

# Cr12钢激光表面熔凝后的性能研究

史华亮<sup>1,2</sup> 李继强<sup>1</sup> 贾志欣<sup>1</sup> 刘立君<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315100

<sup>2</sup>太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030000

**摘要** 采用Nb:YAG激光器对高碳高合金钢Cr12进行了表面熔凝处理试验,分析了激光加工参数对熔凝单元体宽度的影响,采用光学显微镜、扫描电镜以及能谱仪分析了激光熔凝处理后Cr12钢单元体的微观组织和化学成分分布,测量了不同激光加工参数下熔凝单元体宽度,并用显微硬度计测试不同区域的微观硬度。结果表明:激光熔凝处理后得到熔凝区、热影响区和基体三层组织。熔凝区组织为极细的等轴晶和柱状晶,消除了夹杂相,合金元素基本均匀分布。热影响区的显微硬度较基体显著提高,熔凝单元体宽度随激光参数的变化呈一定规律性变化,其中离焦量对单元体宽度影响最大。

**关键词** 激光技术;激光熔凝;Cr12钢;微观组织;显微硬度

中图分类号 TG162.43 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.091602

## Research on Properties of Cr12 Steel Processed by Laser-Remelting

Shi Hualiang<sup>1,2</sup> Li Jiqiang<sup>1</sup> Jia Zhixin<sup>1</sup> Liu Lijun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo, Zhejiang 315100, China

<sup>2</sup>College of Mechanical Engineering, TaiYuan University of Science and Technology,  
TaiYuan, Shanxi 030000, China

**Abstract** An attempt is made to research how does the laser processing parameters impact the width of melted zone in the high carbon alloy steel Cr12 surface using Nb:YAG laser as a heat generating source. The microstructure and chemical composition distribution of Cr12 steel after laser-remelting are observed and analyzed by using optical microscopy, scanning electron microscopy(SEM) and energy spectrometer(EDS). Different widths of melted zone, which are processed by different laser processing parameters, are measured. Hardnesses of laser melted zone are also investigated. The results show that Cr12 steel gets three layers structures, including the melting zone, heat affected zone and the matrix. The microstructure of melted zone has very fine equiaxial crystal and columnar crystal, which eliminates the impurity phase, and the alloying elements are evenly distributed after laser-remelting process. The microhardness of heat affected zone is improved significantly, and the width of melted zone changes along with laser parameters variation and defocusing distance has the most effect on the width of melted zone.

**Key words** laser technique; laser-remelting; Cr12 steel; microstructure; microhardness

**OCIS codes** 160.1245; 350.3390; 350.3850

## 1 引言

冷作模具在工作时,由于被加工材料的变形抗力较大,模具的工作部分承受很大的反复冲击力及摩擦力,其主要失效形式有断裂失效、疲劳失效、磨损失效以及塑性变形等。由于模具的造价普遍较高,再加上模具失效带来的误工会给企业造成很大的经济损失。所以从节约能源、充分发挥材料性能潜力和获得最大

收稿日期: 2014-03-14; 收到修改稿日期: 2014-04-14; 网络出版日期: 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(51275468)、浙江省自然科学基金(LY12E05015)、宁波市重大择优资助项目(2011B1007)

作者简介: 史华亮(1988—),男,硕士研究生,主要从事功能表面激光仿生强化工艺方面的研究。

E-mail: hualiang88519@163.com

导师简介: 李继强(1974—),男,博士,副教授,主要从事模具表面高能束流仿生强化、轻合金材料强化及液态精密成型技术等方面的研究。E-mail: jqlinit@163.com(通信联系人)

的经济效益出发,利用表面强化工艺技术来提高材料使用性能和寿命不失为一种有效的方法<sup>[1-2]</sup>。研究表明激光熔凝处理能普遍提高材料的耐磨性、强度、耐腐蚀性,可以满足大部分材料的使用条件<sup>[3-5]</sup>。本文以Cr12钢为研究对象,利用激光快速熔凝技术在材料表面加工出激光强化单元体,在不改变模具钢材料成分的情况下,实现基体自强化。通过正交试验数据找出各试验参数对强化单元体宽度的影响,为激光表面强化的推广应用提供数据支持和一定的理论指导。

## 2 试验内容与结果分析

### 2.1 试验材料及处理方法

试验材料的化学成分组成如表1所示,热处理规范为960℃油淬和200℃回火2h,用线切割加工成50mm×20mm×6mm的薄片状试样,表面经砂纸打磨、无水乙醇清洗、干燥后置于国产WF300型脉冲YAG激光器的三轴数控工作台上进行表面熔凝处理。从激光器实际控制角度考虑,试验取电流、频率、离焦量、脉宽4个项目作为主要控制参数(如表2所示),分别简称为*E*、*F*、*D*、*P*,激光行走速度恒定为0.5mm/s。

表1 Cr12钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Cr12 steels (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	P	S
2.00 ~ 2.30	≤0.40	≤0.40	11.50 ~ 13.00	≤0.030	≤0.030

表2 激光加工参数

Table 2 Laser processing parameters

Electrical current/A	Frequency /Hz	Defocusing distance /mm	Pulse width /ms
100、120、140、160	5、7、9、10	-3、0、3、5	5、7、9、11

### 2.2 试验设备

激光设备为深圳大族WF300型脉冲YAG激光器。观察金相、测量熔凝单元体宽度所用设备为Nikon MA100型倒置显微镜及与其配套使用的UPO图像分析软件。测量显微硬度所用设备为上海恒一MH-60型显微硬度计,施加载荷为300g。金相镶嵌、预磨、研磨分别采用XQ-2B型金相镶嵌机、M-2A金相预磨机和PG-2型金相试样抛光机。

### 2.3 正交试验方案确定

采用正交试验方法处理加工参数,在各因素变化范围内均衡抽样,使每次试验都具有较强的代表性。表3所示为正交试验的工艺参数安排和试验结果。数据分析采用极差分析法,能较好地反映出试验因素水平变动时试验指标变动的幅度。由此可以根据极差的大小来判断因素影响的主次程度<sup>[6]</sup>。

表3 激光加工参数和数据分析

Table 3 Laser processing parameters and data analysis

No.	<i>E</i> /A	<i>F</i> /Hz	<i>D</i> /mm	<i>P</i> /ms	Width / $\mu$ m
1	100	5	-3	5	1192.6
2	100	7	0	7	1056.3
3	100	9	3	9	990.9
4	100	10	5	11	1240.6
5	120	5	0	9	1076.5
6	120	7	-3	11	1417.6
7	120	9	5	5	1116.3
8	120	10	3	7	1259.8
9	140	5	3	11	1076.6
10	140	7	5	9	1353.7
11	140	9	-3	7	1540.9
12	140	10	0	5	1078.1
13	160	5	5	7	1022.9
14	160	7	3	5	1203.5
15	160	9	0	11	1440.6
16	160	10	3	9	1529.3
Mean value 1	1120.1	1092.15	1420.10	1147.62	
Mean value 2	1217.5	1257.77	1162.87	1219.97	
Mean value 3	1262.3	1272.17	1132.70	1237.60	
Mean value 4	1299.0	1276.95	1183.37	1293.85	
Range	178.9	184.80	287.40	146.22	

## 2.4 激光参数对单元体宽度的影响

根据正交试验表3绘制出了各工艺参数对强化单元体宽度影响的效果图[图1(a)~(d)]。可以看出,随着电流和脉宽的增加,熔凝单元体宽度基本呈线性增加趋势。这是因为激光的功率直接受电流和脉宽的影响,激光照射产生的热量和电流脉宽成线性关系,所以当电流和脉宽增加时照射到试样表面的热量线性增长,导致单元体的宽度线性增加。图1(b)表明频率在达到7 Hz之前单元体宽度增加趋势明显,之后趋于平缓。这主要是在频率达到7 Hz以后,试样基体表面吸收传导的激光脉冲能量达到了饱和,因此不再增加熔池的宽度<sup>[7]</sup>。

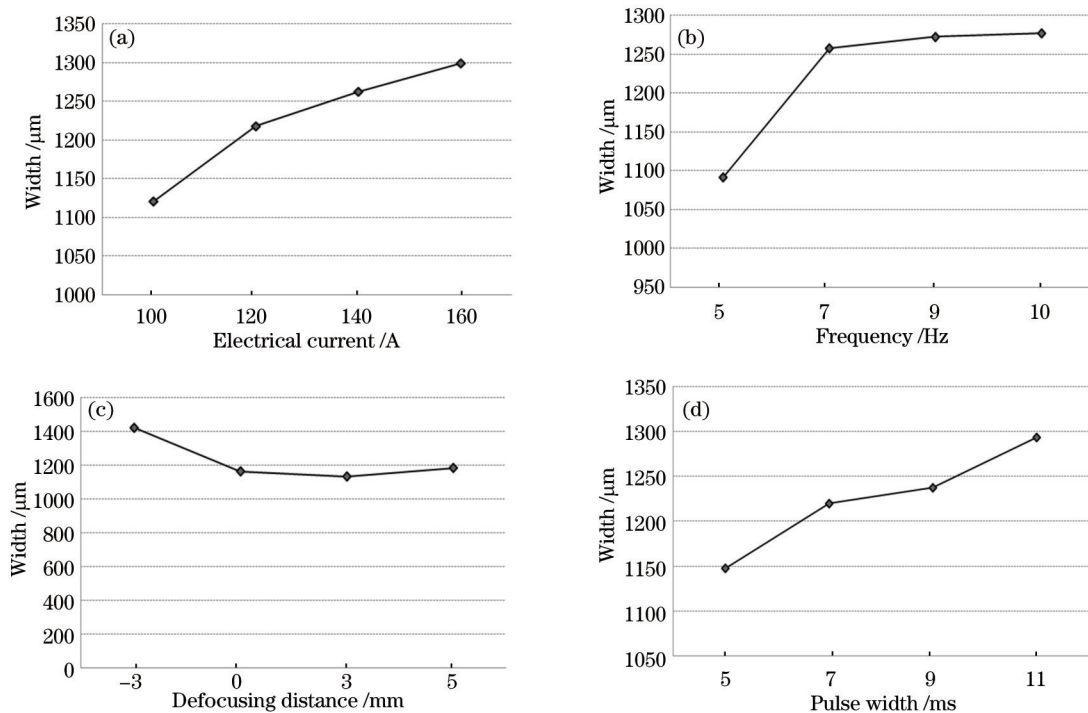


图1 单元体宽度随激光参数变化的趋势。(a)电流;(b)频率;(c)离焦量;(d)脉宽

Fig.1 Trends of unit body width changes along with the laser parameters alteration. (a) Electrical current; (b) frequency; (c) defocusing distance; (d) pulse width

离焦方式有两种:正离焦与负离焦。按几何光学理论,当正负离焦面与焊接面距离相等时,所对应平面上功率密度近似相同,但实际上所获得的熔池形状不同。由图1(c)可以看出离焦量在-3~+3 mm之间时随着离焦量的增大导致单元体宽度降低,在大于+3 mm宽度时有增加趋势,这和熔池的形成过程有关。当负离焦时,材料内部功率密度比表面还高,易形成更强的熔化、汽化区域,使激光的热量更好的传导,因此离焦量在-3~+3 mm之间时试样表面所呈现出的熔池宽度并不一致。离焦量从0 mm到+3 mm再到+5 mm熔池宽度呈现出先降低再增加的趋势,这是因为随着离焦量的增加,激光照射光斑直径变大而激光离焦面上的功率密度逐渐降低,激光光斑直径和功率密度直接影响熔池的宽度结果。离焦量为+3 mm时光斑直径和功率密度对熔池的影响可能达到一种平衡;离焦量在0~+3 mm之间时,激光功率密度对熔池的影响因素大于光斑直径对其的影响;离焦量在+3~+5 mm之间时,光斑直径对熔池宽度的影响大于激光功率密度对其的影响。

结合表3和图1可知,激光的离焦量对单元体宽度影响最显著,各工艺参数的对单元体宽度的影响大小顺序为:离焦量,频率,电流和脉宽。

## 2.5 微观组织

选取单元体形状比较规则、单元体内部没有气泡、裂痕等缺陷的第11组数据加工的工件,整个表层由三部分组成:熔凝区、热影响区和基体,各个区分界线并不是非常明显。图3为Cr12钢的基体、热影响区、熔凝区的微观组织,可以看出Cr12钢熔凝区表面是细小等轴晶区,中间是柱状树枝晶区,底部是胞状晶区。该区域为完全晶粒细化区,主要由少量过饱和隐晶马氏体、细小弥散分布的碳化物和大量残余奥氏体组成。

在激光快速凝固过程中由于过冷度很大,固-液界面以较高的速度前进,固-液界面前沿的碳及合金元素来不及充分扩散,致使固相和液相中的碳与合金元素处在非平衡状态。因此大量的碳和合金元素仍会留在先析出的奥氏体中。而在先析出奥氏体枝晶间剩余的液体中,碳和合金元素只能进行短程扩散,由此形成的共晶碳化物数量减少且细小。随后由于冷却速度很快,进一步抑制了二次碳化物从先析出奥氏体中沉淀。大量的碳和合金元素的固溶使奥氏体的马氏转变温度( $M_s$ 点)降低,高温形成的奥氏体就可以保留至室温,只出现少量马氏体相变。

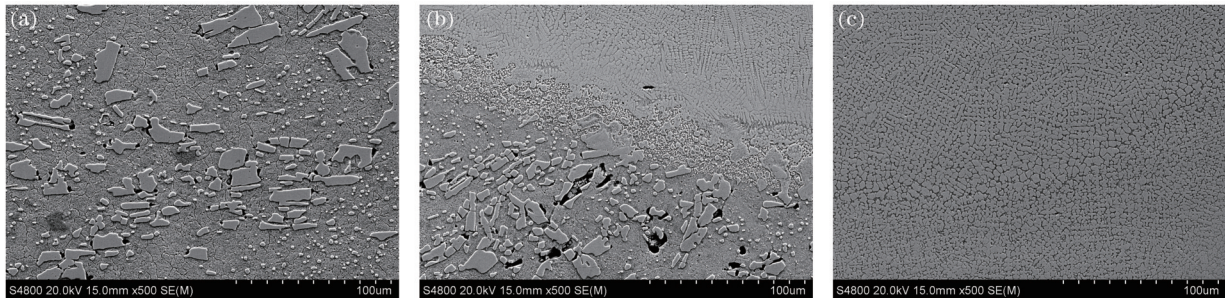


图2 Cr12钢的微观组织。(a)基体;(b)热影响区;(c)熔凝区

Fig.2 Microstructure of Cr12 steel. (a) The matrix; (b) heat affected zone; (c) the melting zone

## 2.6 能谱分析

从试样表面垂直向内对主要合金元素C、Fe、Si、Cr等的浓度分布进行线扫描,如图3所示,结果如图4所示。可以看出Cr12钢激光熔凝区中C、Fe、Si、Cr合金元素浓度分布比较均匀,没有明显的偏析,这是由于高能激光使熔凝层中的夹杂物重新熔化,因而净化了合金组织,熔凝区中没有形成大颗粒碳化物[图2(c)]。单元体各区域的组织成分没有太大的变化。由此可以看出经过激光熔凝处理的Cr12模具钢的组织比较稳定,没有发生性能突变的情况。

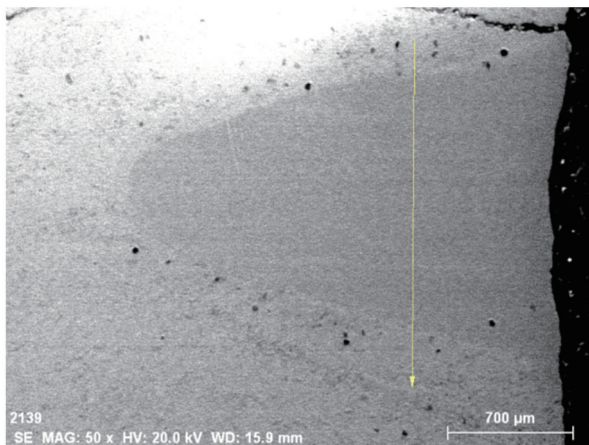


图3 扫描方向

Fig.3 Scanning direction

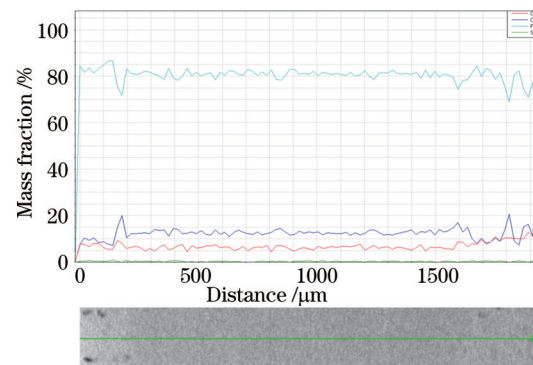


图4 Cr12钢激光熔凝区EDS线扫描分析

Fig.4 Energy dispersive X-ray spectrometer analysis of the melted zone of Cr12 steel

## 2.7 硬度测试

图5为显微硬度测试点示意图,图6所示为X轴方向和Y轴方向显微硬度测量结果。可见在X轴和Y轴方向上熔凝区硬度曲线比较平稳,而热影响区内测试点的硬度先急剧增加后有硬度值回落点,到基体组织内时硬度趋于平稳。根据前述分析,熔凝层组织主要为单相奥氏体的树枝晶和由奥氏体、共晶碳化物以及少量的二次碳化物组成的树枝晶间产物。马氏体数量较少,仅靠奥氏体中碳和合金元素的固溶强化以及少量的树枝晶间共晶碳化物和二次碳化物强化不足以使熔凝层的硬度提高。热影响区组织为过饱和的隐晶马氏体、弥散分布的碳化物和残余奥氏体<sup>[8-9]</sup>。热和冷却使奥氏体晶粒细化、马氏体细小以及弥散析出细小碳化物,其综合作用导致热影响区硬度显著提高。而靠近基体的热影响区有一高温回火区,显微组织由回火索氏体和碳化物组成,其硬度较基体硬度略低<sup>[10-11]</sup>。

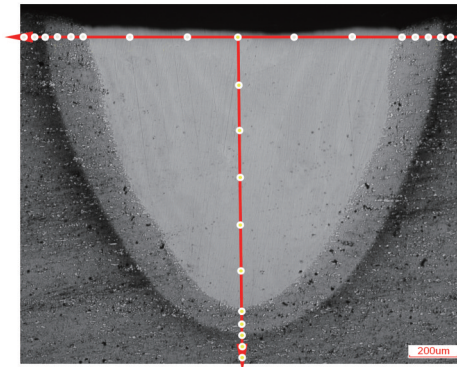


图5 显微硬度测试点

Fig.5 Microhardness test points

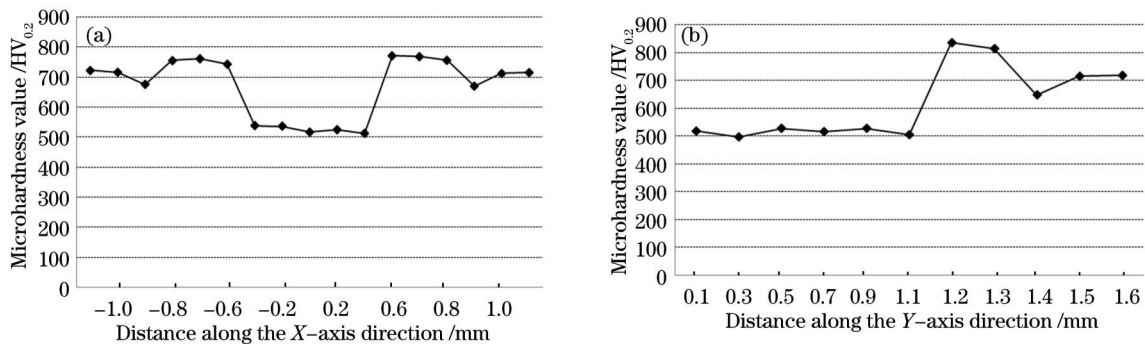


图6 显微硬度曲线。(a) X方向; (b) Y方向

Fig.6 Microhardness distribution along depth direction. (a) X axis; (b) Y axis

### 3 结 论

1) 在激光行走速度恒定为0.5 mm/s的情况下,改变激光工艺参数直接影响单元体宽度。激光离焦量对单元体宽度影响最显著,各工艺参数对单元体宽度的影响大小顺序为:离焦量,频率,电流和脉宽。

2) 本试验条件下用YAG激光器熔凝处理的Cr12钢得到的剖面组织由熔凝区、热影响区和基体三层组成。熔凝区表面是细小等轴晶区,中间是柱状树枝晶区,底部是胞状晶区。胞状晶区为完全晶粒细化区,主要由少量过饱和隐晶马氏体、细小弥散分布的碳化物和大量残余奥氏体组成。合金元素分布基本均匀,无夹杂相。

3) 相较于基体组织,熔凝区硬度略有下降,但热影响区硬度显著提高。

### 参 考 文 献

- Wei Xingzhao, Zhu Weiheng, Qin Ning, *et al.*. Failure analysis and discussion of Cr12 type steel cold work dies[J]. Heat Treatment of Metals, 2011,36(1): 14-23.  
魏兴钊, 朱伟恒, 覃宁, 等. Cr12型钢制冷作模具的失效分析与探讨[J]. 金属热处理, 2011, 36(1): 14-23.
- Zhang Rong, Qian Shukun. Die Materials and Surface Engineering Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. 17-21.  
张蓉, 钱书琨. 模具材料及表面工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 17-21.
- Yan Jun. Researching on Heat Treatment of High-Power Laser to Mould Steel [D]. Xiamen: HuaQiao University, 2003.  
闫钧. 模具钢激光表面热处理的实验研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2003.
- Jin-zhong Lu, Chao-jun Yang, Lei Zhang. Mechanical properties and microstructure of bionic non-smooth stainless steel surface by laser multiple processing [J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6(2): 180-185.
- Zhuang Qiren, Zhang Wenzhen, Lu Fengping. Study of the laser heat treatment for mould surface [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(3): 271-276.  
庄其仁, 张文珍, 吕凤萍. 模具表面的激光热处理研究[J]. 中国激光, 2002, 29(3): 271-276.
- Ma Yunzhe, Dong Shiyun, Xu Binshi, *et al.*. Optimization of proceeding parameters in laser cladding Fe-based alloy [J].

- China Surface Engineering, 2006, 19(5): 154-160.  
马运哲,董世运,徐滨士,等. 铁基合金激光熔覆技术工艺优化研究[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 154-160.
- 7 Huang Zhihui, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.*. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503004.  
黄志辉,刘会霞,沈宗宝,等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.
- 8 Zhu Jie, Liu Jiajun, Chen Nanping. The mechanism of laser transformation hardening on Cr12 steel [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 1990, 11(4): 67-73.  
朱捷,刘家浚,陈南平. Cr12钢激光相变硬化机理[J]. 金属热处理学报, 1990, 11(4): 67-73.
- 9 Zhu Jie, Liu Jiajun, Chen Nanping. Microstructure of laser hardened Cr12 steel [J]. Materials Science Progress, 1990, 4(6): 469-472.  
朱捷,刘家浚,陈南平. Cr12钢激光硬化处理后的组织[J]. 材料科学进展, 1990, 4(6): 469-472.
- 10 Liu Qibin. Laser Processing Technology and Applications [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007. 68-69.  
刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007. 68-69.
- 11 Yang Liuqing, Ding Yangxi, Fu Wei, *et al.*. Study on Cr12MoV steel with wide-band laser quenching [J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(6): 49-51.  
杨柳青,丁阳喜,付伟,等. Cr12MoV钢宽带激光淬火试验研究[J]. 金属热处理, 2006, 31(6): 49-51.