

基于 GMAW 堆焊成型的焊缝模型及搭接量研究

周祯童, 周建平, 许燕

(新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:为了研究 GMAW 堆焊的焊缝成型,采用脉冲熔化极气体保护焊工艺的一元化调节模式进行焊接试验,对三种单道焊缝模型(圆、椭圆、抛物线焊缝模型)进行理论分析和试验验证,比较各模型下的焊缝体积与总熔敷金属体积的误差,确定了最优焊缝模型。试验结果表明:圆焊缝模型的误差最小,焊接参数为电压 18.1 V、电流 100 A、焊接速度 4 mm/s 时,焊缝体积误差仅为 6.663 mm³。基于圆焊缝模型和此组焊接参数进行搭接焊模型的构建和搭接量的计算,并进行了多道搭接焊试验。试验结果表明:搭接量为 6.928 mm 时,焊缝成型良好,表面平整度较高。

关键词:脉冲熔化极气保焊;焊缝模型;搭接模型

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20202168

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)17-0135-05

Research on Weld Model and Lap Mount Based on GMAW Surfacing

ZHOU Zhentong, ZHOU Jianping, XU Yan

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: In order to study the weld formation of GMAW surfacing, the welding experiment was carried out by using the unified adjustment mode of pulse GMAW process, and the theoretical analysis and experimental verification were carried out for the three different models including circle, ellipse and parabola weld models. The errors between the weld volume and total deposited metal volume were compared, and the optimal weld model was determined. The experimental results show that the error of the circle weld model is the smallest. When the welding parameters are voltage of 18.1V, current of 100 A and welding speed of 4 mm/s, the error of the weld volume is only 6.663 mm³. Based on the circular weld model and this group of welding parameters, the lap welding model was constructed and the lap amount was calculated, and the multiple pass lap welding tests were carried out. The experimental results show that when the lap amount is 6.928 mm, the weld is well formed and the surface flatness is high.

Key words: pulse GMAW; weld model; lap model

随着“工业 4.0”和“中国制造 2025”的提出和实施,工业技术得到快速发展,三维堆焊技术也被广泛应用。堆焊是为了增大或者恢复焊件尺寸,或使待焊接表面获得具有特殊性能的熔覆金属层的焊接,是焊接领域的一个重要分支,又是表面工程中的一个主要技术手段^[1],既充分发挥金属材料优越性能、节约材料,又能延长机件使用寿命等,被广泛应用于矿山机械、冶金、石油化工、交通运输及农业机械等工业领域^[2]。用熔化极气体保护焊(gas metal arc welding,

GMAW)进行金属的逐层堆积,获得零部件的三维成型具有效率高、设备成本低、制造形式灵活以及成形性能好等优点^[3-4]。

在采用熔化极气体保护焊进行堆焊过程中,往往需要研究单道焊缝成型,适当调节焊接参数,以获得良好的焊缝成型,并为后续的多道焊接提供数据依据。多道焊过程中,通过设置合适的搭接量^[5],获得表面焊道表面平整度较好的焊缝。然而对于不同的焊缝模型,搭接量的设置也不相同,因此,在研究焊接参数对焊缝成型的影响的同时,研究并建立合适的焊缝模型,可为后续搭接模型的建立提供一个更准确的依据,对于堆焊零件完整性、平整度等具有重要意义^[6-7]。

本文中,建立了三种模型对单道焊缝成型进行研究,利用成型参数验证这三个模型,确定最佳模型,在此基础上建立搭接模型^[8],计算并确定了最佳

收稿日期:2020-08-28

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学重点项目(XJEDU2018I006)

作者简介:周祯童(1995-),女,陕西宝鸡人,硕士,主要研究方向:焊接快速成形;电话:13109954091;E-mail:729033112@qq.com

通信作者:周建平,江苏连云港人,教授,研究方向:特种加工;

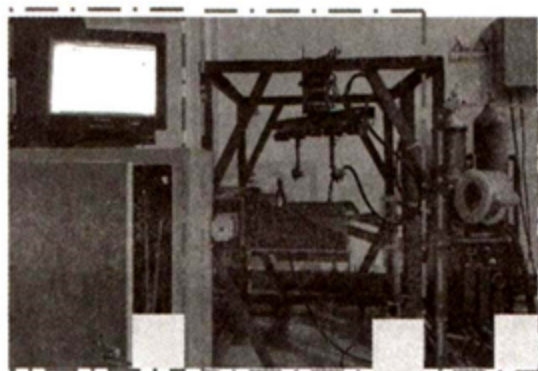
电话:13201323006;E-mail:linkzhou@163.com

搭接量,为堆焊成型零件提供更好的依据。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备

如图1所示,试验平台为新疆大学自主设计研发的基于极坐标的金属堆焊成型平台^[9],主要由焊接电源、控制系统以及机床本体三部分组成。焊接电源采用TDN脉冲MAG/MIG焊接电源,搭配SB-10C-500送丝机,保护气体为Ar;机床本体采用三维框架形式,以焊枪为执行机构的柱坐标成形装置位于框架上部,通过极轴的旋转、极径的进给带动焊枪,配合框架内部焊接平台平动完成三维空间的运动;控制系统由工控机(IPC)、运动控制卡和驱动器等构成,采用pascal语言自主开发了上位机界面,通过界面可实现焊接参数的修改、极轴的旋转与极径进给、焊接平台的进给等一系列控制。



1- 控制系统;2- 堆焊平台;3- 数字化焊接电源
图1 基于极坐标的金属三维堆焊平台

Fig.1 Three dimensional metal surfacing platform based on polar coordinates

1.2 试验材料及方法

采用半自动熔化极气体保护焊工艺进行试验。堆焊基板采用厚度为8mm的6061铝合金板,焊丝为直径1.2mm的ER5356镁铝合金焊丝。基板和焊丝的化学成分如表1所示。

表1 基板和焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of base plate and welding wire (wt%)

材料	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6061	0.70	0.30	0.10	0.20	1.0	0.10	0.2	0.022	余量
ER5356	≤ 0.25	≤ 0.4	≤ 0.1	0.05~0.20	4.5~5.5	0.05~0.20	≤ 0.10	0.06~0.20	余量

试验前用砂纸打磨去除工件表面氧化膜,然后用酒精清洗工件表面,待完全干燥后再进行焊接试验。焊接时加强保护以防止焊接区被氧化,并不断破除可能新生的氧化膜。在焊接过程中,将脉冲MIG焊机设置为一元化调节模式,即调整焊接电

流、焊接电压、焊接速度三者相匹配,确保焊接电源提供的电弧能量刚好能熔化相应的焊丝,避免由于参数改变而引起的焊缝成型质量差的问题。主要通过采集不同焊接参数下的焊缝尺寸,为建立适合的焊缝模型提供数据,其他焊接参数都保持一致,焊接参数见表2。在试验中,每条焊道长度为80mm,焊接速度恒定为4mm/s。

表2 焊接参数
Tab.2 Welding parameters

编号	电流 /A	送丝速度 / $(m \cdot min^{-1})$	电弧电压 /V	焊接速度 / $(mm \cdot s^{-1})$
1	80	4.8	17.6	4
2	90	5.3	17.7	4
3	100	5.8	18.1	4
4	110	6.4	18.5	4
5	120	7.0	18.8	4
6	130	7.4	19.2	4

2 单道焊缝模型的建立与试验验证

2.1 模型的建立

单道焊缝的横截面形状是一个弧形,本文试图通过三种曲线方程建立三种模型,并通过试验验证找到最佳的焊缝模型。

在图2~4中, h 表示焊缝余高, w 为焊缝熔宽。图2为圆-焊缝模型,由弧线 ABC 构成的区域为焊缝面积,可知:

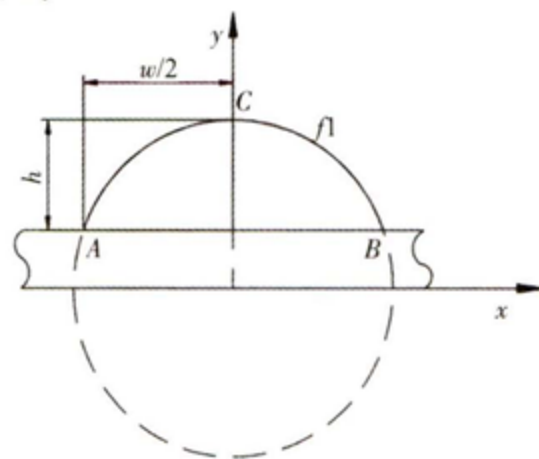


图2 圆焊缝模型
Fig.2 Circle weld model

$$R = \frac{w^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (1)$$

圆方程 $f1$ 为:

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{w^2}{8h} + \frac{h}{2} \right)^2 \quad (2)$$

焊缝区域面积 S_{ABC} :

$$S_{ABC} = 2 \int_0^{\frac{w}{2}} f1 dx \quad (3)$$

$$F1 = \sqrt{\left(\frac{w^2}{8h} + \frac{h}{2}\right)^2 - x^2} - \frac{w^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (4)$$

图3为椭圆焊缝模型。假定DE过椭圆焦点,弧线DEF构成的区域即为焊缝横截面积,椭圆标准方程f2为:

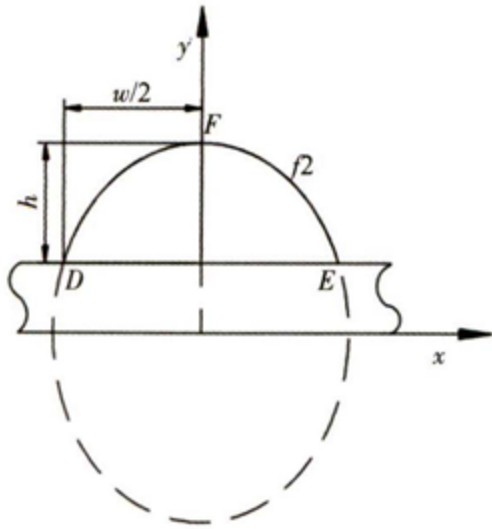


图3 椭圆焊缝模型
Fig.3 Ellipse weld model

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

由数学可得以下关系式:

$$\begin{cases} a-c=h \\ \frac{2b^2}{a}=w \\ c^2=a^2-b^2 \end{cases} \quad (6)$$

解得:

$$\begin{aligned} a^2 &= \frac{4h^4}{(4h-w)^2} \\ b^2 &= \frac{h^2w}{4h-w} \\ c &= \frac{hw-2h^2}{4h-w} \end{aligned} \quad (7)$$

则有椭圆方程f2:

$$\frac{y^2}{4h^4} + \frac{x^2}{\frac{h^2w}{4h-w}} = 1 \quad (8)$$

焊缝截面积 S_{DEF} :

$$S_{DEF} = 2 \int_0^{\frac{w}{2}} F2 dx \quad (9)$$

$$F2 = \sqrt{\frac{4h^4}{(4h-w)^2} - \frac{4h^2x^2}{w(4h-w)}} - \frac{hw-2h^2}{4h-w} \quad (10)$$

第三种模型采用抛物线为原型,如图4所示,整个焊缝截面可以看作是抛物线f3关于y坐标轴对称的曲线与x轴所围成的区域,即曲线LMN面积被视为焊缝截面积,曲线方程f3:

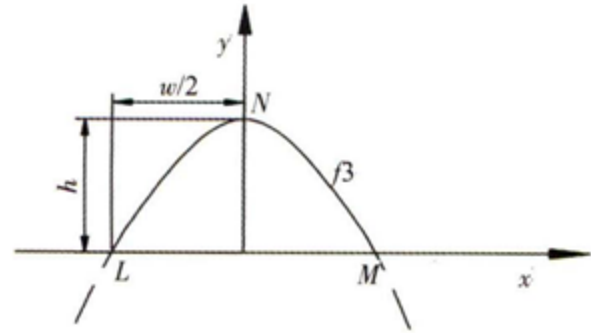


图4 抛物线焊缝模型
Fig.4 Parabola weld model

$$y = ax^2 + bx + c \quad (11)$$

带入 $(-\frac{w}{2}, 0)$, $(\frac{w}{2}, 0)$ 以及 $(0, h)$ 解的抛物线方程f3为:

$$y = \frac{-4h}{w^2}x^2 + h \quad (12)$$

则焊缝截面积可表示为:

$$S_{LMN} = 2 \int_0^{\frac{w}{2}} F3 dx \quad (13)$$

$$F3 = y = \frac{-4h}{w^2}x^2 + h \quad (14)$$

2.2 焊接试验及模型验证

不同电流下焊缝成型如图5所示。影响焊道成形尺寸和质量的因素众多,主要包括:焊接速度、焊接电流、送丝速度、电弧电压、焊丝干伸长、焊枪角度、预热温度、保护气类型及流量等。本试验中采用一元化设置,试验中只改变焊接电流,焊接速度等因素不变。从图中可以看出,每道焊道成形质量均较好,焊缝鱼鳞纹均匀美观。



图5 不同电流下焊缝成形
Fig.5 Weld forming under different currents

为了验证焊接模型建立的准确性,对焊缝成型参数进行采集,使用游标卡尺测量焊缝熔宽和余高,每组焊缝都测量5次,取平均值,记录的数据如表3所示。随着电流升高(相应地电压和送丝速度增大),

表3 不同焊接参数下试验数据
Tab.3 Experimental data under different welding parameters

编号	焊接电流 /A	送丝速度 / $(m \cdot min^{-1})$	电弧电压 /V	熔宽 /mm	余高 /mm
1	80	4.8	17.6	6.446	4.112
2	90	5.3	17.7	6.765	4.287
3	100	5.8	18.1	7.632	4.372
4	110	6.4	18.5	8.148	4.470
5	120	7.0	18.8	8.796	4.496
6	130	7.4	19.2	9.388	4.608

熔宽增加明显,而余高呈缓慢增长趋势,焊缝熔宽比增长。这是因为焊接速度不变,随送丝速度增大,熔池变大,致使熔宽显著增长。

将试验采集的熔宽余高带入焊缝模型,得到不同模型下焊缝体积;焊接所用焊丝直径为1.2mm,根据表中送丝速度可以得到成型丝材的总长度,进而得到总的熔覆金属体积,如表4所示。为了形象地表征模型的准确度,引入误差,如图6所示。

表4 三种模型的焊缝体积
Tab.4 Weld volume of the three models

电流 /A	圆-焊缝体积 / mm^3	椭圆-焊缝体积 / mm^3	抛物线-焊缝体积 / mm^3	成型丝材体积 / mm^3
80	1785.0957	1773.3797	1413.6508	1809.5674
90	1949.6351	1937.4028	1546.7496	1998.0533
100	2179.8811	2174.7294	1779.5789	2186.5481
110	2349.6857	2346.9949	1942.4832	2412.7428
120	2500.0169	2499.8503	2109.1635	2638.9375
130	2704.5756	2704.4502	2307.1949	2789.7347

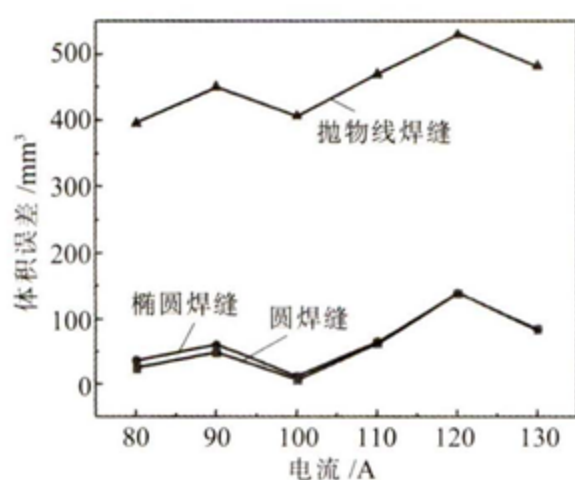


图6 模型误差折线图
Fig.6 Error line chart of the models

从表4可以看到,随着电流的增加,三个焊缝模型体积以及成型丝材体积都呈增长趋势,因为随着电流的增加,送丝速度也随之增大,焊接速度为4mm/s保持不变。圆焊缝模型与椭圆焊缝模型计算求得的焊缝体积相当,但是圆焊缝模型总体较椭圆焊

缝模型略大一些;抛物线焊缝模型计算体积明显偏小,与焊丝熔化体积相差大。从图6可以看到,圆焊缝模型误差最小,能较好地呈现焊缝形状,且焊接电流为100A的焊缝误差最小,误差为6.667 mm^3 ,焊缝成型最好,此时电弧电压为18.1V,送丝速度为5.8m/min,焊接速度为4mm/s。基于此组焊接参数与圆焊缝模型计算顺序焊道的搭接量,以利于平面堆焊成型,得到焊接质量好,表面平整度高的焊缝。

3 基于圆-焊缝模型的搭接量计算

在平面堆焊中,焊道之间合适的搭接量有利于堆焊零件的成型。一个合适的焊道模型,能够更加准确地反映焊缝形状,在此基础上建立的形状尺寸搭接模型更加准确,图7为基于圆焊缝模型建立的搭接模型, h 表示余高, w 表示熔宽, AB 为顺序焊缝中心距, CD 为顺序焊缝搭接量。

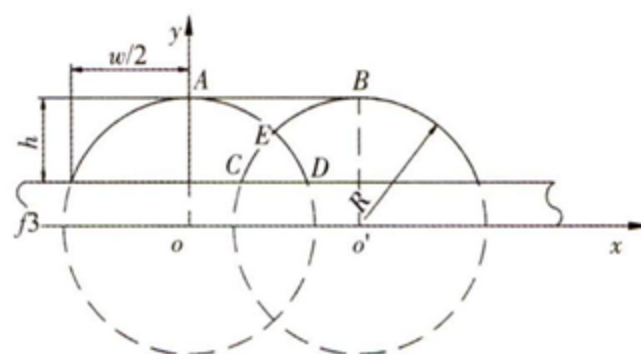


图7 基于圆焊缝模型的搭接模型
Fig.7 Lap model based on circle weld model

在多道堆焊过程中,后道焊缝会与前道焊缝存在重叠部分,如图中曲边三角形CDE区域。实际焊接过程中,熔融金属的表面张力作用使得曲边三角形ABE得到填充,在曲边三角形ABF与曲边三角形CDF的面积相等这理想状况下,焊缝表面成型良好且平整度高,即:

$$S_{ABE} = S_{CDE} \quad (15)$$

设点E坐标为 (x_E, y_E) ,则:

$$S_{ABE} = 2 \int_0^{x_E} (R - \sqrt{R^2 - x^2}) dx \quad (16)$$

$$S_{CDE} = 2 \int_{x_E}^{w/2} (\sqrt{R^2 - x^2} - (R - h)) dx \quad (17)$$

求得的E点横坐标为:

$$x_E = \frac{1}{h} \left(\frac{R^2}{2} \arcsin \frac{w}{2R} - \frac{w}{4} (R - h) \right) \quad (18)$$

从而得到两焊道中心距:

$$L_{AB} = 2x_E = \frac{2}{h} \left(\frac{R^2}{2} \arcsin \frac{w}{2R} - \frac{w}{4} (R - h) \right) \quad (19)$$

以成型较好的焊缝的焊接参数,即焊接电流

100 A, 电弧电压 18.1 V, 送丝速度 5.8 m/min, 进行搭接焊试验。此时所得单道焊缝的熔宽为 7.632 mm, 余高为 4.372 mm, 将数据带入上式得到基于圆焊缝模型的最优中心距为 $L_{AB}=6.928$ mm。

图 8 为不同搭接量下的焊缝成形。从图中可以看到: 图 8(a) 搭接不足, 波峰波谷垂直间距过大; 图 8(c) 过渡搭接, 焊缝表面不平整, 成型效果差, 不利于堆焊零件成型; 图 8(b) 焊缝成型良好, 经测量波峰与波谷之间的高度差为 0.23 mm, 对于一些精度要求不高的零件, 能较好地完成零件成型。

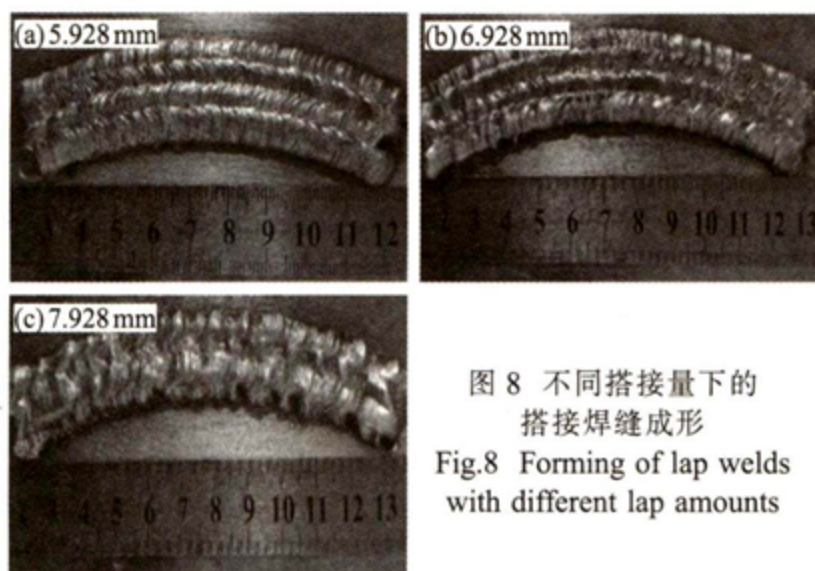


图 8 不同搭接量下的
搭接焊缝成形
Fig.8 Forming of lap welds
with different lap amounts

4 结论

(1) 采用熔化极脉冲气保焊进行堆焊, 利用一元化设置进行不同焊接电流下的焊接试验。试验结果表明: 每条焊缝成型均较好, 焊缝鱼鳞纹均匀美观。

(2) 建立了三种不同的焊缝模型, 三种模型下的焊缝体积与试验过程中熔融的焊丝金属体积相对

比, 可得圆焊缝模型较椭圆以及抛物线焊缝模型的误差小, 当焊接电流为 100 A, 焊接速度为 4 mm/s 时, 圆焊缝模型的误差最小, 表明圆-焊缝模型能更好模拟焊缝成型外貌。

(3) 基于圆-焊缝模型的顺序焊缝搭接模型, 得出理想的搭接量为 6.928 mm, 在焊接电流为 100 A, 焊接速度为 4 mm/s 时进行搭接焊试验, 结果表明焊缝表面较平整, 成型质量较好。

参考文献:

- [1] 胡得胜, 张华威, 谢春生. 5CrMnMo 锚链推杆表面堆焊层组织与性能研究[J]. 材料开发与应用, 2007(6): 9-11.
- [2] 赵玉平. 提高锤头式破碎机刀齿使用寿命的研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006.
- [3] Duda T, Raghavan L V. 3D metal printing technology [J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(29): 103-110.
- [4] 刘勇, 任香会, 常云龙, 等. 金属增材制造技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 15-19.
- [5] 孟凡军, 朱胜, 巴德玛, 等. 基于 GMAW 堆焊成形的间隔焊道搭接量模型[J]. 焊接学报, 2011(2): 69-71.
- [6] Hang Yuming, Chen Yiwei, Li Pengjiu, et al. Weld deposition based rapid prototyping a preliminary study [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135: 347-357.
- [7] 丁冬平. 基于焊接机器人的熔焊成形系统及成形规律的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [8] 来旭辉, 许燕, 周建平. 成型参数对堆焊沉积成型质量的影响规律[C]// 中国机械工程学会特种加工分会、广东工业大学. 特种加工技术智能化与精密化——第 17 届全国特种加工学术会议论文集(摘要). 中国机械工程学会特种加工分会、广东工业大学: 中国机械工程学会, 2017: 242.
- [9] 江祥胜. 基于金属粉末支撑的金属堆焊成型机研制 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017. [11]

倡导原创 拒绝抄袭

凡作者投向本刊的稿件, 请务必做到原创。本刊不接收非原创稿件。本刊对每篇作者来稿, 只要初步认可, 都要进行查重处理。对于查重不过关的稿件, 一律退稿。

由于查重软件的局限性, 个别严重抄袭的稿件没有被查出, 被本刊录用。这样的稿件一经发表, 往往被原作者举报。凡被原作者举报的稿件, 一经查实, 本刊会立即通知有关网络机构将这类稿件从网络版上撤除。

这类稿件严重危害了本刊声誉。对于这类稿件, 本刊绝不姑息, 坚决配合有关网络机构将其从网络版上取缔。

近年来, 本刊每年都有极个别已发表稿件被原作者举报。经查实后, 有关网络机构都对其做了撤稿处理。请个别作者不要抱侥幸心理, 自欺欺人。

本刊大力呼吁作者: 诚信做人, 坚持原创, 绝不抄袭。