18CrNiMo7-6合金结构钢真空电子束焊接头组织及性能研究

葛佳棋[1]，齐开庆[1]，范如意[2]，程肇君[1]，姚洋洋[1]

1.中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司　江苏常州　213011

2.励束智能制造（南通）有限公司　江苏南通　226199

摘要：采用真空电子束焊对18CrNiMo7-6合金结构钢进行了带锁底的对焊试验。通过对接头的组织形貌进行观察，并开展微观硬度、拉伸性能、冲击性能和疲劳性能等检测与试验，分析了18CrNiMo7-6合金结构钢真空电子束焊接头的组织和力学性能。结果表明：电子束热源能量密度高，焊接过程熔融金属快速冷却，接头焊缝区主要为板条马氏体组织，热影响区为马氏体＋铁素体的混合组织；焊缝区和热影响区硬度比母材高，接头抗拉强度达到950MPa，焊接系数达到0.91，焊缝和热影响区的冲击性能高于母材；疲劳极限为354MPa，断口形貌呈现明显的疲劳分区特征。

关键词：真空电子束焊；合金结构钢；微观组织；力学性能；疲劳性能

Microstructure characteristics and properties of 18CrNiMo7-6 structural alloy steel welding joint made by vacuum electron beam welding

GE Jiaqi[1], QI Kaiqing[1], FAN Ruyi[2], CHENG Zhaojun[1], YAO Yangyang[1]

1. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China

2. Lean Beam Intelligent Manufacturing (Nantong) Co., Ltd., Nantong 226199, Jiangsu, China

Abstract: Welding procedure test of 18CrNiMo7-6 with end-lock structure was carried out by vacuum electron beam welding. The microstructure and mechanical properties of vacuum electron beam welding joint of 18CrNiMo7-6 were analyzed by microscopic examination, microhardness, tensile test, Charpy impact test and fatigue test. The results show that, the molten metal is cooled rapidly during welding, weld region is mainly composed of lat martensite, and HAZ is composed of martensite and ferrite. Hardness value of weld zone and HAZ is higher than that of base material, the tensile strength of joint reaches 950MPa, and the welding coefficient reaches 0.91. The impact performance of weld and HAZ is higher than that of base material. The fatigue limit is 354MPa, the fracture morphology shows obvious fatigue partition characteristics.

Keywords: vacuum electron beam welding; structural alloy steel; microstructure; mechanical property; fatigue performance

第一作者：葛佳棋，博士，主要从事焊接工艺研究工作，E-mail：messiah35@sina.com。

1 序言

18CrNiMo7-6是一种具有高强度和高韧性的渗碳型合金结构钢，具有淬透性能优良、热处理变形量小等优点，表面进行渗碳和淬火处理后可获得较高的表面硬度和耐磨性，综合力学性能良好。作为常用的齿轮用钢，广泛应用于轨道交通、化工石化、矿山机械等行业[1-3]。目前，利用18CrNiMo7-6合金结构钢进行人字齿制造加工时，多采用一体化加工，在渗碳淬火及精加工后进行磨齿[4, 5]。该加工方法不可避免地需要留出一段退刀槽以防止加工干涉，因此会增大人字齿轮的轴向尺寸[6]。针对这一问题，行业内提出了分体加工再合体的制造思路[7]。

真空电子束焊是在真空条件下以高功率密度的电子束流轰击被焊金属实现金属连接的方法，具有热源能量密度高、穿透能力强、热影响区窄及焊接变形小等优点。针对铝合金、镁合金、碳素钢、不锈钢、钛合金、高温合金及异种金属等材料电子束焊连接的工艺研究均有较多报道[8-14]。与传统电弧焊相比，电子束焊大大提高了焊接效率和精确率。采用电子束焊对齿轮的分体结构进行焊接，配合热处理以及相关轮齿变形修正，完全可实现电子束焊人字齿轮的合体制造[15]。然而，人字齿在服役过程中，中心平面（即电子束焊缝所在平面）会受到来自齿啮合所导致的交变拉压应力及冲击力，因此电子束焊缝性能就直接影响了人字齿传动的安全与稳定。目前，针对18CrNiMo7-6合金结构钢电子束焊接头性能的研究较为少见，因此本文采用真空电子束焊对18CrNiMo7-6合金结构钢进行对接焊，并对其焊缝组织及接头性能进行分析，为人字齿分体加工再合体制造工艺的发展提供试验基础和依据。

2 试验方法

试验材料为18CrNiMo7-6合金结构钢，正火态，其微观组织形貌如图1所示，化学成分见表1。由图1可知，其微观组织为典型的平衡态组织，主要由铁素体（α-Fe）+片状珠光体（P）组成。尺寸规格为300mm×150mm×40mm，其中工艺锁底台阶厚度为8mm。

真空电子束焊接设备型号为SD85-001，如图2所示。最高加速电压85kV，功率15kW，真空室真空度＜10^{-3}Pa。焊前对待焊区进行机械打磨和丙酮擦洗，采用低功率电子束进行定位焊后进行深熔焊，焊接参数见表2。焊后对接头宏观组织进行观察，采用万能试验机和摆锤冲击试验机进行接头拉伸、疲劳和冲击试验，并利用扫描电镜表征接头微观组织形貌、元素分布及断口特征。

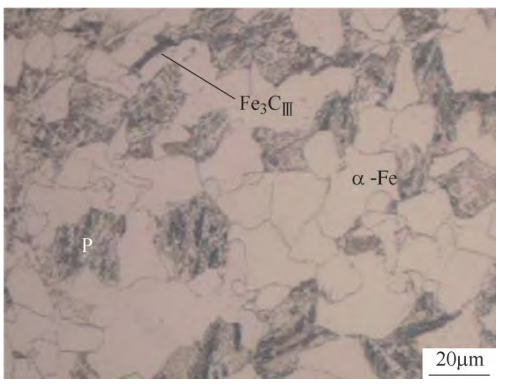

图1 18CrNiMo7-6合金结构钢微观组织形貌

表1 18CrNiMo7-6合金结构钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.15～0.21	≤0.40	0.50～0.90	≤0.025	≤0.035	1.50～1.80	0.25～0.35	1.40～1.70

图2 SD85-001型真空电子束焊设备

表2 真空电子束焊焊接参数

焊接步骤	加速电压/kV	焊接束流/mA	离焦量/mA	焊接速度/（mm/min）	起弧长度/mm	收弧长度/mm	扫描设置			
							形状	频率/Hz	*X*振幅/mm	*Y*振幅/mm
定位焊	80	10	+10	900	15	15	○	200	0.2	0.2
深熔焊	80	106	−22	480	15	15				

3 试验结果与分析

3.1 接头组织形貌

带锁底结构的真空电子束焊接头，通常要求熔深至锁底位置，焊缝根部形貌如图3所示。由图3可知，焊缝底部至试板底面为5.8mm，即焊缝熔深34.2mm，该工艺条件满足锁底结构接头的熔深要求。去除锁底后接头横截面宏观形貌如图4所示。焊缝区（WZ）整体呈现为钉形，成形良好，未发现内部存在明显气孔、裂纹等缺陷。随着电子束轰击深度的增加，对下层金属的热输入量逐渐减少，焊缝金属及热影响区（HAZ）的宽度从上而下呈现变窄趋势。由于真空电子束焊较高的能量密度和焊接速度，因此焊缝区明显可见对称分布的柱状晶组织，且柱状晶主轴与最大温度梯度方向一致，与焊缝中心线大体垂直。

图3 焊缝根部形貌

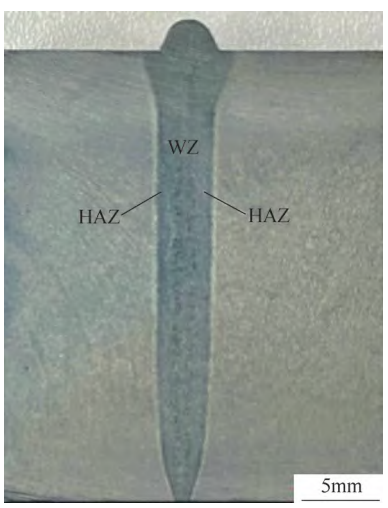

图4 去除锁底后接头横截面宏观形貌

采用光学显微镜和扫描电镜对接头的不同区域进一步观察分析，热影响区显微组织如图5所示。由图5可知，该区域在焊接过程中受电子束热源影响，经历快速升温和降温，同时由于母材较高的淬透性，冷却过程中部分组织转变为马氏体，因此表现为不同取向的马氏体条定向排列状态，呈现板条马氏体＋铁素体的混合组织形貌。接头熔合区显微组织如图6所示。由图6可知，熔融金属依附在母材半熔化晶粒上形核，形成联生结晶，并沿最大温度梯度方向生长，生成柱状晶组织状态。由于形核处母材晶粒位向的差异，宏观上表现为垂直于焊缝中心线定向生长的柱状晶，在生长初期彼此交叉。焊缝区显微组织如图7所示。由于熔融金属的快速冷却，因此焊缝中心区域表现为长条状枝晶形貌，显微组织主要由板条马氏体组成。焊缝中心扫描电镜图像如图8所示，图8中谱图1和谱图2处的能谱分析结果见表3。由表3可知，枝晶间区域合金元素均比长条状枝晶内的含量略高。分析认为，在凝固过程中溶质元素随固-液界面的移动发生重新分布，其扩散速度小于凝固速度，导致一定程度的偏析现象。

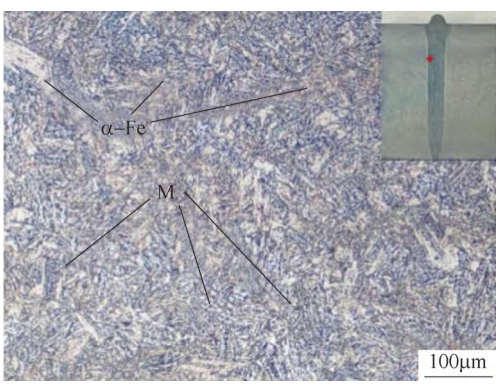

图5 热影响区显微组织

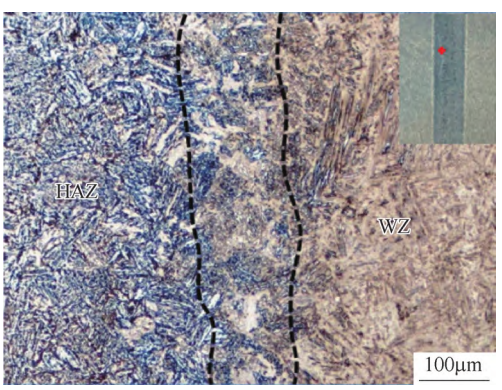

图6 熔合区显微组织

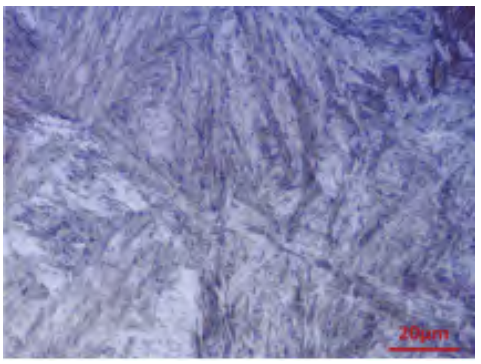

图7　焊缝区显微组织

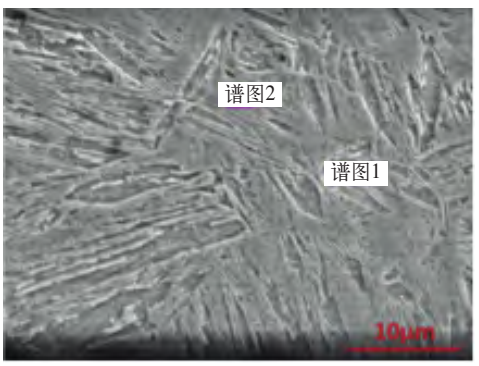

图8　焊缝中心扫描电镜图像

表3　焊缝中心能谱分析结果　（%）

元素	质量分数		原子分数	
	谱图1	谱图2	谱图1	谱图2
Cr	1.74	2.15	1.86	2.30
Mn	0.67	0.96	0.68	0.97
Fe	97.15	95.80	97.03	95.24
Ni	0.44	0.64	0.42	0.61
Si	—	0.45	—	0.88

3.2　显微硬度

在接头的顶部和底部（距试样上下表面2mm处）检测显微硬度，焊缝区测量间距0.5mm，热影响区测量间距0.25mm，母材测量间距1mm，显微硬度分布如图9所示。母材平均硬度为322HV，顶部的两侧热影响区硬度分别为357HV和413HV，底部两侧热影响区显微硬度分别为447HV和430HV，顶部焊缝和底部焊缝的硬度基本一致，为431HV。从检测结果来看，顶部热影响区硬度较低，推测其原因是焊接过程中接头上部区域热输入较高，产生的马氏体组织晶粒粗大，相比于底部细小马氏体组织，晶界较少，阻碍位错运动效果有限，且上部区域利用焊后接头余热温度产生自回火，故顶部区域的热影响区硬度低于底部区域热影响区。而焊缝的上下区域生成晶粒大小较为一致的柱状晶，整体硬度差别不大。

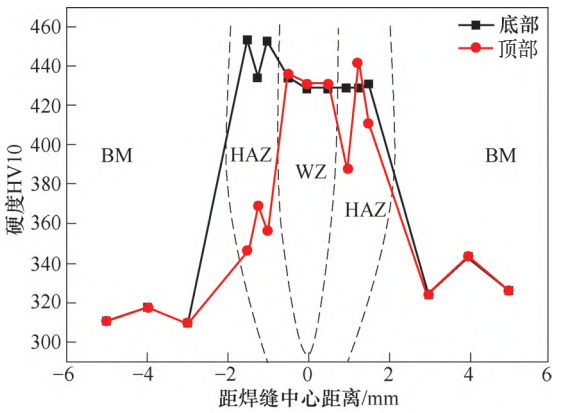

图9　接头顶部和底部位置显微硬度分布

3.3　力学性能

对焊接试样进行拉伸性能分析，取样时去除根部锁底台阶后进行分层取样，考虑到线切割加工量，每层拉伸试样厚度为10mm，拉伸试验结果见表4。由表4可知，接头的抗拉强度达到950MPa，且各层强度无明显变化趋势，焊接系数达到0.91。

在常温条件下，采用夏比V型缺口试样对接头的热影响区和焊缝区进行冲击性能试验，并与母材冲击性能对比，接头的冲击吸收能量如图10所示。从图10可看出，热影响区冲击吸收能量在138J左右；焊缝区冲击吸收能量略高于热影响区，为146J左右；焊缝区和热影响区的冲击吸收能量均超过母材。在当前真空电子束焊工艺条件下，焊缝和热影响区表现出较好的冲击性能，且焊缝和热影响区的冲击吸收能量数值相对集中。分析认为，材料的化

表4　焊接接头拉伸试验结果

试样位置	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率（%）
上层	950	682	6.0
	951	695	7.0
中层	944	690	7.5
	946	685	6.0
下层	953	693	8.0
	945	687	6.0
母材	1045	829	9.5

学成分、显微组织、晶粒度，以及是否含有偏析、非金属夹杂物等冶金缺陷，都会导致材料冲击吸收能量数值的离散性。高能量密度的电子束热源会使焊缝区生成细小的马氏体组织，同时由于板材厚度的原因产生自回火效应，使接头区域在获得较高硬度的同时，也获得了良好的冲击性能。

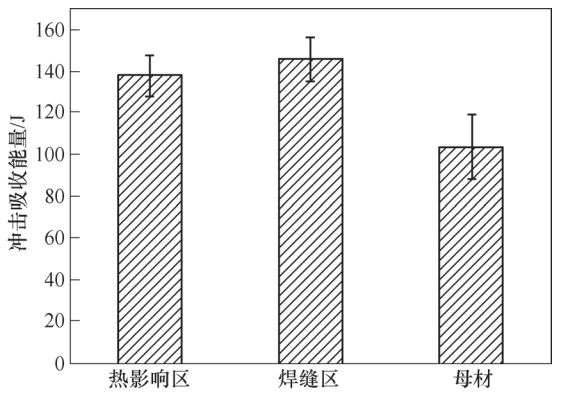

图10　常温条件下接头的冲击吸收能量

3.4　疲劳性能

采用循环载荷正弦波拉应力对接头开展疲劳性能测试，应力比为0.1。应力分散度为4级（380MPa、360MPa、340MPa、320MPa），表明了不同位置处的接头力学性能存在一定差异，这种差异可能由微观组织的不同引起，或由焊接过程中出现的微观缺陷造成。接头的循环拉应力疲劳曲线如图11所示。由图11可知，随着应力幅的降低，接头的疲劳寿命基本呈增加趋势，根据试验数据计算出接头的疲劳极限为354MPa。疲劳断口宏观形貌如图12所示。从图12可明显区分出疲劳裂纹扩展区（FCG）、过渡区及瞬断区等几个区域，属于典型的疲劳开裂形貌。疲劳源为真空电子束焊缝底部的微观气孔，直径约为400μm，此处断口较为平坦光亮；在疲劳裂纹扩展区以疲劳源为中心，表现出较为明显的贝壳花样，弧带为圆形；瞬断区在扩展区的外侧，且瞬断区因在疲劳试验末期拉力作用下而快速断裂，与扩展区所在平面之间存在一定倾斜角度。扩展区疲劳辉纹如图13所示，扩展区解理断口如图14所示，瞬断区微观形貌如图15所示。由图13～图15可知，裂纹扩展区呈现疲劳辉纹和解理断裂的组合特征，在近疲劳源位置主要为疲劳辉纹形貌，辉纹密而直，且相互平行，远离疲劳源位置呈河流花样或扇形花样特征。瞬断区呈现明显的韧窝特征，表明该区域以韧性断裂模式为主，分析原因认为，在疲劳开裂过程中，随着解理裂纹的扩展，形成较大的台阶，裂纹走向有从焊缝传递至母材的倾向，断口上宏观可见的瞬断区与扩展区之间的倾角可验证这一现象。因此，最终裂纹传递至母材，铁素体组织在循环拉应力的作用下产生滑移变形，形成微孔并不断扩展，导致最终的断裂。

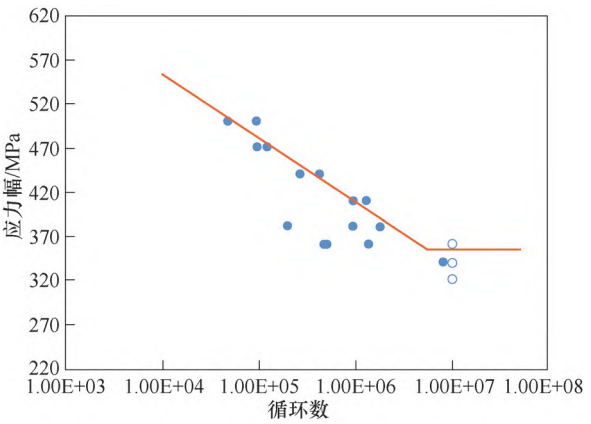

图11　接头循环拉应力疲劳曲线

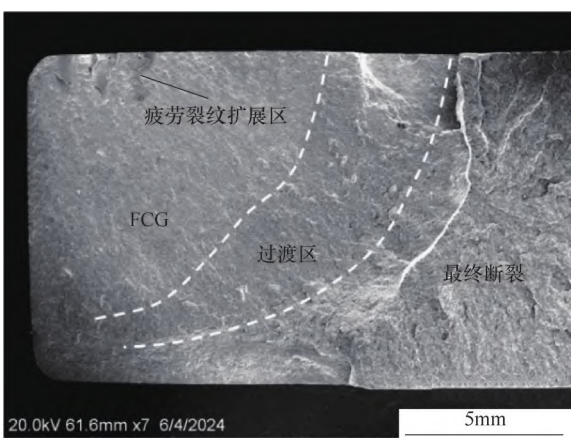

图12　疲劳断口宏观形貌

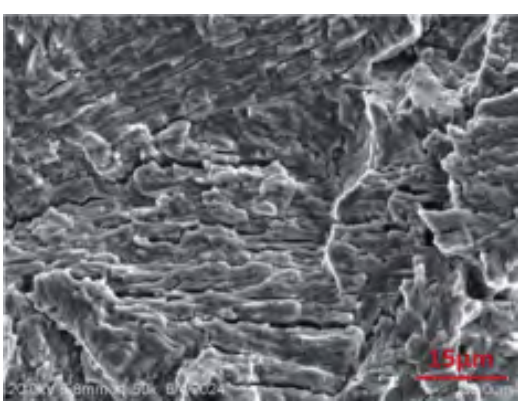

图13　扩展区疲劳辉纹

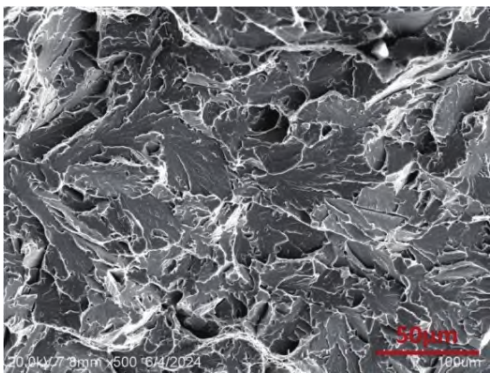

图14　扩展区解理断口

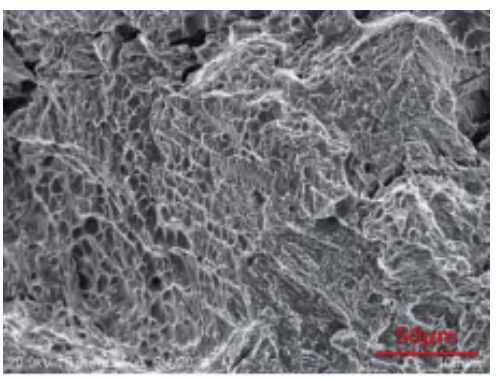

图15　瞬断区微观形貌

4　结束语

1）采用真空电子束焊方法实现了18CrNiMo7-6合金结构钢的焊接，“钉形”焊缝成形良好。接头的快速升降温使焊缝区呈现明显的柱状晶形貌，主要由板条马氏体组成，热影响区由马氏体＋铁素体的混合组织组成。

2）接头抗拉强度为950MPa，焊缝厚度方向上无明显区别，焊接系数达到0.91，热影响区冲击吸收能量均值为138J，焊缝区冲击吸收能量均值为146J，表明合理的真空电子束焊工艺可使接头在获得高硬度的同时，也能获得良好的冲击性能。

3）接头疲劳极限为354MPa，断口形貌分区特征明显，疲劳裂纹扩展区以微观缺陷疲劳源为中心向外扩散，呈现疲劳辉纹和解理断裂组合特征，瞬断区呈现明显韧窝特征。

参考文献：

[1] 朱百智，李小末，张伟. 不同渗碳淬火模式下的18CrNiMo7-6钢晶粒度研究[J]. 金属加工（热加工），2020（5）：24-27.

[2] 顾晓明，吕蓝冰. 风电增速箱18CrNiMo7-6滚道行星轮冲击性能可靠性分析[J]. 金属加工（热加工），2023（10）：92-96.

[3] 张军豪，王文先，闫志峰，等. 18CrNiMo7-6高铁齿轮钢的疲劳极限评定[J]. 机械工程材料，2023（3）：23-27，40.

[4] 施健兵. 人字齿加工工艺研究[J]. 金属加工（冷加工），2017（5）：32-35.

[5] 高红梅，文超，杨明华，等. 18CrNiMo7-6齿轮钢真空渗碳工艺研究[J]. 失效分析与预防，2022（3）：49-52.

[6] 陈臻伟. 无退刀槽人字齿轮的数控加工及刀路优化[D]. 湘潭：湘潭大学，2016.

[7] 魏广远，张东垒，刘文宽，等. 组合人字齿轮的加工方案[J]. 机械工程师，2015（11）：243-244.

[8] 张占伟，王生鹏，宋雨键，等. 3A21铝合金电子束焊工艺及接头组织与性能研究[J]. 热加工工艺，2020，49（13）：15-18.

[9] 吴国华，张国庆，童鑫，等. 镁稀土合金焊接工艺及组织性能研究现状与展望[J]. 有色金属科学与工程，2021，12（1）：116-125.

[10] 赵磊，张连华，孙丙岩. 30CrMoV9钢真空电子束焊接性研究[J]. 机车车辆工艺，2013（5）：15-16.

[11] 胡兴，彭昭成，冯广杰，等. SUS310S不锈钢局部真空电子束焊接接头残余应力及变形研究[J]. 机械工程学报，2020，56（21）：38-47.

[12] 高奇，蒋鹏，耿永亮，等. Ti-6321大厚度钛合金电子束焊接接头组织及性能[J]. 稀有金属材料与工程，2020，49（3）：990-996.

[13] 张建晓，管志忱，黄健康，等. Incoloy825镍基高温合金电子束焊工艺及接头组织与力学性能分析[J]. 焊接学报，2020，41（10）：32-37.

[14] 丁浩，鲍雨梅，张锐之，等. T2紫铜-45钢异种材料电子束焊的焊接接头强度与缺陷评定[J]. 焊接学报，2018，39（5）：43-46.

[15] 关荣鑫，丁英晖，秦磊，等. 电子束焊人字齿轮的轮齿变形分析与修正[J]. 机械传动，2018，42（8）：143-147.

（收稿日期：20250212）