

CMT 增材制造层间温度影响规律试验研究

郭一飞,王克鸿

(南京理工大学 材料科学与工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:利用基于 CMT 焊接技术的增材制造系统,研究层间冷却温度对多层单道增材制造件的宏观结构、金相组织、力学性能的影响。结果表明,一定参数范围内,当送丝速度、熔覆速度、电流电压一定时,层间温度越高,熔覆层塌陷越严重,影响增材构件的成型。由于前熔覆层的预热作用,晶间铁素体生长时间更充分,变得更加粗大,使得构件的拉伸强度下降,且拉伸试样断裂类型为韧性断裂。试验研究表明,层间温度 $\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以得到晶粒较细、性能较好的构件。

关键词:奥氏体不锈钢;冷金属过渡焊接技术;增材制造;层间温度

中图分类号: TG444+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2019)04-0054-04

Experimental Study of Influence of Inter-layer Temperature on CMT-Additive Manufacturing

GUO Yifei, WANG Kehong

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The influence of interlayer cooling temperature (ICT) on the macroscopic structure, microstructure and mechanical properties of multi-layer single-track steel parts is studied with an additive manufacturing system based on CMT welding technology. Results show that, within a certain range of parameters, when the quantitative value of wire feeding speed, cladding speed and electronic current and voltage remains unchanged, the higher the ICT is, the more serious the collapse of the cladding layer is, which hinders the formation of the additive parts. Due to the preheating effect of the pre-cladding layer, there is more time for intergranular ferrite to grow and it becomes coarse, thus decreasing the tensile strength of the parts. The fracture form of the tensile specimen is ductile fracture. It is concluded that when the interlayer temperature is $\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, parts with more refined grain and better mechanical properties can be obtained.

Keywords: ER316L stainless steel; CMT welding technology; additive manufacturing; interlayer temperature

0 引言

增材制造以其制造原理的优势成为具有巨大发展潜力的制造技术。随着材料适用范围增大和制造精度的提高,增材制造技术将给制造技术带来革命性的发展^[1]。

常规 MAG 焊接的熔滴过渡模式为短路过渡,在焊接过程中,焊丝端部的熔滴与母材熔池短路接触,使电流增加,其较高的热输入与磁收缩使得熔滴发生爆断。而冷金属过渡焊接(CMT)的熔滴过渡方式,可以大幅度地降低焊接过程的热输入,过渡过程更加平稳,减少熔滴飞溅,成型与性能更为良好。CMT 焊接具有较强的工作环境适应性,焊缝较为均匀,热输入可控,具有与 MAG 焊接基本相同的熔宽以及更小的熔深,表面成型也更加美观,可以精确地控制焊接热循环,使其特别适用于电弧增材制造^[2-4]。

不锈钢在结构设计中占有重要地位。相对于 ER304 而言,ER316L 因为其具有钼元素,而具有更强的抗腐蚀能力,特别是在氯化物环境中,ER316L 对缝隙腐蚀和点蚀的

抵抗力较大^[5]。ER316L 是 ER316 的低碳版本,在通常情况下,ER316 和 ER316L 之间价格差异较小,而在焊接时,ER316L 中的碳不易析出,减少了焊接部分出现腐蚀的情况。当冷却到低温时,这些奥氏体结构也提供了更好的韧性。与其他铬镍奥氏体不锈钢相比,ER316L 在高温下具有较高的抗断裂、蠕变和拉伸强度。

由于 ER316L 不锈钢优良的力学性能和相当好的耐腐蚀性能,因此具有广泛的前景以及研究价值。本文基于 CMT 焊接技术,以 $\phi 1.0\text{ mm}$ 的 ER316L 不锈钢焊丝为堆覆材料,进行了 4 组单道多层直壁体实验。通过宏观测量、金相分析、硬度测量、拉伸试验、扫描电镜等观察研究方式,研究在增材制造过程中,层间温度对试样的组织与性能的影响。

1 试验设备及方法

基于 CMT 焊接技术的增材制造(CMT-AM)试验系统使用的焊机系统为 TPS-CMT 焊机系统。

CMT-AM 基板为尺寸 $300\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的

ER304 不锈钢,焊丝为直径 1.0 mm 的 ER316L 不锈钢焊丝。表 1 所示为 ER316L 不锈钢焊丝的质量分数。实验开始前对基板进行预处理,以排除氧化物和其他杂质对实验的干扰。

在 CMT-AM 过程中,为了保证每条焊道适当平整,采用往复式的堆覆方式。预设参数如表 2 所示。保护气类型为 98.5% Ar+1.5% O₂,气流量为 20 L/min。进行 4 组单道多层直壁体堆覆,为了对比分析层间温度对直壁宏观的影响,堆覆层数均为 50 层,进行金相组织观察。本试验所用的拉伸件为非标准试样,外形尺寸为 50 mm×15 mm×4 mm,拉伸试样取样位置和设计尺寸如图 1 所示,并利用扫描电镜对断口进行分析,研究断裂类型。

表 1 ER316L 不锈钢焊丝的质量分数 (%)

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	N
ER316L	0.012	2.180	0.570	18.970	12.700	2.310	0.019	0.010	0.020	0.039

表 2 CMT-AM 预设参数设置

堆覆速度/(cm/min)	送丝速度/(m/min)	电流/A	电压/V	弧长修正/(%)	送气提前/滞后时间/s	起弧电流占比/(%)	收弧电流占比/(%)
50	5.0	105	18.7	-15	0.5	105	80

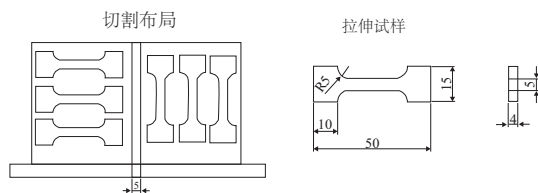


图 1 拉伸试样取样位置和设计尺寸

2 试验结果与分析

2.1 宏观分析

表 3 为 4 组直壁体分别选取多个位置而得到的平均宏观尺寸。图 2 分别为获得的 4 组直壁体成型,分析表 3 中数据可知:

1) 当层间温度为 50℃ 和 150℃ 时,平均层高分别为 1.74 mm 与 1.73 mm,直壁堆覆层之间的边界清晰、平滑,平均层高较高,成型性好,直壁的堆覆效果最好。这是因为在堆覆层数增加的过程中,有效地控制了热输入,同时层数增加,较后进行的堆覆层和初始堆覆层表面成型质量相对均匀。

2) 当层间温度为 250℃ 时,平均层高降低至 1.60 mm,层与层之间的边界基本明显,但具有一定的弯曲度,表面形状基本平滑,层高较低,堆覆效果一般。这是由于随着层叠数量的增加,使得堆覆层开始出现轻微的塌陷,在堆覆过程之中熔池出现不稳定的现象。

3) 当层间温度为 350℃ 时,平均层高降低至 1.41 mm,层与层之间的边界已经不是十分明显,开始出现大量层间结构混合的情况与表面不均匀现象,直壁也出现一定的倾斜,堆覆成型很差。这是由于 CMT-AM 中的

热输入量过多,使得周边凝固金属过多熔化,液态金属开始塌陷到外侧,而较大的热输入也导致熔池的扩散更宽,流动性更强,使得多个堆覆层部分区域相互熔合在一起,形成混合层并导致凹凸不平。

对比 4 组宏观尺寸,可以得出,直壁体的高度与宽度均受到层间冷却温度的影响。当层间冷却温度 > 150℃ 时,堆覆层会出现程度不同的塌陷,层间温度越高,塌陷越严重。



图 2 堆覆试样外观成型侧视图和正视图

表 3 4 组直壁体平均宏观尺寸

层温/(℃)	长度平均值/mm	厚度平均值/mm	高度平均值/mm	平均层高/mm
50	141.95	7.02	86.47	1.73
150	141.33	6.35	87.00	1.74
250	141.72	7.68	80.03	1.60
350	142.45	8.75	70.33	1.41

2.2 金相分析

奥氏体不锈钢在非平衡凝固过程中,熔覆层中的 Cr、Ni 元素含量决定其结晶模式^[6]。铬、镍当量按下列公式进行计算:

$$Cr_{eq} = Cr + 1.37Mo + 1.5Si + 2Nb + 3Ti$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.31Mn + 22C + 14.2N + Cu$$

由上式计算,CMT-AM 试样熔覆层的 Cr 当量(Cr_{eq})为 22.99%,Ni 当量(Ni_{eq})为 14.21%,[Cr/Ni]_{eq} 约为 1.61,所以在 CMT-AM 中 ER316L 的凝固模型为铁素体-奥氏体。

在 ER316L 堆覆层凝固过程中,在结晶过程中树枝状铁素体首先析出,析出的铁素体与液熔化金属发生包晶转变,铁素体连续转变为奥氏体。铁素体周围,奥氏体形核 CMT-AM 的冷却速度快,冷却时间较短,限制了铁素体向奥氏体的转化,因为包晶转变最终得到奥氏体与被奥氏体包围的铁素体的组织,如图 3 所示。

直壁试样底部在增材过程中,第一层熔覆金属最开始凝固时,熔覆层的晶粒生长方向与熔合线的切线方向保持垂直,并朝向熔覆层中心方向生长。分析原因,晶粒的生长方向是由散热方向决定的,由于前面几层的熔覆层与基板的距离很近,所以其具有足够大的散热面积,使其具有较快的冷却速度,如图 4 所示。

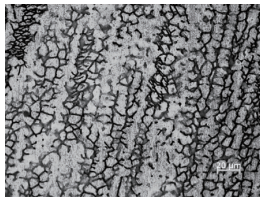


图 3 堆覆层铁素体-奥氏体组织

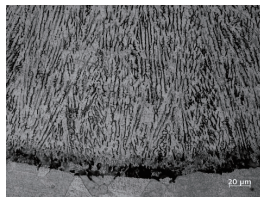


图 4 直壁试样底部枝晶组织

通过有限元模拟可知,基板对熔覆层散热的影响与热源距基板的距离有关,熔覆成型直壁在第 4 层之后冷却途径以及冷却速度维持在稳定状态,在熔覆大概 4 层以后,通过基板散热的途径可以进行忽略,散热方式转变为向四周空间散热。在 4 层以后的直壁中部区域,大量整齐的奥氏体枝晶垂直排列,铁素体在奥氏体枝晶中呈现网状形态。最后导致铁素体均匀地分布在奥氏体基体上,并形成较为不规则的晶界,有利于防止熔覆层中裂纹的扩展,可以有效减少缺陷的产生。

相比较于层间温度 150℃,层间温度为 350℃时,在 CMT-AM 过程中,由于前熔覆层具有预热作用,所以晶间铁素体生长时间更加充分,晶粒更加粗大,如图 5 所示。

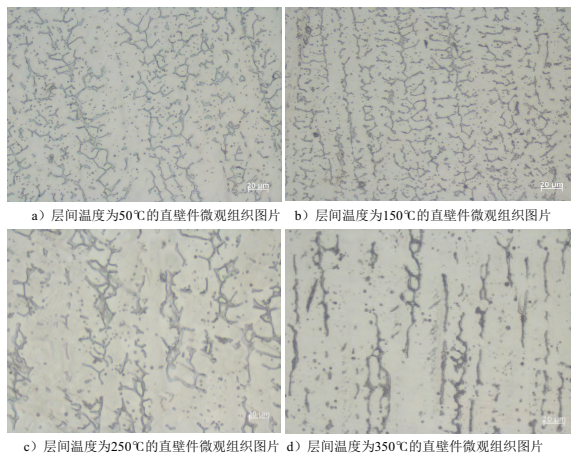


图 5 不同层间温度下试样的有效层显微组织

在 CMT-AM 过程中,由于堆覆层具有一定的熔深,所以堆覆层内部分为两部分组织,分别为再次被熔化形成熔池并凝固的组织 and 未被再次熔化的组织。对于这两个区域,分别称其为重熔区与非重熔区。这两个区域内组织差别明显:非重熔区主要为粗大的向外扩散的树枝状奥氏

体,树枝晶生长方向为向上生长;重熔区内,在 CMT-AM 时每一层熔覆层都会作为后一熔覆层的基底,以供在其之上进行生长,其垂直于熔池熔合线的方向,并向熔覆层中心进行生长。因而,此区域内的奥氏体晶体与非重熔区内的奥氏体晶体相比更加细小,而铁素体也成点状分布,如图 6 所示。

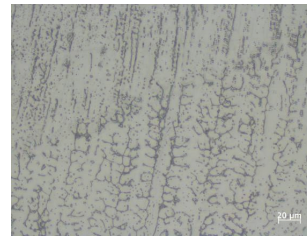


图 6 堆覆层间结合处晶粒组织

2.3 显微硬度测试

采用 HVS1000-Z 显微硬度计进行直壁硬度的测量,对不同层间冷却温度的 CMT-AM 直壁件,测量其维氏硬度。为了使测试更具有代表性,在选取测量位置时,需要避开直壁的底部与顶部。所以,选取的位置为直壁距离基板 30 mm~45 mm 这个区间内的直壁件进行测量。测试选用的加载力为 0.5 kg,测试时长为 10 s,每个测试点之间相距 0.5 mm,测试结果如图 7 所示。

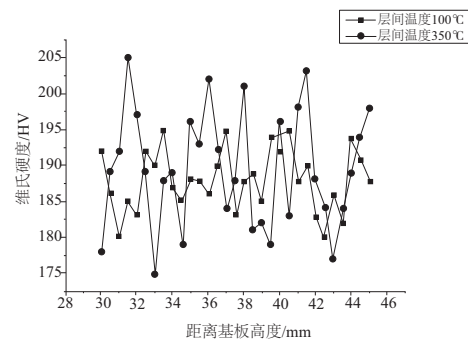


图 7 显微硬度测试结果

由图 7 中可以得出,直壁件的硬度值在 185~200 HV 之间。对比层间冷却温度分别为 150℃与 350℃时的硬度差异,可以得出,当层间冷却温度为 350℃时比层间冷却温度为 150℃的硬度分布更加离散,层间冷却温度为 150℃的硬度分布更为集中。对结果进行分析,硬度值在 185~200 HV 之间不断地上下波动,这是因为由于二次加热,使得熔覆层与熔覆层之间的重熔区出现了数量较少的奥氏体粗晶,与铁素体相比奥氏体硬度较小,所以在测试中此处测量值较低。通过层间冷却温度的调节,较低的层间冷却温度可以在一定程度上减少重熔区中奥氏体粗晶的数量,因此,在硬度测量数值表现上就显示出更小的波动性。

2.4 拉伸强度测试

图 8 所示为 4 组直壁体拉伸强度和延伸率曲线比较图。

观察曲线比较图可知,直壁体的横向拉伸强度是高于其纵向拉伸强度的,高出的数值大概在 30 MPa~40 MPa 之间。

这是因为在 CMT-AM 过程中,熔覆层与熔覆层之间会有少量的氧化膜以及其他杂质参杂其中,严重影响其抗拉强度。由前章节的金相组织分析可知,晶粒的生长方向是垂直于熔覆层方向的,所以其纵向拉伸试样中的晶粒生长方向更为复杂,拉伸强度也更高。直壁体纵向拉伸试样的断裂位置是位于熔覆层与熔覆层之间的重熔区域,根据组织分析,重熔区的奥氏体晶粒较大,所以其抗拉强度较低。

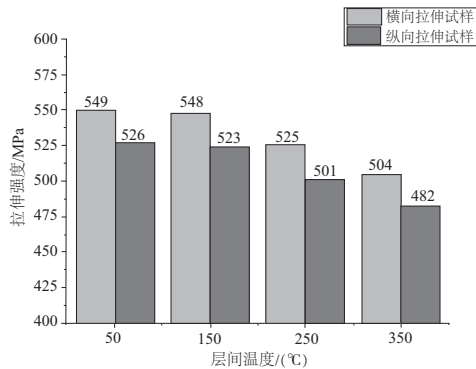


图 8 4 组试样的室温静拉伸性能

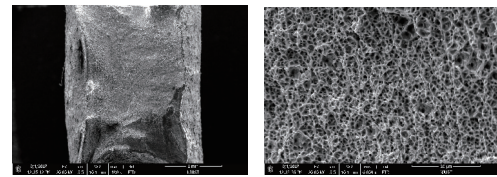
层间温度为 50 °C 和 150 °C 时,试样的拉伸性能不产生变化。层间温度为 250 °C 和 350 °C 试样的横向与纵向的抗拉强度均低于层间温度为 150 °C 的试样。这可能是由于层间冷却温度较高时,由于熔覆层不断受到二次加热,熔池过热导致晶粒粗大,使成形件抗拉强度较低,而熔覆时层间温度降低后,层间结合强度增大。

图 9 为试样扫描电镜下的拉伸断口形貌。在拉伸断口出现的颈缩现象可以确定其为韧性断裂。观察其断口形貌,也可以发现大量密集的等轴韧窝与第二相粒子,由此可判定出,试样在不同层间温度下增材试样的断裂方式均为微孔聚集型断裂。此外,对比二者的韧窝大小,可以明显看出层间温度为 50 °C 试样拉伸断口的韧窝更加密集,韧窝小而深,其韧性性能更好。

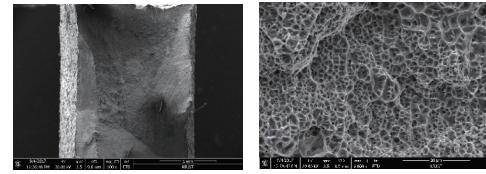
3 结语

1) 层间温度为 50 °C 及 150 °C 时,直壁堆覆层之间的界限清晰、堆覆效果最佳。高于 150 °C 时,层间温度越高,堆覆层的塌陷越严重。

2) 直壁试样底部堆覆层的晶粒生长方向垂直于熔合线的切线方向。4 层以后,晶粒生长方向也开始呈现垂直



a) 层间温度为 50 °C 试样拉伸断口形貌



b) 层间温度为 350 °C 试样拉伸断口形貌

图 9 拉伸断口形貌 (SEM)

基板向上的趋势。在层与层之间重新熔化的区域内,熔合线附近组织变得更细,铁素体成点状分布。层间温度高于 150 °C 时,晶间铁素体生长时间更加充分,晶粒更加粗大,为自下而上连续生长的粗大柱状晶。

3) 与层间冷却温度为 350 °C 的试样相比,层间冷却温度为 150 °C 试样的硬度分布更为集中。堆覆件横向拉伸抗拉强度高于其纵向强度。层间温度高于 150 °C 时,强度降低。断口形貌分析表明两种工艺试样的断裂方式均为微孔聚集型断裂。

参考文献:

- [1] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] 张洪涛,冯吉才,胡乐亮. CMT 能量输入特点与熔滴过渡行为[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 128-132.
- [3] Jing S, Wang K, Qi Z, et al. Microstructure Characteristics and Properties of Mg/Al Dissimilar Metals Made by Cold Metal Transfer Welding with ER4043 Filler Metal[J]. Rare Metal Materials & Engineering, 2013, 42(7): 1337-1341.
- [4] Geng Haibin, Xiong Jiangtao, Huang Dan, et al. Research status and trend of wire arc additive manufacturing [J]. Welding & Joining, 2015, 11: 17-21, 69.
- [5] 潘品李,钟约先,马庆贤,等. 大型核电主管道制造技术的发展[J]. 锻压装备与制造技术, 2011, 46(1): 13-17.
- [6] 胡万伦. 奥氏体不锈钢焊缝中铁素体形成机理及作用[C]. 北京:2006 全国核材料学术交流会议论文集, 2006.

收稿日期:2018-02-26

(上接第 53 页)

- [14] Marconcini M, F. Rubecchini, et al. Numerical Analysis of the Vaned Diffuser of a Transonic Centrifugal Compressor[J]. Journal of Turbomachinery, 2010, 132(4): 1-8.
- [15] 伊卫林,陈志民,马季,等. 叶身融合在径向扩压器中的应用初探[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(6): 1213-1217.
- [16] 张阳,左志涛,梁奇,等. 离心压缩机可调叶片扩压器优化设计与调节分析[J]. 储能科学与技术, 2017, 6(6): 79-86.
- [17] ChenFu, LiShaobin, SuJiexian, et al. Experimental Study of Bowed-twisted Stators in an Axial Transonic Fan Stage[J]. 中国航空学报(英文版), 2009, 22(4): 364-370.

- [18] 王企鲲,陈康民. 轴流风扇两种扭叶片设计方法及其气动性能的比较[J]. 流体机械, 2010, 38(9): 24-30.
- [19] 苏杰先,王仲奇. 叶片的弯扭联合气动成型理论、实验、设计及其应用[J]. 动力工程学报, 1992(6): 1-6.
- [20] Abdelwahab A, Gerber G J. Airfoil diffuser for a centrifugal compressor: US, US8016557[P]. 2011-12-18.
- [21] 陈杰,张晓瑜,雷王兴,等. 掠扭式三维叶片扩压器及设计方法:中国, 103775388 A[P]. 2014-6-24.

收稿日期:2018-02-28

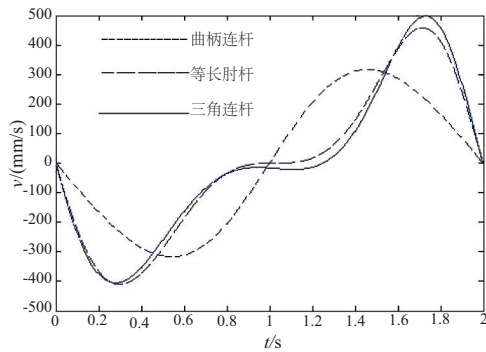


图9 滑块的速度对比曲线

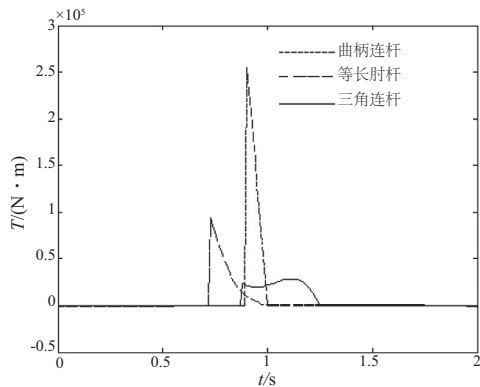


图10 曲柄的转矩对比图

无急回特性。图9中,在公称压力行程内,3种机构的滑块平均速度分别为61 mm/s、30 mm/s和16 mm/s,表明三角连杆机构在公称压力行程内具有更低的工作速度。根据图10的数据对比分析,在公称压力点6 mm处曲柄连杆机构、等长肘杆机构和三角连杆机构所需的最大转矩分别为254 488 N·m、97 311 N·m和28 567 N·m,后者仅分别为前两者的11.22%和29.3%;前两者的转矩在公称压力点以下快速单调降低,三角连杆-肘杆机构的转矩略降后反而有所上升,这是由于增力比的变化引起的。同等条件

下三角连杆机构所需曲柄转矩比曲柄连杆机构减少了88.7%,比等长肘杆机构减少了70.6%,说明三角连杆机构具有更优的增力比特性,能降低伺服电机的容量和成本。

4 结语

1) 伺服曲柄压力机采用了交流永磁同步伺服电机代替普通异步感应电机,并采用计算机控制技术,仿真结果证明,伺服曲柄压力机可以实现滑块特性曲线随成形工艺不同而任意变化,实现了机械压力机的柔性化、智能化。

2) 对曲柄连杆机构、等长肘杆机构和三角连杆-肘杆机构分别进行运动仿真试验对比,结果证明同等条件下三角连杆机构所需曲柄转矩比曲柄连杆机构减少了88.7%,比等长肘杆减少了70.6%,说明三角连杆机构具有更优的增力比特性,能降低伺服电机的容量和成本。

3) 采用MATLAB/Simulink软件作为仿真平台,仿真试验结果表明,MATLAB/Simulink软件可以很好地完成仿真建模、仿真试验及图形处理,仿真软件的选择正确。

参考文献:

- [1] 方雅. 肘杆式伺服曲柄压力机动力学仿真与实验研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- [2] 阮卫平, 胡建国, 孙友松. 伺服机械压力机传动方案分析 [J]. 锻压技术, 2010, 35(4): 67-71.
- [3] 方雅, 孙友松, 胡建国, 等. 基于 MATLAB 的伺服机械压力机传动机构运动学/动力学仿真研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 339-342.
- [4] Yousong Sun, Jianguo Hu, Hongbo Zheng, et al. Energy Saving Drive for Forming Equipments [J]. Advanced Materials Research, 2011, 154/155: 701-707.
- [5] 周霁, 陈富林, 沈金龙, 等. 基于 MATLAB 的四自由度机械臂运动学仿真研究 [J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(1): 115-119.
- [6] 贾得山. 双电机联合驱动伺服曲柄压力机的协调控制研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.

收稿日期: 2018-04-10