文章编号：1000-8608(2018)03-0229-09

激光熔覆系统能耗建模分析方法研究

董萌萌，李　涛*，郭燕春，吴祖鹏，唐梓珏，彭世通

（大连理工大学 机械工程学院，辽宁 大连　116024）

摘要： 针对增材制造过程耗能机理复杂和能耗难以预测的问题，开展激光熔覆系统能耗建模分析方法的研究.根据激光熔覆系统的工作原理及能耗特性，将其分为激光发生器系统、冷却系统、机械臂控制柜、送粉系统以及辅助系统等5部分，通过理论分析和实验规律研究得到各部分能耗模型及系统整机能耗模型.最后通过316L不锈钢试件的激光熔覆实验对能耗模型和比能耗进行分析，结果表明，能耗和比能耗的预测结果与实验测量结果误差分别为1.37%和2.17%，从而验证了模型的准确性和有效性.该模型可用于激光熔覆系统能耗预测、工艺路线改善，实现绿色发展等，所提方法也可为其他增材制造技术相关能耗研究提供参考.

关键词： 增材制造；激光熔覆；能耗模型；比能耗

中图分类号： TG665　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201803002

0 引　言

增材制造也被称为3D打印技术[1]，其因独有的科技优势[2]已被广泛应用到自动化、航空、生物医学、能源消费品等各行业.无论是生产产品的数量还是出产设备的销售量，在过去的数十年都有了显著发展[3]，备受各界人士关注.然而，人们都将注意力集中在增材制造的产品质量问题上，对该过程的能耗问题却研究甚少，尚且没有完善的能耗模型，这对于增材制造技术在能源短缺、低碳发展大环境下进一步的推广十分不便.

Kellens等[3-6]通过CO_2PE! — UPLCI (cooperative effort on process emissions in manufacturing — unit process life cycle inventory)方法，运用时间研究、功率研究、物耗研究和排放研究的方式研究选择性激光烧结(selective laser sintering，SLS)和选择性激光熔化(selective laser melting，SLM)等固体成型技术的环境特性，建立了SLS环境影响参数模型，并提出了改善措施；Le Bourhis等[7]基于生命周期评价(life cycle assessment，LCA)基本框架提出了关于直接激光增材制造(direct laser additive manufacturing，DLAM)方式的环境影响特性的研究方法；Luo等[8-9]研究了增材制造的电能耗，并提出比能耗的计算方式，通过比较3种SLM设备，得出激光效率越高，比能耗越低的结论；Mognol等[10]首次提出零件的加工方向对其电能耗的影响；Baumers等[11-13]研究了零件的几何外形和堆积密度对其电消耗的影响.纵观众多学者的研究，可以看出增材制造中的能耗研究局限于对实际测量数据进行分析，且大多数是将电能耗作为环境影响中的一环来粗略研究，并没有专门详尽的能耗预测模型可用.针对这一研究现状，本文以激光熔覆系统为研究对象，对其能耗特性展开详尽研究.将整个激光熔覆系统分为5个子系统，通过理论分析和实验规律研究得到各子系统能耗模型，以及激光熔覆系统整机能耗模型，并验证模型的有效性.该方法可以在早期设计阶段进行生产过程能耗预测，从而为工艺路线设计及方案优化提供判断依据，也为研究其他增材制造技术能耗问题提供切实可行的研究方法.

收稿日期： 2017-11-16；　**修回日期：** 2018-03-21.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51775086).
作者简介： 董萌萌(1992-)，女，硕士生，E-mail：18342209175@163.com；李　涛*(1977-)，女，副教授，硕士生导师，E-mail：litao@dlut.edu.cn.

1 激光熔覆系统能耗建模

根据激光熔覆系统的工作原理可以将整个系统的能耗分为激光发生器能耗、冷却系统能耗、机械臂控制柜能耗、送粉系统能耗以及辅助系统能耗等 5 部分，即

$$E=E_{\mathrm{l}}+E_{\mathrm{cool}}+E_{\mathrm{con}}+E_{\mathrm{p}}+E_{\mathrm{aux}} \tag{1}$$

式中：E、E_{l}、E_{cool}、E_{con}、E_{p}、E_{aux} 分别为系统总能耗、激光发生器能耗、冷却系统能耗、机械臂控制柜能耗、送粉系统能耗、辅助系统能耗.

1.1 激光发生器能耗建模

激光发生器的工作状态分为待机、熔覆及层间停隔 3 种状态，因而其能耗相应地分为激光器待机能耗、激光器熔覆能耗以及激光器层间停隔能耗，即

$$E_{\mathrm{l}}=E_{\mathrm{lw}}+E_{\mathrm{lm}}+E_{\mathrm{ls}} \tag{2}$$

式中：E_{lw}、E_{lm}、E_{ls} 分别为激光器待机能耗、熔覆能耗、层间停隔能耗.

本研究中激光熔覆过程使用的是光纤激光，这种激光可以获得 0～4 000 W 的功率，为了确定激光单元所需的耗电量，根据正常使用的加工条件，实验研究了 500～2 500 W 激光功率的耗电情况，用功率计测量耗电功率，从而可以探究激光功率与激光消耗功率之间的关系.

实验中激光功率从 500 W 到 2 500 W 以 200 W 为梯度递增间隔，每梯度功率工作 20 s，间隔 10 s，图 1 展示了实验结果（其中纵坐标代表功率，横坐标表示数据采集时间分辨率为 500 ms），从中可以看出大约有 500 W 的功率消耗偏差，这是由于没有激光功率的输出下激光单元内的耗电

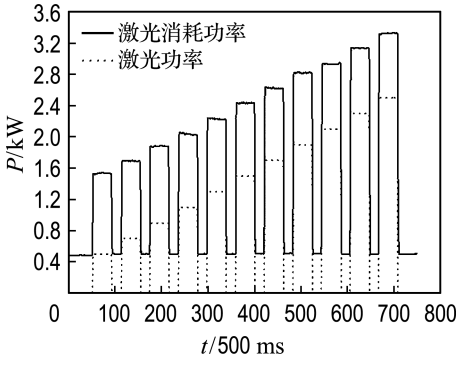


图 1 激光功率与激光消耗功率对比

Fig. 1 The comparison between laser power and laser consumption power

系统消耗了一部分能量，其值仅与激光器的型号有关，此处表示为激光发生器的待机功率. 则激光器待机能耗为

$$E_{\mathrm{lw}}=P_{\mathrm{lw}}t_{\mathrm{lw}} \tag{3}$$

式中：P_{lw}、t_{lw} 分别为激光器待机功率、待机时间.

由图 1 可以得到图 2 的激光功率和激光消耗功率之间的关系曲线. 可以看出激光功率与激光消耗功率之间存在一个双射函数，即

$$P_{\mathrm{lc}}=f(P_{\mathrm{l}}) \tag{4}$$

则激光器熔覆能耗为

$$E_{\mathrm{lm}}=\int_0^{t_{\mathrm{lm}}}P_{\mathrm{lc}}\,\mathrm{d}t=\int_0^{t_{\mathrm{lm}}}f(P_{\mathrm{l}})\,\mathrm{d}t \tag{5}$$

式中：P_{lc}、P_{l}、t_{lm} 分别为激光消耗功率、激光功率、激光熔覆时间.

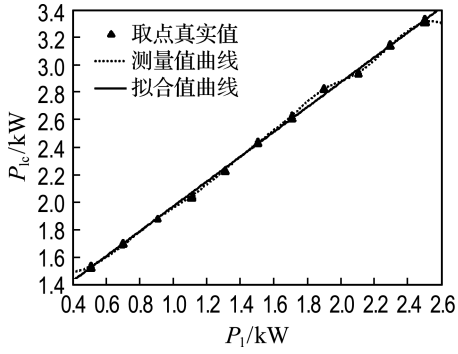


图 2 激光功率和激光消耗功率的关系曲线

Fig. 2 The relationship curves of laser power and laser consumption power

激光熔覆作为一种增材制造技术是通过逐层制造的原理进行工作的，所以有必要研究层间能耗情况. 以激光功率 1 200 W 单道熔覆 316L 不锈钢铁粉为例进行研究，熔覆长度 30 mm，熔覆 20 层，用功率计测量功耗情况，OriginPro 数值处理软件处理数据得到图 3. 图中虚线部分为层间停隔消耗功率，为 1 100 W，经过大量实验可得，此值为定值，是激光发生系统的自身特点所致，与工艺参数的选择无关，此处不作深层次的研究. 则激光器层间停隔能耗可表示为

$$E_{\mathrm{ls}}=\int_0^{t_{\mathrm{ls}}}P_{\mathrm{ls}}\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中：P_{ls}、t_{ls} 分别为层间激光消耗功率、层间停隔时间.

综上所述可得激光发生器加工过程总能耗为

$$E_{\mathrm{l}}=E_{\mathrm{lw}}+E_{\mathrm{lm}}+E_{\mathrm{ls}}=$$

$$P_{\mathrm{lw}}t_{\mathrm{lw}}+\int_0^{t_{\mathrm{lm}}}f(P_{\mathrm{l}})\mathrm{d}t+\int_0^{t_{\mathrm{ls}}}P_{\mathrm{ls}}\mathrm{d}t \tag{7}$$

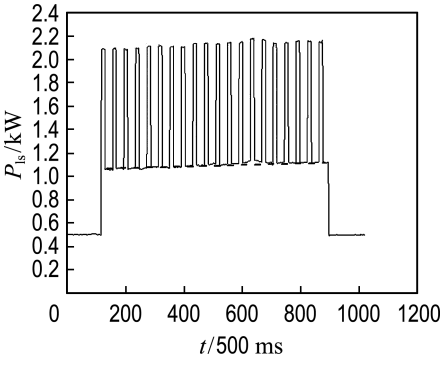


图 3　层间激光消耗功率

Fig. 3　Laser consumption power between cladding layers

1.2　冷却系统能耗建模

激光熔覆过程使用高功率激光，在电能转化为激光能的过程中，一大部分能量由于焦耳效应而丢失[7]，这部分能量单靠对流形式远不足以散失，因此有必要借助外界冷却系统进行降温冷却以保护激光单元内部部件以及熔覆头部分. 图 4 展示了关于冷却系统在冷却过程中消耗电功率的情况，容易看出，冷却系统有两个工作状态：一个是待机状态，此状态大约消耗功率 500 W；另一个是冷却工作状态，此状态大约消耗功率 2 450 W. 因此冷却系统能耗可由下式表示：

$$E_{\mathrm{cool}}=E_{\mathrm{cs}}+E_{\mathrm{cw}} \tag{8}$$

$$E_{\mathrm{cool}}=P_{\mathrm{cs}}t_{\mathrm{cs}}+P_{\mathrm{cw}}t_{\mathrm{cw}} \tag{9}$$

式中：E_{cs}、E_{cw}、P_{cs}、P_{cw}、t_{cs}、t_{cw}分别为冷却系统待机能耗、工作能耗、待机消耗功率、工作消耗功率、待机时间、工作时间.

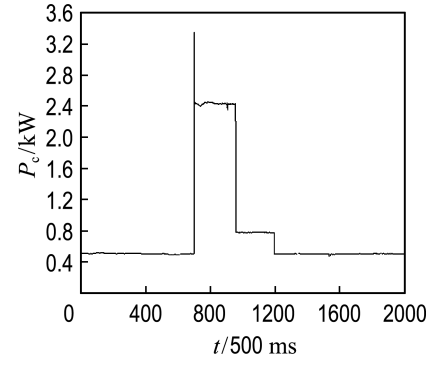


图 4　冷水机功耗曲线

Fig. 4　The curve of chiller consumption power

为了确定冷却系统的冷却时间，可以利用热力学的相关知识，在此假设所有能量转换过程的能量损失都被冷却系统的冷却水消耗掉，因此，可以用以下公式确定冷却时间：

$$t_{\mathrm{cw}}=\frac{(P_{\mathrm{lc}}-P_{\mathrm{l}})t_{\mathrm{lm}}}{v_{\mathrm{f}}\rho c\Delta T} \tag{10}$$

式中：v_{f}、ρ、c、ΔT 分别为冷却水的流速、冷却水的密度、冷却水的比热容、冷却水的温差（即当冷却水设定为 21 ℃，实际温度为 21.5 ℃时，冷水机开始工作，使其降至 20.5 ℃，因此 $\Delta T=1$ K）.

1.3　机械臂控制柜能耗建模

为了阐述方便，将机械臂熔覆头在起点的位置定义为原点（如图 5 中 A 点），激光经过熔覆头即将开始熔覆工作时熔覆头的位置称为设置起始点（如图 6 中 B 点）. 机械臂控制柜通过控制六轴系统来控制机械臂的运动，使激光束能在基体表面按照规划的路径精确扫描，做到柔性加工，由于每根轴的运动状态不同，其耗能情况也极其复杂，因而本文将其看作一个整体，根据宏观状态变化引起的功耗变化来研究控制柜的能耗情况. 按工作原理可以将控制柜的耗能表示为

$$E_{\mathrm{con}}=E_{\mathrm{cons}}+E_{\mathrm{conw}} \tag{11}$$

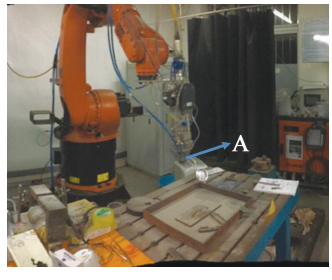


图 5　熔覆头原点位置

Fig. 5　Home position of cladding head

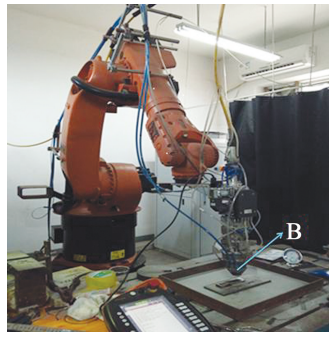


图 6　熔覆头设置起始点位置

Fig. 6　Setting original position of cladding head

式中：E_{cons}、E_{conw}分别为机械臂控制柜待机能耗、

工作能耗.

为了研究影响控制柜耗能因素,选取激光功率、扫描速度、送粉速率 3 个主要影响因素,设计正交实验 L_{16},进行长为 30 mm 的 316L 不锈钢铁粉的单道熔覆实验,实验设计如表 1 所示.

表 1 正交实验安排

Tab. 1 Orthogonal experimental arrangements

实验序号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s^{-1})	送粉速率/(g·min^{-1})
1	900	5	10
2	900	7	20
3	900	9	30
4	900	11	40
5	1 000	5	10
6	1 000	7	20
7	1 000	9	30
8	1 000	11	40
9	1 100	5	10
10	1 100	7	20
11	1 100	9	30
12	1 100	11	40
13	1 200	5	10
14	1 200	7	20
15	1 200	9	30
16	1 200	11	40

由正交实验研究发现激光器控制柜的能耗情况只与机械臂的位置变动有关,由于篇幅有限,详细探讨过程不在此展示,图 7 表示了控制柜完成一个完整工作行程的功耗情况.

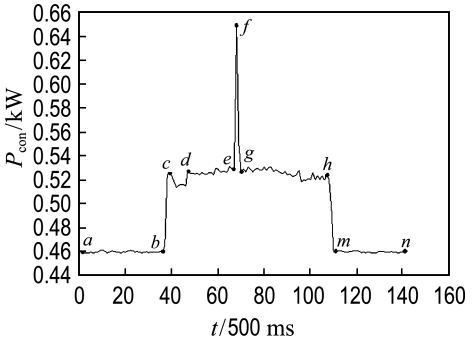


图 7 控制柜功耗

Fig. 7 Control cabinet consumption power

如图所示,a—b 和 m—n 两段表示控制柜的待机状态,当熔覆头从原点 A 位置走到设置起始点 B 位置时,功率从待机功率上升到工作功率(图中 b—c),此过程需要 1～2 s,然后出现了 4～5 s 的运动转换过程(图中 c—d),此阶段有大约 10 W 的功率波动. 从 d 点开始进入熔覆过程,熔覆头做水平直线匀速运动,熔覆过程结束后,机械臂维持当前状态,其功耗并未出现变化,直到熔覆头从 B 位置重新回到 A 位置,此过程功率出现最大跃动点,即图中的 f 点,然后归于静止. 整个过程(图中 e—f—g)耗时 1～2 s,其中到达 A 位置后,机械臂内部六轴系统依然耗功以完成状态转换过程(图中 g—h),大约 20 s 后,机械臂控制柜重回待机状态(图中 m—n).

由以上工作原理分析以及大量实验归纳,本文对其复杂的实际工作过程进行如下简化处理以得到可利用的理论模型:

(1)跃动过程 e—f—g 由于时间过短,对整个能耗结果影响不大,因此本次能耗建模将其简化忽略不计;

(2)波动过程 c—d 由于其功率降低不大,对整个能耗结果影响不大,将其与 d—e 段看作同样的功耗情况,因此将两段看作一个整体进行建模分析;

(3)由以上两项处理可得,工作状态能耗中影响能耗的主要位置因素转换为时间因素,而功率消耗为常值.

因此,机械臂控制柜待机能耗和工作能耗为

$$E_{cons}=P_{cons}t_{cons} \tag{12}$$

$$E_{conw}=P_{conw}t_{conw} \tag{13}$$

式中:P_{cons}、P_{conw}、t_{cons}、t_{conw} 分别为机械臂控制柜待机功率、工作功率、待机时间、工作时间.

机械臂控制柜的工作时间由达到 f 点之前和之后两部分构成,在达到 f 点之前,一部分时间由熔覆时间决定,熔覆时间由扫描速度和熔覆长度共同决定,另一部分时间则取决于六轴系统的内部消耗情况,跟系统有关;在达到 f 点之后,机械手臂为了达到原始平衡位置而持续耗功,此段时间由实验数据分析可知为定值,因此工作时间为

$$t_{conw}=l/v+k_1+k_2 \tag{14}$$

式中:$l/v+k_1$ 表示 f 点之前的工作时间,k_2 表示 f 点之后的工作时间,l 是熔覆层的长度,v 是激光扫描速度,k_1、k_2 为六轴系统控制机械臂下降、

上升固定消耗时间常数，其值只与系统有关.

因此可得机械臂控制柜的能耗为

$$E_{\mathrm{con}}=P_{\mathrm{cons}}t_{\mathrm{cons}}+P_{\mathrm{conw}}\left[\frac{ln}{v}+t_{\mathrm{ls}}+(k_1+k_2)N\right] \tag{15}$$

式中：n 是熔覆层数，t_{ls} 是层间停隔总时间，N 是机械臂上升、下降的次数.

1.4　送粉系统

送粉系统由送粉器、气路装置以及激光熔覆头等部件构成，双料仓负压式送粉器采用载气式送粉结构，利用惰性气流的动能使散粒物料呈悬浮状态随气流沿管道输送至激光熔覆头，配置同轴熔覆头可以实现长距离的粉末输送，实现激光熔覆的同步送粉.

送粉系统的整体能耗由两部分构成，即

$$E_{\mathrm{p}}=E_{\mathrm{ps}}+E_{\mathrm{pw}} \tag{16}$$

式中：E_{ps}、E_{pw} 分别为送粉系统待机状态能耗、送粉状态能耗.

根据其工作原理可知送粉系统由待机状态转变为送粉状态实质是送粉器内部流量计开关打开使惰性气体进入气路管道中以实现粉末的输送，因此仅仅是开关的开闭引起送粉系统电功率的起伏变化，此变化不仅数值较小而且时间较短，因而可将整个过程看作恒功率工作，则式(16)转化为

$$E_{\mathrm{p}}=K_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{pon}} \tag{17}$$

式中：K_{p} 是送粉系统的功率常数，其值大小与送粉器本身有关，单位为功率单位；t_{pon} 是送粉器开机总时间.

1.5　辅助系统能耗建模

激光熔覆系统的辅助系统是指对激光熔覆过程起辅助作用的系统，如数控系统、空调系统、除湿系统等，辅助系统在工作时其功率基本保持不变，因此：

$$E_{\mathrm{aux}}=\sum_{i=1}^{m}h_iP_it_i \tag{18}$$

式中：m 是辅助系统的个数，P_i 是辅助系统 i 的消耗功率，t_i 是辅助系统 i 的工作时间，h_i 是开关函数，$h_i=\begin{cases}1;\text{开启}\\0;\text{关闭}\end{cases}$.

1.6　激光熔覆系统能耗模型

根据以上对激光熔覆系统激光发生器、冷却系统、机械臂控制柜、送粉系统以及辅助系统等 5 部分进行的能耗建模分析可得到激光熔覆系统整机能耗模型，即

$$\begin{aligned}E=&\left\{P_{\mathrm{lw}}t_{\mathrm{lw}}+\int_0^{t_{\mathrm{lm}}}f(P_{\mathrm{l}})\mathrm{d}t+\int_0^{t_{\mathrm{ls}}}P_{\mathrm{ls}}\mathrm{d}t\right\}+\\&\left\{P_{\mathrm{cs}}t_{\mathrm{cs}}+P_{\mathrm{cw}}\frac{(P_{\mathrm{lc}}-P_{\mathrm{l}})t_{\mathrm{lm}}}{v_{\mathrm{f}}\rho c\Delta T}\right\}+\\&\left\{P_{\mathrm{cons}}t_{\mathrm{cons}}+P_{\mathrm{conw}}\left[\frac{ln}{v}+t_{\mathrm{ls}}+(k_1+k_2)N\right]\right\}+\\&K_{\mathrm{p}}t_{\mathrm{pon}}+\sum_{i=1}^{m}h_iP_it_i\end{aligned} \tag{19}$$

1.7　比能耗建模

根据 1.1～1.6 节激光熔覆系统能耗建模的分析以及文献[9]中所用的方法，本文采用式(20)进行比能耗的计算，其推导过程由于篇幅有限不在此赘述.

$$e_{\mathrm{s}}=\frac{E}{M} \tag{20}$$

其中 e_{s} 为比能耗(specific energy consumption)，M 为熔覆层质量.

生产率可用下式计算：

$$Q=\frac{M}{t_{\mathrm{m}}} \tag{21}$$

其中 Q 为生产率(process productivity)，t_{m} 为加工时间.

2　实验验证

2.1　实验安排

本实验中激光熔覆系统采用鞍山煜宸科技有限公司为大连理工大学制造的 RS-LCD-4000-D-R 型光纤激光熔覆系统，将 PA2000mini 功率分析仪连接于设备总线处，用以测量机床功率消耗，通过 PAM 功率分析仪管理软件将电脑和功率仪相连，实现远程控制，采集数据. 具体实验布置及接线如图 8 所示. 本实验熔覆的基体材料与送入熔覆材料均为 316L 不锈钢，主要成分如表 2 所示. 实验任务是在 120 mm×10 mm×10 mm 的基体上熔覆一个长为 80 mm，熔覆层为 20 层的单道多层试件，相关工艺参数如表 3 所示，熔覆过程如图 9 所示.

2.2　能耗预测过程与结果

依据第 1 章所建能耗模型，对此实验过程进行能耗预测.

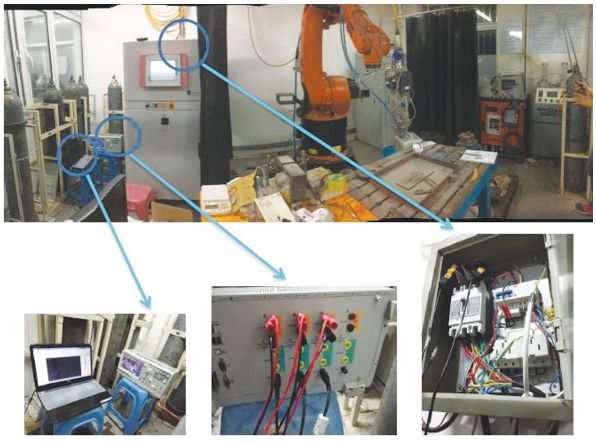


图 8 实验装置及接线总图

Fig. 8 Diagram of experimental equipment and wiring

表 2 316L 不锈钢主要成分

Tab. 2 The components of 316L stainless steel %

w(C)	w(Mo)	w(Ni)	w(Fe)	w(Mn)	w(Cr)	w(Si)
0.022	2.5	12.5	65.6	1.6	17.1	0.7

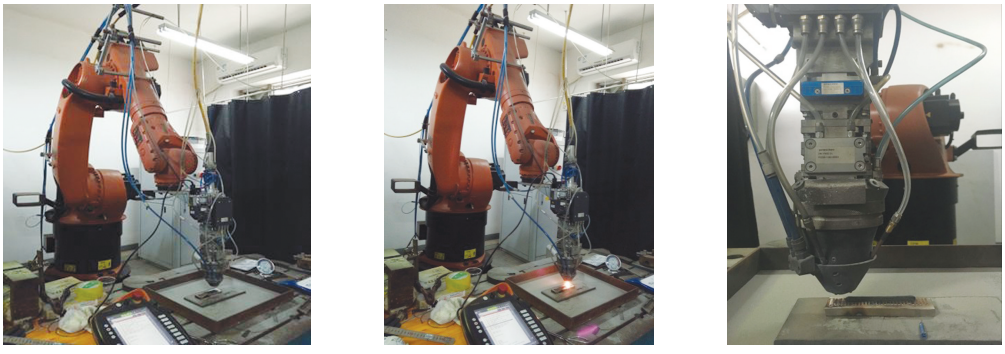
表 3 工艺参数表

Tab. 3 Process parameters list

加工参数	具体数值
扫描速度 v/(mm·s^{-1})	12
送粉速率 v_p/(g·min^{-1})	9.15
冷却水流速 v_f/(L·h^{-1})	360
熔覆层数 n	20
激光功率 P_l/kW	1.5
光斑直径 d/mm	2
单层熔覆时间 t_{lmd}/s	6.7
熔覆层间隔时间 t_{lsd}/s	12
熔覆长度 l/mm	80
熔覆率 f/%	30～40
冷却水密度 ρ/(kg·m^{-3})	1×10^3
冷却水比热容 c/(J·kg^{-1}·K^{-1})	4.2×10^3
冷却水温差 ΔT/K	1

步骤 1 设计加工工艺路线，如图 10 所示.

步骤 2 根据能耗模型进行能耗预测.



(a) 设备待加工 (b) 设备加工中 (c) 工件形成

图 9 激光熔覆过程

Fig. 9 Laser cladding process

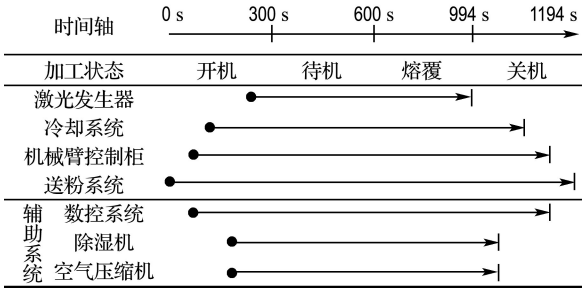


图 10 激光熔覆过程加工工艺路线

Fig. 10 Laser cladding processing routes

(1)激光发生器能耗预测：利用 Matlab 数值分析软件的曲线拟合功能，可以得到本实验所用激光器的具体双射函数为

$$P_{lc}=f(P_l)=0.900\ 7P_l+1.068 \tag{22}$$

因而得到激光消耗功率为 2.419 kW，然后根据式(7)以及工艺参数和工艺路线，得到激光发生器的预测能耗为 0.778×10^6 J.

(2)冷却系统能耗预测：根据式(9)、(10)以及本实验设备相关参数(见表 3)可以对冷却系统能耗进行预测，计算过程由于篇幅有限不再赘述，结果为 1.058×10^6 J.

(3)机械臂控制柜能耗预测：本设备中机械臂下降、上升固定消耗时间常数 k_1、k_2 分别为 11 s、

20 s，且下降、上升 1 次，由式(11)～(15)预测得到其能耗为 0.526×10^6 J.

(4)送粉系统能耗预测：本实验研究中使用的是 RACHAM 公司生产的 RC-PF-01B-2 双料仓负压式送粉器，其 K_p 为 90 W，工作原理如 1.4 节分析，根据式(16)、(17)所建能耗模型进行送粉系统能耗预测得到预测值为 0.107×10^6 J.

(5)辅助系统能耗预测：鞍山煜宸科技有限公司为大连理工大学制造的激光熔覆系统中辅助系统有数控系统、空调系统、除湿系统、空气压缩系统以及照明系统等，则式(18)可表示为

$$E_{aux}=P_{com}t_{com}+P_{aircon}t_{aircon}+P_{dehum}t_{dehum}+P_{comp}t_{comp}+P_{light}t_{light} \tag{23}$$

式中：P_{com}、P_{aircon}、P_{dehum}、P_{comp}、P_{light} 分别为数控系统、空调系统、除湿系统、空气压缩系统、照明系统的消耗功率；t_{com}、t_{aircon}、t_{dehum}、t_{comp}、t_{light} 分别为数控系统、空调系统、除湿系统、空气压缩系统、照明系统的工作时间.

由此得到辅助系统的能耗预测值为 0.724×10^6 J.

步骤 3　实测能耗值与预测能耗值对比.

由步骤 2 可以得到激光熔覆系统整机能耗预测值，将相关结果与实测能耗值展示于表 4 中，结果显示，模型预测能耗值为 3.193×10^6 J，实测能耗值为 3.150×10^6 J，其误差仅为 1.37%. 通过熔覆粉末质量相关计算以及式(20)、(21)可以得到比能耗以及生产率(见表 4)，比能耗误差为 2.17%，生产率误差为 5.15%，由此可以验证模型的有效性. 图 11 是 Gutowski 等于 2017 年总结整理的各种加工方式生产率及比能耗的对比图[14]，

表 4　预测能耗与实测能耗对比

Tab. 4　The comparison of predictive energy consumption and real measure energy consumption

	系统名称	能耗/10^6 J	比能耗/(J·kg^{-1})	生产率/(kg·h^{-1})	熔覆质量/g
预测	激光发生器	0.778	4.466×10^8	6.53×10^{-2}	7.15
	冷却系统	1.058			
	机械臂控制柜	0.526			
	送粉系统	0.107			
	辅助系统	0.724			
	全过程能耗	3.193			
实测	全过程能耗	3.150	4.565×10^8	6.21×10^{-2}	6.90

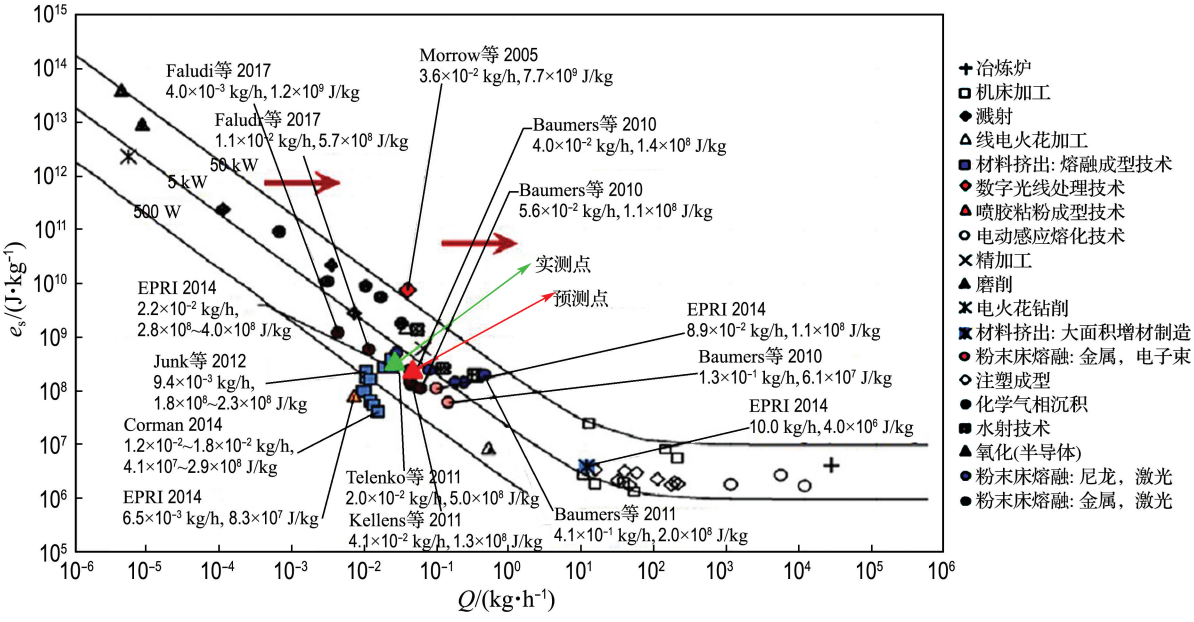


图 11　各种加工方式的生产率及比能耗的对比

Fig. 11　The comparison among various processing methods of productivity and specific energy consumption

图中绿色三角形代表本研究的实测值,红色三角形代表的是预测值.

3 结 语

增材制造过程目前还没有完整的能耗模型,本文以激光熔覆这一典型的增材制造系统为研究对象,根据其工作原理以及能耗特性,将激光熔覆系统整机能耗分为5部分,即激光发生器能耗、冷却系统能耗、机械臂控制柜能耗、送粉系统能耗以及辅助系统能耗.结合加工原理以及实验规律对5部分能耗分别建模,从而得到激光熔覆系统整机能耗模型,并以熔覆一个长为80 mm,层数为20的316L不锈钢试件为例,进行实验验证,结果表明在同一设定加工条件下模型预测能耗值为3.193×10^6 J,实测能耗值为3.150×10^6 J,其误差仅为1.37%,比能耗误差为2.17%,生产率误差为5.15%,从而验证了所建模型的准确性和有效性;并将结果标识在生产率及比能耗的对比图(图11)中,再次验证了本次研究数据的可靠性以及模型的有效性.从图中可以看到,激光熔覆技术的比能耗(图中中间部分)与传统加工技术(图中右下角部分)相比要高2~3个能量级,属于高能量密度生产方式,从可持续角度来看,非常有必要探究其耗能机理以减少能耗、提高能源利用率.本研究为后续工艺参数优化、能耗预测等相关工作提供了理论计算基础,也为其他增材制造过程节能减排、绿色生产、参数优化等方向的研究提供了参考.

参考文献:

[1] 李玉霞. 选择性激光熔化增材制造碳效率评估方法及应用[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
LI Yuxia. Carbon efficiency and application of selective laser melting process for additive manufacturing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)

[2] SREENIVASAN R, GOEL A, BOURELL D L. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing [J]. **Physics Procedia**, 2010, **5**(1): 81-90.

[3] KELLENS K, YASA E, RENALDI R, *et al*. Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes [C] // **22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011**. Austin: University of Texas at Austin, 2011:1-16.

[4] KELLENS K, RENALDI R, DEWULF W, *et al*. Environmental impact modeling of selective laser sintering processes [J]. **Rapid Prototyping Journal**, 2014, **20**(6):459-470.

[5] KELLENS K, DEWULF W, OVERCASH M, *et al*. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI) — CO_2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description [J]. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012, **17**(1):69-78.

[6] KELLENS K, DEWULF W, OVERCASH M, *et al*. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO_2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: Case studies [J]. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012, **17**(2):242-251.

[7] LE BOURHIS F, KERBRAT O, HASCOET J Y, *et al*. Sustainable manufacturing: Evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2013, **69**(9/10/11/12):1927-1939.

[8] LUO Yanchun, JI Zhiming, LEU M C, *et al*. Environmental performance analysis of solid freedom fabrication processes [C] // **Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment**. Piscataway: IEEE, 1999:1-6.

[9] LUO Yanchun, LEU M C, JI Zhiming. Assessment of environmental performance of rapid prototyping and rapid tooling processes [Z]. Newark: Department of Mechanical Engineering, New Jersey Institute of Technology, 1999:783-791.

[10] MOGNOL P, LEPICART D, PERRY N. Rapid prototyping: Energy and environment in the spotlight [J]. **Rapid Prototyping Journal**, 2006, **12**(1):26-34.

[11] BAUMERS M, TUCK C, WILDMAN R, *et al*. Transparency built-in: Energy consumption and cost estimation for additive manufacturing [J]. **Journal of Industrial Ecology**, 2013, **17**(3): 418-431.

[12] BAUMERS M, TUCK C, HAGUE R, *et al*. A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption [C] // **21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010**. Austin: University of Texas at Austin, 2010: 278-288.

[13] BAUMERS M, TUCK C, WILDMAN R, *et al*. Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter? [C] // **22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011**. Austin: University of Texas at Austin, 2011: 30-40.

[14] GUTOWSKI T, JIANG Sheng, COOPER D, *et al*. Note on the rate and energy efficiency limits for additive manufacturing [J]. **Journal of Industrial Ecology**, 2017, **21**: S69-S79.

Investigation on energy consumption modeling analysis method of laser cladding system

DONG Mengmeng, LI Tao*, GUO Yanchun, WU Zupeng, TANG Zijue, PENG Shitong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Aiming at the problem that the energy consumption mechanism of additive manufacturing process is complex and the energy consumption is difficult to predict, the energy consumption modeling analysis method of laser cladding system is studied. According to the working principles and characteristics of energy consumption, the laser cladding system is divided into five subsystems: laser generator system, cooling system, mechanical arm control cabinet, powder feeding system and auxiliary system. Each subsystem energy consumption model is obtained by theoretical analysis and experimental studies. The total energy consumption model can be obtained by aggregating the five subsystem energy consumption models. Then the experiment of processing a 316L stainless steel specimen is conducted as an illustrative example. The energy consumption model and the specific energy consumption are analyzed. The results show that the errors of the energy consumption and the specific energy consumption between predictive values and real measure values are 1.37% and 2.17% respectively, which verify the validity of the model. The model can be used for predicting laser cladding system energy consumption, improving process routes, and implementing the green development. Also, the proposed approach can provide reference for studying energy consumption issues of other additive manufacturing technologies.

Key words: additive manufacturing; laser cladding; energy consumption models; specific energy consumption