3种典型航空齿轮钢电子束焊接头微观组织与力学性能

余槐¹, 袁鸿¹, 张国栋¹, 王金雪¹, 张鹏¹, 曲文卿², 宋邹昊²

(1. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095;

2. 北京航空航天大学,北京 100191)

摘要:齿轮轴的高质量焊接是影响直升机功重比和服役性能的关键,论文探讨了电子束焊接过程对中国三代典型的齿轮钢材料(9310,16Cr3NiWMoVNbE和CSS-42L)的微观组织与力学性能的影响。结果表明,3种齿轮钢基体组织均为细小针状马氏体,而电子束焊缝则显著粗化,尤其9310焊缝晶粒长大明显,CSS-42L热影响区在电子束热作用下变化显著,从焊缝边界到母材可分为4种不同形貌的组织,呈现出极端不均匀的现象。9310和16Cr3NiWMoVNbE焊缝显微硬度明显高于基体,而CSS-42L焊缝显微硬度则显著低于基体;3种焊接接头显微硬度最低值均出现在热影响区,表明热影响区是整个结构最薄弱区域,力学性能测试结果也充分表明了这一结论。3种齿轮钢电子束焊接头拉伸断裂全部发生在热影响区,强度较基体稍有下降;断裂之前发生了明显的颈缩现象,塑性下降不显著。CSS-42L性能显著优于9310和16Cr3NiWMoVNbE,CSS-42L电子束焊接头强度也高出9310焊接接头强度50%,塑性更加显著,高出超过20%。研究结果为直升机传动系统制造提供科学依据。

关键词:齿轮钢;电子束焊;力学性能;微观组织;断裂位置

中图分类号: TG456.3 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hj.20230710001

Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of three typical aviation gear steels

Yu Huai¹, Yuan Hong¹, Zhang Guodong¹, Wang Jinxue¹, Zhang Peng¹, Qu Wenqing², Song Zouhao² (1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: High quality welding of gear shaft is critical to improving power-to-weight ratio and service performance of helicopter transmission systems. Effect of electron beam welding process on microstructure and mechanical performance of three gear steels (9310, 16Cr3NiWMoVNbE and CSS-42L) was deeply discussed. The results showed that microstructure of three gear steel was all tiny needle martensite, grain size of weld was obviously coarse after electron beam welding, especially grain size of 9310 weld was obviously coarse. Significant change appeared in heat affected zone of CSS-42L under the action of electron beam heat, four different kinds of microstructure formed from weld boundary to base metal, appearing extremely inconsistency phenomenon. Hardness of 9310 and 16Cr3NiWMoVNbE weld was higher than that of base metals, while hardness of CSS-42L weld was lower than that of base metal. The lowest hardness zone of three kinds of welded joints was all located in HAZ, indicating that HAZ was the weakest zone of welded joints, and it was supported by mechanical test results. Tensile fracture appeared in HAZ of three EBW joints. Tensile strength and torsional strength of welded joints were slightly lower than those of base metals. Obvious necking phenomenon occurred before fracture, so plasticity reduction was little. Mechanical properties of CSS-42L were all higher than those of 9310 and 16Cr3NiWMoVNbE. Strength of CSS-42L EBW joints was higher over 50% than that of 9310 EBW joints, and plasticity exceeded over 20% than those of two gear steel EBW joints. The results provided scientific support for manufacturing of helicopter transmission systems.

Key words: gear steel, electron beam welding, mechanical properties, microstructure, fracture position

0 前言

作为直升机三大关键动部件之一,传动系统是发 动机向旋翼及直升机附件提供转速和扭矩的唯一途 径,是保障直升机安全可靠运行的重要基础^[1],具有 高功重比、高减速比、高效率、高可靠、高生存能力 和长寿命要求等特点^[2]。高温高速重载特定复杂工 况导致传动系统动力学问题突出、对维护性要求高。 传动系统最典型结构就是齿轮与传动轴的焊接结构, 其高可靠性性能随着航空器对更高功重比的追求, 对结构材料的本征性能及传动轴与齿轮的焊接制造 要求都越来越高。

目前,中国航空器传动结构材料均为典型中低碳 超高强度轴承齿轮钢,其发展历程根据其服役温度 目前经历了三代。第一代齿轮钢为低碳低合金钢, 以Cr-Ni, Cr-Ni-W和Cr-Ni-Mo三大合金系为主,9310 是Cr-Ni-Mo系低碳低合金钢系列中镍含量最高,淬 透性最好的典型钢种,常在低温回火后常温使用,是 国内外航空航天等领域广泛应用的一种高强高韧渗 碳钢^[3-4],主要应用于制造中重载荷、中大截面尺寸 航空动力传动系统中的齿轮、齿轮轴、旋翼轴等构件。 16Cr3NiWMoVNbE钢具有晶粒长大倾向低、淬透性 高、抗拉强度高、塑韧性好等优异的综合性能¹⁵,借 助特殊表面改性工艺路径及方法,具备了300℃中 高温区服役的能力,因此成为中国第二代航空渗碳 齿轮钢(服役温度 200~350 ℃)。CSS-42L 钢⁶⁶ 为可 渗碳的超高强耐高温轴承齿轮钢,具有优异的高 温红硬性、耐磨性及耐蚀性,芯部组织保持着极高 的强度与断裂韧度,服役耐温性较第二代渗碳齿轮 钢提升100℃以上,具备了400℃以上的优异高温

热稳定性,确保齿轮在无油干运转状态仍表现出良好的高温红硬性,成为首个成功应用的第三代传动结构材料牌号。目前,中国针对9310钢研究较多,而16Cr3NiWMoVNbE钢的组织与性能研究就少了许多,而CSS-42L钢相关数据更是稀少,尤其是其焊接性能目前极少见于文献。

传统熔化焊技术难以满足航空齿轮结构高强高 精度要求^[7-8]。电子束焊(Electron beam welding, EBW) 是当前航空传动结构可靠焊接的第一优选^[9-10]。针 对航空高强渗碳齿轮钢焊接的研究也是以 9310 钢研 究和应用较多,例如,覃巍^[11]探究了电子束焊接工艺 参数对 9310 钢焊缝成形、接头组织特征和力学性能 的影响。林楚新^[12] 对 9310 尾桨齿轮轴电子束焊缝在 疲劳试验时出现裂纹的原因及控制方法进行了探讨。 目前,关于第二代和第三代齿轮钢电子束焊接组织 与性能的研究工作存在空白。

因此,该文针对9310,16Cr3NiWMoVNbE,CSS-42L 等3种典型齿轮钢材料,对比分析了其电子束焊接 头的微观组织和力学性能,讨论了三代齿轮钢材料 和电子束焊缝的微观组织和性能差异,为直升机传 动系统齿轮钢电子束焊接制造提供数据和理论 支持。

1 试验材料及方法

9310,16Cr3NiWMoVNbE,和CSS-42L的化学成分 见表1。图1为3种齿轮钢材料的微观组织。

电子束焊工艺参数为:加速电压 90 kV、电子束 流 58 mA、焊接速度 6 mm/s、真空压强不大于 5×10⁻³ Pa。接头形式为典型的对接锁底形式,如图 2 所示。

焊后对焊缝进行微观组织分析,腐蚀液为硫酸铜

母材	С	Cr	Ni	Мо	Nb	W
9310	0.07 ~ 0.13	1.0 ~ 1.4	3.0 ~ 3.5	0.08 ~ 0.15	_	
16Cr3NiWMoVNbE	0.14 ~ 0.19	2.6 ~ 3.0	1.0 ~ 1.5	0.40 ~ 0.60	0.10 ~ 0.20	1.0 ~ 1.4
CSS-42L	0.11 ~ 0.16	12.0 ~ 15.0	1.80 ~ 2.20	4.50 ~ 5.00	0.010 ~ 0.035	0.40 ~ 0.80
母材	Со	Si	V	Mn	Ce	
9310	_	0.15 ~ 0.35	_	0.4 ~ 0.7	_	
16Cr3NiWMoVNbE	_	0.60 ~ 0.90	0.35 ~ 0.55	$0.40 \sim 0.70$	0.01 ~ 0.20	
CSS-42L	11.0 ~ 13.0	≤0.10	0.50 ~ 0.70	≤0.10	_	

表1 齿轮钢化学成分表(质量分数,%)



(a) 9310



(b) 16Cr3NiWMoVNbE



(c) CSS-42L

图 1 3种齿轮钢材料的微观组织



图 2 对接锁底结构示意图

盐酸溶液(硫酸铜 4 g、盐酸 20 mL、水 20 mL),采用 XT-05C 体视显微镜观察接头宏观形貌,采用 Zeiss Axio Scope.A1 光学显微镜观察接头微观形貌。

拉伸试验按照 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》执行,3种齿轮钢母材及焊接接头拉伸试样平行段原始直径 d₀=5 mm,标

距长度 L_0 =25 mm。试验设备为 MTS-810 液压伺服材 料试验机,所测数据为 5 次测量后的平均值。扭转试 验按照 GB/T 10128—2007《金属材料 室温扭转试验 方法》执行, 3 种齿轮钢母材及焊接接头拉伸试样平 行段原始直径 d_0 =5 mm,标距长度 L_0 =50 mm。试验设 备为 QBN-500 扭转试验机,加载速率为 16°/min。断 口形貌采用 JSM 6010 扫描电镜观察。

2 结果与分析

2.1 齿轮钢母材与 EBW 接头微观组织

图 3 为 3 种齿轮钢材料电子束焊缝的宏观形 貌,可以看到 3 种焊缝均呈现典型丁字形形貌,无 裂纹、缩孔等缺陷,均实现了良好的冶金结合。与 3 种基体组织相比,电子束焊缝组织明显粗化,呈现 出典型的粗大树枝晶组织,热影响区组织也明显异 于基体组织。此外,9310,16Cr3NiWMoVNbE和CSS-42L电子束焊缝的深宽比分别达到了 15:2,16:2 和 13:2,显然,CSS-42L钢的熔深明显小于 9310 钢和 16Cr3NiWMoVNbE钢,且热影响区相对较宽,说明电 子束能量对基体的热影响更大。



图 3 3 种材料 EBW 接头宏观组织

为了进一步分析电子束焊接过程对3种齿轮钢 组织的热影响,图4和图5分别给出了3种齿轮钢电 子束焊缝区域和热影响区的微观组织,以与图1的3 种齿轮钢基体微观组织对比分析。

图 1 的 3 种齿轮钢基体组织均为细小针状马氏体,保证了材料具有较高的强度和良好的塑性。而 电子束焊缝组织(如图 4 所示)明显粗于基体组织,其 中 9310 焊缝组织显著粗大;焊缝组织呈现了明显的 不均匀性,多数焊缝区域组织为典型的树枝晶,由熔 合线向焊缝中心生长,焊缝中心位置则存在少量等



(a) 9310



(b) 16Cr3NiWMoVNbE



(c) CSS-42L

图 4 焊缝微观组织

轴晶;这是由于高能电子束对基体材料热作用的极度不均匀造成的,焊缝中心呈现极高温度,沿着垂直于熔合线的方向呈现了极大的温度梯度,冷却速度快,从而生成了大量树枝晶。9310,16Cr3NiWMoVNbE和CSS-42L齿轮钢焊缝的树枝晶组织方向性逐渐显著化,而晶粒度则逐渐细化,CSS-42L电子束焊缝组织与基体组织差异最为悬殊。

图 5(a) 和图 5(b) 的 9310 和 16Cr3NiWMoVNbE 电 子束焊接热影响区组织形貌与其基体组织差异较小, 靠近熔合线的热影响区显微组织表现为较为粗大 的板条马氏体,远离熔合线区域的马氏体晶粒尺寸 逐渐减小,与基体组织非常相似,说明电子束焊热影 响较小。CSS-42L 热影响区组织与基体明显不同,



(a) 9310



(b) 16Cr3NiWMoVNbE



(c) CSS-42L-1





图 5 热影响区微观组织

如图 4(c) 和图 4(d) 所示, 在电子束热作用下发生了显著变化, 从焊缝边界到母材可分为4种不同形貌的热影响区组织, 呈现出热影响区组织极端不均匀的现象。

2.2 齿轮钢 EBW 接头显微硬度

3种齿轮钢基体组织在 EBW 焊接过程热作用下 显微组织产生了显著变化,其性能也发生了明显变 化,图 6 给出了 3 种材料 EBW 焊接区域显微硬度分 布情况。由图可以看到,9310 钢 EBW 接头的显微硬 度呈现典型的"Ω"形分布。母材区组织为低碳回火 马氏体,显微硬度适当(313 HV);而焊缝组织为典型 的粗大板条马氏体,显微硬度达到了 398 HV,显著高 于其他区域,说明焊缝冷却速度快淬火形成淬硬马



图 6 3 种齿轮钢 EBW 焊缝区显微硬度分布

氏体:热影响区显微硬度分布相对不均匀,出现了高 低2个区域,靠近焊缝一侧的热影响区也发生了硬化, 显微硬度为337 HV, 略高于母材, 该区域组织形成粗 大的板条马氏体及少量残余奥氏体组织;而靠近母 材一侧的热影响区发生了回火软化,强化相消融,显 微硬度降低为 285 HV。16Cr3NiWMoVNbE 钢 EBW 接头的显微硬度分布同样呈现"Ω"形。母材组织为 回火马氏体,组织细小均匀,显微硬度为489 HV:焊 缝组织为粗大板条马氏体,显微硬度达到了 512 HV; 热影响区晶粒大小随着距焊缝距离的增大而减小, 显微硬度也从焊缝向母材逐渐降低,靠近焊缝侧显 微硬度为 502 HV, 靠近母材侧显微硬度只有 463 HV, 说明发生了回火软化。CSS-42L钢 EBW 接头显微硬 度分布与前2种材料的焊接接头完全不同,母材由板 条马氏体、奥氏体薄膜及微纳米碳化物构成,显微硬 度最高,达到了551 HV:焊缝中心为少量等轴晶,显 微硬度为485 HV,两侧为柱状晶,显微硬度为513 HV; 热影响区组织非常复杂且不均匀,依次形成粗大板 条马氏体区(HAZ1)、残余奥氏体区(HAZ2)、索氏体 和托氏体区(HAZ3)、近似母材的马氏体区(HAZ4), 显微硬度明显降低,说明发生了较明显的软化现象, HAZ1, HAZ2, HAZ3 和 HAZ4 的显微硬度平均值分别 为 507 HV, 499 HV, 410 HV 和 503 HV, 其中 HAZ3 显 微硬度显著低于接头其他区域。

总体而言,9310,16Cr3NiWMoVNbE和CSS-42L 基体显微硬度逐渐升高,分别为313 HV,489 HV和551 HV,而其EBW焊缝显微硬度则分别398 HV,512 HV 和510 HV,热影响区成为显微硬度最低区域,分别只有 285 HV,46 HV和410 HV。9310和16Cr3NiWMoVNbE 焊接接头区域的显微硬度分布与CSS-42L显著不同, EBW焊缝显微硬度明显高于基体组织,而CSS-42L 焊缝显微硬度明显低于基体;相同之处在于3种齿轮 钢EBW接头显微硬度最低值均出现在热影响区,因 此,3种材料宏观力学性能测试时,热影响区就将成 为断裂区域。

2.3 齿轮钢基体与 EBW 接头力学性能

表 2 和图 7 分别为 9310, 16Cr3NiWMoVNbE 和 CSS-42L 基体与 EBW 接头力学性能测试结果(抗拉 强度、抗扭强度和断后伸长率)。由表 2 可知, 9310 钢 EBW 接头的强度较基体强度下降了 10% 左右, 塑 性仅有基体的 64%; 16Cr3NiWMoVNbE 钢 EBW 接头 的强度和塑性与基体基本相当; CSS-42L 钢 EBW 接

试样名称	屈服强度 R _{eH} /MPa	抗拉强度 R _m /MPa	断后伸长率 A(%)	抗扭强度 R _t /MPa				
9310 母材	832.0	1 077.0	13.9	894				
9310 接头	803.0	954.1	8.9	816				
16Cr3NiWMoVNbE 母材	1 159.9	1 430.6	9.4	1 175				
16Cr3NiWMoVNbE 接头	1 239.1	1 424.0	8.1	1 170				
CSS-42L 母材	1 370.1	1 884.4	11.9	1 522				
CSS-42L 接头	1 240.6	1 440.6	10.6	1 316				

表2 3种齿轮钢母材及接头拉伸试验结果及扭转试验结果



图 7 3 种齿轮钢与其 EBW 接头的力学性能

头的强度较基体稍有下降(76%~86%),塑性没有明显下降,依然保持了断后伸长率超过10%的优异性

能。从上述 3 种齿轮钢基体和 EBW 焊接接头力学性 能数据对比发现,作为第三代齿轮钢的典型代表 CSS-42L 本身性能显著优于 9310 和 16Cr3NiWMoVNbE,强 度(包括抗拉强度和抗扭强度)分别提高了超过 70% 和 30%,而塑性基本不降低,略低于 9310,明显高于 16Cr3NiWMoVNbE。CSS-42L 电子束焊接接头强度比 9310 焊接接头强度提高了 50%,与 16Cr3NiWMoVNbE 焊接接头强度相当,但塑性明显高出 20% 和 32%。

由上述焊接接头力学性能测试结果可以发现, 3种基体材料塑性均不低于9%,而焊接接头也具有 较好的不低于8%的塑性,CSS-42L电子束焊接接头 塑性甚至达到了10.6%,因此,3种齿轮钢基体和电 子束焊接接头拉伸时均出现了较为明显的颈缩现 象,3种接头的断裂位置均发生在焊缝与母材的过 渡段,如图8所示,从断裂试件可以看出,3种材料 的焊缝区域均没有发生颈缩和断裂现象,颈缩是从 焊接接头的热影响区靠近母材的回火软化区开始 出现,最后断裂在该区域,图9(a)为CSS-42L齿轮钢



图 8 3 种齿轮钢基体和 EBW 接头的拉伸断裂试

电子束焊接接头断裂宏观形貌图。断裂试件的颈 缩现象非常明显,表征了较好的塑性,其中9310钢 接头拉伸试样出现了双颈缩现象,颈缩位置关于焊 缝中心对称。图9(b)和图9(c)分别为CSS-42L基体 和EBW焊接接头拉伸断口微观形貌,基体和接头 断口上均存在很多的韧窝,撕裂岭明显,焊接接头 和基体并没有太大差异,说明二者断裂形式相同, 均属于韧性断裂。



(a) 接头断裂宏观形貌



(b) 基体断口形貌



(c) 接头断口形貌

图 9 CSS-42L 基体和 EBW 接头拉伸宏微观形貌

3 结论

(1)9310,16Cr3NiWMoVNbE和CSS-42L齿轮钢 母材组织均为细小针状马氏体,电子束焊接之后焊 缝组织明显粗化,尤其是9310焊缝晶粒长大显著, 焊缝主要为粗大树枝晶为主,中心存在少量等轴晶。 9310和16Cr3NiWMoVNbE热影响区晶粒组织与母 材差异不大,而 CSS-42L 热影响区在电子束热作用 下热影响区组织变化显著,从焊缝边界到母材可分 为4种不同形貌的热影响区组织,呈现出极端不均 匀的现象。

(2)9310 和 16Cr3NiWMoVNbE 焊缝区显微硬度 明显高于基体, 而 CSS-42L 焊缝显微硬度则显著低于 基体; 3 种焊接接头显微硬度最低值均出现在热影响 区, 表明热影响区是整个结构最薄弱区域。

(3)3种齿轮钢电子束焊接头拉伸断裂全部发生 在热影响区,强度较基体稍有下降;断裂之前发生了明 显的颈缩现象,塑性下降不显著,均为典型的韧性断裂。 CSS-42L本身性能显著优于9310和16Cr3NiWMoVNbE, 电子束焊接头强度也高出9310焊接接头强度50%, 塑性更加显著高出超过20%。

参考文献

- [1] 佘亦曦,康丽霞,唐朋.直升机传动系统的现状与发展研究[J].航空科学技术,2021,32(1):78-82.
- [2] 陈铭, 徐冠峰, 张磊. 直升机传动系统和旋翼系统关键技术 [J]. 航空制造技术, 2010(16): 32 37.
- [3] 郑医,何培刚,李宁,等.航空渗碳齿轮钢的迭代发展[J]. 航空材料学报,2023,43(1):60-69.
- [4] 吴秋平, 王春旭, 刘宪民, 等. 回火温度对 9310 钢力学性 能及组织的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(6): 179-180, 183.
- [5] 滕佰秋,常春江. 航空发动机用新材料—6Cr3NiWMoVNbE 齿轮钢 [J]. 航空发动机, 2003, 29(2): 34 37.
- [6] Yang Changyong, Xu Jiuhua, Fu Yucan. et al. Investigation on the grindability of CSS-42L stainless steel[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 33(6): 706 – 713.
- [7] Üstündağ Ö, Gook S, Gumenyuk A, et al. Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 275: 116358.
- [8] Teemu Lahtinen, Pedro Vilaça, Virgínia Infante. Fatigue behavior of MAG welds of thermo-mechanically processed 700MC ultra high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 126: 62 – 71.
- [9] 陈素明,杨平,贺韡,等.消除应力回火对 30CrMnSiNi2A 真空电子束焊接头组织和力学性能的影响[J].焊接, 2022(3):47-51,57.
- [10] 高峰, 黄成杰, 关峰, 等. A-100 钢电子束焊缝力学性能及 微观组织 [J]. 焊接, 2022(9): 60 64.

(下转第46页)

Manufacturing Technology, 2017, 90(5-8): 2009 - 2025.

- [13] Sun Li, Ren Xiaobo, He Jianying, et al. A bead sequencedriven deposition pattern evaluation criterion for lowering residual stresses in additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102424.
- [14] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, et al. A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 31: 101 – 110.
- [15] Zhao Huihui, Zhang Guangjun, Yin Ziqiang, et al. Threedimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 276 – 285.
- [16] Zhan Yu, Zhang Enda, Fan Peng, et al. A novel finite element model for simulating residual stress in laser melting deposition[J]. International Journal of Thermophysics, 2021, 42: 56.
- [17] 闫峘宇,刘文洁,李新宇,等.电弧增材制造焊缝建模及尺 寸规律研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47(5): 177-181.
- [18] 刘理想,柏兴旺,周祥曼,等. 电弧增材制造多层单道堆积 的焊道轮廓模型函数 [J]. 焊接学报, 2020, 41(6): 24 - 29, 36.
- [19] 张金田, 王杏华, 王涛. 单道多层电弧增材制造成形控制 理论分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 63 - 67.
- [20] 杨永强, 翁昌威, 周权, 等. 316L 不锈钢等离子增材制造工

艺与尺寸预测模型研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(15): 31-38.

- [21] 张兆栋,曾庆文,刘黎明,等.铝合金激光诱导 MIG 电弧
 增材制造成形尺寸规律 [J].焊接学报,2019,40(8):7-12.
- [22] Ding Donghong, He Fengyang, Yuan Lei, et al. The first step towards intelligent wire arc additive manufacturing: an automatic bead modelling system using machine learning through industrial information integration[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2021, 23: 100218.
- [23] 树西.304 不锈钢电子束熔丝沉积工艺及稳定性研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [24] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299 – 305.
- [25] Obeid O, Alfano G, Bahai H, et al. Numerical simulation of thermal and residual stress fields induced by lined pipe welding[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 5: 1 – 14.
- 第一作者: 刘博文,硕士研究生;主要从事电弧增材制造数 值模拟方向的研究;874771280@qq.com。
- 通信作者: 周祥曼,博士,副教授;主要从事增材制造、数值 模拟方向的研究;zhouxman@ctgu.edu.cn。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

刘博文,周祥曼,秦敬平,等. 基于等腰梯形截面的多层单道有限元几何建模及合理性分析[J]. 焊接, 2024(3): 40-46. Liu Bowen, Zhou Xiangman, Qin Jingping, et al. Geometric modeling and rational analysis of multilayer single channel finite element based on isosceles trapezoidal section[J]. Welding & Joining, 2024(3): 40-46.

(上接第40页)

- [11] 覃巍. SAE9310 钢电子束焊接工艺及接头组织性能研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [12] 林楚新. 尾桨轴模拟件电子束焊缝裂纹分析 [J]. 失效分析与预防, 2010, 5(2): 102-105.
- 第一作者: 余槐,硕士,高级工程师;主要从事航空航天金属材料电子束焊接性及复杂构件电子束焊接制造技术的研究;yumugui@163.com。

(编辑:王龙权)

本文引用格式:

余槐,袁鸿,张国栋,等.3种典型航空齿轮钢电子束焊接头微观组织与力学性能[J].焊接,2024(3):33-39,46.

Yu Huai, Yuan Hong, Zhang Guodong, et al. Microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of three typical aviation gear steels[J]. Welding & Joining, 2024(3): 33 – 39, 46.