膜层材料与技术

工艺参数对钴基合金等离子熔覆残余应力的影响

来佑彬，王冬阳，杨波，吴海龙，孙铭含，李响

（沈阳农业大学 工程学院，沈阳 110866）

摘 要：目的 探究钴基合金等离子熔覆在不同工艺参数下残余应力的分布规律，选取最优工艺参数组合，以达到降低残余应力的目的。**方法** 设计正交试验，采用等离子熔覆技术制备9组不同工艺参数下单道钴基等离子熔覆样件，利用盲孔法对每个样件的熔覆起点、中间位置及终点位置的残余应力进行测量，分析工作电流、扫描速度、送粉速度等工艺参数对残余应力的影响规律。**结果** 工件表面残余应力主要以拉应力为主，其中间位置的残余应力最大。各个位置平行于扫描路径方向的残余应力均大于垂直于扫描路径方向的残余应力。当工作电流为92 A、扫描速度为100 mm/min、送粉速度为12 r/min时，所成形的样件残余应力最小。**结论** 工作电流对熔覆起点和终点平行于扫描路径方向的残余应力影响最为显著，其余各位置各方向上，影响最显著的因素为扫描速度。工作电流越大，残余应力越大；随着扫描速度的增大，残余应力不断变小；随着送粉速度的增大，残余应力有增大的趋势。选取合适的工艺参数组合能够有效地控制残余应力。

关键词：等离子熔覆；钴基合金；正交试验；盲孔法；残余应力；工艺参数

中图分类号：TG174.442 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2019)06-0314-08

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.038

Influence of Process Parameter on the Residual Stress of the Co-based Alloy Plasma Cladding

LAI You-bin, WANG Dong-yang, YANG Bo, WU Hai-long, SUN Ming-han, LI Xiang

(School of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

ABSTRACT: The work aims to study the distribution of residual stress of plasma cladding of Co-based alloy under different process parameters and select the optimal combination of process parameter to reduce the residual stress. Orthogonal experiment was designed and nine groups of single channel Co-based plasma cladding samples with different process parameters were prepared by plasma cladding. Blind-hole method was used to measure the residual stress at the starting location, intermediate location and finish location of each sample, and the influence of working current, scanning speed and powder feeding rate on the residual stress was analyzed. The residual stress on the surface of the samples was mainly tensile stress, and the residual stress at middle location was the maximum. The residual stress parallel to the scanning path was greater than that perpendicular to the scanning path. When the working current was 92 A, the scanning speed was 100 mm/min, and the powder feeding rate was 12 r/min, the residual stress of the formed sample was the minimum. The working current has the most significant impact on the residual stress of the starting location and the finish location parallel to scanning path and other locations in all directions. The most significant factor is the scanning speed. The greater the working current is, the greater the residual stress is. With the in-

收稿日期：2018-10-11；**修订日期：**2018-11-18

Received：2018-10-11；**Revised：**2018-11-18

基金项目：国家自然科学基金项目（51605311）；辽宁省教育厅科学技术研究重点项目（LSNZD201603）；沈阳市科技局项目（17-231-1-65）

Fund： Supported by the National Natural Science Foundation of China (51605311) and the Education Department of Liaoning Province Science and Technology Research Key Project (LSNZD201603) and Shenyang Science and Technology Bureau Project (17-231-1-65)

作者简介：来佑彬（1988—），男，博士，讲师，主要研究方向为增材制造。邮箱：youbinlai@163.com

Biography： LAI You-bin (1988—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: addictive manufacturing. E-mail: youbinlai@163.com

crease of the scanning speed, the residual stress becomes smaller. With the increase of the powder feeding rate, the residual stress has an increasing trend. The residual stress can be effectively controlled by selecting the proper combination of process parameters.

KEY WORDS: plasma cladding; Co-based alloy;orthogonal test; blind-hole method; residual stress; process parameter

等离子熔覆技术是在热喷涂、等离子堆焊、激光熔覆等技术基础上发展而来的一种新兴的高能束熔覆表面处理技术[1]。该技术以工作电流产生的等离子弧为移动热源，采用同步送粉的方式进行熔覆。一方面，等离子弧的快速加热冷却为材料加工提供了常规手段无法实现的极端非平衡条件，可以在工件表面获得一种组织致密、结合牢固的熔覆层，实现熔覆层与工件基体的冶金结合；但另一方面，等离子熔覆过程中局部热输入造成的不均匀温度场必然引起局部热效应，熔池及其周围区域在经历一个快速加热、熔化和快速冷却、凝固的过程后，必然会产生局部的热塑性变形，熔池部分因冷却体积减小而受到附近材料的约束，从而导致残余应力的产生[2]。由此可见，残余应力是等离子熔覆的必然产物。

一般来说，残余应力作为一种内应力，对工件的微观组织稳定性和自身结构稳定性都有极其不利的影响，会严重影响到工件的使用性能[3]。但也有研究表明，一定层深分布的残余压应力能够提高工件的疲劳寿命、蠕变寿命以及抗应力腐蚀能力，使工件表面得到一定的强化[4-5]，因此对残余应力的研究具有重要意义。TAO Yang-feng[6]通过提高激光熔覆过程中的环境温度，有效降低了激光熔覆层的开裂敏感性，并探究出残余应力在熔覆层不同深度的分布规律。SIMSON T[7]采用 X 射线衍射方法对选择性激光熔化（SLM）成形件的残余应力进行测量，探究了残余应力在熔覆层不同位置的分布规律。FANG Yong-chao[8]在等离子熔覆粉末中加入 La_2O_3 后，采用 X 射线衍射仪对熔覆层残余应力进行测量，结果表明残余应力得到显著降低。目前国内外学者对高能束熔覆残余应力的研究多集中于激光熔覆，在等离子熔覆方面研究较少。相比于激光熔覆，等离子熔覆技术虽然在原理上与其相似，但在热源提供、工作环境等方面均与之不同，导致熔覆过程中产生的残余应力分布情况有所差别，因此对于等离子熔覆残余应力有较大的研究价值。本文在其他工艺参数一定的情况下，以工作电流、送粉速度和扫描速度为试验因素，设计正交试验制得成形样件，采用盲孔法对每个样件在熔覆起点、熔覆中间位置、以及熔覆终点的残余应力进行测量，进而分析了残余应力在不同熔覆位置的分布情况。采用正交试验极差分析法，研究了不同工艺参数对钴基合金等离子熔覆残余应力的显著性影响规律，以及不同位置的残余应力随工艺参数的变化情况，为通过优化工艺参数来调控残余应力奠定了基础。

1　试验

1.1　试验材料

试验用基板材料为 Q235 钢，基板尺寸为 115 mm×95 mm×10 mm，试验前先将基板进行热处理，以消除基板内原有的残余应力[9]。具体操作为：将基板放入炉内加热至 550 ℃，保温 2 h，随炉冷却至室温。将热处理后的基板打磨抛光，以便去除表面氧化皮层并增加其表面光洁度，然后用丙酮对其做进一步的清洁处理[10]。熔覆用粉末材料为钴基合金球形粉末，粒度为 100~270 目，硬度为 40~44HRC，其化学成分（以质量分数计）为：C 1.11%，Cr 28.61%，Fe 0.45%，Mn 0.24%，Mo 0.21%，Ni 2.55%，Si 1.41%，W 4.67%，Co 余量。

1.2　样件制备

试验在沈阳农业大学等离子熔覆系统上进行。为除去粉末中的水分，增强粉末的流动性及传送时的均匀性，试验前对粉末进行二次筛选，并在 120 ℃真空环境下进行干燥处理[11]。选取工作电流、扫描速度、送粉速度 3 个因素作为研究对象，各因素水平如表 1 所示。采用 $L_9(3^4)$正交表进行正交试验设计，如表 2 所示，制备 9 组不同工艺参数组合下的钴基合金单道熔覆试验样件。采用基恩士 VHX-5000 型超景深显微镜分别扫描出熔覆起点、中间位置、终点的三维形貌图，如图 1 所示。熔覆层每个位置取长度为 5 mm 的区域，在该区域内采用显微镜测量出熔覆层厚度的平均值，测量结果见表 3。

表 1　试验中的工艺参数

Tab.1 Process parameters in the experiment

Working current/A	Scanning speed/ $(mm\cdot min^{-1})$	Powder feeding rate/ $(r\cdot min^{-1})$	Nozzle distance/mm	Ionic gas flow/ $(L\cdot h^{-1})$	Feeding gas flow/ $(L\cdot h^{-1})$	Protected gas flow/ $(L\cdot h^{-1})$
90，95，100	90，100，110	8，10，12	5	0.7	3	5

表 2 正交试验设计

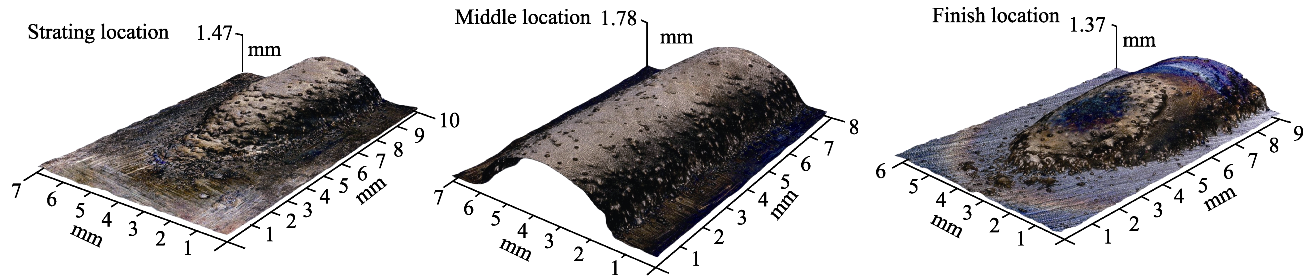
Tab.2 Orthogonal test design

No.	Working current	Scanning speed	Powder feeding rate	Empty row
1	1(92 A)	1(80 mm/min)	1(8 r/min)	1
2	1	2(90 mm/min)	2(10 r/min)	2
3	1	3(100 mm/min)	3(12 r/min)	3
4	2(95 A)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3(98 A)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 3 熔覆层厚度测量结果

Tab.3 Measurement results of cladding thickness

No.	Thickness of starting location/mm	Thickness of middle location/mm	Thickness of finish location/mm
1	1.17	1.57	0.87
2	1.21	1.65	1.08
3	1.44	1.76	1.16
4	1.23	1.56	0.93
5	1.55	1.87	1.13
6	1.23	1.52	0.73
7	1.54	1.88	1.18
8	1.26	1.49	0.74
9	1.22	1.61	1.04



a 起点 b 中间位置 c 终点

图 1 熔覆层三维形貌图

Fig.1 3D topography of cladding layer

观察图 1 熔覆层各位置的三维形貌图并结合表 3 熔覆层高度测量结果可知：在熔覆起点处，由于基板温度较低，有大量未熔粉末，熔覆效果较差；熔覆中间位置最厚，熔覆层表面较均匀；为避免熔覆终点处出现粉末堆积现象，在熔覆到终点时立刻切断电流，扫描和送粉继续进行一段时间后停止，防止余弧使熔覆层再一次熔融，断弧后熔池温度迅速降低，新送入的粉末无法熔化，故在熔覆终点位置熔覆层逐渐变薄。

1.3 残余应力测试

钻孔法测量残余应力是 1934 年德国学者 J. Mathar[12]提出的，经过不断的改进和完善，测量精度大为提高，现已成为工程上应用最广泛的残余应力测量方法。其基本原理为：在具有一定初应力的熔覆样件表面粘贴应变片并钻孔，钻孔后样件表面原有的应力平衡被破坏，小孔周围会释放部分应力使该区域应力重新分布，应变片受到应力释放作用而产生的应变由应变仪测得，最后根据弹性力学理论计算出小孔处所释放的应力[13-15]。

本试验仪器使用 BX120-1CG 型电阻应变片与 JYB-1 型数字静态应变仪，采用盲孔法对单道等离子熔覆样件产生的残余应力进行测量。试验流程如下：

1）打磨、清洁样件表面。当熔覆后的样件恢复至初始温度后，对其熔覆区域周围基板打磨至镜面，并使用丙酮进行清洁处理。

2）贴片。在熔覆区域周围粘贴应变片并连接于应变仪，应变片贴放位置如图 2 所示，其中 A 点为熔覆起点，B、D 点为熔覆中间位置，C 点为熔覆终点。为确保应变片完全贴合于基板，静置 24 h 后方可进行后续操作。

3）钻孔。将应变仪示数调零后开始钻孔，为降低由于钻孔导致的孔边塑性变形对测量精度的影响[16]，小孔中心距应变片敏感栅距离为 2 mm，先选取直径 1 mm 的钻头对孔心位置进行确定，随后用直径 2mm 的钻头进行钻孔，钻孔深度为 2 mm。残余应力测试样件如图 3 所示。

4）读数。为避免钻孔时钻削热产生的附加应变对读数的影响，钻孔后应静置 20 min，孔边恢复到初始温度后，每隔 5min 读取一组示数，直到相邻 2 次示数相差(1~2)$\mu\varepsilon$ 或相同时开始取值，取 4 组数值后采用平均值法求得应变的平均值[17]。

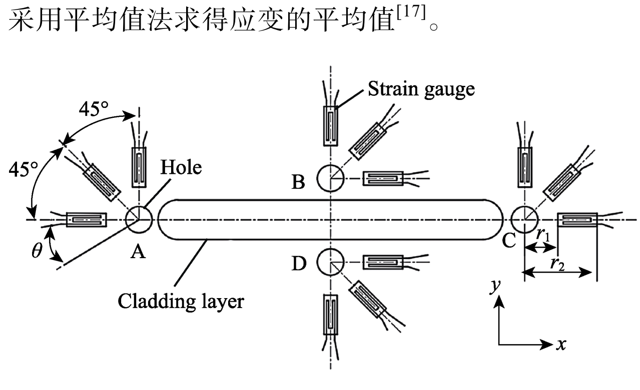


图 2 残余应力测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of residual stress testing

图 3　残余应力测试样件
Fig.3 Sample of residual stress test

2　结果与分析

2.1　残余应力的计算

盲孔法应力释放系数 A、B 的计算公式为[18]：

$$A=-k\frac{1+v}{2}\frac{a^2}{r_1r_2} \tag{1}$$

$$B=-\frac{2a^2}{r_1r_2}\left[-1+\frac{1+v}{4}\frac{a^2(r_1^2+r_1r_2+r_2^2)}{r_1^2r_2^2}\right] \tag{2}$$

式中：k 为修正系数（1.065）；v 为 Q235 钢材的泊松比（0.25）；a 为钻孔半径（1 mm）；r_1、r_2 为应变片敏感栅到孔心最近、最远处的距离（r_1=2 mm，r_2=3 mm）。将以上数据代入公式（1）和（2）得，A=–0.1109375，B=–0.278356。

主残余应力 σ_1、σ_2 及方向角 θ 的计算公式如下[18]：

$$\sigma_{1,2}=E\left[\frac{\varepsilon_1+\varepsilon_3}{4A}\mp\frac{1}{4B}\sqrt{(\varepsilon_1-\varepsilon_3)^2+(2\varepsilon_2-\varepsilon_1-\varepsilon_3)^2}\right] \tag{3}$$

$$\theta=\frac{1}{2}\arctan\frac{2\varepsilon_2-\varepsilon_1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3-\varepsilon_1} \tag{4}$$

式中：ε_1、ε_2、ε_3 分别为应变计所测得的应变数；A、B 为应力释放系数；E 为 Q235 的弹性模量（200 GPa）；θ 为主应力 σ_1 与平行于扫描路径 x 方向的夹角。

定义主残余应力平行于扫描路径 x 方向的分量为 σ_x，垂直于扫描路径 y 方向的分量为 σ_y，残余应力 σ_x、σ_y 计算公式如式（5）和（6）[19]。将由式（3）和（4）计算所得的主残余应力 σ_1、σ_2 及方向角 θ 代入式（5）和（6）进行计算，即可求得 σ_x、σ_y（见表 4）。

$$\sigma_x=\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}+\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cdot\cos 2\theta \tag{5}$$

$$\sigma_y=\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}-\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}\cdot\cos 2\theta \tag{6}$$

表 4　残余应力推算值
Tab.4 Presumed value of residual stress

No.	A		B		C		D	
	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa	σ_x/MPa	σ_y/MPa
1	158.79	109.39	218.80	137.71	187.52	136.31	234.13	127.79
2	66.33	–51.23	275.57	166.35	183.66	96.01	249.20	130.97
3	–14.11	–117.95	169.10	81.94	74.31	–41.40	172.58	136.84
4	124.99	103.29	253.60	154.07	149.57	114.55	241.73	202.67
5	113.45	–4.38	300.12	194.98	222.21	67.82	259.88	142.83
6	59.87	–33.07	222.87	142.64	156.64	89.45	178.41	87.50
7	253.10	105.66	355.07	291.92	315.00	99.87	327.58	279.74
8	176.08	113.95	298.99	130.31	178.88	62.02	258.35	155.16
9	138.81	–14.19	213.26	117.46	188.57	27.10	206.10	102.86

由表 4 可得：由于熔池宽度有限，熔池在 x 方向的体积收缩量要比 y 方向上的大，故各个位置的 x 方向残余应力均大于 y 方向的残余应力。熔覆起点处的残余应力最小，中间位置的残余应力最大。在第 7 组工艺参数组合下熔覆后的工件的各点残余应力在 9 组中最大；在第 3 组工艺参数组合下，即工作电流为 92 A、扫描速度为 100 mm/min、送粉速度为 12 r/min 时，所得熔覆样件残余应力最小。

2.2　工艺参数对各位置残余应力影响的显著性

采用正交试验极差分析法研究工艺参数对熔覆起点、中间位置以及终点的 x、y 方向残余应力影响的显著性，极差 R 的计算方法如下[20]：

$$k_i=K_i/s \tag{7}$$

$$R=\max\{k_1,k_2,k_3\}-\min\{k_1,k_2,k_3\} \tag{8}$$

其中，K_i 为任一列上水平号为 i（本文 i=1,2,3）时所对应的试验结果之和；s 为任一列上各水平出现的次数；k_i 为任一列上取因素水平 i 时所得试验结果的算术平均值。将表 3 残余应力推算值代入公式（7）和（8）中，经过计算得到极差 R，极差越大，则表示该极差列所对应的因素对残余应力的影响越大。

2.2.1　工艺参数对熔覆起点（A 点）残余应力的影响

对熔覆起点（A 点）进行正交试验极差分析，试验数据处理见表 5。由表 5 可知，在 A 点 x 方向上，

工作电流与扫描速度对残余应力的影响都很显著。其原因是熔覆开始时，基板温度较低，工作电流引起的局部大量热输入瞬间导致熔池与基板间形成较大温度差，该温度差直接决定熔池冷却凝固时的体积收缩量，而熔池的塑性变形是导致残余应力产生的主要原因。因此，工作电流对残余应力的影响显著。扫描速度也可通过改变熔池单位时间内所受热量来影响熔池与基板间的温度差，故扫描速度对残余应力也有显著影响。在 A 点 y 方向上，因为熔池宽度是有限的，熔池在 y 方向上的收缩量也是有限的，所以工作电流对残余应力的影响也是有限的。扫描速度不仅可以改变熔池与基板间的温度差，还决定着熔池的宽度，因此在 y 方向上扫描速度对残余应力的影响要比工作电流大。熔覆开始时温度较低，粉末熔化率较低，所以无论是在 x 方向上还是 y 方向上，送粉速度对残余应力的影响都较小。

表 5　A 点残余应力直观分析结果
Tab.5 Intuitive analysis results of residual stresses at point A

Direction		Working current	Scanning speed	Powder feeding rate
σ_x	k_1	70.33	178.96	131.58
	k_2	99.44	118.62	110.04
	k_3	189.33	61.53	117.48
	R	119.00	117.43	21.54
σ_y	k_1	−19.93	106.12	63.42
	k_2	21.95	19.44	12.62
	k_3	68.48	−55.07	−5.55
	R	88.40	161.18	68.98

2.2.2　工艺参数对熔覆中间位置（B、D）点残余应力的影响

由于 B、D 点均处在熔覆中间位置，故将两点一同进行分析，其极差分析结果见表 6。由表 6 可知，在熔覆中间位置，对残余应力影响最大的因素是扫描速度。随着熔覆的进行，基板温度不断累积，导致熔池与基板间的温度差逐渐降低并趋于平稳，因此在 x、y 两方向上工作电流对残余应力的影响程度均有所降低。扫描速度的大小决定着熔池的宽度，因此扫描速度可以显著地影响残余应力的大小。在 y 方向上，工作电流与送粉速度综合起来也可以对熔池宽度造成一定影响，但影响程度不及扫描速度。

2.2.3　工艺参数对熔覆终点（C 点）残余应力的影响

对熔覆终点（C 点）进行正交试验极差分析，结果如表 7 所示。由表 7 可知，扫描速度对 C 点 x、y 方向上的残余应力均有显著影响，这是因为熔覆至 C 点时，为防止粉末在尾部堆积，立刻切断工作电流，此时扫描速度的大小就决定了之后熔池的大小，从而影响该点的残余应力。由于工作电流被切断基板与熔池瞬间产生较大温度差，熔池沿 x 方向上迅速冷却收缩而产生较大残余应力，故在 C 点 x 方向上的残余应力有显著影响；而 y 方向上熔池收缩量较小，且该点处熔池主要依靠余弧的温度形成，所以工作电流对 C 点 y 方向上的残余应力影响不显著。由于没有了等离子弧的作用，新送入的粉末无法熔化与基板结合形成熔池，反倒对熔池在 y 方向的收缩起到了一定的阻碍作用，因此送粉速度在 y 方向对残余应力也起到了一定的影响。

表 6　B、D 点残余应力直观分析结果
Tab.6 Intuitive analysis results of residual stresses at points B and D

Location	Direction		Working current	Scanning speed	Powder feeding rate
B	σ_x	k_1	221.16	275.82	246.89
		k_2	258.86	291.56	247.51
		k_3	289.13	201.78	274.76
		R	67.98	89.78	27.87
	σ_y	k_1	128.67	194.56	136.89
		k_2	163.90	163.88	145.96
		k_3	179.90	114.01	189.61
		R	51.23	80.55	52.73
D	σ_x	k_1	218.63	267.81	223.63
		k_2	226.67	255.81	232.34
		k_3	264.01	185.70	253.34
		R	45.38	82.12	29.71
	σ_y	k_1	131.86	203.40	123.49
		k_2	144.33	142.98	145.50
		k_3	179.25	109.07	186.47
		R	47.39	94.33	62.98

表 7　C 点残余应力极差分析结果
Tab.7 Range analysis results of residual stresses at point C

Direction		Working current	Scanning speed	Powder feeding rate
σ_x	k_1	148.49	217.36	174.34
	k_2	176.14	194.91	173.93
	k_3	227.48	139.84	203.84
	R	78.99	77.53	29.91
σ_y	k_1	63.64	116.91	95.93
	k_2	90.60	75.28	79.22
	k_3	63.00	25.05	42.09
	R	27.61	91.86	53.83

2.3　不同工艺参数对残余应力的影响

2.3.1　工作电流对残余应力的影响

图 4 为不同工作电流下 4 个测试位置处残余应力

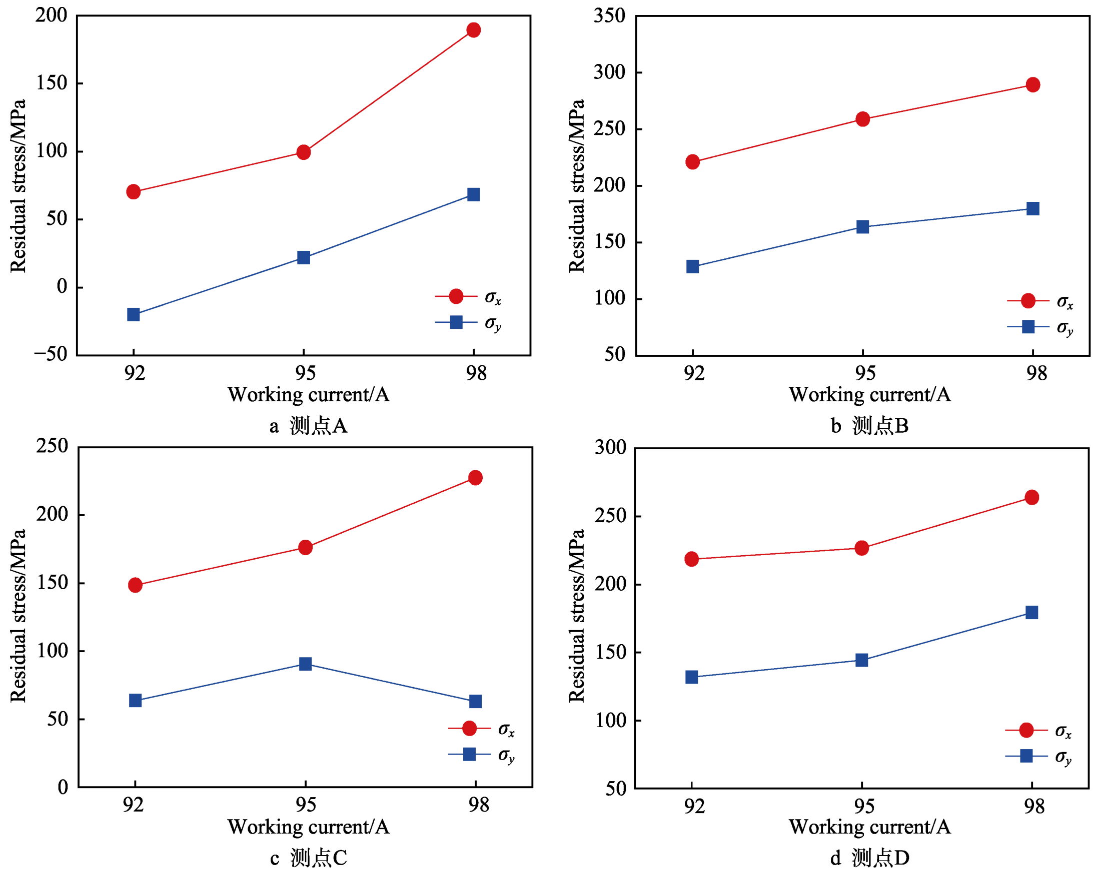


图 4　不同工作电流下的残余应力

Fig.4 Residual stress at different working current: a) point A, b) point B, c) point C, d) point D

的变化情况，可以看出，在测点 A、B、D 的 x 方向上，残余应力随着工作电流的增加而增大。这是因为熔池部分塑性变形会产生残余应力，增大工作电流会增加熔池与基板间的温度差，熔池在冷却凝固时的 x 方向上的体积收缩量增大，从而导致残余应力变大。在这三个测点的 y 方向上，工作电流的增大导致熔池宽度增大，熔池凝固后在 y 方向上的体积收缩量变大，残余应力变大[19]。在测点 C 处 x 方向上，工作电流被切断导致熔池温度迅速降低，在 x 方向的体积收缩量取决于被切断前的工作电流大小，工作电流越大体积收缩量越大，残余应力越大。另一方面，切断工作电流后熔池宽度逐渐变小，y 方向上的残余应力随着电流的增大呈先增大后减小的趋势。综上，在粉末能够熔化的前提下，可以通过适当的降低工作电流来减小产生的残余应力。

2.3.2　扫描速度对残余应力的影响

图 5 为不同扫描速度下 4 个测试位置处残余应力的变化情况。在 x 方向上，随着扫描速度的增大，熔池单位时间内所受到的不均匀热输入会减少，熔池冷却凝固时的体积收缩量变小，使得产生的残余应力变小。在 y 方向上，增大扫描速度可以减小熔池宽度，从而减小残余应力[19]。其中，测点 A 的 y 方向残余应力在 80~90 mm/min 区间内，由 106.12 MPa 的残余拉应力逐渐减小为 0，在 90~100 mm/min 区间内逐渐产生能够提高工件性能的残余压应力。所以，选择合适的扫描速度能够有效降低熔覆后的残余拉应力，并产生一定的残余压应力来改善工件性能。测点 B 的 x 方向残余应力变化趋势与测点 D 略有不同，可能是试验误差引起的。

2.3.3　送粉速度对残余应力的影响

图 6 为不同送粉速度下 4 个测试位置处残余应力的变化情况，可以看出送粉速度对残余应力也有影响。在测点 A 处，残余应力随着送粉速度的增大而减小，原因是在开始熔覆时基板温度较低，此时增大送粉速度，工作电流产生的热量会被合金粉末部分吸收，使基板难以完全熔化，导致形成的熔池体积较小，熔池凝固收缩时产生的残余应力较小。在测点 B、D 处，此时工作电流产生的高温等离子弧可将合金粉末与基板完全熔解形成熔池，当增大送粉速度时，连续被送入熔池的合金粉末颗粒的温度相对于熔池温度要低很多，因此进入熔池后相当于给熔池添加了一个强制冷却条件，使基板与熔池间的温度差变大，熔池凝固收缩产生的残余应力随之变大[21]。在测点 C 处，工作电流已经被切断，此时新送入的合金粉末会阻碍熔池在 y 方向的凝固收缩，所以残余应力随送粉速度的增大而减小。最后，从整体残余应力的角度考虑，在满足送粉量条件下，采用较小的送粉速度有助于降低残余应力。

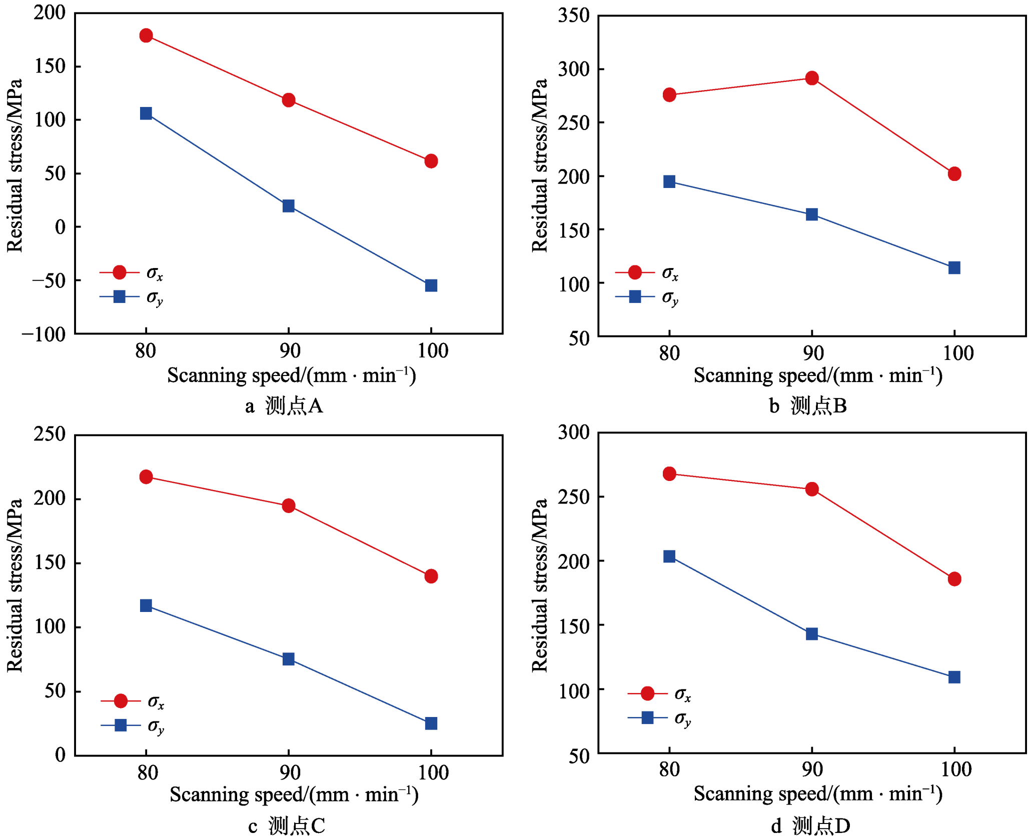


图 5 不同扫描速度下的残余应力

Fig.5 Residual stress at different scanning speed: a) point A, b) point B, c) point C, d) point D

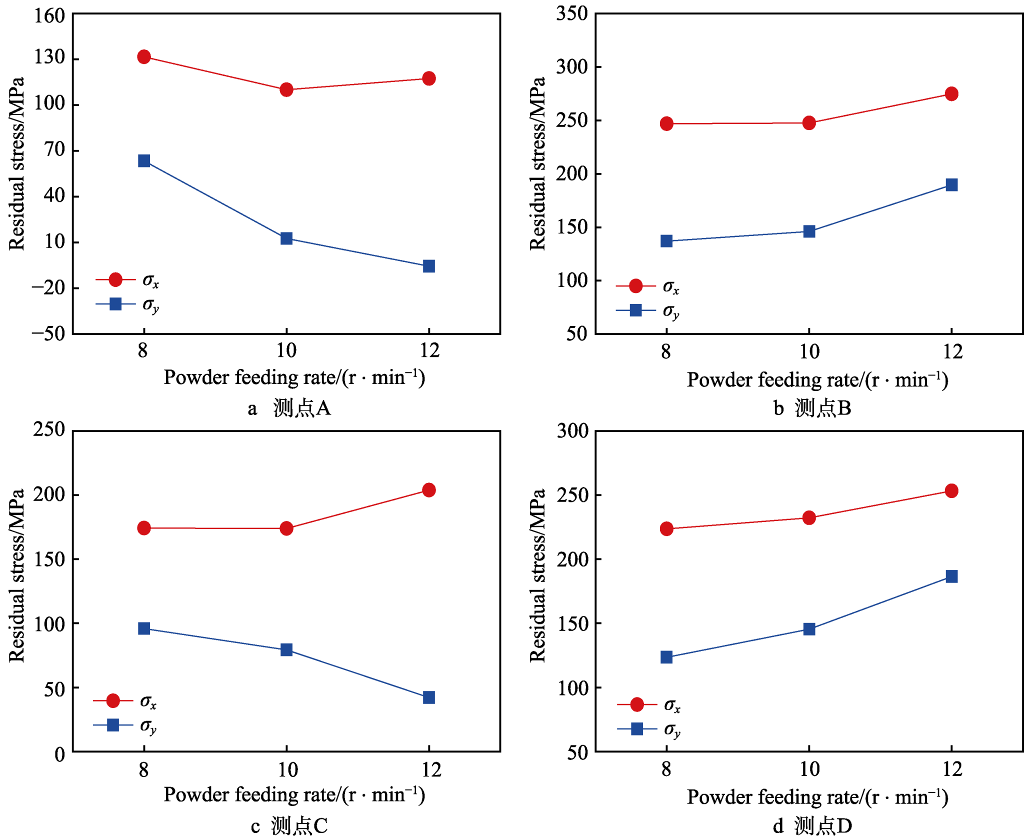


图 6 不同送粉速度下的残余应力

Fig.6 Residual stress at different powder feeding rate: a) point A, b) point B, c) point C, d) point D

3 结论

1）工件表面残余应力主要以拉应力为主，平行于扫描路径方向的残余应力大于垂直于扫描路径方向的残余应力。熔覆中间位置的残余应力最大，熔覆终点的残余应力大于熔覆起点的残余应力。

2）工作电流、扫描速度、送粉速度均对残余应力有显著影响。其中，对于熔覆起点、终点平行于扫描路径方向的残余应力，工作电流对其影响最为显著，扫描速度也有较为显著的影响。其余各位置各方向上，对残余应力影响最为显著的因素为扫描速度。

3）工作电流越大，残余应力越大；增大扫描速度可降低残余应力；随着送粉速度的增大残余应力有增大的趋势。选取合适的工艺参数组合能够有效的减小残余应力。

参考文献：

[1] 严大考，张洁溪，唐明奇，等. 等离子熔覆技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 20-24.
YAN Da-kao, ZHANG Jie-xi, TANG Ming-qi, et al. Research development of plasma cladding technology[J]. Hot working technology, 2015, 44(4): 20-24.

[2] 杨健，黄卫东，陈静，等. 激光快速成形金属零件的残余应力[J]. 应用激光, 2004(1): 5-8.
YANG Jian, HUANG Wei-dong, CHEN Jing, et al. Residual stress on laser rapid forming metal part[J]. Applied laser, 2004(1): 5-8.

[3] LU J. Handbook of measurement of residual stresses[M]. Liburn: The Fairmont Press, 1996.

[4] 何少杰，杨文玉，郭步鹏，等. 机加工表面残余应力及其疲劳寿命评价的研究进展[J]. 表面技术, 2015, 44(6): 120-126.
HE Shao-jie, YANG Wen-yu, GUO Bu-peng, et al. Research progress on evaluation of surface residual stressand fatigue life of machined products[J]. Surface technology, 2015, 44(6): 120-126.

[5] 蒋聪盈，黄露，王婧辰，等. TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的残余应力模拟分析[J]. 表面技术，2016, 45(4): 5-9.
JIANG Cong-ying, HUANG Lu, WANG Jing-chen, et al. Simulation analysis of the residual stress field of TC4 Ti alloy under laser shock peening and shot peening[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 5-9.

[6] TAO Y F, LI J, LÜ Y H, et al. Residual stress distribution in different depths of TiNi/Ti_2Ni-based laser clad coating prepared at different environmental temperatures[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(9): 2043-2054.

[7] SIMSON T, EMMEL A, DWARS A, et al. Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting[J]. Additive manufacturing, 2017 (17): 183-189.

[8] FANG Y C, CUI X F, CAI Z B, et al. Influence of La_2O_3 addition on nano indentation hardness and residual stress of stellite 6 coating prepared by plasma cladding[J]. Journal of rare earths, 2018, 36(8): 873-878.

[9] KÖHLER H, RAJPUT R, KHAZAN P, et al. On the influence of laser cladding and post-processing strategies on residual stresses in steel specimens[J]. Physics procedia, 2014(56): 250-261.

[10] 来佑彬，刘伟军，赵宇辉，等. TA15 粉末激光成形基板应力影响因素的试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(7): 1605-1609.
LAI You-bin, LIU Wei-jun, ZHAO Yu-hui, et al. Experimental research on influencing factors of the residual stress of substrate in Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr powder laser shaping[J]. Rare metal materials and engineering, 2014, 43(7): 1605-1609.

[11] 付延英，翟贤超，印雪梅. GH3625 合金激光直接成形工艺[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(2): 39-42.
FU Yan-ying, ZHAI Xian-chao, YIN Xue-mei. Laser metal direct manufacturing process of GH3625 alloy[J]. Aerospace materials and technology, 2017, 47(2): 39-42.

[12] MATHAR J. Determination of initial stresses by measuring the deformations around drilled holes[J]. Trans ASME, 1934(4): 249-254.

[13] 宋俊凯，黄小波，高玉魁. 残余应力测试分析技术[J]. 表面技术, 2016, 45(4): 75-82.
SONG Jun-kai, HUANG Xiao-bo, GAO Yu-kui. Test and analysis technology of residual stress[J]. Surface technology, 2016, 45(4): 75-82.

[14] ASTM E837-94a, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method [S].

[15] KUNG C L, LIN A D, HUANG Po-wei, et al. Estimation formula for residual stress from the blind-hole drilling method[J]. Advances in mechanical engineering, 2018, 10(8): 1-11.

[16] VANGI D, ERMINI M. Plasticty effects in residual stress measurement by the hole drilling method[J]. Strain, 2002, 36(2): 55-59.

[17] 游敏，郑小玲，王福德，等. 盲孔法测定焊接残余应力适宜测试时间研究[J]. 武汉水利电力大学(宜昌)学报, 1999(1): 57-60.
YOU Min, ZHENG Xiao-ling, WANG Fu-de, et al. On suitable testing time of blind-hole technique for measuring residual stress[J]. Journal of China Three Gorges University (natural sciences), 1999(1): 57-60.

[18] 陈惠南. 盲孔法测量残余应力 A、B 系数计算公式讨论[J]. 机械强度, 1989(2): 31-36.
CHEN Hui-nan. A discussion of calculation of coefficients A and B by blind-hole-drilling method[J]. Journal of mechanical strength, 1989(2): 31-36.

[19] 来佑彬，刘伟军，孔源，等. 激光快速成形 TA15 残余应力影响因素的研究[J]. 稀有金属材料与工程，2013, 42(7): 1526-1530.
LAI You-bin, LIU Wei-jun, KONG Yuan, et al. Influencing factors of residual stress of Ti-6.5Al-1Mo-1V-2Zr alloy by laser rapid forming process[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(7): 1526-1530.

[20] 李云雁，胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京：化学工业出版社, 2013.
LI Yun-yan, HU Chuan-rong. Experiment design and data processing[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.

[21] 龚丞，王丽芳，朱刚贤，等. 激光增材制造316L不锈钢熔覆层残余应力的数值模拟研究[J]. 应用激光，2018, 38(3): 402-408.
GONG Cheng, WANG Li-fang, ZHU Gang-xian, et al. Numerical simulation of residual stress in 316L stainless steel cladding layer by laser additive manufacturing[J]. Applied laser, 2018, 38(3): 402-408.