

工艺参数对 316L 不锈钢激光熔覆层中 Cr 元素分布的影响

徐瀚宗^{1,2,3}, 葛鸿浩^{1,2,3*}, 王杰锋^{1,2,3}, 张群莉^{1,2,3}, 姚建华^{1,2,3}, Volodymyr S. Kovalenko^{1,4}

¹浙江工业大学激光先进制造研究院, 浙江 杭州 310023;

²浙江省高端激光制造装备协同创新中心, 浙江 杭州 310023;

³浙江工业大学机械工程学院, 浙江 杭州 310023;

⁴乌克兰国立科技大学激光技术研究所, 乌克兰 基辅 03056

摘要 采用基于体积平均法的气-固-液三相激光熔覆模型, 探究了工艺参数对 45 钢表面激光熔覆 316L 不锈钢熔覆层中 Cr 元素分布及其均匀性的影响。首先, 使用 Cr 元素的平均浓度来表征熔覆层中元素的分布情况, 并对熔覆过程中 Cr 元素分布的演变进行分析; 然后, 将 Cr 元素在 y 方向分布的计算结果与实验结果进行对比, 验证了模型的可靠性; 之后通过设定的正交工艺参数进行模拟, 探究工艺参数与熔覆层中 Cr 元素平均含量之间的关系; 最后, 根据模拟结果对熔池的流动行为进行分析, 探究工艺参数与熔覆层中 Cr 元素在 x 方向分布均匀性之间的关系。研究表明: 对熔覆层中 Cr 元素含量影响最大的工艺参数是送粉率, 然后依次为激光功率和扫描速度, 送粉率与 Cr 元素含量呈正相关, 激光功率与 Cr 元素含量呈负相关。熔池凝固速率与流速对熔覆层中 Cr 元素分布的均匀性有较大影响, 可通过适当增大激光功率和降低扫描速度来获得元素分布更为均匀的熔覆层。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 数值模拟; 三相模型; 工艺参数; 元素分布; 均匀性

中图分类号 TG174.4; TG111.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1202004

Effects of Process Parameters upon Chromium Element Distribution in Laser-Cladded 316L Stainless Steel

Xu Hanzong^{1,2,3}, Ge Honghao^{1,2,3*}, Wang Jiefeng^{1,2,3}, Zhang Qunli^{1,2,3}, Yao Jianhua^{1,2,3}, Volodymyr S. Kovalenko^{1,4}

¹Institute of Laser Advanced Manufacturing, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

²Zhejiang Provincial Collaboration Innovation Center of High-End Laser Manufacturing Equipment, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

³School of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

⁴Laser Technology Research Institute, National Technical University of Ukraine, Kiev 03056, Ukraine

Abstract The gas-solid-liquid three-phase model based on the volume-average method was used to study the influence of process parameters upon the chromium element distribution and its uniformity in laser-cladded 316L stainless steel on 45 steel. First, the chromium elemental distribution in cladding layer was characterized by average concentration of chromium element and the evolution of chromium element distribution during the cladding process was analyzed; secondly, the simulated and experimental Cr distributions along y direction were compared to verify the model's reliability. Then, a simulation was performed by set the orthogonal-process parameters to obtain the relationship between the process parameters and the distribution of chromium element in the cladding layer. Finally, according to the simulation results, the flow behavior of the molten pool was analyzed to obtain the relationship between the process parameters and the uniformity of chromium element in the cladding layer along the x direction.

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-07-02; 录用日期: 2020-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0407300)、国家自然科学基金(51804274)、浙江省省属高校基本科研业务费项目(科技类)(RF-C2019003)

* E-mail: gehh@zjut.edu.cn

The result shows that the powder-feeding rate has the greatest influence on chromium content in the cladding layer, followed by laser power and scanning speed in sequence. The powder-feeding rate is positively related to the average concentration of Cr, whereas the laser power is negatively related to this concentration. The solidification and flow rates of the molten pool have an important impact upon the uniformity of the chromium element distribution in the cladding layer. A cladding layer with a more uniform elemental distribution can be obtained by appropriately increasing the laser power and reducing the scanning speed.

Key words laser technique; laser cladding; numerical simulation; three-phase model; process parameters; element distribution; uniformity

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光熔覆就是用激光辐照金属粉末,使其与基体材料共同形成熔池,随着熔池的移动,熔融的金属粉末快速凝固,与基体材料形成冶金结合,从而达到表面修复以及提高材料表面性能的目的。该工艺具有热影响区小、热变形小、修复层与基体结合性能良好、修复层组织细小、工艺过程易于实现自动化等优点^[1-3]。激光熔覆后所得到的熔覆层凝固组织受激光功率、扫描速度、送粉率、元素分布等诸多因素的影响,其中,金属粉末中的元素在熔覆层中的重新分布是决定熔覆层性能的一个主要因素^[4-8]。Barr等^[9]采用不同的工艺参数对超高强度钢进行了修复,修复后发现,熔池内熔体混合不充分导致的成分富集,即宏观偏析,会使超高强度钢熔覆层发生凝固开裂现象。Liu等^[10-11]采用激光熔覆技术在不同的激光功率和扫描速度下制备了AerMet钢涂层,但由于熔池对流不充分,涂层中发生了合金元素富集现象,导致涂层的耐蚀性降低。可见,全面了解激光熔覆过程中工艺参数对熔覆层成分分布的影响,对于预测和控制熔覆层的微观结构、力学性能和缺陷是至关重要的。此外,由于熔池的寿命极短,而且激光熔覆过程比较复杂,因此很难通过实验观察熔覆层成分分布的演变过程。

相比之下,采用数值模拟对激光熔覆过程中熔池的演化和成分分布进行研究,可以大大降低实验费用以及时间成本^[12]。到目前为止,很少有人针对熔池凝固后的成分分布进行预测。鉴于此,本文通过建立基于体积平均法的气-固-液三相模型,对激光熔覆316L不锈钢过程中Cr元素分布的演变进行分析,并探究工艺参数对Cr元素分布的影响,为实验提供支撑。

2 激光熔覆模型

2.1 数学模型

激光熔覆过程可以看作是一个由局部热输入引

起的连续的固-液-固转化过程^[13]。本文采用基于体积平均法的气-固-液三相模型来研究激光熔覆过程中的元素分布^[14-16]。

质量守恒^[14-16]方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_l \rho_l) + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{u}_l) = -M_{ls} + \dot{M}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s) = M_{ls}, \quad (2)$$

式中:下标 l、s 分别代表液相和固相; f 为体积分数; ρ 为密度; \mathbf{u} 为速度; M_{ls} 为固相和液相之间的质量交换速率; \dot{M} 为质量源项,即送粉率; t 为时间。质量交换只存在于固液两相之间。

动量守恒方程^[14-16]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_l \rho_l \mathbf{u}_l) + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{u}_l \otimes \mathbf{u}_l) = -f_l \nabla \mathbf{P} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_l + f_l \rho_l \mathbf{g}_l - \mathbf{U}_{ls} - \mathbf{U}_{la}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_a \rho_a \mathbf{u}_a) + \nabla \cdot (f_a \rho_a \mathbf{u}_a \otimes \mathbf{u}_a) = -f_a \nabla \mathbf{P} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_a + f_a \rho_a \mathbf{g}_a + \mathbf{U}_{la} + \mathbf{U}_{sa}, \quad (4)$$

式中:下标 a 代表气相; \mathbf{P} 为压力; $\bar{\boldsymbol{\tau}}_l$ 、 $\bar{\boldsymbol{\tau}}_a$ 为压力张量; \mathbf{U}_{ls} 、 \mathbf{U}_{la} 、 \mathbf{U}_{sa} 为两相间的动量交换量。 \mathbf{U}_{ls} 表示液相流经固相时因受到固相的阻力而减少的动量,可采用 Blake-Kozeny 方法计算得到。

溶质守恒方程^[14-16]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_l \rho_l c_l) + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{u}_l c_l) = -C_{ls} + \dot{C}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s c_s) = C_{ls}, \quad (6)$$

式中: c_l 、 c_s 分别代表液相和固相中的溶质浓度(质量分数,下同); C_{ls} 为固相和液相之间的溶质交换速率; \dot{C} 为溶质源项,由质量源项产生。溶质交换只存在于固液两相之间。

能量守恒方程^[14-16]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_l \rho_l h_l) + \nabla \cdot (f_l \rho_l \mathbf{u}_l h_l) = \nabla \cdot (f_l k_l \nabla T_l) - Q_{ls} - Q_{la} + \dot{Q}_l, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_s \rho_s h_s) = \nabla \cdot (f_s k_s \nabla T_s) + Q_{ls} - Q_{sa} + \dot{Q}_s, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_a \rho_a h_a) + \nabla \cdot (f_a \rho_a \mathbf{u}_a h_a) = \nabla \cdot (f_a k_a \nabla T_a) + Q_{la} + Q_{sa}, \quad (9)$$

式中： h_l 、 h_s 、 h_a 分别代表液相、固相和气相的焓； k_l 、 k_s 、 k_a 分别代表液相、固相和气相的热导率； T_l 、 T_s 、 T_a 分别代表液相、固相和气相的温度； Q_{ls} 、 Q_{la} 、 Q_{sa} 表示由热传导产生的两相间的能量交换； \dot{Q}_l 、 \dot{Q}_s 分别表示液相和固相因相变潜热而产生的能量源项。

本文采用高斯热源模型，光斑内任意一点的热流密度可表示为

$$q = \frac{2P}{\pi r^2} \cdot \exp\left(-\frac{2R^2}{r^2}\right), \quad (10)$$

式中： q 代表热流密度； P 代表激光功率； r 代表光斑半径； R 代表光斑内任意一点到光斑中心的距离。

为简化模型，特作如下假设：1)该模型只考虑液

相、固相、气相三种相，其体积分数之和为 1；2)液相和气相为流动相，固相为静止相；3)质量源的初始状态为液相；4)气相与其他两相间只存在动量和热量交换，不存在质量和溶质交换；5)激光热源呈高斯分布，且作用于熔池表面；6)只考虑激光热输入以及熔池和母材中的热传导，忽略对流换热和辐射换热；7)熔池内的液相为不可压缩的牛顿流体，其流动方式为层流。

2.2 物理模型

基体采用尺寸为 30 mm×9 mm 的二维网格模型；根据不同工艺参数所得到的熔覆层的最大高度，熔覆层选用尺寸为 30 mm×1.5 mm 的二维网格模型。为了减少计算量，熔覆层网格采用均匀网格，基体网格采用自上而下由密到疏的非均匀网格。激光熔覆边界条件如图 1 所示(H 表示传热系数， T_w 表示边界固定温度)，熔覆层边界类型设为压力入口，基体边界类型设为固壁，其固定温度为 300 K，传热系数为 10 W·m⁻²·K⁻¹。

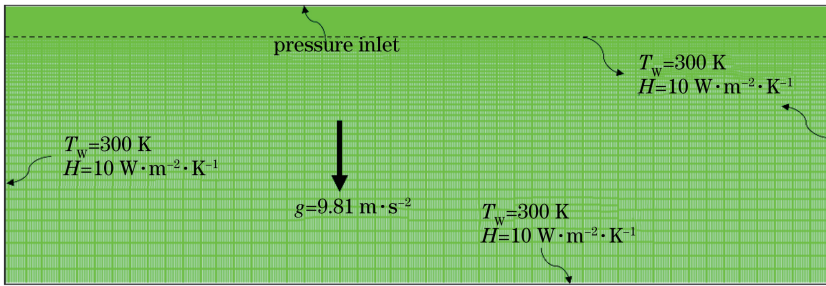


图 1 激光熔覆边界条件和网格

Fig. 1 Boundary condition and grid of laser cladding

为实现对激光熔覆过程的模拟，将整个计算域分为空气域、激光束域、粉末沉积域、基体域和能量吸收域五部分。如图 2 所示，激光束域在基体域上方，并沿着扫描方向移动。随着熔池的形成，凝固，再形成，熔覆层逐渐堆积增长，能量吸收域和粉末沉积域的位置随之发生变化。高斯热源施加在能量吸收域上，能量在固相和液相中的分配比例由固、液体积分数决定。随着时间推移，温度逐渐升高并达到最高点，基体通过其内部的热传导以及与空气的对流换热进行传热。具体的计算域演变模型如图 2 所示。

2.3 材料参数

基体材料选用 45 钢，基体尺寸为 100 mm×50 mm×10 mm。将基体表面打磨平整，并去除氧化层。熔覆材料选用 316L 不锈钢金属粉末。45 钢

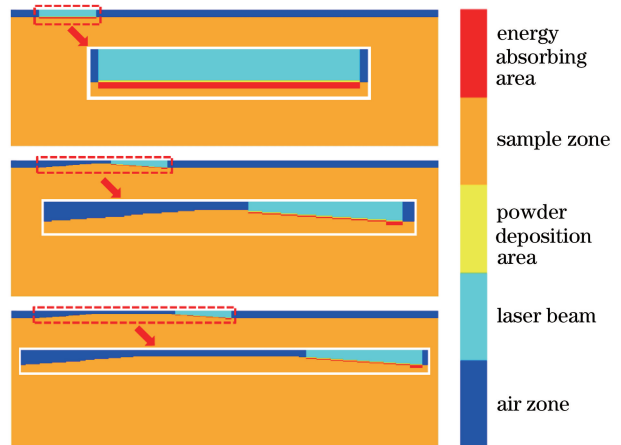


图 2 计算域演变模型

Fig. 2 Computational domain evolution model

和 316L 不锈钢的化学成分如表 1 所示。计算用到的物性参数如表 2 所示。

表 1 45 钢和 316L 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 45 steel and 316L stainless steel

Material	Mass fraction of element /%						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe
45 steel	0.45	0.2	0.6	—	—	—	Bal.
316L stainless steel	0.02	0.55	1.55	16.0	10.0	2.08	Bal.

表 2 计算中用到的物性参数

Table 2 Material property parameters used in calculation

Parameter	Content
Initial mass fraction of chromium $c_0/\%$	16.0
Melting point T_f/K	1815.15
Density $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	8000
Specific heat $c_p/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	500
Thermal conductivity of liquid $k_l/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	209.2
Thermal conductivity of solid $k_s/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	19.2
Latent heat $\Delta h_f/(J \cdot kg^{-1})$	250000
Viscosity $\mu_1/(Pa \cdot s)$	0.0042
Liquidus slope $m/(K \cdot \%^{-1})$	-80.45

表 4 正交模拟结果

Table 4 Orthogonal simulation results

No.	P/W	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$R/(g \cdot min^{-1})$	$c_{ave}/\%$
1	1200	4	6.8	5.65
2	1200	6	10.0	6.99
3	1200	8	13.9	9.29
4	1200	10	17.5	10.31
5	1300	4	10.0	8.41
6	1300	6	6.8	5.59
7	1300	8	17.5	11.30
8	1300	10	13.9	8.25
9	1400	4	13.9	9.33
10	1400	6	17.5	10.74
11	1400	8	6.8	3.93
12	1400	10	10.0	7.33
13	1500	4	17.5	7.07
14	1500	6	13.9	8.80
15	1500	8	10.0	5.25
16	1500	10	6.8	4.00

2.4 研究方案

为研究工艺参数对熔覆层中 Cr 元素分布的影响,结合前期实验,以合适的激光功率 P 、扫描速度 v 及送粉率 R 作为自变量,以熔覆层中 Cr 元素质量分数的平均值 c_{ave} 作为因变量,设计三因素四水平正交模拟实验。具体正交实验方案如表 3 和表 4 所示。

表 3 因素水平设计表

Table 3 Factor level design table

Level	Factor		
	P/W	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$R/(g \cdot min^{-1})$
1	1200	4	6.8
2	1300	6	10.0
3	1400	8	13.9
4	1500	10	17.5

3 模拟结果与实验验证

3.1 温度场研究

使用上述三相模型,选择第 16 组参数(即激光功率 $P=1500 W$,扫描速度 $v=10 mm \cdot s^{-1}$,送粉率 $R=6.8 g \cdot min^{-1}$),研究激光熔覆过程中温度场的演化。

图 3 为激光扫描过程中不同时刻的温度场分布云图。由图可知,温度场分布呈勺状,光斑中心已扫描过的区域等温线较为稀疏,温度梯度小,光斑中心未扫描到的区域等温线较为密集,温度梯度较大^[17]。这是因为热量在光斑已扫描的区域无法及

时传导,存在热累积,而光斑未扫描到的区域没有直接吸收激光能量。此外,温度高于熔点的区域逐渐扩大,经过一段时间后趋于稳定,此现象说明熔池的大小存在一个增长的过程,然后趋于稳定。光斑中心的温度存在一个急剧增长—缓慢增长—平衡的过程,在 0.1 s 之前,光斑中心温度从 300 K 急剧升高至 1845 K,在 0.1 s 之后,光斑中心温度由 1845 K 缓慢增长至 1975 K。这是由于激光热输入与热传导损失的热量达到平衡存在一个过程,0.1 s 之前,激光热输入远大于热传导损失的热量,故温度上升较快,而 0.1 s 以后,激光热输入与热传导损失的热量趋于平衡,故温度上升得较为缓慢^[18-20]。

3.2 流场分析

图 4 为激光熔覆过程中不同时刻固相体积分云图以及速度矢量图。由图可知,熔池逐渐变大,且固相体积分介于 0 和 1 之间的区域(糊状区)逐渐变大。这是由于随着时间的推移,熔池尾部的热累积变大,温度梯度变小,温度处在熔点附近的区域变大。此外,液相区域存在前后两个大小不等且方向相反的涡流。这主要是由于熔池边缘温度较低,中心温度较高,形成了较大的温度差,从而在熔池表面

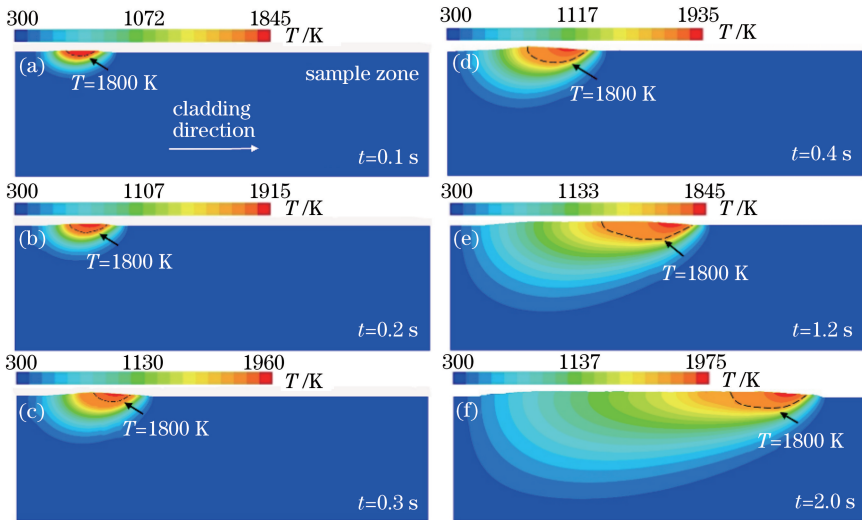


图 3 不同时刻的温度场云图。(a) $t=0.1$ s;(b) $t=0.2$ s;(c) $t=0.3$ s;(d) $t=0.4$ s;(e) $t=1.2$ s;(f) $t=2.0$ s
Fig. 3 Temperature distribution cloud diagram at different time. (a) $t=0.1$ s; (b) $t=0.2$ s;
(c) $t=0.3$ s; (d) $t=0.4$ s; (e) $t=1.2$ s; (f) $t=2.0$ s

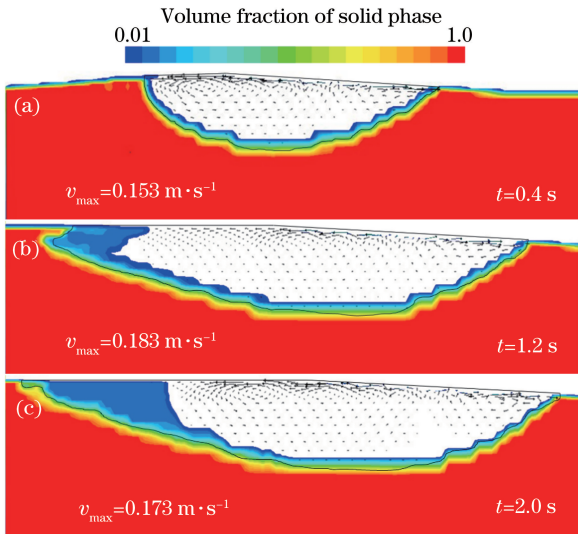


图 4 不同时刻固相的体积分数及流场。
(a) $t=0.4$ s;(b) $t=1.2$ s;(c) $t=2.0$ s

Fig. 4 Volume fraction of solid phase and flow field at different time. (a) $t=0.4$ s; (b) $t=1.2$ s; (c) $t=2.0$ s

形成张力梯度,最后形成了 Marangoni 对流。熔池表面的流速较大,三个不同时刻(0.4,1.2,2.0 s)熔池内的最大流速分别为 0.153,0.183,0.173 m/s。这主要是由于熔池中心温度最高,产生了使液体从熔池中心向熔池边缘流动的动力^[21]。

3.3 元素分布

由于 316L 不锈钢粉末中富含 Cr 元素,而 45 钢中不含 Cr 元素,故本文采用 Cr 元素的成分分布来表征熔覆层的元素分布。Cr 元素在单个网格内的混合浓度(质量分数)的计算公式为

$$c_{\text{mix}} = \frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot f_1 + c_s \cdot \rho_s \cdot f_s}{c_1 \cdot \rho_1 + c_s \cdot \rho_s} \quad (11)$$

图 5 为激光熔覆过程中不同时刻 Cr 元素的成分分布云图。由图可知,Cr 元素在熔覆层中的分布不均匀,即存在宏观偏析。在激光熔覆起始区域,由于熔池还未完全成形,Cr 元素的浓度较大。随着时间的推移,熔池逐渐稳定,Cr 元素的浓度总体逐渐下降。但是根据上述分析,熔池尾部产生的糊状区会阻碍熔池的流动,导致 Cr 元素分布不均匀,部分区域的 Cr 元素浓度高于周围区域。熔池所在区域的 Cr 元素只存在于熔覆层的上半部分,这是由于将质量源项添加到熔池表面后,Cr 元素会通过熔池内的流动布满整个熔覆层,而 Cr 元素从熔池表面运动到熔池底部需要经历一个过程。

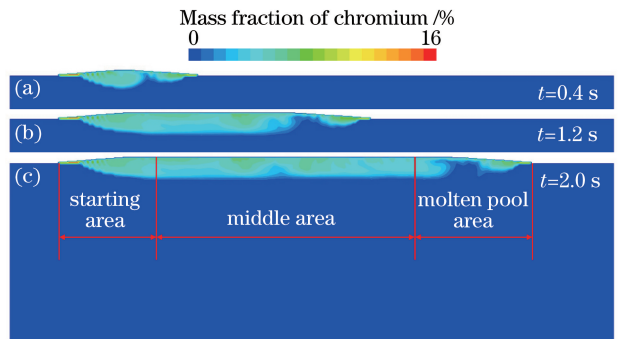


图 5 不同时刻的 Cr 元素浓度分布。
(a) $t=0.4$ s;(b) $t=1.2$ s;(c) $t=2.0$ s

Fig. 5 Chromium concentration distribution at different time. (a) $t=0.4$ s; (b) $t=1.2$ s; (c) $t=2.0$ s

3.4 实验验证

实验所用基材为 45 钢,熔覆材料选用 316L 不锈钢粉末。使用线切割加工得到沿激光扫描方向且靠近起始位置的纵截面试样,然后对其进行镶嵌、研磨、抛光、腐蚀和干燥处理,之后采用 ZEISS 光学显微镜对试样进行观察,结果如图 6(b)所示。采用

BRUKERX Flash 6130 能谱仪(EDS)分别沿 x 方向和 y 方向取点并对熔覆层进行成分分析,分析结果如图 6(a)和图 6(c)所示。将实验得到的 Cr 元素浓度与模拟结果进行对比,对比结果如图 7 和图 8 所示,可见,实验结果与模拟结果的一致性较高,验证了此模型的可靠性。

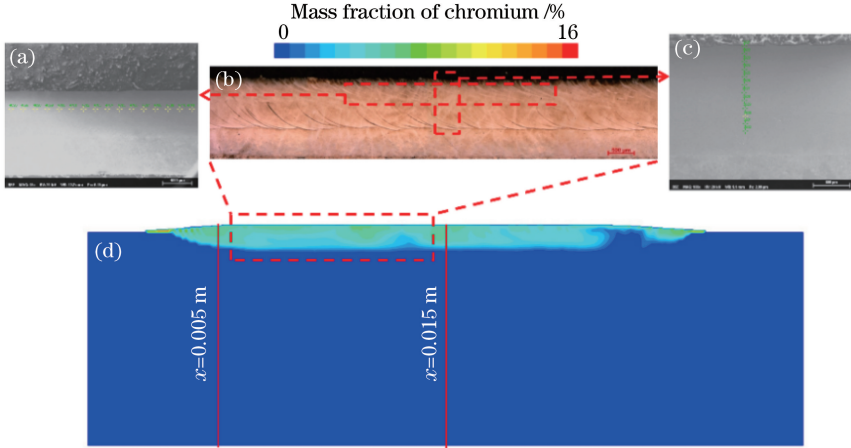


图 6 实验与模拟对比图。(a) x 方向取点位置的局部放大图;(b)试样的金相图;
(c) y 方向取点位置的局部放大图;(d) Cr 元素分布模拟图

Fig. 6 Comparison between experiment and simulation. (a) Magnified image of area containing selected points in x direction; (b) metallographic image of cladding layer; (c) magnified image of area containing selected points in y direction; (d) simulation of chromium element distribution

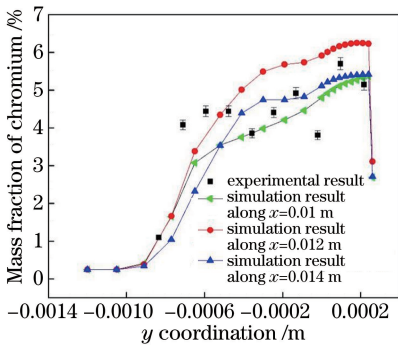


图 7 实验得到的 y 方向上浓度曲线与模拟结果的对比图
Fig. 7 Comparison between experimental and simulation concentration in y direction

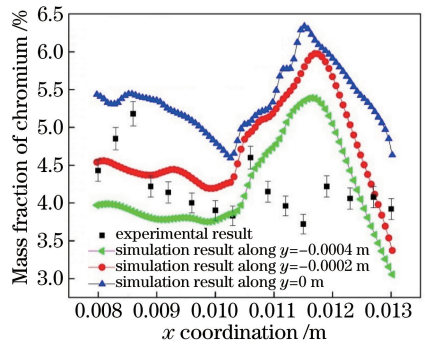


图 8 实验得到的 x 方向上的浓度曲线与模拟结果对比图
Fig. 8 Comparison between experimental and simulation concentration in x direction

4 正交模拟结果与讨论

4.1 工艺参数对浓度的影响

为探究激光工艺参数与熔覆层中元素分布之间的规律,使用 Cr 元素浓度(质量分数,下同)来表征熔覆层中的元素分布规律。熔覆层中 Cr 元素质量分数的平均值 c_{ave} 的计算公式为

$$c_{ave} = \frac{\sum c_{mix}^i \cdot V_i}{\sum V_i}, \quad (12)$$

式中: V_i 表示单个网格的体积。

采用表 4 中的正交模拟数据对各因素进行极差分析,分析结果如表 5 所示^[22]。由极差分析可得,在各工艺参数等幅变化的情况下,对激光熔覆层中 Cr 元素平均浓度影响由大到小的参数依次是送粉率、激光功率、扫描速度。

采用正交实验的分析方法对每一组模拟数据进行分析。对熔覆层中 Cr 元素平均浓度对应的同一工艺参数在不同水平变量下的模拟结果取平均值,结果图 9 所示。由图 9 可知,熔覆层中 Cr 元素的平均浓度与送粉率呈正相关,与激光功率大致呈负相

表 5 极差分析表
Table 5 Range analysis

Level	Factor		
	P/W	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$R/(g \cdot min^{-1})$
k_1	8.06	7.62	4.79
k_2	8.39	8.03	7.00
k_3	7.8	7.44	8.92
k_4	6.3	7.47	9.86
R	2.11	0.59	5.06

关,扫描速度对激光熔覆层中 Cr 元素平均浓度的影响较小。分析其原因:送粉率的大小决定了单位时间内进入熔池的粉末的多少,送粉率的增大使得单位时间进入熔池的粉末变多,熔覆层中 Cr 元素的平均浓度增大;激光功率增大使得基体表面的能量密度变大,基体吸收更多的能量,产生更大的熔池,在相同的送粉量下,熔覆层中 Cr 元素的平均浓度下降;扫描速度通过影响同一位置处的激光的作用时间以及送粉量来改变基体吸收能量的多少和送粉量的大小,扫描速度增大(减小),基体吸收的能量和送粉量也随之增大(减小),故扫描速度与熔覆层浓度无明显的正、负相关关系。

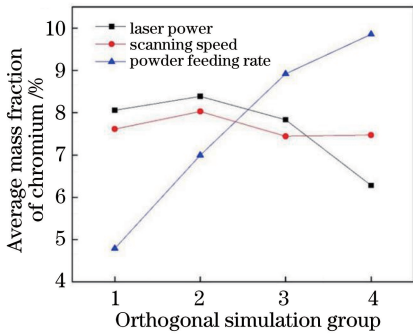


图 9 激光熔覆层中 Cr 元素平均浓度的正交模拟结果图
Fig. 9 Orthogonal simulation results of average concentration of chromium in laser cladding layer

4.2 Cr 元素分布的均匀性研究

激光熔覆过程中熔池的对流对成分均匀化具有促进作用。激光熔覆属于快速凝固过程,当熔池混合不充分时,易引起熔覆层元素分布不均匀,导致熔覆层的性能较差^[23-25]。将第二组参数(即激光功率 $P=1200\text{ W}$,扫描速度 $v=6\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,送粉率 $R=6.99\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$)作为模拟参数进行模拟,图 10 为此参数下熔覆层中 Cr 元素的分布云图,在熔覆层中 $y=0.0092\text{ m}$ 的水平线段处(起始位置为 $x=0.008\text{ m}$,终止位置为 $x=0.022\text{ m}$),绘制 Cr 元素成分分布图,如图 11 所示。由图 11 可知,Cr 元素分布的不均匀性较为明显,成分波动也较为频繁,

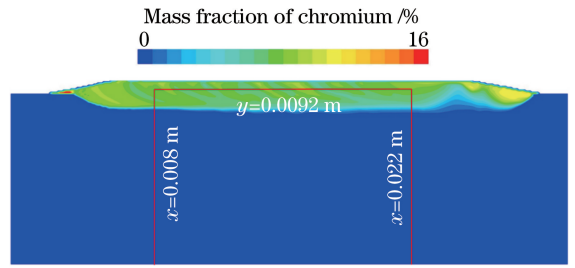


图 10 Cr 元素分布云图

Fig. 10 Chromium element distribution cloud diagram

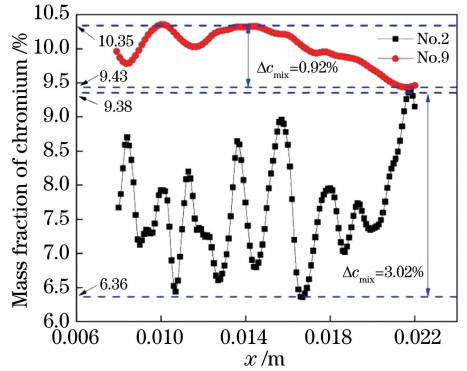


图 11 不同工艺参数下 Cr 元素均匀性的对比

Fig. 11 Comparison of chromium element uniformity at different process parameters

Cr 元素的质量分数最高可达 9.38%,最低可至 6.36%,最大差值 Δc_{mix} 可达 3.02%。

为探究导致熔覆层中 Cr 元素分布不均匀性的原因,选取 $t=1.2\text{ s}$ 时形成的熔池进行详细分析,绘制此刻熔池的温度分布云图、固相体积分云图、Cr 元素分布云图和流场图,如图 12 所示。图 12(a)为熔池的温度分布云图,由图可知:沿激光扫描方向的温度梯度较为密集,此时熔池内的流动较为剧烈;相反,沿激光扫描反方向的温度梯度较为稀疏,说明熔池流动较为平缓。这是因为熔池流动的主要驱动力是由温度梯度产生的表面张力,表面张力越大,流速越快,表面张力越小,流速越小。图 12(b)为固相体积分云图,由图可知,在熔池左侧存在固相体积分介于 0 和 1 之间的区域,即糊状区;此区域的 Cr 元素分布云图如图 12(c)所示,可见存在明显的 Cr 元素富集现象。这是因为熔池尾部存在热量累积,温度梯度较小,形成了一部分糊状区,导致液相的流动受到较大阻力,较多的 Cr 元素滞留在糊状区。图 13 为此时的熔池流动示意图,由图可知,熔池内产生了两个相反方向的涡流,即 Marangoni 对流。分析其原因:熔池中心温度最高,边缘温度较低,熔池从高温向低温流动,即熔体从熔池中心向熔池边缘流动;当熔池边缘的熔

体沿熔池固液界面向下流动时会在熔池中间区域的底部汇合后继续向上流动,形成两个涡流。另外,溶质浓度差的作用也会使熔池从中间向边缘流动。粉末添加在熔池表面,熔池表面的溶质浓度较大,产生的浓度差使熔体从熔池表面中心向边缘流动,溶质浓度差对熔池流动的影响较小。

两个涡流在熔覆层中的位置存在一个高度差,左侧涡流在较高位置,右侧涡流在较低位置,而参考图 10 和图 12(c)可知,Cr 元素富集区域大多存在于熔覆层的较高位置处,故可知熔池的流动对 Cr 元素分布的均匀性极为重要,流速越快,Cr 元素分布得越均匀。

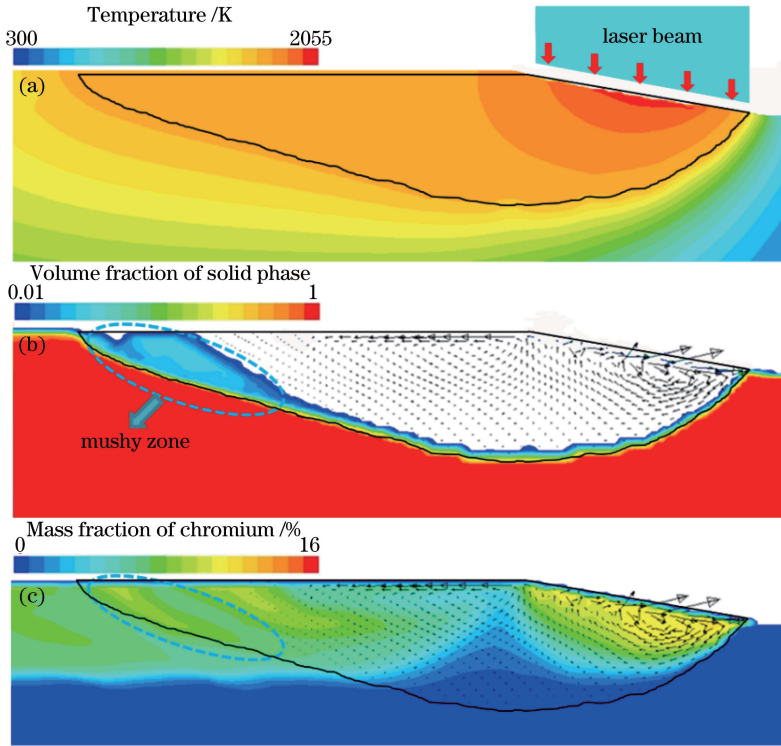


图 12 1.2 s 时的模拟结果。(a)温度场;(b)固相体积分数和流场;(c) Cr 元素分布和流场

Fig. 12 Simulation results at 1.2 s. (a) Temperature field; (b) volume fraction of solid phase and flow field; (c) chromium element distribution and flow field

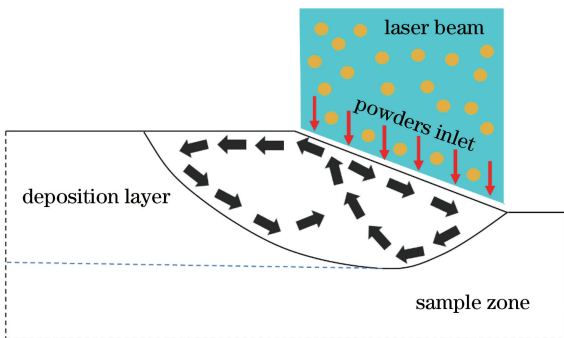


图 13 1.2 s 时的熔池流动示意图

Fig. 13 Flow diagram of molten pool at 1.2 s

为验证上述分析的合理性,通过调整工艺参数(即适当增大激光功率和降低扫描速率)来降低凝固速率,增大流速,然后绘制了激光功率 $P=1400\text{ W}$,扫描速度 $v=4\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,送粉率 $R=13.9\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 时熔覆层中沿 x 方向的 Cr 元素分布图,如图 11 所示。对比后可知,随着熔池逐渐稳定,熔覆层中 Cr

元素的质量分数最高为 10.35%,最低为 9.43%,最大差值 Δc_{mix} 为 0.92%,这一结果与第二组参数下的结果相比,波动范围下降了 2.1 个百分点,说明 Cr 元素分布趋于均匀。

5 结 论

本文建立了基于体积平均法的气-固-液三相激光熔覆模型,并基于该模型对 45 钢表面激光熔覆 316L 不锈钢涂层中 Cr 元素的分布进行了模拟,获得了激光熔覆过程 Cr 元素的分布。模拟所得的 Cr 元素浓度分布曲线与实验结果的一致性较高,验证了该模型的可靠性。

通过极差分析得到了各工艺参数等幅变化下对熔覆层 Cr 元素平均浓度影响由大到小的参数是送粉率、激光功率、扫描速度,且送粉率与 Cr 元素的平均浓度成正相关,激光功率与 Cr 元素的平均浓度成

负相关。当激光功率为 1200 W, 扫描速度为 $6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 送粉率为 $10.0 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 熔覆层中 Cr 元素的质量分数沿 x 方向的最大差值为 3.02%; 当激光功率为 1400 W, 扫描速度为 $4 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, 送粉率为 $13.9 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 熔覆层中 Cr 元素的质量分数沿 x 方向的最大差值为 0.92%。通过分析发现, 熔覆层中 Cr 元素沿 x 方向分布的均匀性与凝固速率、熔池流速有关, 凝固速率越慢, 熔池的流速越快, Cr 元素的分布越均匀。本研究可为制备均匀的熔覆层提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] Yuan Q L, Feng X D, Cao J J, et al. Research progress in laser cladding technology[J]. *Materials Review*, 2010, 24(3): 112-116.
袁庆龙, 冯旭东, 曹晶晶, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. *材料导报*, 2010, 24(3): 112-116.
- [2] Yao J H. Laser surface modification technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
姚建华. 激光表面改性技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [3] Song J L, Li Y T, Deng Q L, et al. Research progress of laser cladding forming technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 29-39.
宋建丽, 李永堂, 邓琦林, 等. 激光熔覆成形技术的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(14): 29-39.
- [4] He S S, Yu Z S, Zhang P L, et al. Effect of sub-micron $\text{TiC}/\text{B}_4\text{C}$ particle on microstructures and properties of laser clad Stellite coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0302010.
何珊珊, 于治水, 张培磊, 等. 亚微米 $\text{TiC}/\text{B}_4\text{C}$ 颗粒对激光熔覆 Stellite 涂层组织及性能影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0302010.
- [5] Chen J, Zhang F Y, Tan H, et al. Alloying mechanics in moving melt pool during laser solid forming from blended elemental powders[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(8): 2154-2159.
陈静, 张凤英, 谭华, 等. 激光多层熔覆沉积预混合 Ti-xAl-yV 合金粉末在熔池中的熔化与偏析行为[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 2154-2159.
- [6] Sun M, Wu G L, Wang Y, et al. Ceramic coating prepared by laser cladding and composite micro-arc oxidation on 316L surface [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(2): 24-32.
孙敏, 吴国龙, 王晔, 等. 316L 表面激光熔覆复合微弧氧化制备陶瓷涂层[J]. *表面技术*, 2019, 48(2): 24-32.
- [7] Yang J X, Chang W Q, Miao X H, et al. Influence of Mn, Mo, Ti additions on microstructure and magnetic properties of WC-FeNiCr composite coatings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1006001.
杨胶溪, 常万庆, 缪宣和, 等. 添加 Mn、Mo、Ti 合金元素对激光熔覆 WC-FeNiCr 复合涂层组织及磁性能的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1006001.
- [8] Ji X, Sun Z G, Chang L L, et al. Microstructure evolution behavior in laser melting deposition of Ti6Al4V/Inconel625 gradient high-temperature resistant coating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1102008.
季霄, 孙中刚, 唱丽丽, 等. 激光熔化沉积 Ti6Al4V/Inconel625 梯度耐高温涂层组织演变为研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1102008.
- [9] Barr C, da Sun S, Easton M, et al. Influence of macrosegregation on solidification cracking in laser clad ultra-high strength steels [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 340: 126-136.
- [10] Liu J, Li J, Cheng X, et al. Effect of dilution and macrosegregation on corrosion resistance of laser clad AerMet100 steel coating on 300M steel substrate[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325: 352-359.
- [11] Liu J, Li J, Cheng X, et al. Microstructures and tensile properties of laser clad AerMet100 steel coating on 300M steel [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(4): 643-652.
- [12] Wu X Y, Xu J X, Gao X S, et al. Numerical simulation of thermal process and fluid flow field in laser-MIG hybrid weld pools[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0902003.
吴向阳, 徐剑侠, 高学松, 等. 激光-MIG 复合焊接热过程与熔池流场的数值分析[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0902003.
- [13] Aucott L, Dong H, Mirihanage W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 5414.
- [14] Ge H H, Ren F L, Li J, et al. Four-phase dendritic model for the prediction of macrosegregation, shrinkage cavity, and porosity in a 55-ton ingot[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(3): 1139-1150.
- [15] Li J, Wu M, Hao J, et al. Simulation of channel segregation using a two-phase columnar solidification model-Part I: model description and verification[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 55: 407-418.
- [16] Wu M, Fjeld A, Ludwig A. Modelling mixed

- columnar-equiaxed solidification with melt convection and grain sedimentation-Part I: model description [J]. *Computational Materials Science*, 2010, 50(1): 32-42.
- [17] Chen Z, Li X F, Zuo D W, et al. Effects of process parameters on temperature field of Al/Ti coating by laser cladding on 7050 aluminum alloy based on numerical simulation[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2015, 33(1): 86-92, 116.
陈竹, 黎向锋, 左敦稳, 等. 激光工艺参数对 7050 铝合金 Al/Ti 熔覆温度场影响规律的模拟[J]. *材料科学与工程学报*, 2015, 33(1): 86-92, 116.
- [18] Lei J B, Yang X C, Chen J, et al. Measurement of surface temperature field distribution in molten pool of laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1605-1608.
雷剑波, 杨洗陈, 陈娟, 等. 激光熔覆熔池表面温度场分布的检测[J]. *中国激光*, 2008, 35(10): 1605-1608.
- [19] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091401.
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 091401.
- [20] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, et al. Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051404.
任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051404.
- [21] Wang Y F, Sun X, Song Z J, et al. Interface microstructures of broad-band laser cladding amorphous alloy coating [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(3): 61-65.
王彦芳, 孙旭, 宋增金, 等. 宽带激光熔覆非晶合金涂层界面组织结构[J]. *表面技术*, 2018, 47(3): 61-65.
- [22] Xing B, Chang B H, Du D. Effects of process parameters on morphology of laser deposited layer on IC10 directionally solidified superalloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2015, 36(7): 88-92.
邢彬, 常保华, 都东. 工艺参数对 IC10 高温合金激光熔覆层形貌的影响[J]. *焊接学报*, 2015, 36(7): 88-92.
- [23] Liu F C, Ren H, Wang X G, et al. Dendritic segregation of Nb modified GH4169 superalloy fabricated by laser additive manufacturing [J]. *Surface Technology*, 2019, 48(5): 123-131.
刘奋成, 任航, 王晓光, 等. 激光增材制造高 Nb 含量 GH4169 合金微观偏析行为研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(5): 123-131.
- [24] Fatoba O S, Akinlabi E T, Akinlabi S A, et al. Characterization of laser additive manufactured Al-Si coating on titanium alloy [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 4675-4682.
- [25] Yang X C, Zheng T X, Zhang N K, et al. Study on the convective mass transfer in laser cladding of FeCrSiB alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1992 (2): 86-90.
杨洗陈, 郑天禧, 张乃坤, 等. FeCrSiB 合金激光熔覆中对流传质研究[J]. *金属学报*, 1992(2): 86-90.