

外加纵向磁场 GTAW 焊接机理*

I. 电弧特性

罗 键^{1,2)} 贾昌申²⁾ 王雅生²⁾ 薛 锦²⁾ 吴毅雄¹⁾

1) 上海交通大学焊接研究所, 上海 200030

2) 西安交通大学焊接研究所, 西安 710049

摘 要 针对外加纵向磁场 GTAW(gas tungsten-arc welding) 焊接过程, 采用红外热像伪着色法测定了外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的温度场, 并建立了外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧热流密度径向分布模型, 对焊接电弧外形的变化、焊接电弧电流、电压与外加纵向磁场强度变化的关系进行了研究。

关键词 纵向磁场、钨极氩弧焊、焊接电弧、温度场

中图分类号 TG456.2

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)02-0212-05

MECHANISM OF THE GAS TUNGSTEN-ARC WELDING IN LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD CONTROLLING

I. Property of the Arc

LUO Jian^{1,2)}, JIA Changshen²⁾, WANG Yasheng²⁾, XUE Jin²⁾, WU Yixiong¹⁾

1) Welding Research Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

2) Welding Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: LUO Jian, Tel: (021)62932585, E-mail: jluo@mail1.sjtu.edu.cn.

Manuscript received 2000-06-27, in revised form 2000-09-26

ABSTRACT In gas tungsten-arc welding (GTAW) with longitudinal magnetic field controlling, the welding arc temperature field was measured by the infrared sensing and computer image technique. The distribution models of welding arc heat flow density of GTA welding with longitudinal magnetic controlling under the conditions of weak magnetic field and small welding current were developed for the first time. The new phenomenon of the welding arc effecting by the additional longitudinal magnetic field was studied, and the relationships between the welding arc current, voltage and intensity of the additional longitudinal magnetic field were analyzed.

KEY WORDS longitudinal magnetic field, GTAW, welding arc, temperature field

近年来, 伴随着材料科学与工程技术的发展, 各种新焊接工艺不断涌现, 以满足现代结构材料的焊接要求。在电弧焊接过程中引入磁场控制就是满足这种需要的正在发展的先进焊接技术^[1]。外加纵向磁场的引入可以促使焊接电弧旋转、改变焊接电弧特性, 影响焊缝成形。实践表明, 外加间歇交变纵向磁场电弧焊接技术可以有效地搅拌焊接熔池, 改变熔池金属的结晶状况, 细化焊缝金属的

一次结晶组织, 减小化学不均匀性, 提高焊缝金属的塑性和韧性; 降低结晶裂纹和气孔的敏感性; 提高奥氏体不锈钢焊缝金属抗晶间腐蚀的能力, 全面提高焊接质量^[1-3]。它以附加装置简单、投入成本低、效益高等优点在冶金、热能、电力、航天等部门和领域得到了广泛的应用, 发展前景较为广阔^[2-4]。

目前, 国内外关于外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧特性方面的研究比较薄弱, 研究并不十分深入^[1,2,5]。在实际应用中, 难免会因缺乏理论依据而产生一定的盲目性, 从而影响了这种技术的发展和推广。因此, 开展外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧特性的研究, 从本质上认识电磁作用电弧焊接技术的机理, 为电磁作用电弧焊接技术的工程

* 国家自然科学基金资助项目 59775059

收到初稿日期: 2000-06-27, 收到修改稿日期: 2000-09-26

作者简介: 罗 键, 男, 1971 年生, 土家族, 博士

应用提供理论借鉴, 无疑具有十分重要的理论研究意义和广阔的工程应用价值. 本文将针对外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的温度分布、等离子流力、电流密度等电弧特性进行全面深入的定量测定与分析, 为深入研究磁控电弧焊接技术进行铺垫. 对外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流体各种性质的测定和分析, 常称为低温等离子体诊断. 由于焊接电弧低温等离子体的极端温度条件, 限制了对其特征参数的测量, 一般必须从外部进行, 因而外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子体诊断比其他物理参数的测量更为困难 [5,6].

1 焊接电弧温度场的测量及其结果分析

本文采用红外热像法实时测定外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度场. 红外热像仪采用美国 Inframetrics 公司生产的 AGA780 热像仪. 该设备包括红外探测器、红外信息处理器、彩色显示器和录像机等. 在测量温度之前, 采用工程标定法 [1] 对测温仪器进行温度标定. 测量时为了使摄取的图像清晰, 在红外摄像机前配置了两块红外滤光片, 同时通过加滤光器组滤掉电弧光的干扰.

外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度场的红外取像是从水平位置直接将摄像机对准焊接电弧, 所摄取的图像信号通过 A/D 转换, 经图像卡在计算机上进行取像、消除噪音、均匀量比、伪着色等处理, 最终获得了所测焊接电弧温度场的图像. 为了研究外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度场及其分布, 实验是在不同焊接工艺参数下进行的, 采用了以下 3 种焊接条件: (1) 外加纵向磁场与无外加磁场; (2) 改变外加纵向磁场强度; (3) 改变焊接电流强度.

在外加恒定纵向磁场的磁感应强度为 0.01 T, 焊接电流为 100 A、钨极与水冷 Cu 阳极的距离 (L) 为 3 mm、

钨极直径为 3.2 mm、Ar 气流量为 8—16 L/min 的条件下, 外加恒定纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度场如图 1a 所示, 图 1b 为同样条件下普通 GTAW 焊接电弧温度场. 磁场方向为从钨极到水冷 Cu 板, 磁场强度的测量点在电弧中心轴线的半弧长处.

从图 1 明显可见, 与普通 GTAW 焊接电弧相比, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的温度分布比较分散, 外形“矮而胖”, 分布范围较广, 电弧中心区域的温度并不是很高, 电弧径向的温度梯度比较小. 普通 GTAW 焊接电弧温度场外形“高而瘦”, 温度分布比较集中, 电弧中心区温度较高, 电弧径向的温度梯度比较大. 但这两种焊接电弧温度场的本质特征无明显区别 (如电弧中心区温度都比外缘高). 沿焊接电弧中心线, 温度场对称分布; 在电弧水平面各个径向上温度梯度相等, 其等温线为一列同心圆. 本文普通 GTAW 焊接电弧温度场的测量结果比文献 [6] 给出的测试值要小.

当外加恒定纵向磁场的磁感应强度变化时, 保持其他焊接条件不变, 在距离钨极 $L=2$ mm 处, 垂直外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧中心线的水平剖面上温度分布曲线如图 2 所示. 因为电弧温度场对称分布, 绘图时取其一半即可.

从图 2 可知, 当外加恒定纵向磁场的磁感应强度增大时, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度分布更加发散, 中心区域的温度降低, 电弧影响区域增大, 焊接电弧径向温度梯度减小. 研究表明, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度分布曲线下的面积并不随外加磁场强度增大而改变, 即外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的总热量不变, 这从另一侧面证实了外加纵向磁场的引入并不增加 GTAW 焊接电弧的总热量, 只是改变了 GTAW 焊接电弧的热量分布 [1,2,5].

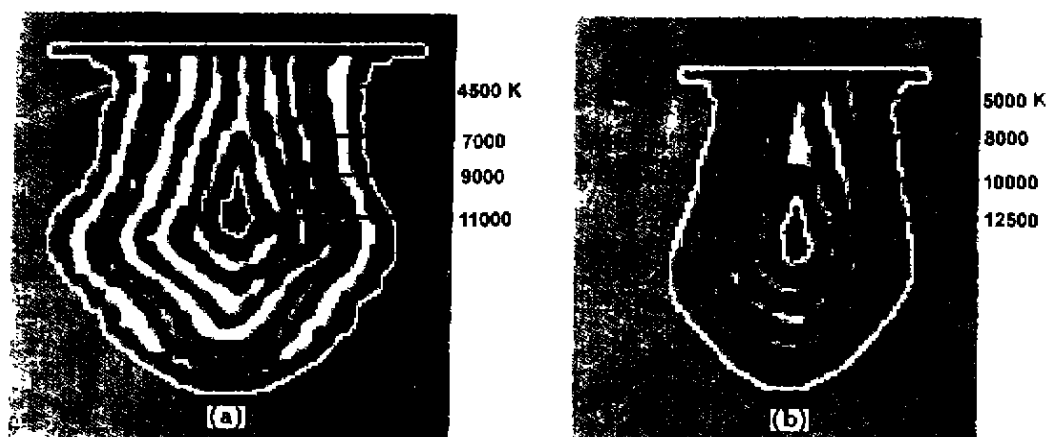


图 1 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧实测温度场

Fig.1 Measured welding arc temperature fields of GTAW with longitudinal magnetic field controlling

(a) $B=0.01$ T (b) $B=0$

在外加恒定纵向磁场的磁感应强度为 0.01 T 时, 变化焊接电流, 而保持其他焊接条件不变, 得到的外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧水平剖面上的温度分布曲线如图 3 所示。

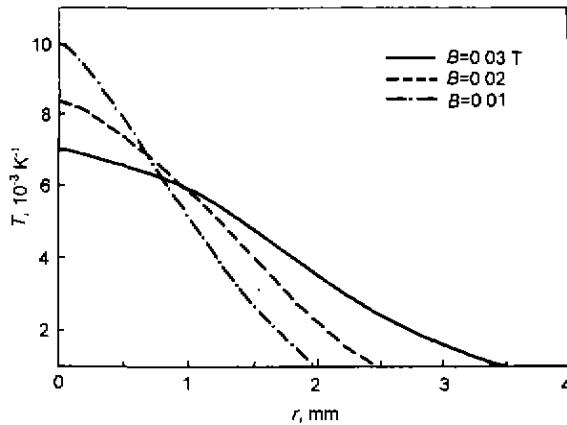


图 2 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧水平剖面温度分布

Fig. 2 Temperature distribution on the horizontal section of welding arc of GTAW with longitudinal magnetic field controlling ($L=2$ mm)

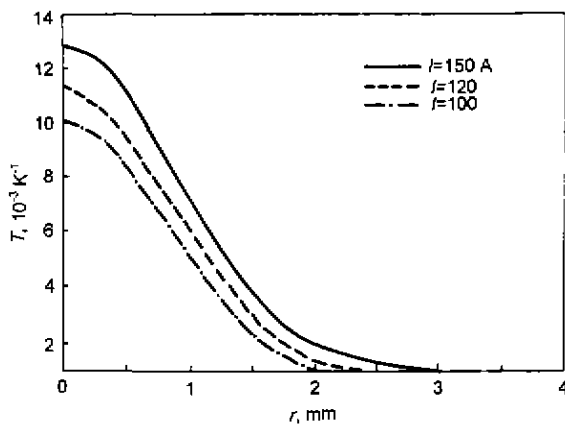


图 3 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧水平剖面温度分布

Fig. 3 Temperature distribution on the horizontal section of welding arc of GTAW with longitudinal magnetic field controlling ($B=0.01$ T)

从图 3 可知, 当外加纵向磁场 GTAW 焊接电流增大时, 焊接电弧的温度升高, 焊接电弧的温度梯度增大, 影响范围增大, 温度分布曲线下所围的面积增大, 表明外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的热量增加; 同时焊接电流的增大使外加纵向磁场的作用更为明显, 但焊接电弧温度分布的特征不变。综上所述, 焊接电流的增大使外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的总热量增加, 但并不改变其电弧热流的分布特征。

根据焊接电弧温度场与热流密度的紧密联系^[1,6], 以普通 GTAW 焊接电弧热流密度分布模型^[5,6]为基础, 建立外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧热流密度的 Gauss 正态径向分布模型

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{KQ}{\pi} \exp(-Kr^2) \quad (1)$$

$$Q = \eta_a UI \quad K = \frac{\alpha}{\sigma_q^2} \quad (2)$$

式中: $q(r)_{\text{arc}}$ 为焊接电弧热流密度, K 为热流集中系数, Q 为焊接电弧有效热功率, r 为某点的径向距离, U 为电弧电压, I 为焊接电流, η_a 为焊接电弧功率有效利用系数, α 为热流集中系数常数, σ_q 为电弧热流分布参数, σ_q 定义为热流密度衰减至最大值的 5% 时的径向距离。但是, 这与普通 GTAW 焊接电弧热流密度的 Gauss 正态分布有所不同, 主要区别在于模型中热流集中系数的不同, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧热流密度 Gauss 正态分布的热流集中系数要小于普通 GTAW 的热流集中系数, 即磁控电弧热流分布参数 σ_q 较大。同时热流集中系数中的常数 α 也不一样, 对于普通 GTAW 焊接过程而言, σ_q 一般取值为 1—3 mm, α 一般取值为 0.5—3。在本研究条件下, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧热流分布模型为

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{\eta_a UI}{3\pi\sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{3\sigma_q^2}\right) \quad (3)$$

2 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧形态

将励磁线圈安装在焊枪上, 采用水冷 Cu 阳极板的方法拍摄外加恒定纵向磁场 GTAW 焊接电弧的外形, 使用 1/1000 s 的快门速度和滤光镜拍摄, 拍摄过程在同一次电弧燃烧过程中随意、连续进行, 以保证电弧外形拍摄时焊接参数的一致性。

通过拍摄并观察外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧外形照片, 测量并分析外加纵向磁场作用下 GTAW 焊接电压、焊接电流等参数, 研究发现在外加纵向磁场作用下, 焊接电弧及其参数发生了一系列的变化。

焊接电流为 100 A, 钨极与水冷 Cu 阳极距离为 3 mm, 钨极直径为 3.2 mm, Ar 气流量为 8—16 L/min 时, 在不同外加磁场强度条件下, 外加恒定纵向磁场 GTAW 焊接电弧的典型外观照片如图 4 所示 (其他条件均相同)。

如图 4 所示, 在本研究的小焊接电流 ($I \leq 200$ A)、弱外加磁场的作用下 ($B \leq 0.1$ T), 外加恒定纵向磁场 GTAW 焊接电弧外形发生了明显的变化。这是普通 GTAW 焊接电弧所不具有的现象: 焊接电弧外形下部扩张、上部收缩, 电弧外观形态呈钟罩形, 具有轴对称性, 并且, 随着外加纵向磁场强度的增大, 电弧外形上部收缩、

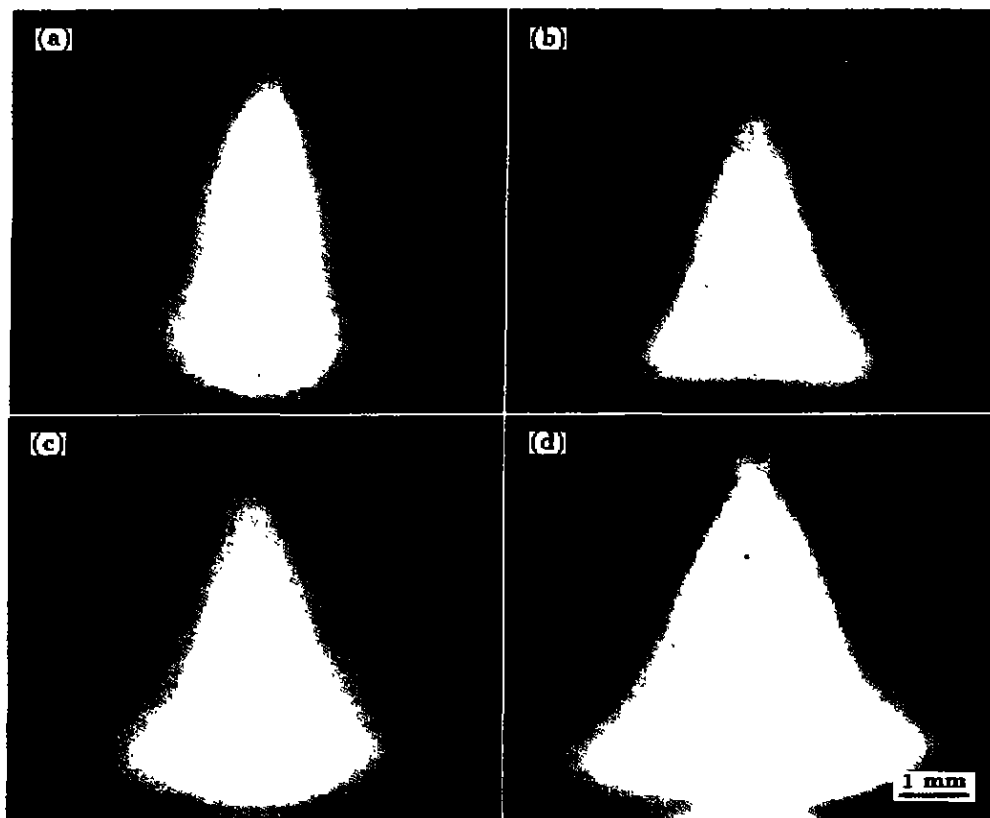


图 4 焊接电弧外形

Fig.4 Shapes of welding arc ($I \leq 200$ A)(a) $B=0$ (b) $B=0.01$ T (c) $B=0.05$ T (d) $B=0.1$ T

下部扩张的程度增大。研究表明,外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧等离子流体高速旋转,随着磁感应强度的增大,电弧等离子流体转速加快,其钟罩面是一个高速旋转的封闭形导电面。

研究表明^[1-3],在外加间歇交变纵向磁场 GTAW 焊接时,焊接电弧外形在上述两种形态 ($B \neq 0$, $B=0$) 之间不断发生交替变化:外加磁场作用时,焊接电弧扩张;外加磁场休止时,焊接电弧收缩。即在外加间歇交变纵向磁场作用下,GTAW 焊接电弧外形不断扩张、收缩、再扩张、再收缩,这与外加横向磁场作用下 GTAW 焊接电弧形态有着明显的不同。这种表现在焊接电弧外形上的变化,也使焊接电弧其他特性不可避免地受到影响。

3 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧电流和电压的变化

为了测定外加纵向磁场对焊接电弧电压和电流的影响,将电弧电压和电弧电流信号输入函数记录仪,并改变外加纵向磁场的磁感应强度,利用函数记录仪所记录的焊接电弧和焊接电流的波形,确定焊接电流、焊接电压与外加纵向磁场的磁感应强度之间的关系,结果如图 5 和 6 中曲线所示:当磁感应强度从 0 增大到 0.12 T 时,实测的

焊接电弧电流从 125 A 减小到 74 A 左右,电弧电压从 11.5 V 升高到 15.8 V 左右。由此可得,在其他条件不变的情况下,随着外加恒定纵向磁场的磁感应强度增大,焊接电弧电流减小,电弧电压升高。

经分析认为:这是由于高速旋转的焊接电弧中带电粒子的飘移旋转运动使其传导电流所经路程增大,实际相当于增大了电弧长度;同时,焊接电弧旋转时周围气体介质对它的冷却作用加强,促使电弧弧柱的电场强度增大,外

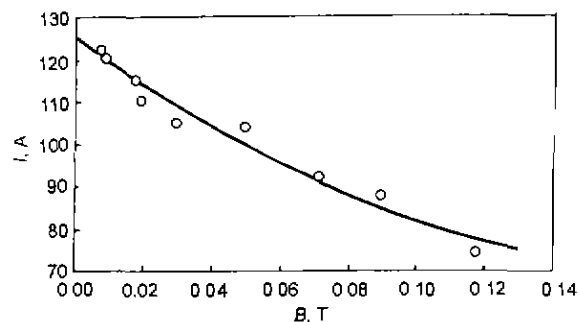


图 5 外加纵向磁场 GTAW 焊接电流与磁感应强度的关系

Fig.5 Relationship between welding current (I) and intensity (B) of longitudinal magnetic field

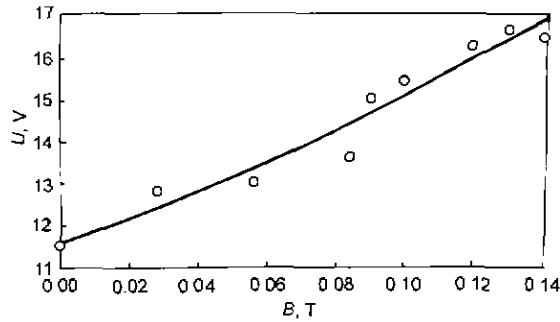


图6 外加纵向磁场 GTAW 焊接电压与磁感应强度的关系

Fig.6 Relationship between welding voltage (U) and intensity (B) of longitudinal magnetic field

加纵向磁场的作用增强, 电弧作用面积增大; 另外, 外加纵向磁场作用下, 正离子和电子运动轨迹的“分离”, 使之产生相互吸引力; 又因为电弧等离子流体“相对集中”现象的出现, 致使弧柱实际导电面积相对缩小, 弧柱阻抗增大。因此, 当磁场强度增大时, 电弧电压升高, 而电弧电流减小。

4 结论

(1) 红外热像法实测的外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的温度场显示, 沿焊接电弧中心线其温度场对称分布与普通 GTAW 焊接电弧相比, 外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧的温度分布比较分散, 温度场外形“矮而胖”, 温度分布范围较广, 电弧径向温度梯度较小。

(2) 当外加纵向磁场的磁感应强度增大时, 焊接电弧温度分布更加发散, 电弧中心区温度降低, 电弧热影响范围增大, 电弧径向温度梯度降低; 焊接电流增大时, 外加

纵向磁场 GTAW 焊接电弧温度升高, 电弧总热量增大, 但并不改变电弧热流分布的本质特征, 其电弧径向温度分布呈现正态 Gauss 分布模式

(3) 根据焊接电弧温度的分布规律, 首次建立了外加恒定纵向弱磁场、小电流 GTAW 直流正极性焊接电弧热流密度径向 Gauss 正态分布模型

$$q(r)_{\text{arc}} = \frac{\eta_a UI}{3\pi\sigma_q^2} \exp\left(\frac{-r^2}{3\sigma_q^2}\right)$$

(4) 拍摄的焊接电弧外形照片表明, 外加恒定纵向磁场作用下 GTAW 焊接电弧外形下部扩张, 上部收缩, 电弧外观形态呈钟罩形, 具有轴对称性。外加恒定纵向磁场 GTAW 焊接条件下, 随着外加纵向磁场强度的增大, 电弧电流减小, 电弧电压升高。

参考文献

- [1] Jia C S, Yin X Q. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 1994; 28(4): 7 (贾昌申, 殷咸青. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 7)
- [2] Luo J, Jia T, Yin X Q. *Acta Metall Sin*, 1999; 35: 330 (罗 健, 贾 涛, 殷咸青. 金属学报, 1999; 35: 330)
- [3] Jia C S, Luo J, Jia T. *Aeronaut Manuf Technol*, 1999; (3): 26 (贾昌申, 罗 健, 贾 涛. 航空工艺技术, 1999; (3): 26)
- [4] Villafuerte J C, Kerr H W. *Weld J*, 1990; 69: 1s
- [5] Jayarajan T N, Jackson C E. *Weld J*, 1972; 51: 377s
- [6] Zhang W Y. *Heat Trans Welding*. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. 1 (张文钰. 焊接传热学. 北京: 机械工业出版社, 1987. 1)
- [7] Lu D P. *Trans China Weld Inst*, 1986; 17(7): 47 (路登平. 焊接学报, 1986; 17(7): 47)