

纵向磁场对 TIG 焊电弧形态的影响*

刘政军, 陆 璐, 苏允海, 雷 康
(沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870)

摘 要: 为了研究外加纵向磁场对 TIG 焊焊接电弧形态的影响并分析电弧形态的变化机理, 在常规的 TIG 焊焊接过程中施加纵向磁场, 利用高速摄像机对焊接电弧形态进行拍摄和记录。实验结果表明, 当无磁场作用时, 弧柱呈锥形且未发生旋转运动。在外加磁场作用下, 弧柱呈收缩状态且沿顺时针旋转。当焊接参数不变时, 随着磁场强度的增加, 弧柱的收缩程度随之增加。根据磁场的理论公式, 可推导出在外加纵向磁场作用下, 电弧的旋转半径与磁感应强度成反比。

关 键 词: 纵向磁场; TIG 焊; 磁场强度; 磁场电流; 高速摄像; 电弧形态; 弧柱收缩

中图分类号: TG 403 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1646(2015)01-0034-05

Effect of longitudinal magnetic field on arc profile of TIG welding

LIU Zheng-jun, LU Lu, SU Yun-hai, LEI Kang

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to study the influence of applied longitudinal magnetic field on the welding arc profile of TIG welding and to analyze the change mechanism of arc profile, the longitudinal magnetic field was applied in the conventional TIG welding process, and the arc profile was shot and recorded with high-speed camera. The experimental results show that without the action of magnetic field, the arc column shows the cone shape and the rotation motion does not occur. Under the action of applied magnetic field, the arc column shows the contraction state and rotates in the clockwise direction. When the welding parameters remain unchanged, the contraction degree of arc column increases with increasing the magnetic field strength. According to the theoretical formula of magnetic field, it can be derived that under the action of applied longitudinal magnetic field, the rotation radius of arc is inversely proportional to the magnetic induction.

Key words: longitudinal magnetic field; TIG welding; magnetic field strength; magnetic field current; high-speed camera; arc profile; arc column contraction

外加磁场焊接技术是近些年来发展起来的一种新型焊接技术^[1]。在焊接过程中将外加磁场作用在电弧上, 将影响电弧中带电粒子的运动形式和电弧形态, 进而影响熔滴过渡过程, 对熔池中金属的流动、晶粒的形成和长大均有显著的作用, 并可以细化焊缝的一次组织, 减少化学成分的不均匀性, 降低焊缝气孔和裂纹的形成^[2-4], 有效提高焊接接头的质量和焊接生产效率^[5]。

由于磁场具有附属装置简单, 投入成本少, 效率高, 消耗能源低等特点^[6], 并可以显著地改善焊接接头质量, 因此, 利用外加磁场控制焊接过程具有广泛的应用前景和重要的研究价值。国外对外加磁场焊接技术的研究较多, Bachmann 等^[7]研究了稳态磁场对厚铝合金的高密度激光束焊接熔池的动态影响, 表明所施加的磁场对焊接熔深具有散热作用。Necib 等^[8]研究了磁场对切削工具

收稿日期: 2014-07-02.

基金项目: 辽宁省教育厅重点实验室基金资助项目(2008S164); 沈阳市科技攻关项目(20082647-2).

作者简介: 刘政军(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事焊接冶金、特种焊接材料及表面强化等方面的研究。

* 本文已于 2014-12-15 11:18 在中国知网优先数字出版, 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1189.T.20141215.1118.014.html>

中金属碳化物磨损的影响,表明磁场对磨损的影响存在一个磁场强度的临界值($16.5 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$),此时的磨损最小;此外,磁场的增强可以改变芯片的形态并且升高接触面的温度。

国内对外加磁场焊接技术的研究在近些年才开始兴起,且主要集中在磁场对堆焊层组织及性能的影响以及对电弧与熔池的作用。电磁搅拌可以使堆焊层的金属组织得到细化,并控制堆焊层中硬质相的形态和分布,使其均匀地分布在堆焊层的表面,进而提高堆焊层的力学性能,同时堆焊层的金属耐磨性也随之增强^[5-10]。朱胜^[4]等研究了 MIG 焊的焊接电弧行为,当无磁场作用时,电弧形态稳定;在交变纵向磁场作用下,焊接电弧发生顺时针和逆时针的旋转运动。

尽管外加磁场焊接技术已经得到广泛研究,且部分研究成果已经应用于生产实际,但其作用机理仍未认识清楚,尤其是电弧形态的变化机理更是如此。因此,本文将从纵向磁场对电弧区域带电粒子的运动影响出发,分析电弧的运动机制及电弧形态变化的原因。

1 实验方法

实验中选用的母材是 AZ31B 变形镁合金板材,并将其加工成实验所需的 $50 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 规格大小的试板。其中, AZ31B 镁合金的化学成分如表 1 所示。焊接前利用角磨机打磨试板表面,以去除其表面的氧化物和油污。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分(%)

Tab. 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy (%)

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Mg
2.5 ~ 3.5	0.5 ~ 1.5	0.2 ~ 0.5	0.1	0.05	余量

由于镁的化学性质活泼^[42],尤其是在焊接的高温作用下,其氧化性极强^[43],容易与空气反应而形成氧化镁(MgO),从而使焊接接头塑性降低。因此,镁及镁合金的焊接方法需要采用气体保护焊焊接。本文的焊接方法是以氩气作为保护气体的 TIG 焊。但常规的 TIG 焊熔深较浅,效率低,只适用于薄板焊接^[44-46]。所以本文采用外加磁场焊接技术。在实验过程中,所施加的是纵向磁场,磁场电流和磁场频率均可以调节,该磁场是由放置在工件下方的激磁线圈产生的。试板放于激磁线圈上方,并使试板的中心与线圈的中心重合,因此,激磁线圈产生的磁力线平行于焊接电弧的中

心轴线。

本文采用 TIG 焊自动焊接方法,焊接工艺参数是焊接电流为 70 A ,焊接速度为 $300 \sim 320 \text{ mm/min}$,保护气体流量为 10 L/min 。进行外加磁场 TIG 焊的同时,利用高速摄像机拍摄和记录电弧的形态。高速摄像机的型号为 FASTCAM ultima512,并保证摄像机的中心与钨极尖端处于同一水平面上,且两者之间的距离大约为 1.2 m ,快门速度为 10^{-3} s ,同时采用滤光镜拍摄。为了保证在焊接参数相同的情况下进行电弧形态的拍摄,需要在电弧燃烧过程中进行连续拍摄,拍摄位置如图 1 所示。

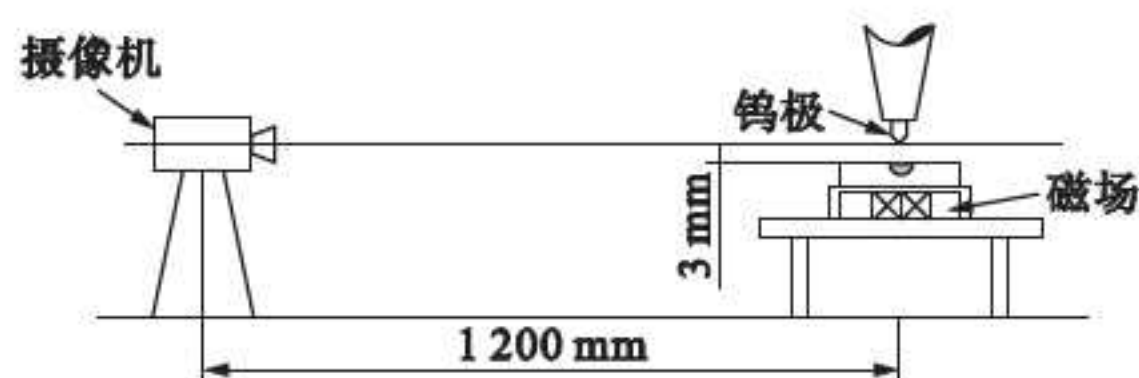


图 1 高速摄像拍摄位置示意图

Fig. 1 Schematic shooting position of high-speed camera

2 实验结果

利用高速摄像机拍摄 TIG 焊与外加磁场 TIG 焊的电弧形态。从不同磁场参数条件下的每组电弧形态照片中精选出稳定燃烧且间隔相同的 16 张图片进行对比分析。在电弧形态拍摄过程中,弧长为 3 mm ,磁场电流均为 2 A ,磁场频率分别为 0 、 10 、 20 、 50 和 100 Hz 。

图 2 为未加磁场时的电弧形态,电弧呈锥形且无旋转。此外,从图 2 还可以观察到,前几张和后几张的电弧略显“粗胖”,中间几张照片中的电弧略显“收缩”,但这并不代表电弧收缩了,而是因为在高速摄像拍摄电弧形态的过程中,高速摄像机是不动的,而电弧沿焊缝方向不停地移动,所以有时拍摄的是电弧的正面,有时拍摄的是电弧的侧面,从而呈现出不同的电弧形态。由无磁场作用下焊接电弧压力的测量结果可知,电弧压力为 0.01 kPa 。

图 3 为磁场频率为 10 Hz 时的电弧形态。与图 2 相比,电弧发生收缩且沿顺时针旋转。这是因为施加的磁场作用在电弧上产生了洛伦兹力,使电弧产生旋转。此外,与无磁场作用下电弧压力相比,此时的电弧压力增大至 0.02 kPa 。

图 4 为磁场频率为 20 Hz 时的电弧形态。与图 2、3 相比,电弧收缩程度加大且沿顺时针旋转,电弧压力增大至 0.03 kPa 。

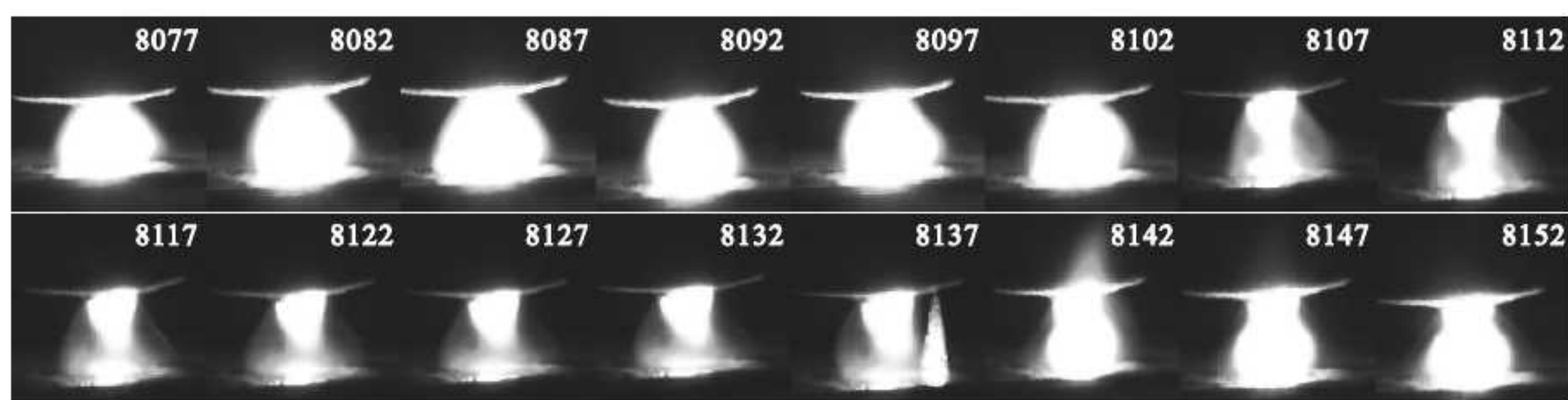


图2 无磁场的电弧形态

Fig. 2 Arc profile without magnetic field

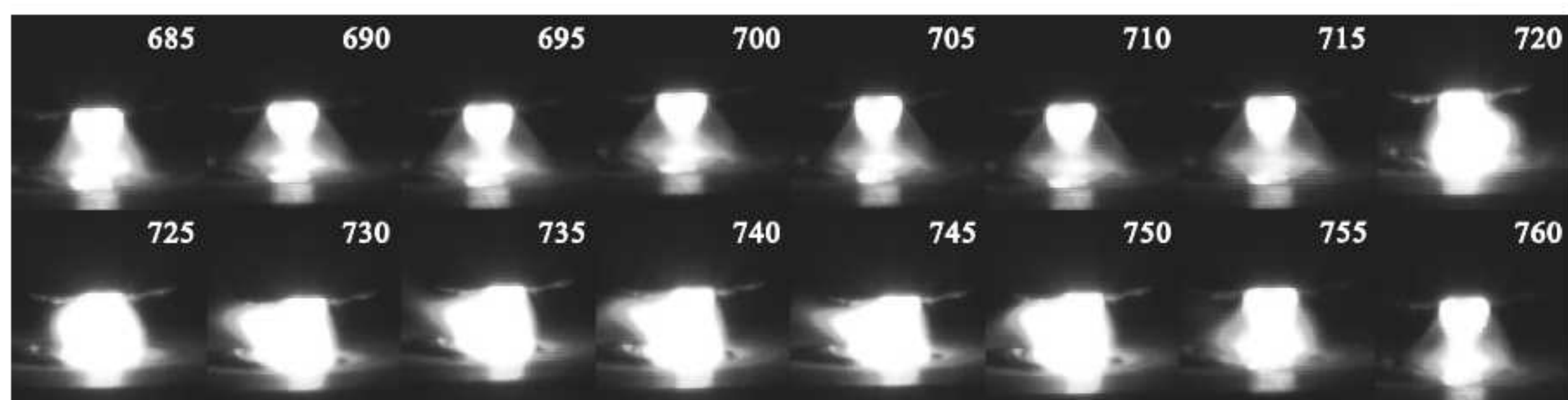


图3 磁场频率为 10 Hz 时的电弧形态

Fig. 3 Arc profile with magnetic frequency of 10 Hz

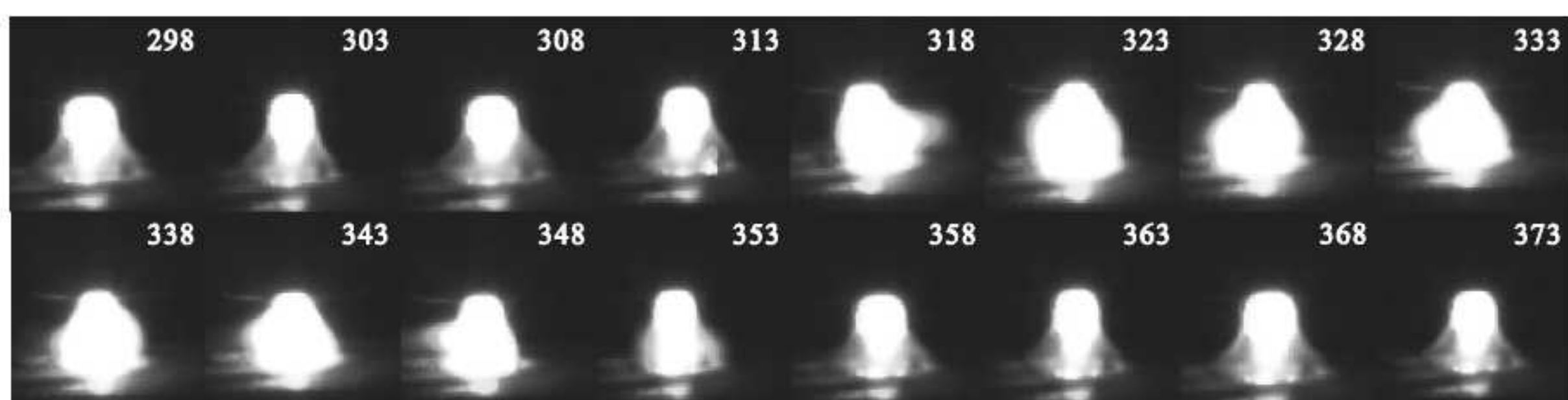


图4 磁场频率为 20 Hz 时的电弧形态

Fig. 4 Arc profile with magnetic frequency of 20 Hz

图5为磁场频率为 50 Hz 时的电弧形态,与图2~4相比,电弧收缩程度继续增大且沿顺时针旋转,电弧压力增加至 0.05 kPa。另外,由图5还可以观察到,从一个周期中挑选的 16 张照片的电弧全部呈现收缩状态且电弧稳定燃烧。

图6为磁场频率为 100 Hz 时的电弧形态,与

图2~5相比,电弧收缩程度最大且沿顺时针旋转,电弧的稳定性和挺度最好,电弧的压力最大,达到 0.14 kPa。

通过对比图2~6可以发现,在焊接电流(70 A)与磁场电流(2 A)不变的情况下,磁场频率越大,电弧的收缩程度越大,且电弧压力也不断增加。

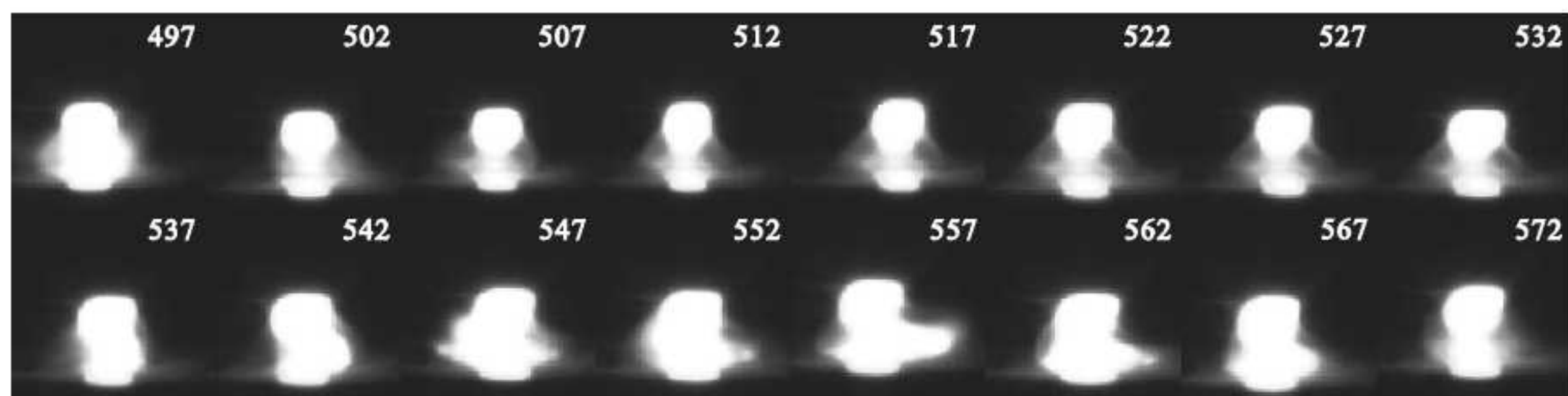


图5 磁场频率为 50 Hz 时的电弧形态

Fig. 5 Arc profile with magnetic frequency of 50 Hz

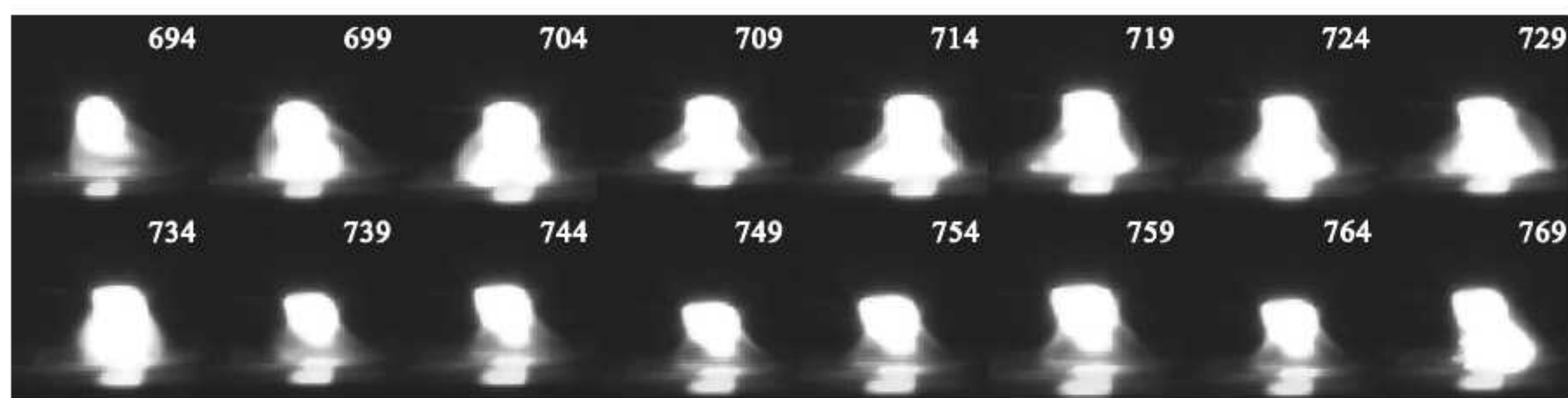


图6 磁场频率为100 Hz时的电弧形态

Fig. 6 Arc profile with magnetic frequency of 100 Hz

3 实验结果分析

焊接电弧中的带电粒子包括电子、正离子和负离子,而起关键作用的是电子和正离子。当未施加磁场时,在焊接过程时,带电粒子由于自身产生的纵向电场、横向(径向)电场以及浓度差异会产生定向运动^[47]。当施加纵向磁场后,由于电弧中的带电粒子(以电子为例进行分析,正离子的运动形式恰好与电子相反)的定向运动分量受到磁场作用而产生洛伦兹力,洛伦兹力提供向心力,所以带电粒子开始以电弧轴线为中心做半径为 r 的圆周运动。

假设实验中施加的为均强纵向磁场,而向心加速度公式、牛顿第二定律公式和洛伦兹力公式分别如式(1)~(3)所示。由于电子在磁场中做圆周运动的向心力是由电子所受的洛伦兹力提供的^[48],因此,可以根据式(2)和(3)推导出电子在磁场中做圆周运动的旋转半径计算公式,如式(4)所示。

$$a = v^2 / r \quad (1)$$

$$F = ma = mv^2 / r \quad (2)$$

$$F = qvB \quad (3)$$

$$r = mv / qB \quad (4)$$

式中: a 为加速度; r 为旋转半径; F 为洛伦兹力; m 为电子的质量; v 为电子定向运动速度分量; q 为电子的电荷量; B 为磁感应强度。

从式(4)可以看出,因为洛伦兹力不做功,所以电子的速度不变,因而电子旋转半径 r 与磁感应强度 B 成反比。因此,当磁感应强度增加时,旋转半径随之变小,弧柱收缩程度随之加大。

4 结 论

采用外加磁场的方法对AZ31B变形镁合金板材进行了TIG焊接,研究了有无磁场作用下焊

接电弧的形态变化以及变化机理,可以得到如下结论:

- 1) 当无磁场作用时,弧柱呈锥形且无旋转运动。
- 2) 在外加磁场作用下,弧柱呈收缩状态且沿顺时针旋转;随着磁场强度的增加,弧柱的收缩程度随之增加。
- 3) 在外加纵向磁场作用下,电弧的旋转半径与磁感应强度成反比。

参考文献(References):

- [1] 李德全,苏允海.直流磁场作用下高强钢焊接接头组织力学性能的演变[J].热加工工艺,2014,43(15):222-224.
(LI De-quan, SU Yun-hai. Evolution of microstructure and mechanical properties of high strength steel under DC magnetic field [J]. Hot Working Technology, 2014, 43(15): 222-224.)
- [2] 苏允海,林金梁,蒋焕文,等.磁场下镁合金A-TIG接头成形性及显微组织分析[J].焊接学报,2013,34(11):13-16.
(SU Yun-hai, LIN Jin-liang, JIANG Huan-wen, et al. Formability and microstructure of magnesium alloy welded by A-TIG under magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(11): 13-16.)
- [3] 苏允海,蒋焕文,秦昊,等.镁合金磁控焊工艺参数的优化设计[J].焊接学报,2012,33(12):84-88.
(SU Yun-hai, JIANG Huan-wen, QIN Hao, et al. Optimum design of magnesium alloy welding parameters with GTAW under magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(12): 84-88.)
- [4] Su Y H, Liu Z J, Liu D. Effect of magnetic field on microstructure and properties of magnesium alloy welded joint with GTAW [J]. Manufacturing Process Technology, 2011, 189/190/191/192/193: 3507-3511.
- [5] 张广柱,鲁海龙. AZ91 镁合金 TIG 焊接接头组织性能的磁场控制[J].热加工工艺,2013,42(1):210-211.
(ZHANG Guang-zhu, LU Hai-long. Magnetic field control of microstructure and properties of TIG welded joint of AZ91 alloy [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(1): 210-211.)
- [6] 梅强. 磁场作用下短路过渡电弧特性研究 [J]. 沈

- 阳:沈阳工业大学,2012:1-14.
(MEI Qiang. Research of short circuiting transfer arc characteristics under the action of magnetic field [J]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012:1-14.)
- [7] Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, et al. About the influence of a steady magnetic field on weld pool dynamics in partial penetration high power laser beam welding of thick aluminium parts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60 (5): 309-321.
- [8] Necib D, Bouchoucha A, Zaidi H, et al. Influence of the magnetic field on the wear behavior of a cutting tool during the turning operations [J]. World Journal of Engineering, 2011, 8 (1): 53-60.
- [9] 刘政军, 李乐成, 武小娟, 等. 磁控状态下 Fe90 堆焊层显微组织对力学性能的影响 [J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35 (1): 31-35.
(LIU Zheng-jun, LI Le-cheng, WU Xiao-juan, et al. Effect of microstructure on mechanical properties of Fe90 surfacing layer at magnetic control state [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2013, 35 (1): 31-35.)
- [10] 刘政军, 李乐成, 宗琳, 等. 磁场作用下镍基等离子弧堆焊层的组织及耐磨性能 [J]. 焊接学报, 2012, 33 (2): 53-56.
(LIU Zheng-jun, LI Le-cheng, ZONG Lin, et al. Microstructures and wear resistance of Ni-based PLA surfacing layer with introducing magnetic field [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33 (2): 53-56.)
- [11] 朱胜, 王启伟, 殷凤良, 等. 交变纵向磁场作用下 MIG 焊电弧行为研究 [J]. 材料热处理学报, 2012, 32 (11): 23-27.
(ZHU Sheng, WANG Qi-wei, YIN Feng-liang, et al. Research on MIG welding arc under alternating longitudinal magnetic field [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 32 (11): 23-27.)
- [12] 李肖丰, 李全安, 陈君, 等. 镁合金的腐蚀特性及耐蚀性研究 [J]. 材料保护, 2009, 42 (2): 37-42.
(LI Xiao-feng, LI Quan-an, CHEN Jun, et al. Process in research on corrosion characteristics and corrosion resistance of magnesium alloys [J]. Materials Protection, 2009, 42 (2): 37-42.)
- [13] 刘奋军, 王憨鹰. AZ31B 镁合金焊接技术研究现状及发展方向 [J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36 (5): 129-132.
(LIU Fen-jun, WANG Han-ying. Research status and development tendency of welding technology of AZ31B magnesium alloy [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2013, 36 (5): 129-132.)
- [14] 马壮, 张莉, 王义伟. 有色合金 A-TIG 焊研究现状 [J]. 材料导报, 2014, 28 (1): 91-94.
(MA Zhuang, ZHANG Li, WANG Yi-wei. Research status of A-TIG welding for non-ferrous alloy [J]. Materials Review, 2014, 28 (1): 91-94.)
- [15] 严铿, 何旭丹, 王清翌, 等. 铝合金活性 TIG 焊接接头性能研究 [J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2014, 28 (2): 131-134.
(YAN Keng, HE Xun-dan, WANG Qing-zhao, et al. Study of joint properties of aluminum alloy A-TIG welding [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 28 (2): 131-134.)
- [16] 刘旭东. 镁合金 A-TIG 焊中氧化物基活性剂的研究 [J]. 现代焊接, 2014, 134 (2): 24-27.
(LIU Xu-dong. Study of activating fluxes based on oxide for A-TIG welding [J]. Modern Welding, 2014, 134 (2): 24-27.)
- [17] 徐伟, 苏辉. 外加磁场下的焊接电弧运动分析 [J]. 电焊机, 2012, 42 (10): 32-34.
(XU Wei, SU Hui. Analysis of welding arc motion under external magnetic field [J]. Electric Welding Machine, 2012, 42 (10): 32-34.)
- [18] 贾利英. 电磁学中带电粒子在电磁场中的运动问题 [J]. 科学之友, 2009 (3): 125-126.
(JIA Li-ying. Charged particles movement in electromagnetic field [J]. Friend of Science Amateurs, 2009 (3): 125-126.)

(责任编辑:尹淑英 英文审校:尹淑英)