

文章编号:1674-8190(2018)04-603-08

# 超高强度 300M 钢电子束深缝焊接力学性能及破坏机理研究

刘星<sup>1</sup>, 刘斌<sup>2</sup>, 卢智先<sup>2</sup>, 赵桐<sup>3</sup>

(1. 西安航空学院 飞行器学院, 西安 710077)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

(3. 北京航空制造工程研究所 高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

**摘要:** 超高强度 300M 钢具有优异的力学性能, 广泛应用于飞机起落架。通过静力拉伸、三点弯曲及动态 Charpy 冲击试验, 揭示 300M 钢电子束深缝焊接的力学性能及破坏机理; 对试验后的典型试样进行断口宏观与微观分析, 并采用场发射扫描电镜(SEM)对断口形貌进行观察、分析。结果表明: 母材与焊接件都出现明显的拉伸塑性段, 二者的刚度和强度相差不大, 但是焊接件的断裂应变较母材小, 焊接件焊缝的韧性略低于母材; 焊接件弯曲强度与母材相当, 但是破坏时的弯曲变形较母材也有所下降, 焊接件的延性较差; 在冲击试验中焊接件吸收能量与断裂韧性均低于母材, 冲击韧度降低。

**关键词:** 超高强度 300M 钢; 深焊缝; 电子束焊接; 拉伸强度; 弯曲强度; 冲击韧度

**中图分类号:** TG404; TG407

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.020

## Study on Mechanical Properties and Failure Mechanism of Deep Seam Electron Beam Welding of Ultra-high Strength 300M Steel

Liu Xing<sup>1</sup>, Liu Bin<sup>2</sup>, Lu Zhixian<sup>2</sup>, Zhao Tong<sup>3</sup>

(1. School of Aircraft Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The ultra-high strength 300M steel is applied in aircraft landing gear because of excellent mechanical properties. The tests of static tensile strength, three-point bending properties and Charpy impact properties are conducted. It reveals the mechanical properties and failure mechanism of electron beam deep seam welding of 300M steel. Macroscopic and microscopic analysis of typical specimens fracture after testing and fractography of weldment fracture surface are investigated by SEM(scanning electron microscope). Results indicate that both parent metal and weldment appear obvious tension plastic behavior, and there is little difference between stiffness and strength. However, the fracture strain and toughness of weldment become weaker compared with the parent metal. The bending strength of weldment is slightly lower than that of the parent metal, and the bending deformation and ductility decline. In Charpy impact test, both absorbed energy and fracture toughness of weldment are lower than parent metal. Thus the impact toughness of weldment decreases.

**Key words:** ultra-high strength 300M steel; deep weld seam; electron beam welding; tensile strength; bending strength; impact toughness

收稿日期:2018-03-29; 修回日期:2018-06-07

基金项目:西安航空学院通用航空工程技术中心基金  
(XHY-2016084)

西安航空学院校级科研基金(2018KY1226)

通信作者:刘斌, binbinmoon@sina.com

## 0 引 言

300M 合金钢(40CrNi<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>MoVA)<sup>[1]</sup>是在 4340

钢基础上改进得到的超高强度钢<sup>[2]</sup>。该材料采用精细的热处理工艺,然后在 500 K 进行低温回火制备得到,抗拉强度和弹性模量分别为 2 000 MPa 和 205 GPa,具有较高的强度、韧性、塑性和疲劳性能。由于 300M 钢优异的力学性能,在航空航天中广泛用作较大尺寸结构材料,例如飞机起落架材料、超高强度螺栓、耳片和火箭发动机壳体<sup>[3-4]</sup>。

目前 300M 钢材料制成的较大尺寸的结构件(例如飞机起落架),都是在锻造毛坯上进行数控加工,其缺点为较浪费材料、利用率低,以及毛坯锻造纤维流线部分切断,深孔加工难度大、需要大型的锻压设备使得成本较高。因此,国内外对该材料的电子束焊接(Electron Beam Welding,简称 EBW)工艺进行了较多研究。真空电子束焊接由高电压加速装置形成的高能电子束流通过磁透镜汇聚,得到很小的焦点,能量密度可达  $10^6 \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$ ,轰击真空中零件可使电子束的动能迅速转变为热能,致使金属熔化进而完成焊接。电子束焊接具有以下优点:电子束穿透能力强,焊缝深宽比大(可达 50:1),焊接速度快,热影响区小,焊接变形小,真空环境避免了外来夹杂物引入,有利于提高焊缝质量,焊接可达性好,电子束易受控。随着电子束焊接工艺的发展,300M 钢电子束焊接工艺已逐渐应用于工业,例如国内某型飞机起落架外筒及连杆已成功应用 300M 钢的电子束焊接工艺<sup>[4]</sup>。

近年来,国内外研究人员对 300M 钢的切削加工<sup>[5]</sup>、压力加工<sup>[6-7]</sup>、表面完整性对疲劳性能的影响<sup>[8]</sup>等方面做了大量的研究。国外, O. R. Ritchie<sup>[9]</sup>分析了 300M 超高强度钢疲劳裂纹扩展阈值处的附近微观组织; H. S. Sung 等<sup>[10]</sup>和 T. E. Pistochni 等<sup>[11]</sup>分别从不同角度研究了 300M 刚的疲劳性能。国内,李瑞鸿等<sup>[12]</sup>也分别从不同角度研究了 300M 刚的疲劳性能;张国栋等<sup>[13]</sup>先后对 300M 钢的电子束焊接热处理工艺及高周疲劳断裂机制进行了研究,但焊接深度仅为 16 mm;吴攀等<sup>[14]</sup>对电子束预热与焊接复合工艺的 300M 钢焊接接头进行了残余应力测试,焊缝深度 5 mm,发现残余应力分布具有一定的规律;郭光耀等<sup>[15]</sup>采用增加扫描波形的焊接方法对适用于管材的 10 mm 厚度的 300M 钢板材进行了工艺研究。但是对 300M 钢电子束焊接的力学性能及破坏机理研究较少,且所涉及的焊接技术的焊缝深度较浅、焊

缝质量及焊接工艺仍需提高。

本文以深焊缝(50 mm)的 300M 钢电子束焊接件为研究对象,研究其静力拉伸强度、三点弯曲及动态 Charpy 冲击的各项力学性能,并通过断口分析寻找该类改良工艺的优缺点用以指导工艺的进一步改进。

## 1 试样制备及试验方法

通过调整焊接电压、电流、聚焦电流以及焊接速度等,完成焊接,焊接工艺示意如图 1 所示。焊接母材为两个 50 mm 厚度的 300M 钢板材,并进行一次性电子束焊接成形,焊缝宽度 5~8 mm。300M 钢材料的元素成分如表 1 所示。电子束焊接后进行热处理:正火、油淬及回火。制备好的焊接试样毛坯进行 X 光探伤,取合格的试样进行机械加工。机械加工为棒材(拉伸试样)、板材(三点弯曲试样)、带缺口柱形(Charpy 冲击试样)。

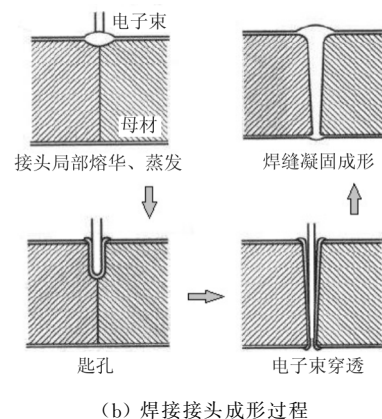
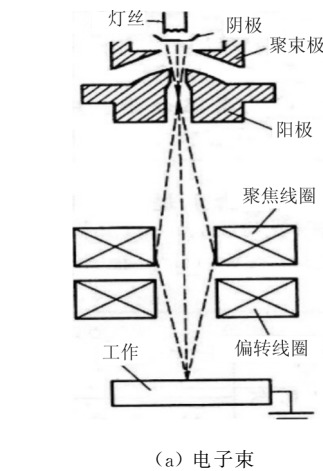


图 1 电子束焊接示意图

Fig. 1 Diagram of electron beam welding

表1 300M 钢化学元素成分

Table 1 Chemical compositions of 300M steel

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
C	0.4	Cr	0.84
Mn	0.75	Mo	0.41
Si	1.58	V	0.082
S	0.001	Cu	0.12
P	0.005	Fe	剩余
Ni	1.84		

依据 HB/Z315-1998《高温合金、不锈钢真空电子束焊接工艺》和 HB7608-1998《高温合金、不

锈钢真空电子束焊接质量检验》进行工艺指导及焊接质量检验。对检验合格的试样分别进行静力拉伸、三点弯曲及动态 Charpy 冲击试验,试验及试件情况如表 2 所示。静力拉伸试件为中间细(5 mm等径)两头粗(带螺纹、直径 8 mm)的棒材;三点弯曲试件为 300 mm×40 mm×14.5 mm 跨距 140 mm 的板材;Charpy 冲击试件为 50 mm×10 mm×10 mm 规格的带 V 形缺口的柱形。在所有完成的试验中选出典型试样进行断口宏观与微观分析,断口形貌观察采用场发射扫描电镜(SEM)。

表2 试验及试件情况

Table 2 Test and sample condition

试验类型	材料	试样件数	试样尺寸	缺口	缺口深度/mm
静力拉伸	母材	3	长 50 mm,直径 5 mm	无	—
静力拉伸	焊接件	15	长 50 mm,直径 5 mm	无	—
三点弯曲	母材	3	300 mm×40 mm×14.5 mm 跨距 140 mm	无	—
三点弯曲	焊接件	30	300 mm×40 mm×14.5 mm 跨距 140 mm	无	—
Charpy 冲击	母材	3	50 mm×10 mm×10 mm	V 形	2
Charpy 冲击	焊接件	18	50 mm×10 mm×10 mm	V 形	2

## 2 拉伸试验

试样经电子束焊接后,根据组织特点,分为母材区、焊缝区和热影响区三部分。从母材向焊缝中心移动,峰值温度升高,原始奥氏体晶界变大,冷却下来从细小板条马氏体变成粗大板条马氏体。从母材到热影响区,逐渐受到焊接热循环,珠光体组织减少直至消失;从焊缝至热影响区,呈粗大板条马氏体到细小板条马氏体过渡<sup>[16-17]</sup>。

焊后经热处理工艺后,并没有消除焊缝中粗大柱状晶组织,但是正火油淬工艺使柱状晶轮廓及焊缝与热影响区的分界变得模糊<sup>[13,17]</sup>。热处理后试样接头母材区、焊缝区和热影响区的组织均为残余奥氏体+回火马氏体+ε 碳化物,组织相差不大,故其拉伸性能相近;区别在于焊缝区和热影响区材料经历了焊接热循环,奥氏体稳定性提高,这一点在硬度上有所体现,即焊缝及热影响区的硬度大于母材区<sup>[16-17]</sup>。

在拉伸试验中(试验设备如图 2 所示),试样多数在母材处断裂。这是因为试样经热处理后,焊缝部位回火马氏体板条尺寸略大于母材部位,板条强化效果较大,故断裂位置多数为母材,少数为焊缝或热影响区。说明多数电子束焊接件焊接区域的强度是高于母材的。母材与焊接件拉伸性能的平均值如表 3 所示。

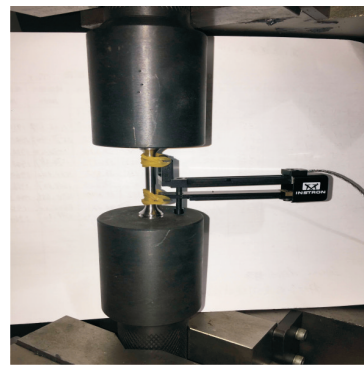


图2 拉伸试验设备

Fig. 2 Tensile test equipment

表3 母材与焊接件拉伸性能对比(平均值)

Table 3 Contrast of tensile property of parent metal and weldment(average)

编号及材料/数量	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa(0.2%)	抗拉强度/MPa	延伸率/%
母材/3	206.778	1 650.431	2 035.889	10.45
1#焊接件/5	198.953	1 575.008	1 949.149	9.58
2#焊接件/5	208.021	1 600.035	1 964.417	7.04
3#焊接件/5	205.720	1 632.508	1 912.323	11.49

将试验中发现的在焊接区域断裂的应力—应变曲线进行对比,如图3所示。

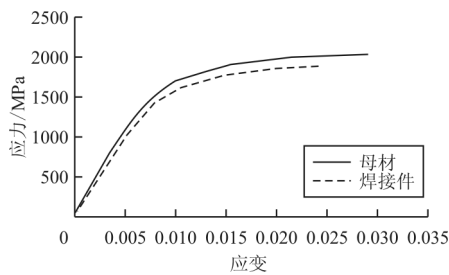
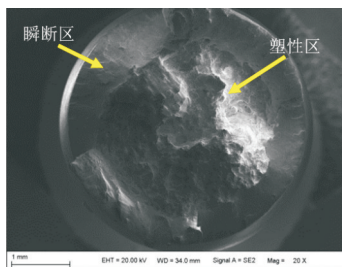


图3 母材与焊接件应力—应变曲线

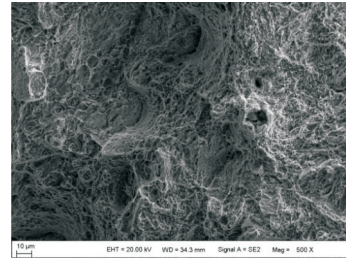
Fig. 3 Stress-strain curves of parent metal and weldment

从图3可以看出:母材与焊接件都出现明显的拉伸塑性段,二者的刚度和强度相差不大,但是焊接件的断裂应变较母材小,表明少数焊接件焊缝的韧性相对母材而言较差。

将母材断口和焊缝断口在场发射扫描电镜下进行观察分析,母材宏观断口和中心点处500X断口形貌如图4所示,焊缝处断裂试样的宏观断口和中心点处500X断口形貌如图5所示。焊缝处断裂的典型试样共5件,通过对比其中一个试样的断口与母材形貌发现:无论母材还是焊缝的断口,其都表现为标准的中心圆形塑性区及周围环形瞬断区的特点。



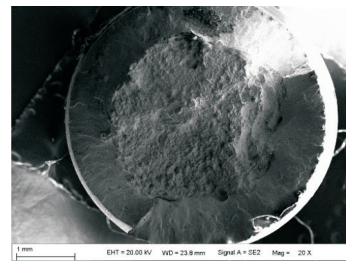
(a) 断口宏观形貌



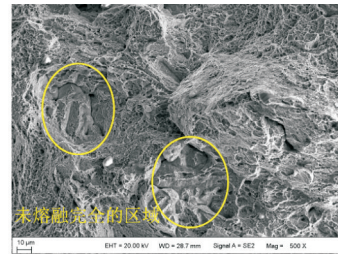
(b) 断口中心位置微观图

图4 母材拉伸 SEM 断口

Fig. 4 SEM of parent metal tensile fracture



(a) 断口宏观形貌



(b) 断口中心位置微观图

图5 焊缝断裂的焊接件 SEM 断口

Fig. 5 SEM of weld metal tensile fracture

从图4可以看出:母材的塑性区材料均匀、韧窝明显且均匀分布,而焊缝断口塑性区可以发现未完全熔融的区域,该区域无明显的韧窝出现,说明其不是塑性断裂,这可能是导致焊缝提前于母材破坏的原因。

此外,沿电子束焊接方向不同深度,即深焊缝上中下部位的组织也略有差异,焊缝中部马氏体位向差异较小,组织比较均匀,这可能是由于上部和下部与外界接触面积大,热量易散失,高温停留时间短所致<sup>[16-17]</sup>。为此,本文将焊缝上层与下层制成的试样进行拉伸试验。部分试验结果如表 4 所

示,深焊缝的上层区域(浅焊缝)与下层区域(深焊缝)的各项力学性能相差不大,抗拉强度在 1955~1965 MPa 上下略微浮动,即沿电子束焊接方向不同深度的焊缝拉伸性能上基本无差别。但深焊缝有利于焊接大尺寸或大厚度构件,例如飞机起落架。

表 4 焊缝上层、下层拉伸性能对比

Table 4 Contrast of tensile property of upper and lower parts of the weld

参 数	上 层					均 值	标准差
	数 值						
	50LS-2-01	50LS-2-02	50LS-2-03	50LS-2-04	50LS-2-05		
原始直径/mm	5.00	5.01	5.00	5.00	4.99	5.00	0.007
断后直径/mm	4.06	4.00	3.94	4.00	3.90	3.98	0.061
弹性模量/GPa	201.002	207.415	210.560	209.402	211.725	208.020	4.233
破坏载荷/kN	38.547	38.720	38.524	38.934	38.754	38.695	0.167
屈服强度/MPa	1 560.025	1 639.140	1 611.622	1 596.752	1 592.637	1 600.035	28.852
抗拉强度/MPa	1 963.203	1 971.982	1 961.992	1 951.197	1 973.712	1 964.417	9.024

参 数	下 层					均 值	标准差
	数 值						
	50LX-2-01	50LX-2-02	50LX-2-03	50LX-2-04	50LX-2-05		
原始直径/mm	4.99	5.00	5.02	5.02	5.00	5.006	0.013
断后直径/mm	4.02	4.59	4.12	4.30	4.12	4.23	0.22
弹性模量/GPa	204.753	206.685	197.570	202.068	203.253	202.865	3.427
破坏载荷/kN	38.147	38.643	38.689	38.337	38.209	38.405	0.248
屈服强度/MPa	1 588.262	1 603.282	1 606.645	1 574.886	1 566.143	1 587.844	17.541
抗拉强度/MPa	1 942.809	1 968.081	1 970.412	1 952.477	1 945.945	1 955.945	12.660

### 3 弯曲试验

为了测试电子束深缝焊接的弯曲性能,本文进行三点弯曲试验,试验设备如图 6 所示。分别将焊接件(6 批试样每批 5 件)与母材(3 件)进行对比试验。焊接件与母材弯曲性能对比的破坏强度、弯曲强度及位移平均值如表 5 所示,可以看出:焊接件的破坏载荷和弯曲强度略低于母材,但是弯曲破坏的位移较母材小,这说明焊接件的延性较差。

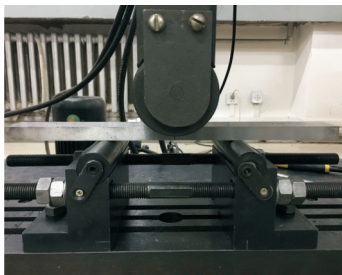


图 6 弯曲试验设备

Fig. 6 Bending test equipment

表 5 母材与焊接件弯曲性能对比(平均值)

Table 5 Contrast of bending property of parent metal and weldment(average)

编号与材料/ 数量	破坏载荷/ kN	弯曲强度/ MPa	位移/mm
母材/3	177.528	4125.344	20.942
1# 焊接件/5	162.450	3826.209	13.163
2# 焊接件/5	166.933	3942.061	15.158
3# 焊接件/5	162.825	3799.868	12.972
4# 焊接件/5	167.880	3915.857	16.230
5# 焊接件/5	165.696	3834.176	14.446
6# 焊接件/5	166.681	3858.037	14.815

三点弯两端支点跨度 140 mm,压头位于中心位置。焊接件弯曲断口宏观形貌如图 7 所示,其中上部为弯曲时压头接触位置,因此上半部分受压,下半部分受拉。在图中标注出典型的 A、B、C 三个区域,A 区域为弯曲破坏起始位置,然后沿 45°方向向两边扩展,最后直至完全断裂破坏。将 A、B、

C 三个区域分别在场发射扫描电镜下进行观察,如图 8~图 10 所示。试样断口均位于试样长度中心处,断口形状为圆弧形。焊接件的弯曲强度较母材的弯曲强度略低,破坏时的试件弯曲变形较母材也有所下降。焊接件大部分强度较母材降低不多,少量焊接件断口表面有毛刺不平整。

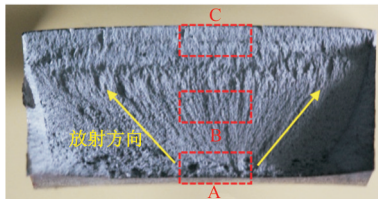
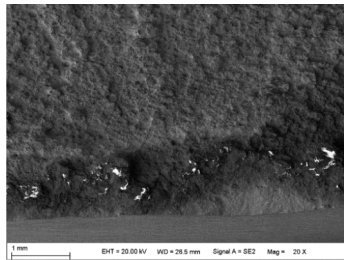
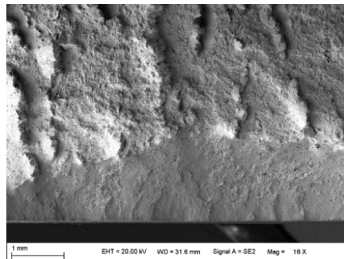


图 7 焊接件弯曲断口宏观形貌

Fig. 7 Macrographs of bending weldment fracture surface

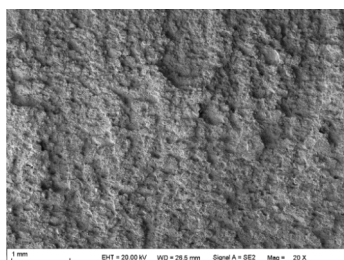


(a) 母 材

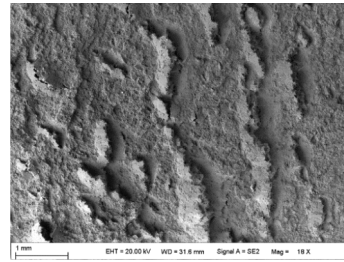


(b) 焊接件

图 8 背部受拉中心位置 A 区域母材与焊接件 SEM 对比  
Fig. 8 SEM contrast of parent metal and weldment in the A area of the back pulled center position

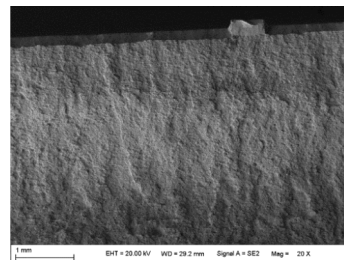


(a) 母 材

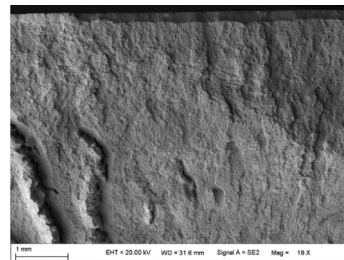


(b) 焊接件

图 9 中心位置 B 区域母材与焊接件 SEM 对比  
Fig. 9 SEM contrast of parent metal and weldment in the B area of the center position



(a) 母 材



(b) 焊接件

图 10 上面受压部位 C 区域母材与焊接件 SEM 对比  
Fig. 10 SEM contrast of parent metal and weldment in the C area of the upper compression part

### 4 Charpy 冲击试验

为了验证电子束焊接深焊缝工艺的断裂性能,对焊接件(3 批共 18 件)和母材(3 件)进行摆锤冲击试验<sup>[18-19]</sup>,其吸收能量和断裂韧性如表 6 所示。

表 6 母材与焊接件均值比较(平均值)

Table 6 Averages of parent metal and weldment(average)

编号与材料/数量	吸收能量/J	断裂韧性/(J·mm <sup>-2</sup> )
母材/3	24.140	0.301
1#焊接件/6	17.196	0.215
2#焊接件/6	17.770	0.220
3#焊接件/6	23.246	0.290

从表 6 可以看出: 焊接件第 1 批和第 2 批吸收能量与断裂韧性低于母材约 30%, 而第 3 批与母材相当; 但总体而言, 焊接件吸收能量与断裂韧性均低于母材。

试样 V 形缺口及冲击点的位置图如图 11 所示。对冲击后试样断面进行 SEM 断口分析, 从宏观断口可以看出: 断面呈放射状, 中心处于缺口边中心处, 母材的放射条带较为明显(如图 12 所示), 焊接件(如图 13 所示)这种现象不是特别明显。从局部放大图可以看出: 母材的韧窝较为明显, 分布均匀且密; 焊接件也有韧窝, 但是韧窝浅且不明显, 分布不均匀。

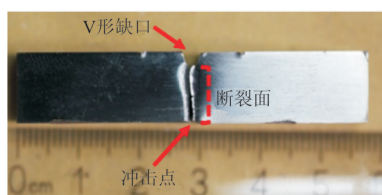
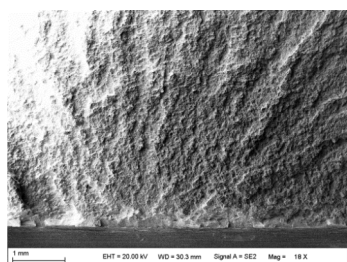
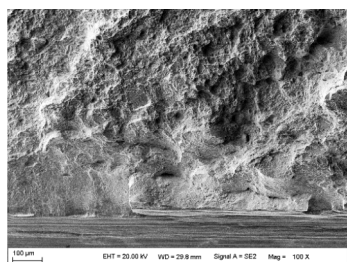


图 11 试样 V 形缺口及试样冲击位置

Fig. 11 The position of V-shaped notch and impact specimen



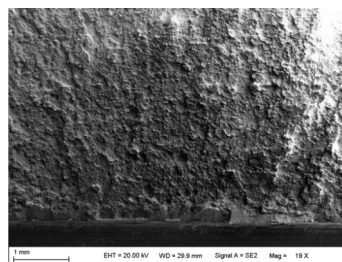
(a) 断口中心位置



(b) 断口边缘位置

图 12 Charpy 冲击母材 SEM 断口 (23.36 J)

Fig. 12 SEM Charpy impact fracture of parent metal (23.36 J)



(a) 断口中心位置



(b) 断口边缘位置

图 13 Charpy 冲击焊接件 SEM 断口 (20.38 J)

Fig. 13 SEM Charpy impact fracture of weldment (20.38 J)

## 5 结 论

(1) 在静力拉伸试验中, 50 mm 深焊缝电子束焊接件的韧性及塑性均低于母材。母材的塑性区材料均匀、韧窝明显且均匀分布, 但是焊接件的断裂应变较母材小, 焊接件焊缝的韧性略低于母材。母材与焊接件都出现明显的拉伸塑性段, 二者的刚度和强度相差不大; 且沿电子束焊接方向不同深度的焊缝拉伸性能上基本无差别。

(2) 在三点弯曲试验中, 焊接件的破坏载荷和弯曲强度略低于母材, 但是弯曲破坏的位移较母材小, 破坏时的试件弯曲变形较母材也有所下降, 这说明焊接件的延性较差。

(3) 在冲击试验中焊接件吸收能量与断裂韧性均低于母材, 母材的韧窝较为明显, 分布均匀且密; 焊接件也有韧窝, 但是韧窝浅且不明显, 分布不均匀, 冲击韧度降低。

总之, 经过以上三项力学试验分析, 50 mm 深焊缝电子束焊接的超高强度 300M 钢各项力学性能较母材均有所下降。焊缝处均有较多粗大柱状晶组织, 且各项试验均在焊缝粗大柱状晶处发生破坏。因此, 对于这类深焊缝的电子束焊接工艺, 应

加大研究力度,采用合理的焊接和焊后热处理工艺逐渐减少甚至消除焊缝粗大柱状晶组织,从而改善焊接件的力学性能,增强焊接件的可靠性,提高其使用寿命。

### 参考文献

- [1] 杨昭明, 罗小安. 先进工艺在飞机起落架制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2005(6): 100-103.  
Yang Zhaoming, Luo Xiaohan. Application of advanced manufacturing technology in aircraft undercarriage production[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(6): 101-103. (in Chinese)
- [2] 马少海, 厉勇, 王春旭, 等. Q-P 工艺下超高强度 300M 钢的单轴拉伸规律研究[J]. 航空材料学报, 2014, 34(3): 42-47.  
Ma Shaohai, Li Yong, Wang Chunxu, et al. Law of uniaxial tensile tests of ultra-high strength 300M steel treated by quenching-partitioning(Q-P) process[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34(3): 42-47. (in Chinese)
- [3] 张慧萍, 王崇勋, 杜煦. 飞机起落架用 300M 超高强度钢发展及研究现状[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(6): 73-76.  
Zhang Huiping, Wang Chongxun, Du Xu. Aircraft landing gear with the development of 300M ultra high strength steel and research[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2011, 16(6): 73-76. (in Chinese)
- [4] 毛智勇. 电子束焊接技术在大飞机中的应用分析[J]. 航空制造技术, 2009(2): 92-94.  
Mao Zhiyong. Application of electron beam welding technology in large aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(2): 92-94. (in Chinese)
- [5] 刘维民, 赵军, 艾兴, 等. 高速车削 300M 超高强度钢时的  $Al_2O_3$  基陶瓷刀具磨损机理研究[J]. 摩擦学报, 2011, 31(6): 564-568.  
Liu Weimin, Zhao Jun, Ai Xing, et al. Wear mechanisms of  $Al_2O_3$ -based ceramic cutting tool in high speed turning of 300M ultra high strength steel[J]. Tribology, 2011, 31(6): 564-568. (in Chinese)
- [6] Luo J, Li M Q, Liu Y G, et al. The deformation behavior in isothermal compression of 300M ultra-high strength steel[J]. Materials Science and Engineering(A), 2012, 534(1): 314-322.
- [7] Liu Y G, Luo J, Li M Q. The fuzzy neural network model of flow stress in the isothermal compression of 300M steel[J]. Materials & Design, 2012, 41: 83-88.
- [8] Gao Y K, Li X B, Yang Q X, et al. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40Cr Ni<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>Mo VA steel[J]. Materials Letters, 2007, 61: 466-469.
- [9] Ritchie O R. Influence of microstructure on near-threshold fatigue-crack propagation in ultra-high strength steel[J]. Metal Science Journal, 1976, 11(8/9): 368-381.
- [10] Sung H S, Ji H R, Jeong K, et al. Effects of shot peening on the fatigue properties of 300M steel[J]. Journal of the Korean Institute of Metals and Materials, 2000, 38(11): 1472-1477.
- [11] Pistochni T E, Hill M R. Effect of laser peening on fatigue performance in 300M steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(7): 521-533.
- [12] 李瑞鸿, 刘道新, 张炜, 等. 喷丸强化与表面完整性对 300M 钢疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(9): 1418-1423.  
Li Ruihong, Liu Daoxin, Zhang Wei, et al. Influence of shot peening and surface integrity on the fatigue properties of 300M Steel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(9): 1418-1423. (in Chinese)
- [13] 张国栋, 杨新岐, 何鑫龙, 等. 焊后热处理对 300M 超高强度钢电子束焊接接头组织及性能的影响[J]. 航空材料学报, 2012, 32(5): 26-31.  
Zhang Guodong, Yang Xinqi, He Xinlong, et al. Effect of PWHT on microstructure and mechanical properties of electron beam welded joints of 300M ultra-high strength steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(5): 26-31. (in Chinese)
- [14] 吴攀, 付鹏飞, 温家伶, 等. 300M 钢电子束预热与焊接复合加工后的残余应力测试[J]. 金属热处理, 2012, 37(10): 84-86.  
Wu Pan, Fu Pengfei, Wen Jialing, et al. Measurement of residual stresses for steel 300M after electron beam preheating and welding combined processing[J]. Heat Treatment of Metals, 2012, 37(10): 84-86. (in Chinese)
- [15] 郭光耀, 李晋炜, 韩瑞清. 300M 低合金钢电子束焊接工艺研究[J]. 航空制造技术, 2014(8): 23-25.  
Guo Guangyao, Li Jinwei, Han Ruiqing. Research on electron beam welding procedure of 300M low alloy steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(8): 23-25. (in Chinese)
- [16] 谢永辉. 超高强度钢电子束焊接接头微观组织特征与力学性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Xie Yonghui. Study on the microstructure and properties of electron beam welded joints for ultra high strength steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [17] 张国栋. 300M 钢电子束焊接接头组织及高周疲劳性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.  
Zhang Guodong. Study on the microstructure and high cycle fatigue properties of electron beam welded joints for 300M steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [18] 刘斌, 徐绯, 菊池正纪, 等. 斜胶接 CFRP 的冲击损伤容限研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 870-876.  
Liu Bin, Xu Fei, Kikuchi Masanori, et al. Study on impact damage tolerance of scarf bonded CFRP[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(6): 870-876. (in Chinese)
- [19] Bin Liu, Fei Xu, Wei Feng, et al. Experiment and design



50-54. (in Chinese)

- [8] 索双富, 邢敏杰, 薛庆, 等. W形金属密封环轴向刚度影响因素研究[J]. 润滑与密封, 2016, 41(2): 15-17.  
Suo Shuangfu, Xing Minjie, Xue Qing, et al. Research on effect factors of axial stiffness of metallic W-ring[J]. Lubrication and Sealing, 2016, 41(2): 15-17. (in Chinese)
- [9] 崔晓杰. 金属密封技术的研究进展及密封机理分析[J]. 石油机械, 2011, 39(增刊1): 102-105, 108.  
Cui Xiaojie. Metal sealing technology research progress and sealing mechanism analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(S1): 102-105, 108. (in Chinese)

(上接第 584 页)

- [15] 李锋, 白鹏. 飞行器低雷诺数空气动力学[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2017.  
Li Feng, Bai Peng. Aerodynamics of aircraft at low Reynolds number [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2017. (in Chinese)

作者简介:

孙凯军(1986—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气

作者简介:

陈京名(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空密封与润滑。

王云(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:宇航推进理论。

李齐飞(1988—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

力宁(1967—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空发动机密封设计、试验。

(编辑:马文静)

作者简介:

(编辑:赵毓梅)

(上接第 602 页)

- [11] Alemi-Ardakani M, Milani A S, Yannacopoulos S. A rapid approach for predication and discrete lay-up optimization of glass fiber/polypropylene composite laminates under impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015 (84): 134-144.
- [12] 黄博生, 商和财, 彭亚萍. 碳/玻混杂纤维的混杂效应及其受力性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2005, 30(6): 39-41.  
Huang Bosheng, Shang Hecai, Peng Yaping. Study on the hybrid effect of fibers and the load-carrying capacity of concrete component wrapped with HFRP[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005, 30(6): 39-41. (in Chinese)
- [13] Reddy P R S, Reddy T S, Madhu V, et al. Behavior of E-glass composite laminates under ballistic impact[J]. Materials and Design, 2015, 84: 79-86.
- [14] Jia Xin, Huang Zhengxiang, Zu Xudong, et al. Effect of mesoscale and multiscale modeling on the performance of

动布局设计、螺旋桨设计。

包晓翔(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

付义伟(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器气动布局设计。

Kevlar woven fabric subjected to ballistic impact: a numerical study[J]. Applied Composite Materials, 2013, 20(6): 1195-1214.

作者简介:

陈战辉(1977—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

万小鹏(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计等。

王文智(1984—),男,博士,副教授。主要研究方向:复合材料结构设计等。

李沛城(1987—),男,博士研究生。主要研究方向:飞行器复合材料结构设计。

(编辑:马文静)

(上接第 610 页)

methods of composite scarf repair for primary-load bearing structures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88: 27-38.

作者简介:

刘星(1990—),男,硕士,助教。主要研究方向:飞行器设计和结构的力学性能测试技术。

刘斌(1986—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:复合

材料胶接及胶接修理。

卢智先(1959—),男,高级实验师。主要研究方向:材料力学性能试验技术、疲劳与断裂。

赵桐(1989—),男,硕士,工程师。主要研究方向:高能束流加工技术。

(编辑:赵毓梅)