要强化相 γ'' 相 (Ni_3Nb) 与辅助强化相 γ' 相 (Ni_3AlTi) 的形成。Al 能提高表面抗氧化性能,Ti 能提高合金表面抗腐蚀性能。Al, Ti 是 γ' 相的主要形成元素,研究发现:镍基高温合金的高温性能主要受加入的 Al, Ti 含量和 Ti/Al 比影响^[82]。Nb 除形成沉淀强化相 γ'' 相外,也容易在合金的凝固过程中发生偏析,导致在枝晶间区域形成低熔点液化薄膜和有害的 Laves 相,导致合金强度降低、热裂纹的倾向增大^[83]。

2.3.3 C, B 元素

C, B 元素直接影响合金中碳化物、硼化物相的产生,从而改变晶界析出相在接头热影响区的液化,进而对焊接开裂产生影响,由于这些元素的原子半径和 Ni 有较大差异,因此很难在奥氏体基体中形成,而更容易聚集在 γ 相的晶界处。Alam 等学者^[84]研究了 C, B, P 等合金元素的偏聚对 Inconel 718 合金性能的影响,结果表明:B, P 在热影响区附近的晶界区附近出现了熔化开裂,主要是由于焊缝中微量元素在晶界的偏聚和局部析出相的生成,从而导致焊缝组织液化,最终导致焊缝开裂。

3 结束语

高温合金是一种极具发展潜力的材料。当前,针对高温合金的焊接问题,国内外学者已经开展了很多研究,并在其裂纹形成机制和工艺优化等方面取得了一些进展。但是,目前该材料还面临着焊缝组织偏析、焊接裂纹存在、抗腐蚀性能不佳、易产生气孔等问题。针对上述问题,未来可以从以下几方面进行针对性研究。

(1)利用脉冲电流的方法,可以降低焊接电流的平均值,细化焊缝晶粒,减少成分偏析;可调节性强,有助于实现对电弧能量及空间分布的精准调控,且易于得到合适的熔池形态与尺寸,从而增强了焊缝耐烧穿、保护熔池、确保焊缝根部均匀熔透;脉冲电流可以减少焊缝底部产生的孔洞,通过增大脉冲峰值电流可以提高电弧挺度,可以有效地抑制电弧的漂移。

(2)通过调节焊接电流、电弧电压、焊接速度、送丝速度、保护气体流量等焊接工艺参数来预防正、反面焊缝余高过量,正、反面焊缝凹陷,焊缝表面氧化等问题。

(3)选择合适的焊前热处理和焊后热处理工艺,

避免产生气孔、裂纹、夹杂等情况的发生,进而提高焊接质量。

参考文献

- [1] 王诗洋, 刘士伟, 侯星宇, 等. 焊丝成分对镍基高温合金 TIG 焊接性的影响 [J]. 焊接学报, 2023, 44(3): 31 – 36, 60.
Wang Shiyang, Liu Shiwei, Hou Xingyu, et al. Effect of wire composition on weldability of a Ni-based superalloy welded by TIG method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(3): 31 – 36, 60.
- [2] Zhou Changjie, Fan Xiaole, Zhu Lihua, et al. Transient liquid phase bonding of DD5 superalloy using a designed interlayer: microstructure and mechanical properties[J]. China Welding, 2024, 33(2): 1 – 10.
- [3] Thakur A, Gangopadhyay S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based superalloys[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 100: 25 – 54.
- [4] 王成, 陈冰清, 周标, 等. GH3536/DD6 异质合金激光搭接焊对母材组织和性能的影响 [J]. 焊接, 2024(7): 50 – 57.
Wang Cheng, Chen Bingqing, Zhou Biao, et al. Effect of laser lap welding of GH3536/DD6 heterogeneous alloy on microstructure and properties of base metal[J]. Welding & Joining, 2024(7): 50 – 57.
- [5] Ojo O A, Richards N L, Chaturvedi M C. Micro-structural study of weld fusion zone of TIG welded IN 738LC nickel-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2014, 51(7): 683 – 688.
- [6] 樊兆宝, 安绍孔, 王英健. 钨极氩弧焊技术及其在空空导弹加工中的应用 [J]. 航空制造技术, 2011(11): 50 – 53.
Fan Zhaobao, An Shaokong, Wang Yingjian. Application of argon arc welding technology in air-to-air missile machining[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(11): 50 – 53.
- [7] 蒋玉霞. 脉冲电流钨极氩弧焊电弧行为与焊缝成形研究 [D]. 成都: 西华大学, 2023.
Jiang Yuxia. Study on arc behavior and weld formation of pulsed current argon tungsten arc welding [D]. Chengdu, China: Xihua University, 2023.
- [8] 王刚. 焊接方法对钛合金板焊接接头组织性能的影响研究 [J]. 世界有色金属, 2023(10): 129 – 131.
Wang Gang. Study on the effect of welding methods on the microstructure and properties of titanium alloy plate welding joints[J]. *World Nonferrous Metals*, 2023(10): 129 – 131.
- [9] 严振兴, 刘转楠. 1060 纯铝管焊接质量的控制 [J]. 焊接技术, 2022, 51(11): 87 – 90.
Yan Zhenxing, Liu Zhuannan. Welding quality control of 1060 pure aluminum pipe[J]. Welding Technology, 2022, 51(11): 87 – 90.
- [10] 王晨曦. 基于氩弧焊的法兰板焊接变形数值模拟与控制 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
Wang Chenxi. Numerical simulation and control of welding deformation of flange plate based on argon arc welding [D]. Nanjing, China: Southeast University, 2021.
- [11] 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, 2015, 36(4): 109 – 112.
Wang Tao, Zheng Zhentai, Dong Tianshun, et al. Effect of welding parameters on grain size in Inconel601H nickel-based alloy weld by P-TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(4): 109 – 112.
- [12] 张晓鸿, 马朋召, 张康, 等. 脉冲 TIG 焊接工艺参数对高温镍基合金焊缝组织的调控研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 93 – 101.
Zhang Xiaohong, Ma Pengzhao, Zhang Kang, et al. Study on controlling of welding seam microstructure about nickel-based high-temperature alloy by pulse TIG welding process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(2): 93 – 101.
- [13] 王祯, 姚雷, 孔胜国, 等. K487 铸造高温合金氩弧焊接头的组织和性能研究 [J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 446 – 448.
Wang Zhen, Yao Lei, Kong Shengguo, et al. Study on microstructure and properties of K487 argon tungsten-arc welding joint[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 446 – 448.
- [14] 许鸿吉, 田世英, 谢明, 等. 高温合金 GH4169 氩弧焊接头的高温组织和力学性能 [J]. 大连铁道学院学报, 2006, 27(3): 77 – 79.
Xu Hongji, Tian Shiyong, Xie Ming, et al. Studies on microstructures and physical properties of argon-(shielded) arc welding joint of GH4169 superalloy at 650 °C[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2006, 27(3): 77 – 79.
- [15] Janaki Ram G D, Venugopal Reddy A, Prasad Rao K, et al. Control of Laves phase in Inconel 718 GTA welds with current pulsing[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2013, 9(5): 390 – 398.
- [16] 李二行. 超声波辅助铝基多元低熔点合金制备和焊接性能研究 [D]. 西安: 西安石油大学, 2022.
Li Erhang. Ultrasonic-assisted preparation of aluminum-based multicomponent low-melting-point alloys and research on welding properties [D]. Xi'an, China: Xi'an Shiyou University, 2022.
- [17] 李张辉. 镍基高温合金电子束焊接头高温疲劳性能研究

- [J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 35 – 37.
- Li Zhanghui. Study on elevated temperature fatigue performance of electron beam welded joints of nickel-based superalloys[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(2): 35 – 37.
- [18] 嵇佳佳, 柯文敏, 李泽国, 等. 电子束焊扫描波形对高温合金 GH625 焊缝成形影响研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2021(11): 60 – 62.
- Ji Jiajia, Ke Wenmin, Li Zeguo, et al. Study on the influence of scanning waveform of electron beam welding on the weld formation of superalloy GH625[J]. MW Metal Working, 2021(11): 60 – 62.
- [19] 谭观华. K418 高温合金电子束焊接的裂纹形成机理及调控 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2020.
- Tan Guanhua. Cracking mechanism and control of K418 superalloy electron beam welding [D]. Nanchang, China: Nanchang Hangkong University, 2020.
- [20] Devendranath Ramkumar K, Sridhar R, Periwai S, et al. Investigations on the structure – property relationships of electron beam welded Inconel 625 and UNS 32205[J]. Materials & Design, 2015, 68: 158 – 166.
- [21] 程林, 刘永江. GH3044/GH2747 异种高温合金真空电子束焊接接头组织和性能 [J]. 焊接技术, 2019, 48(7): 16 – 18.
- Cheng Lin, Liu Yongjiang. Microstructure and properties of vacuum electron beam welded joints of GH3044/GH2747 dissimilar superalloy[J]. Welding Technology, 2019, 48(7): 16 – 18.
- [22] 张子阳. IC10/GH3039 异种高温合金电子束焊接接头组织及性能研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- Zhang Ziyang. Microstructure and mechanical properties of IC10/GH3039 electron beam welding welded joints [D]. Nanchang, China: Nanchang Hangkong University, 2018.
- [23] 张明敏, 胡玥, 吴家云, 等. 电子束焊接参数对高温合金小熔深焊缝形貌的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(1): 233 – 235.
- Zhang Mingmin, Hu Yue, Wu Jiayun, et al. Effect of electron beam welding parameters on little penetration depth weld shape of high temperature alloys[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(1): 233 – 235.
- [24] 陆业航, 李晋炜, 张庆云, 等. GH3536 高温合金电子束焊组织及显微硬度分析 [J]. 焊接, 2010(9): 47 – 50.
- Lu Yehang, Li Jinwei, Zhang Qingyun, et al. Microstructure and microhardness of GH3536 high temperature alloy joint by electron beam welding[J]. Welding & Joining, 2010(9): 47 – 50.
- [25] 丁亚茹. 7075 铝合金激光焊焊接的研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2022(10): 110 – 112.
- Ding Yaru. Study on laser welding of 7075 aluminum alloy Inner Mongolia Science Technology and Economy, 2022(10): 110 – 112.
- [26] 刘喜旺, 贾金龙, 张林杰, 等. Nb521 高温合金光纤激光焊及接头组织性能研究 [J]. 应用激光, 2023, 43(7): 49 – 57.
- Liu Xiwang, Jia Jinlong, Zhang Linjie, et al. Nb521 superalloy fiber laser welding and study on microstructure and properties of joint[J]. Applied Laser, 2023, 43(7): 49 – 57.
- [27] 聂洪铭, 蔡晓龙, 徐广彬, 等. 基于过渡层的 TiAl/GH3030 异质高温合金激光焊接接头组织与性能研究 [J]. 长春工程学院学报 (自然科学版), 2023, 24(2): 65 – 68.
- Nie Hongming, Cai Xiaolong, Xu Guangbin, et al. Study on the microstructure and properties of TiAl/GH3030 heterogeneous superalloy laser welding joint based on transition layer[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Science Edition), 2023, 24(2): 65 – 68.
- [28] 滕彬, 武鹏博, 李晓光, 等. GH3128 合金激光焊接接头组织与性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(7): 82 – 87.
- Teng Bin, Wu Pengbo, Li Xiaoguang, et al. Microstructure and properties of GH3128 alloy laser welding joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(7): 82 – 87.
- [29] 丁琪, 嵇佳佳, 柯文敏, 等. 高温合金 GH4169 激光焊工艺研究 [J]. 金属加工 (热加工), 2020(12): 23 – 26.
- Ding Qi, Ji Jiajia, Ke Wenmin, et al. Research on laser welding technology of high temperature alloy GH169[J]. MW Metal Working, 2020(12): 23 – 26.
- [30] 敖三三, 罗震, 单平, 等. Inconel 601 镍基高温合金激光焊焊缝的显微组织 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(8): 2099 – 2107.
- Ao Sansan, Luo Zhen, Shan Ping, et al. Microstructure of Inconel 601 nickel-based superalloy laser welded joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(8): 2099 – 2107.
- [31] 步贤政. Inconel601 镍基高温合金激光焊接的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- Bu Xianzheng. Research on laser welding of Inconel601 nickel based superalloy [D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2012.
- [32] Caiazza F, Alfieri V, Cardaropoli F, et al. Investigation on edge joints of Inconel 625 sheets processed with laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 93: 180 – 186.
- [33] 刘昱乾. 发动机用高温合金等离子弧焊接工艺与接头组织性能研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
- Liu Yuqian. Research on plasma arc welding process and joint microstructure and properties of superalloy for engine [D]. Tianjin, China: Civil Aviation University of China,

- 2022.
- [34] 张海泉, 赵海燕, 张彦华, 等. 镍基高温合金电子束焊接热影响区微裂纹特征分析 [J]. *材料工程*, 2005(3): 22 – 25, 64. Zhang Haiquan, Zhao Haiyan, Zhang Yanhua, et al. Analysis on the microfissuring behavior in the heat-affected zone of electron-beam welded nickel-based superalloy [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005(3): 22 – 25, 64.
- [35] Wei Qingsong, Xie Yin, Teng Qing, et al. Crack types, mechanisms, and suppression methods during high-energy beam additive manufacturing of nickel-based superalloys: a review [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2022, 1(4): 100055.
- [36] 邓国威. 激光选区熔化 CM247LC 高温合金工艺研究及其叶片修复应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2022. Deng Guowei. Research on process of selective laser melted CM247LC superalloy and its application for turbine blade repair [D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2022.
- [37] Pan Peng, Chen Shuangjian, Zheng Jiale, et al. Welding solidification cracking susceptibility and behavior of nickel based ERNiMo-2 wire [J]. *Materials Letters*, 2022, 314: 131774.
- [38] 乔绅, 周文哲, 谭庆彪, 等. 镍基高温合金 CM247LC 增材制造研究进展 [J]. *精密成形工程*, 2022, 48(8): 93 – 103. Qiao Shen, Zhou Wenzhe, Tan Qingbiao, et al. Research progress of additive manufacturing of CM247LC Nickel-based superalloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 48(8): 93 – 103.
- [39] Adegoke O, Andersson J, Brodin H, et al. Influence of laser powder bed fusion process parameters on the microstructure and cracking susceptibility of nickel-based superalloy alloy 247LC [J]. *Results in Materials*, 2022, 13: 100256.
- [40] Zhou Zhipeng, Huang Lan, Shang Yijing, et al. Causes analysis on cracks in nickel-based single crystal superalloy fabricated by laser powder deposition additive manufacturing [J]. *Materials & Design*, 2018, 160: 1238 – 1249.
- [41] Cieslak M J, Stephens J J, Carr M J. A study of flie weldability and weld related microstructure of cabot alloy 214 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1988, 19(3): 657 – 667.
- [42] Osoba L O, Ding R G, Ojo O A. Microstructural analysis of laser weld fusion zone in Haynes 282 superalloy [J]. *Materials Characterization*, 2012, 65: 93 – 99.
- [43] Carter L N, Attallah M M, Reed R C. Laser powder bed fabrication of nickel-base superalloys: Influence of parameters, characterisation, quantification and mitigation of cracking [J]. *Superalloys*, 2012, 76: 577 – 586.
- [44] Taheri M, Razavi M, Kashani-Bozorg S F, et al. Relationship between solidification and liquation cracks in the joining of GTD-111 nickel-based superalloy by Nd: YAG pulsed-laser welding [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 5635 – 5649.
- [45] Tang Y T, Panwisawas C, Ghoussoub J N, et al. Alloys by-design: application to new superalloys for additive manufacturing [J]. *Acta Materialia*, 2021, 202: 417 – 436.
- [46] 盛家锦. 激光熔覆 IN939 镍基高温合金裂纹控制及热处理研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2021. Sheng Jiajin. Study of crack control and heat treatment of laser clad IN939 nickel-based superalloy [D]. Hangzhou, China: Zhejiang University of Technology, 2021.
- [47] Kou S. Solidification and liquation cracking issues in welding [J]. *JOM*, 2003, 55(6): 37 – 42.
- [48] Rule J. Friction stir processing nickel-base alloys [D]. Columbus, USA: The Ohio State University, 2011.
- [49] 李乐, 路媛媛, 唐峰, 等. 表面纳米化对镍基高温合金焊接液化裂纹的影响 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(1): 151 – 155. Li Le, Lu Yuanyuan, Tang Feng, et al. Effect of surface nanocrystallization on welding liquation cracking of nickel-base superalloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(1): 151 – 155.
- [50] 张中平, 李平荣. K4169 合金焊接热影响区液化裂纹研究 [J]. *航天工艺*, 2001, 4(2): 32 – 34. Zhang Zhongping, Li Pingrong. Study on liquefaction crack in welding heat affected zone of K4169 alloy [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2001, 4(2): 32 – 34.
- [51] 张冬梅. 718 高温合金激光焊接及其液化裂纹形成机理研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2017. Zhang Dongmei. Research on laser welding and the mechanism of liquation crack of 718 superalloy [D]. Shanghai, China: Shanghai University of Engineering Science, 2017.
- [52] 高海芸. Ni₃Al 基高温合金激光焊接裂纹及焊缝组织和性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2013. Gao Haiyun. Study on crack of Ni₃Al based high temperature and laser weld seam microstructure and performance [D]. Beijing, China: Beijing University of Technology, 2013.
- [53] 叶欣. Inconel718 合金薄壁铸件焊接接头组织演变和热裂纹研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017. Ye Xin. Microstructure evolution and hot cracking mechanism of Inconel 718 Ni-based superalloy thin-wall casting component welding joint [D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

- [54] Gao Mingze. Defect formation during high power laser welding of a creep resistant nickel alloy [D]. Philadelphia, USA: The Pennsylvania State University, 2023.
- [55] Boswell J H, Clark D, Li W, et al. Cracking during thermal post-processing of laser powder bed fabricated CM247LC Ni superalloy[J]. Materials & Design, 2019, 174: 107793.
- [56] 彭飞. 预置中间层的 IN738LC 镍基合金电子束焊接接头组织及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- Peng Fei. Research on the microstructure and property of electron beam welded IN738LC nickel based superalloy by presetting interlayer[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [57] 文明月. Co-Al-W 基高温合金的可焊性及其接头力学性能研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Wen Mingyue. Study on weldability and weld joint mechanical properties of the Co-Al-W based superalloys [D]. Hefei, China: University of Science and Technology of China, 2021.
- [58] 尹懿, 张丽玲, 李水涛, 等. K438 高温合金补焊接头热处理裂纹研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(7): 243 – 245.
- Yin Yi, Zhang Liling, Li Shuitao, et al. Study on crack of K438 superalloy repair welding joint after heat treatment[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(7): 243 – 245.
- [59] Zhang G J, Xiao C Y, Taheri M. Effect of Nd: YAG pulsed laser welding process on the liquation and strain-age cracking in GTD-111 superalloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 52: 66 – 78.
- [60] 曹国献. K423A 合金精铸件铸造缺陷的补焊工艺研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
- Cao Guoxian. The research about repair welding the foundry defects that delicate casting of alloy K423A [D]. Nanchang, China: Nanchang Hangkong University, 2016.
- [61] Wang Houqin, Han Ke, Peng Fei, et al. Strain-age cracking in vacuum electron beam welded IN738LC alloy during post-weld heat treatment[J]. Vacuum, 2021, 194: 110588.
- [62] González M A, Martínez D I, Pérez A, et al. Microstructural response to heat affected zone cracking of prewelding heat-treated Inconel 939 superalloy[J]. Materials Characterization, 2011, 62(12): 1116 – 1123.
- [63] 韩柯. IN738LC 高温合金电子束焊接接头裂纹形成机理及控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- Han Ke. Investigation on the formation mechanism and control of welding cracks in electron-beam-welded IN738LC joint [D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [64] 侯星宇. 镍基单晶高温合金真空钎焊接头组织与失效机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- Hou Xingyu. Study on microstructure and failure mechanism of vacuum brazing joint of Ni-base single crystal superalloy [D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2022.
- [65] 黄菁, 孙宇峰, 信纪军, 等. 316LN 不锈钢/Inconel718 高温合金异种材料激光焊接工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2023, 52(9): 26 – 30, 41.
- Huang Jing, Sun Yufeng, Xin Jijun, et al. Research on laser welding technology of 316LN stainless steel and Inconel 718 superalloy dissimilar materials[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(9): 26 – 30, 41.
- [66] 程龙, 孟庆海, 白晓琳, 等. Inconel601 镍基高温合金焊接工艺研究 [J]. 焊管, 2022, 45(7): 37 – 41.
- Cheng Long, Meng Qinghai, Bai Xiaolin, et al. Study of welding process on Inconel601 nickel-based superalloys[J]. Welded Pipe and Tube, 2022, 45(7): 37 – 41.
- [67] 任洪辰. 激光焊接镍基高温合金工艺及其性能研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2021.
- Ren Hongchen. Research on laser welding process and performance of Nickel-based superalloy [D]. Tianjin, China: Civil Aviation University of China, 2021.
- [68] 方连军. GH536 高温合金薄壁结构件焊接工艺研究 [D]. 大连理工大学, 2019.
- Fang Lianjun. Research on welding process of GH536 thin-walled structural parts [D]. Dalian, Liaoning, China: Dalian University of Technology, 2019.
- [69] 王冰瑶, 魏艳红, 欧文敏. 镍基高温合金焊接接头组织性能及工艺优化 [J]. 机械制造文摘——焊接分册, 2018(1): 8 – 13.
- Wang Bingyao, Wei Yanhong, Ou Wenmin. Microstructure and properties of welded joints and welding parameters optimization for nickel-based superalloy[J]. Welding Digest of Machinery Manufacturing, 2018(1): 8 – 13.
- [70] 闫飞, 王春明, 胡席远. 高温合金 GH909 激光焊接工艺 [J]. 电焊机, 2014, 44(9): 6 – 9.
- Yan Fei, Wang Chunming, Hu Xiyuan. Study of the process of laser welding for low expansion superalloy GH909[J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(9): 6 – 9.
- [71] 卢冰, 李晨曦, 肖雪, 等. 摆动激光焊接 GH4169 镍基高温合金焊缝成形性能研究 [J]. 热加工工艺, 2024, 53(11): 21 – 25, 36.
- Lu Bing, Li Chenxi, Xiao Xue, et al. Forming performance of GH4169 Ni-based superalloy weld produced by laser oscillating welding[J]. Hot Working Technology, 2024, 53(11): 21 – 25, 36.
- [72] 彭和思, 陈兵华, 唐景龙, 等. 激光焊接工艺对 K418 与 0Cr18Ni9 焊接接头性能的影响 [J]. 激光技术, 2018,

- 42(2): 229 – 233.
- Peng Hesi, Chen Binghua, Tang Jinglong, et al. Effect of laser welding technology on mechanical properties of K418 and 0Cr18Ni9 weld joints[J]. *Laser Technology*, 2018, 42(2): 229 – 233.
- [73] 彭为康, 润长生, 戴延丰, 等. Ni₃Al 基高温合金 JG4356 焊接性能和工艺研究 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(1): 55 – 58, 63.
- Peng Weikang, Run Changsheng, Dai Yanfeng, et al. Study on welding properties and technology of Ni₃Al-based superalloy JG4356[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(1): 55 – 58, 63.
- [74] 吴承隆, 尹浩, 黄泽涵. GH4169 镍基高温合金脉冲激光焊接工艺参数优化 [J]. *工具技术*, 2020, 54(10): 38 – 42.
- Wu Chenglong, Yin Hao, Huang Zehan. Process parameter optimization of GH4169 pulse laser welding[J]. *Tool Engineering*, 2020, 54(10): 38 – 42.
- [75] Xia Yufeng, Peng Mengxia, Teng Haihao, et al. Multi-properties optimization of welding parameters of wire arc additive manufacture in dissimilar joint of iron-based alloy and nickel-based superalloy using grey-based Taguchi method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2021, 235(23): 6984 – 6995.
- [76] 雪生兵. 可打印专用镍基高温合金设计、制备及性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- Xue Shengbing. Design, preparation and properties research of printable dedicated nickel-based superalloy [D]. Lanzhou, China: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [77] 白昶, 杨飞, 张毅, 等. 船用 LNG 储罐高锰奥氏体低温钢焊条 CHE680TS 的研制 [J]. *焊接技术*, 2023, 52(9): 78 – 82.
- Bai Chang, Yang Fei, Zhang Yi, et al. Development of high manganese austenitic low temperature steel electrode CHE680TS for marine LNG storage tank[J]. *Welding Technology*, 2023, 52(9): 78 – 82.
- [78] 吕鹏, 刘子剑, 彭韬, 等. 强流脉冲电子束作用下 CrFeCoNiMo_{0.2} 的组织结构与性能调控 [J]. *稀有金属*, 2023, 47(9): 1221 – 1231.
- Lv Peng, Liu Zijian, Peng Tao, et al. Microstructure and performance control of CrFeCoNiMo_{0.2} under action of high current pulsed electron beam[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2023, 47(9): 1221 – 1231.
- [79] 张强. 镍基高温合金粉末氧化行为及合金组织与性能研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- Zhang Qiang. Nickel-based superalloy powder oxidation behavior and its effect on microstructure and properties of alloys [D]. Beijing, China: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [80] 许佳玉. 选区激光熔化 Inconel 738 合金的组织性能调控及成分优化设计研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- Xu Jiayu. Study on microstructure and properties control and composition optimization design of Inconel 738 alloy by selective laser melting [D]. Lanzhou, China: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [81] Chen S J, Ye X X, Tsang D K L, et al. Welding solidification cracking susceptibility and behavior of a Ni-28W-6Cr alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(1): 29 – 35.
- [82] 李娜, 杜随更, 王晋伟. 中间层材料对 TiAl 合金与 42CrMo 钢摩擦焊接头性能的影响研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(7): 2519 – 2524.
- Li Na, Du Suigeng, Wang Jinwei. Influence of intermediate layer on the properties of friction welded joints between TiAl alloy and 42CrMo steel[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(7): 2519 – 2524.
- [83] 刘洋, 孙朝远, 肖石, 等. 燃气轮机用 IN718 高温合金改锻工艺 [J]. *锻压技术*, 2023, 48(3): 11 – 19.
- Liu Yang, Sun Chaoyuan, Xiao Shi, et al. Modified forging process of superalloy IN718 for gas turbine[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48(3): 11 – 19.
- [84] Alam T, Felfer P J, Chaturvedi M, et al. Segregation of B, P, and C in the Ni-based superalloy, Inconel 718[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43(7): 2183 – 2191.

第一作者: 王雪融, 硕士研究生; 主要从事高温合金焊接性能的研究; 3195363683@qq.com。

通信作者: 王诗洋, 博士, 副研究员; 主要从事高温合金钎焊、扩散焊和熔焊的研究; sywang16b@imr.ac.cn。

(编辑: 王龙权)

本文引用格式:

王雪融, 王诗洋, 马国峰, 等. 熔焊工艺在高温合金焊接性能优化的研究现状[J]. *焊接*, 2024(12): 20 – 32.

Wang Xuerong, Wang Shiyang, Ma Guofeng, et al. Research status of fusion welding process in welding performance optimization of superalloy[J]. *Welding & Joining*, 2024(12): 20 – 32.