铂基合金与 GH3128 合金电子束焊接接头组织与性能研究

蔡宏中[1,2]，易健宏[2]，吴 霏[1]，周利民[1]，魏 燕[1]，陈 力[1]，张诩翔[1]，崔 浩[1]，张贵学[1]，胡昌义[1,2*]
(1. 昆明贵金属研究所,稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室，昆明 650106；
2. 昆明理工大学材料科学与工程学院，昆明 650093)

摘 要：采用电子束焊接技术对铂基合金与 GH3128 进行焊接。利用工业 CT、扫描电子显微镜、显微硬度仪和材料万能试验机，研究了铂基合金与 GH3128 焊接接头显微组织、力学性能及断口形貌。结果表明：铂基合金与 GH3128 具有良好的焊接性能，焊接接头的质量良好，无缺陷，成分均一，焊缝区显微硬度在 360~380 之间，焊缝强度为 499 MPa，断裂方式为韧性断裂，断裂位置位于铂基合金一侧。

关键词：铂合金；GH3128；电子束焊接；焊缝组织；力学性能
中图分类号：TG146.4^{+}3 **文献标识码：**A **文章编号：**1004-0676(2018)S1-0032-04

Microstructure and Properties of Electron Beam Welded Joints of Platinum Based Alloy and GH3128 Alloy

CAI Hongzhong[1,2], YI Jianhong[2], WU Fei[1], ZHOU Limin[1], WEI Yan[1], CHEN Li[1],
ZHANG Xuxiang[1], CUI Hao[1], ZHANG Guixue[1], HU Changyi[1,2*]
(1. State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunming Insitute of Precious Metals, Kunming 650106, China;
2. Faculty of Materials and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The platinum base alloy and GH3128 were welded by electron beam welding technology. The microstructure, mechanical properties and fracture morphology of the platinum based alloy and GH3128 welded joints were studied by industrial CT, scanning electron microscope, microhardness tester and material universal testing machine. The results showed that the platinum based alloy and GH3128 have good welding performance. The welding joint has good quality, no defect, uniform composition, the micro hardness (*HV*) of weld zone was between 360 to 380, weld strength was 499 MPa, fracture mode as ductile fracture and fracture position on one side of platinum base alloy.

Key words: platinum alloy; GH3128; electron beam welded; microstructure of weld; mechanical property

随着国际上航天技术的飞速发展，对能在更高温度、强氧化及强腐蚀等极端环境条件下使用的高温新材料提出了迫切的需求，比如卫星提高寿命的要求、空间站轨道控制动力系统以及登月飞行器发动机系统等。推力器喷管是航天发动机的核心部件，喷管材料的性能与发动机性能直接相关。铂基合金由于具有较高的熔点和极强的高温抗氧化性性能，无需涂层保护，克服了发动机抗氧化涂层的寿命限制[1-3]，从而大幅提高了发动机产品质量的稳定性和可靠性。著名航天专家戚发轫院士指出，推力室采用铂基合金材料可显著提高航天发动机比冲性能，对延长航天器寿命意义重大[4]。铂基合金已成为高

收稿日期：2018-7-12
基金项目：云南省技术创新人才项目(2016HB025)、云南省应用基础研究重点项目(2016FA053)、云南省重大科技专项(新材料 2018ZE001)
第一作者：蔡宏中，男，硕士，正高级工程师，研究方向：稀贵金属功能材料。E-mail：chz@ipm.com.cn
*通讯作者：胡昌义，男，博士，研究员，研究方向：贵金属功能材料。Email：hcy@ipm.com.cn

温抗氧化结构材料的重要发展方向之一。但由于其自身的密度交大及生产成本等问题，铂基合金材料在很多场合都需要与某些金属连接，以便发挥各自的优异性能，同时也可以满足快速、安全、简易及价格低廉的设计需要。镍基高温合金 GH3128 是目前在航空领域应用较为广泛的一种高温合金，它除了可以制造涡轮叶片以外，还可以制造航空、航天发动机燃烧室等零部件，其使用温度一般在 950℃左右[5-9]。铂基合金材料与 GH3128 镍基高温合金(简称 GH3128)的连接有着重要的实际意义，它不仅可以有效地降低零件的成本及重量，而且还可以提高零件的使用温度和使用寿命。由于这两种材料的连接工艺及其连接构件具有很强的军事背景，故截至目前尚未检索到国内外有关这方面的研究报道。

与常规熔化焊相比，电子束焊是使用电子束轰击材料表面，使材料表面瞬间被加热、熔化和凝固，进而使材料表面获得较高的强度、硬度及较高的耐磨性，其处理过程清洁、无污染且加热集中，焊接热影响区小，对母材热损伤小，接头强度高且有真空进行保护，在精密零件的焊接上具有广阔的应用前景[10]。本研究采用电子束焊接工艺进行铂基合金与 GH3128 之间的连接，并研究焊接接头组织及相关性能。

1　实验

铂基合金与GH3128的装配示意图如图1所示。焊接前采用丙酮超声清洗待焊接件，去除油污及异物，并吹干。焊接设备为 CVE CW606 型电子束焊机。将处理好的样品安装在焊接平台上，并抽真空，保证真空度不大于 1×10^{-1} Pa。焊接参数如表 1 所列。

在焊接过程中，电子束流向铂基合金一侧适当偏离，以保证焊缝两侧材料熔化程度相当。

采用 ACTTIS300 工业 CT 对焊接件进行 CT 扫描无损检测。采用扫描电子显微镜(XL30 ESEM)观察焊缝的宏观形貌、显微组织及断口形貌。采用 HXS-1000A 显微硬度计测量焊缝截面横、纵方向的显微维氏硬度。使用 AG-X100kN 材料万能试验机进行焊缝力学性能检测，加载速率 0.5 mm/min。

2　结果与讨论

2.1　焊接接头质量分析

焊接接头宏观形貌见图 2，焊接件 CT 无损检测如图 3 所示。

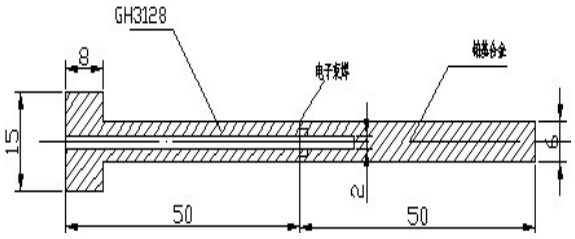


图 1　焊接件装配示意图

Fig.1 Assembly diagram of weldment

表 1　焊接工艺参数

Tab.1 Welding parameter

电压/kV	束流/mA	聚焦电流/A	焊接线速度/(m/min)	束流偏置距离/mm
60	7.0~8.5	2.4~2.7	0.9~1.4	0.10~0.15

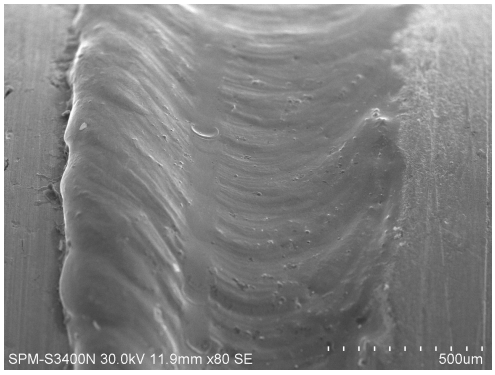
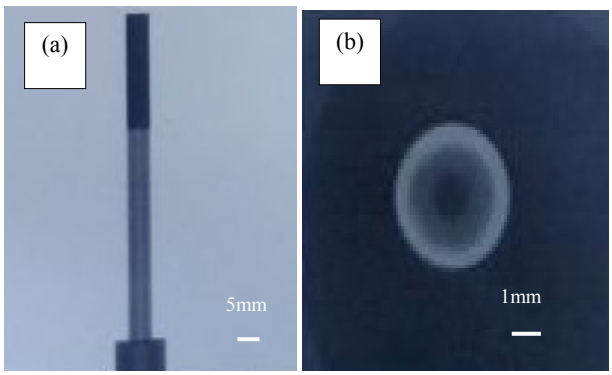


图 2　接头焊缝外观形貌

Fig.2 Appearance of joint weld



(a). DR image of the weldment; (b). CT image of the weld line

图 3　焊接件 CT 无损检测

Fig.3 CT nondestructive testing of the weldment

由图 2 可知，铂基合金与 GH3128 合金的焊缝表面成形良好，焊缝宽度均匀，无表面气孔、表面裂纹、未熔合、夹渣、焊瘤、飞溅、弧坑裂纹等表面缺陷。对焊接件的 DR 图像(图 3(a))做初步检查并确定焊缝的准确位置，每条焊缝扫描 5 层，切片厚

度 0.25 mm，切片间距 0.25 mm，得到焊缝的典型 CT 图像(图 3(b))。焊缝 CT 无损检测结果表明，焊缝质量良好，未发现焊接裂纹和未熔合现象，也没有气孔。

2.2 焊缝微观组织结构

图 4 为焊缝截面经机械打磨抛光后的显微组织形貌。由图 4 可知，焊缝未贯穿 GH3128 合金管，形状为倒三角状，上宽下窄，符合电子束焊接的典型特征。焊缝内部质量良好，在整个焊缝的截面中未发现焊缝气孔、裂纹、夹渣、未熔合等内部缺陷。

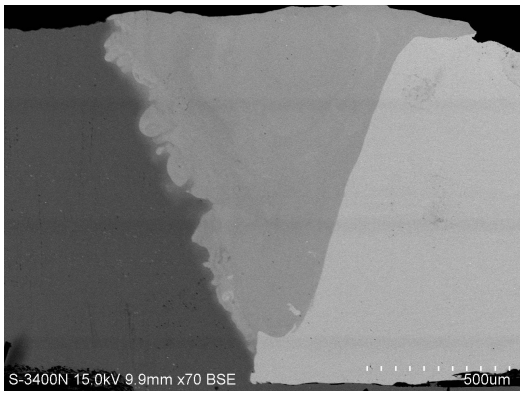
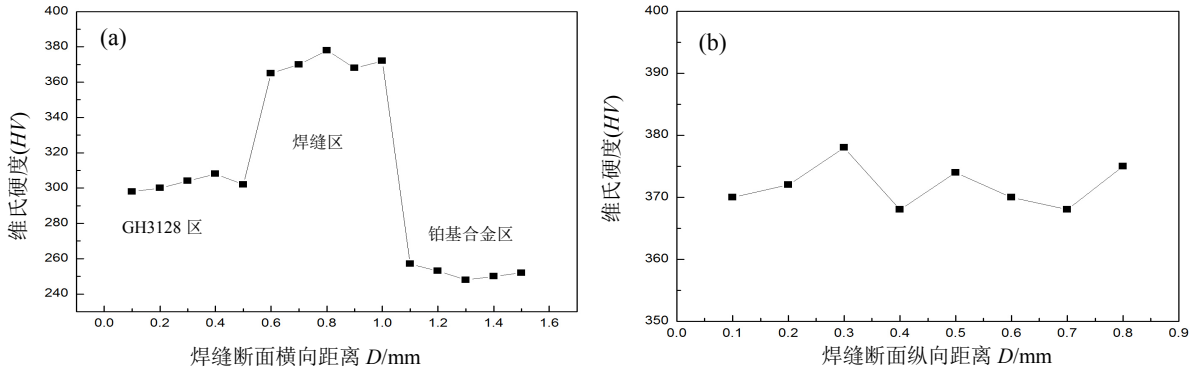


图 4 焊缝 SEM 图像

Fig.4 Weld line SEM image

2.3 焊缝区域的硬度分布

图 5 为焊缝区域的硬度分布图。



(a). 横断面(Transverse); (b). 纵断面(Longitudinal)

图 5 焊缝区硬度分布图

Fig.5 Hardness distribution diagram of weld zone

图 5(a)硬度横向分布的测量位置为焊缝的正中间，距离焊缝的顶部和底部的距离相等；图 5(b)硬度纵向分布的测量位置为焊缝正中间，镜像平分焊缝区，0 点处为焊缝顶部。从图 5(a)可以看出，焊缝区横向显微硬度最高，在 360~380 之间，母材之一的 GH3128 合金在 300~310 之间，另一母材铂基合金则在 250~260 之间。从图 5(b)可以看出，焊缝纵向显微硬度则变化不大，平均值为 371.8。

2.4 焊缝区域的能谱分析

图 6 为焊缝区域横截面纵向能谱线扫描分析。从图 6 中可以看出，在整个焊缝的熔深范围内，焊缝内各合金成分无明显突变，成分均一。

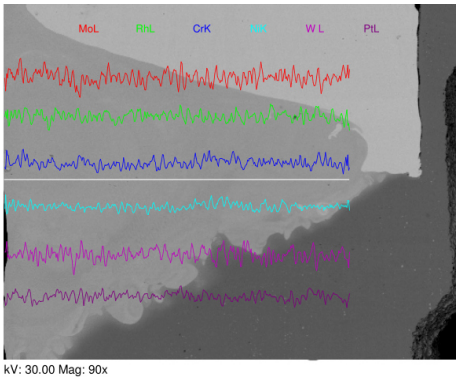


图 6 焊能谱分析

Fig.6 Weld line energy spectrum analysis

2.5 焊缝力学性能

使用 AG-X100kN 电子万能试验机对焊接件进行焊缝力学性能检测。焊接件最终断裂位置没有在焊缝处，而是位于铂基合金一侧，说明焊缝的强度超过了母材之一的铂基合金的强度。焊缝的拉伸应力应变曲线如图 7 所示。

根据图 7，铂基合金/GH3128 焊缝的焊缝的拉伸极限应力为 499 MPa，最大延伸率为 18%；焊缝无明显的屈服点。

焊缝断口形貌如图 8 所示。由图 8(a)可知，合金的断口呈明显的“杯锥断口”，而“杯锥断口”是常见的韧性断口，因此，合金材料在室温时的断裂方式为韧性断裂。由图 8(b)可明显的观察到断口由许多小窝组成，这是由于塑性变形过程中，所产生的微孔不断扩展和孔壁不断伸长而造成的韧窝。

综合力学性能及断口形貌，铂基合金与 GH3128 具有良好的焊接性能，焊缝塑性好，强度足够高，两者焊接后完全能够满足实际的使用要求。

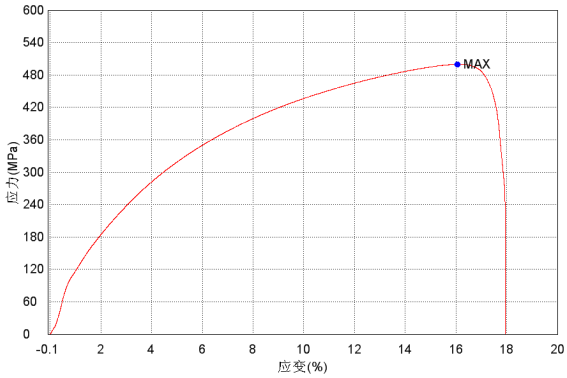
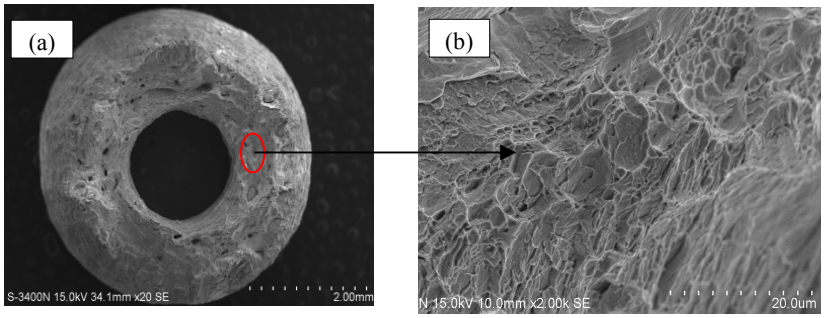


图 7 铂基合金/GH3128 高温合金焊缝应力应变曲线

Fig.7 Tensile stress-strain curve of Pt based alloy/GH3128 weld



(a). 全景(Full view); (b). 局部(Part view)

图 8 焊缝断口分析　Fig.8 Analysis of weld fracture

3　结论

1) 铂基合金与 GH3128 间具有良好的焊接性能，焊缝外观及内部均无缺陷。

2) 焊缝区硬度平均值为 371.8，高于母材铂基合金及 GH3128。

3) 焊缝断口位于铂基合金一侧，断裂方式为韧性断裂，强度和延伸率分别为 499 MPa 和 18%。

参考文献：

[1] 徐方涛, 张绪虎, 贾中华. 姿/轨控火箭发动机推力室高温抗氧化涂层[J]. 宇航材料工艺, 2012(1): 25-29.

[2] 宁远涛, 杨正芬, 闻飞. 铂[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.

[3] 宁远涛. 铂族金属高温固溶强化型合金[J]. 贵金属, 2009, 30(2): 51-56.

[4] 戚发轫, 朱仁璋, 李颐黎. 载人航天器技术[M].北京: 国防工业出版社, 2003.

[5] 张凯锋, 韩文波, 王国峰. 镍基合金超塑成形与扩散连接技术研究进展[J]. 塑性工程学报, 2004, 11(1): 1-5.

[6] 郭建亭. 高温合金材料学应用基础理论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[7] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第二卷[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[8] LI Z M, QIAN S J, WANG W. Characterization and oxidation behavior of NiCoCrAlY coating fabricated by electrophoretic deposition and vacuum heat treatment[J]. Applied surface science, 2011, 257(10): 4616-4620.

[9] 李志明, 钱士强, 王伟. 预氧化温度对 GH3128 合金抗高温循环氧化性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(11): 1980-1984.

[10] 牛济泰, 孟令辉, 张杰, 等. 航空航天材料的焊接与胶接[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.