

液态铝合金表面张力快速检测新方法 with 装置^①

李大勇, 石德全, 张宇彤

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 表面张力是液态合金的重要物性参数之一, 铝合金表面张力与其变质处理效果及充型能力等质量参数密切相关, 研究铸造铝合金表面张力快速检测方法 with 装置, 对于开发铝合金熔炼质量炉前实时评价系统具有非常重要的实际意义。介绍了一种液态铝合金表面张力快速测试的新方法 with 新装置, 新方法以固定时间内吹入被测液体的气泡个数以及气泡在生长过程中内部压差变化为信息参数, 通过回归公式求解表面张力。基于该方法研制的表面张力新型测试装置由单片机测控单元、探头及其锁紧和升降机构、供气单元等部分构成。采用新装置可在 5 s 内测得铝合金表面张力, 且具有较高的测试精度。

关键词: 液态铝合金; 表面张力; 新方法; 新装置

中图分类号: TG 23

文献标识码: A

New method and device for fast testing surface tension of liquid aluminum alloy

LI Da-yong SHI De-quan, ZHANG Yu-tong

(School of Materials Science and Engineering

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract Surface tension is one of the important physical features of liquid metal. Some quality parameters such as inoculation effect and filling ability of aluminum alloy relate to surface tension. So it is very significant to develop new method and device of fast testing surface tension of liquid metal for evaluating the quality of melting aluminum in front of the furnace. A new method of fast testing liquid aluminum was introduced. The new method takes the number of blowing bubbles into liquid metal during limited period and the pressure differential in the bubble during its growing process as information parameters, then calculates the surface tension equivalent of the melt by means of regression equation. An automatic device of testing surface tension based on the new method consists of an air compressor, a heat resistant detector, detector holder, detector driver and a testing and controlling unit. With the new method and device, surface tension of liquid cast aluminum can be tested accurately in 5 s.

Key words liquid aluminum; surface tension; new testing method; new testing device

表面张力是液态合金的重要物性参数之一。理论分析与实验均已证明, 液态铝合金表面张力与其变质处理效果、充型能力、夹杂倾向和蓄气能力均有密切关系^[1]。因此, 研究液态铝合金表面张力快速测定方法 with 装置对于研究和开发铝合金质量炉前实时评价系统具有重要的实际意义。

液体表面张力的测定方法有毛细管上升法、毛细管波法、拉筒法、气泡最大压力法、振动滴法、静滴法、悬滴法等多种方法^[2]。近年来, 有关液体表面张力检测的研究很多^[3-16], 但涉及快速检测的研究内容几乎未见报道。测定液态合金表面张力的常用方法是气泡最大压力法和静滴法, 两种方法均

① 基金项目: 国家自然科学基金-上海宝钢集团公司钢铁联合研究基金资助项目 (50174023)

收稿日期: 2004-07-20 修订日期: 2004-09-21

作者简介: 李大勇 (1958-), 男, 教授, 博士生导师, 博士。

通讯作者: 李大勇, 教授; 电话: 0451-86390010 E-mail: dyl@hrbust.edu.cn

为静力学方法,是通过测量某一状态下的某些特定数值计算表面张力的方法。采用静力学方法测定表面张力结果虽然比较准确,但测试过程比较复杂,测试周期也相对较长(至少需 1 min),一般只能用于实验室条件下金属或合金物性的研究之用。为了实现液态合金表面张力瞬间检测以便实时评价其熔炼质量参数,本文作者开展了液态合金表面张力快速检测方法与装置以及相关质量参数实时评价的研究工作,并获得了令人满意的成果^[7-8],本文介绍了铝合金表面张力快速检测的研究成果。

1 表面张力快速检测基本原理

由本文作者提出的液态合金表面张力快速测定方法被称为“气泡幅频当量法”。通过毛细管不断向合金液吹气,调节气流压力及流量,使毛细管端口能够以一定速度连续吹出气泡,计测 5 s 时间内吹出气泡的个数及毛细管内压差变化,以此为主要信息参数,求解一个当量用以表征被测液体的表面张力,故取名“气泡幅频当量法”。

如图 1(a)所示,将一只半径为 r 带有储气室的耐热毛细管垂直插入密度为 ρ 的被测液体,端口与液面距离为 h_1 。当恒压气源 p_0 引入储气室后,由于出气口被液柱封闭,储气室及毛细管内压力 p_x 逐渐升高,毛细管内液柱高度不断降低,当液柱被全部排除管外时,毛细管内压差与 h_1 深度下液体静压力相当,即 $p_x = p_1 = \rho g h_1$ 。此后,毛细管内压差继续升高并克服液体表面张力所产生的附加压力,导致气泡在管口生成、长大和脱离。根据拉普拉斯公式,球形弯曲液面因表面张力所产生的附加压力 Δp 可由公式(1)计算^[1],

$$\Delta p = 2\sigma / R \quad (1)$$

式中 Δp 为附加压力; σ 为液-气界面张力,即液体表面张力; R 为弯曲液面曲率半径。

由于气泡在形成、长大直到脱离管口的过程中,弯曲液面曲率半径是不断变化的,只有在管口形成半球形气泡即当 $R = r$ 时,弯曲液面曲率半径 R 处于最小值,此时附加压力达到最大值, $\Delta p = 2\sigma / r$ 。图 1(b)为储气室压力 p_x 随气泡不断生成、长大和脱离而变化的曲线, p_1 对应气体克服液体静压力排出管内液柱阶段, Δp 对应气体克服液体表面张力 σ 产生的附加压力,促使气泡形成、长大和脱离阶段。在理想状态下,该阶段的压力变化是一条等幅振荡曲线,每个波纹对应一个气泡,上升段代表气泡长成半球之前的压力变化,下降段代表从

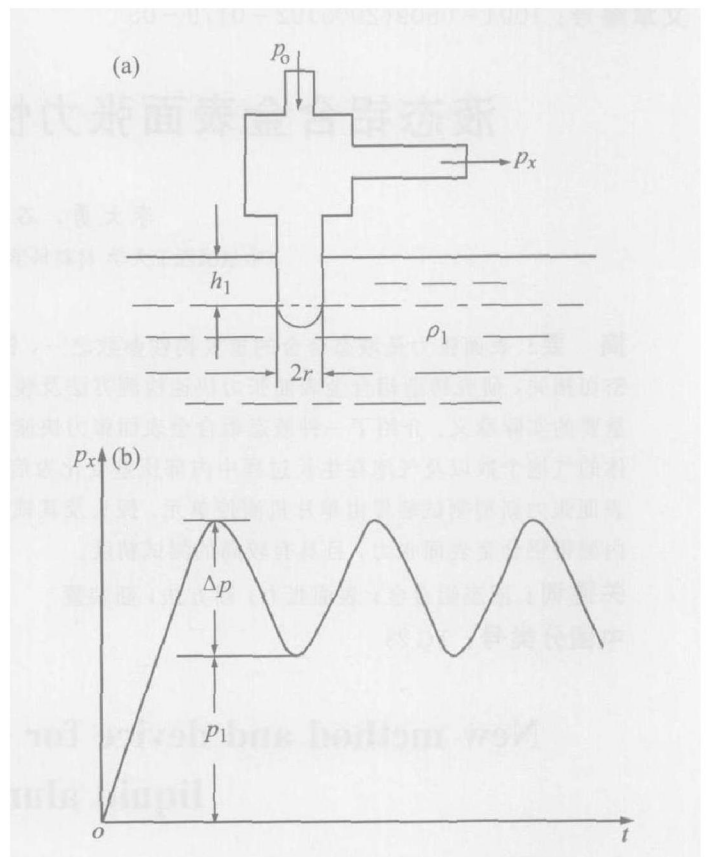


图 1 新方法测定表面张力原理图

Fig 1 Schematic drawing of testing surface tension with new method

(a) — State of capillary inserting into liquid
(b) — Amplitude vibration curve

半球长至全球并且脱离管口的压力变化。表面张力 σ 越大, Δp 值(峰谷差值)越大,在固定时间内产生的气泡个数 N 将越小。因此, Δp 和 N 可以用作表征表面张力 σ 的信息参数。除此以外还必须考虑毛细管内径的影响,因为式(1)表明,弯曲液面附加压力最大值与毛细管半径 r 直接相关。综合利用 Δp 、 N 和 r 等参数,将有可能求出一个与被测液体实际表面张力相当的量,作者称这个量为当量表面张力并记为 σ_e 。

通过多年探索与实验,作者确定的液态铝合金当量表面张力 σ_e 与信息参数 Δp 、 N 和 r 之间的关系遵循式(2)所示的形式。

$$\sigma_e = a \Delta p + bN + c(\Phi_x - \Phi_0) + d \quad (2)$$

式中 σ_e 为当量表面张力; Δp 为附加压力最大值与最小压力之差(数字量); N 为 5 s 内生成气泡的个数(数字量); Φ_x 为毛细管内径 ($\Phi_x = 2r$), mm; Φ_0 为标准毛细管内径 ($\Phi_0 = 2.0$ mm); a 、 b 、 c 、 d 为经实验确定的系、常数。

只要获得 a 、 b 、 c 、 d 系、常数值,并且能够快速准确测定 Δp 、 N 和 Φ_x 值,即可实现液态铝合金

表面张力的快速测定。

2 表面张力快速测定装置硬件及软件设计

2.1 表面张力测定装置总体构成及工作过程描述

自行研制的以“气泡幅频当量法”为基本原理的液态铝合金表面张力快速测定装置主要由耐热探头及锁紧机构、探头升降机构及驱动单元、供气单元、压差与温度传感器和单片机测控单元等构成。其中探头及其锁紧机构、供气单元以及单片机测控单元最为重要，各单元之间关系如图 2 所示。

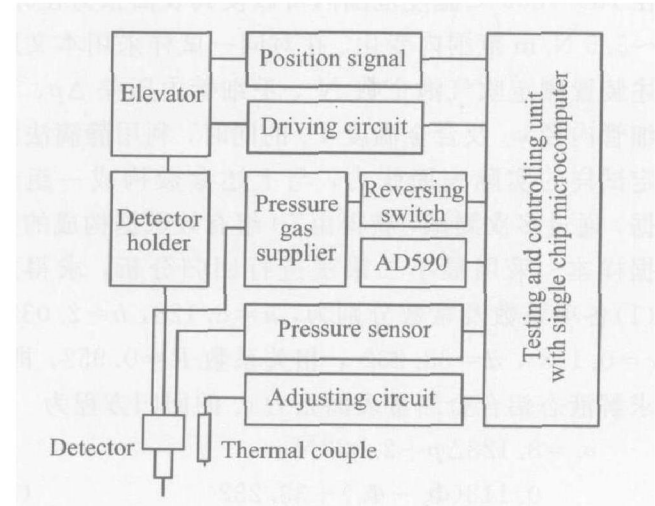


图 2 表面张力快速测定装置总体构成框图

Fig 2 Schematic drawing of device for fast testing surface tension

表面张力测定过程如下。测试装置接收测试指令(通过仪器面板相应按键输入)后，单片机测控单元令探头升降机构及热电偶下降，供气单元向探头提供大气流，在探头下降过程中计算机读取毛细管内径数据。随后切换至小气流，探头及热电偶在探头升降机构驱动下缓慢插入被测合金，毛细管内压差逐渐增加。当此压差值达到预定值时，计算机测控单元令探头机构停止下降。在此后的 5 s 内，供气单元不断以小气流向探头供气，计算机实时采集毛细管内压差数据和热电偶温度数据。时间到后探头及热电偶被自动提起，供气单元自动停止工作，计算机依据毛细管内压差数据自动识别波峰波谷差值及气泡个数，结合毛细管内径值计算出被测液态铝合金的当量表面张力，通过 LED 和微型打印机输出测试结果。

2.2 耐热探头及其锁紧机构

耐热探头及其锁紧机构如图 3 所示。耐热探头为一次性消耗器件，主要由探头本体和毛细管构成。探头本体采用耐热水泥添加适量附加物和水在模具型腔内压制成形。毛细管选用耐高温 ($1\,000\,^{\circ}\text{C}$ 以上)石英管，其直径为 $(2.0 \pm 0.2)\,\text{mm}$ ，壁厚为 $(0.5 \pm 0.05)\,\text{mm}$ ，端口做磨平处理。

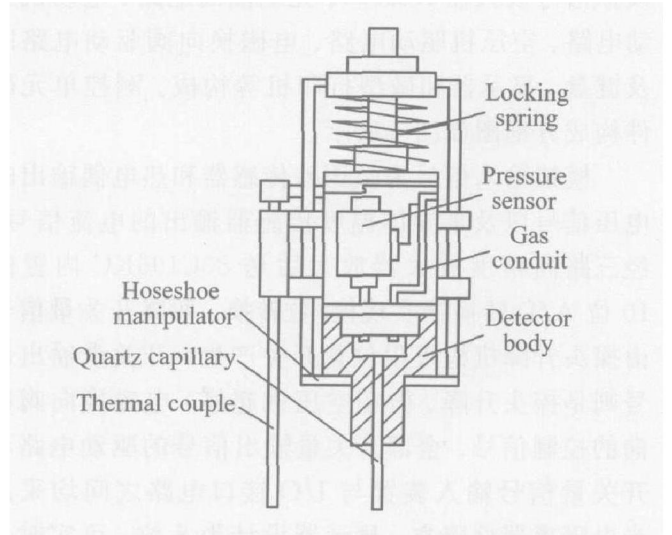


图 3 耐热探头及其锁紧机构结构简图

Fig 3 Structure of heat-resistant detector and its holder

设置探头锁紧机构的目的在于方便一次性耐热探头的快速装卸，并保证吹气期间供气回路的绝对密封性。该机构主要由锁紧机构本体、耐热密封胶圈、蹄形机械手和锁紧弹簧等部分组成。当探头及其锁紧机构在驱动机构牵引下上升接近上止点时，蹄形机械手受阻停止运动，但锁紧机构本体继续上升，锁紧弹簧被逐渐压缩，蹄形机械手与锁紧机构本体之间的距离逐渐增大，直至达到极限距离后停止上升，此时可沿水平方向顺利装卸探头。探头推入蹄形机械手后，当探头锁紧机构下降离开上止点时，锁紧弹簧弹力逐渐释放，推动蹄形机械手和锁紧机构本体向相反方向运动，直到探头被锁紧。

2.3 供气单元

供气单元的功能是向探头提供两种气源，分别用于管径测量和通过毛细管向被测液体吹出气泡。为了避免气液氧化反应对测试结果的影响，管径测量用气源由微型空压机直接提供普通压缩空气，吹气泡用气源采用惰性气体钢瓶经精密节流阀提供恒压惰性气体，供气过程中的气源切换靠电磁换向阀在计算机测控单元控制下自动完成。

2.4 计算机测控单元

为了实现表面张力快速测定过程中探头升降、空压机起停、气源切换等动作的自动控制以及压差和温度数据的采集与处理,设计了以单片计算机为核心的测控单元。该单元主要由高性能单片机 80C196KC、程序存储器 2764、数据存储器 6264、显示器及键盘接口电路 8279、I/O 接口电路 8255、模拟信号放大器 ICL760、光电隔离电路、电动机驱动电路、空压机驱动电路、电磁换向阀驱动电路以及键盘、显示器和微型打印机等构成。测控单元硬件构成方框图如图 4 所示。

模拟输入信号为微压差传感器和热电偶输出的电压信号以及半导体温度传感器输出的电流信号,经三路高精度放大器放大后送 80C196KC 内置的 10 位 A/D 转换器实现模/数转换。两路开关量信号由探头升降机构极限位置开关产生,开关量输出信号则是探头升降、微型空压机起停、电磁换向阀换向的控制信号。全部开关量输出信号的驱动电路和开关量信号输入装置与 I/O 接口电路之间均采用光电隔离器件隔离。显示器设计为 8 位,可实时显示系统状态以及毛细管内径、合金温度、毛细管内压差、气泡个数和表面张力等参数。键盘包括 0~9 数字键和时间、标定、测试、检测、复位等功能键。全部约 8 K 字节的 MCS-96 汇编语言程序和数表固化在 2764 程序存储器中,主程序包括监测程序、标定程序和检测程序等,子程序包括采样子程序、峰谷值识别子程序、气泡个数计算子程序、表面张力求解子程序、显示子程序、打印子程序及相关的数码转换子程序等。数表部分主要包括计算表面张力所用公式的常、系数以及求解合金温度所用的数字-温度对照表。全部程序设计为模块化结构,并为未来添加功能留有冗余。受篇幅限制,本文不对每个程序作逐一解释。

3 回归方程常、系数确定及测试装置的应用实验

基于新方法实现液态铝合金表面张力快速、准确测定的关键技术之一是确定本文第一节所述公式 (1) 中的系数 a 、 b 、 c 及常数 d 。为了提高回归方程的适应性,在数据样本获取实验中,应尽量扩大液态铝合金表面张力的变化范围。为此,向铝合金液中加入不同含量的表面活性元素,以获得具有不同表面张力的液态合金试样。在实验室条件下,熔配铝镁合金,分别添加 5 种不同含 Be 量的添加剂,在 700~800 °C 温度范围内可以使其表面张力在 5.0~5.5 N/m 范围内变化。在对同一试样采用本文所述装置测定吹气泡个数 N 、毛细管内压差 Δp 、毛细管内径 Φ_x 及合金温度 T_x 的同时,利用静滴法测定试样的实际表面张力,与上述参数构成一组数据,通过多次测试,获得由 50 组有效数据构成的数据样本。采用最小二乘法进行回归分析,求得式 (1) 各项系数及常数分别为, $a=8.128$, $b=2.032$, $c=0.118$, $d=33.232$, 相关系数 $R=0.952$ 即,求解液态铝合金当量表面张力 σ_e 的回归方程为

$$\sigma_e = 8.128 \Delta p + 2.032 N + 0.118 (\Phi_x - \Phi_0) + 33.232 \quad (3)$$

将各项系、常数固化于计算机测控单元的 2764 芯片中,即可用于液态铝合金表面张力的炉前快速测定。

为了考核新方法及新装置的实用性及可靠性,利用该装置在生产现场进行 20 余次实际测试,与静滴法测定结果对比,其测试平均误差为 $\pm 7 \times 10^{-2}$ N/m,测试速度比静滴法提高几十倍,适合用

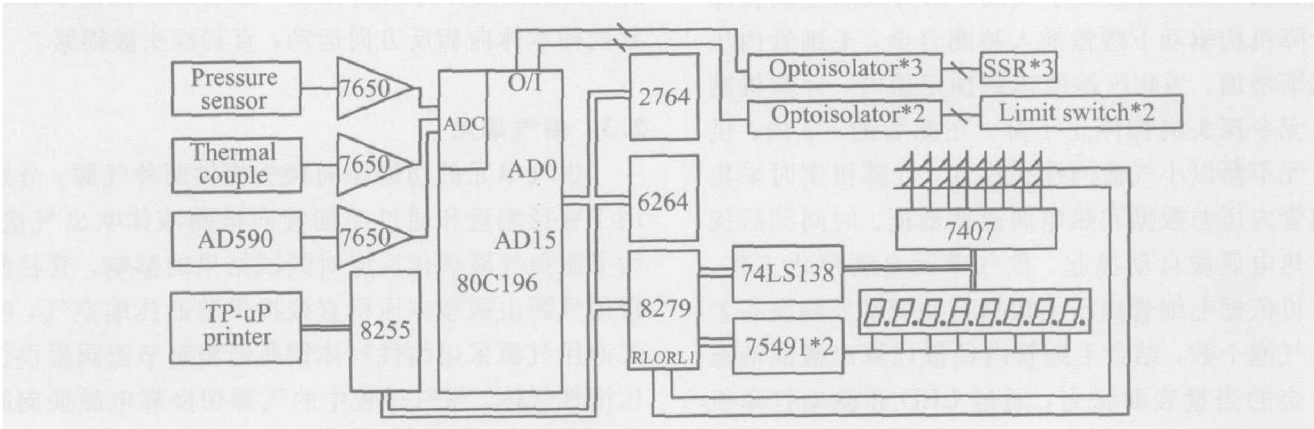


图 4 计算机测控单元硬件原理简图

Fig 4 Basic diagram of microcomputer testing and controlling unit

REFERENCES

- [1] 雷永泉. 铸造过程物理化学 [M]. 北京: 新时代出版社, 1982 126- 127.
LEI Yong-quan Physics and Chemistry in Foundry[M]. Beijing New Times Press 1982 126- 127.
- [2] 王常珍. 冶金物理化学研究方法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982 328- 349.
WANG Chang-zhen The Method of Physicochemical Analysis for Metallurgy Process[M]. Beijing Metallurgical Industry Press 1982 328- 349.
- [3] 朱述曾, 王鸿福, 何德宽, 等. 一种新型的炉前快速鉴别蠕铁的方法 [J]. 铸造生产, 1983(1): 5- 13.
ZHU Shu-zeng WANG Hong-fu HE De-kuan, et al A new method for fast identifying compacted iron in front of the furnace[J]. Foundry and Manufacture 1983(1): 5- 13.
- [4] 苏应龙, 吴国蔚, 陈桂馨, 等. 快速测定石墨形态的新方法—铁水表面张力测定法 [J]. 北京工业大学学报, 1983(4): 21- 31.
SU Ying-long WU Guo-wei CHEN Gui-xin, et al A new method for fast measuring graphite shape surface tension measure[J]. Journal of Beijing Polytechnic University 1983(4): 21- 23.
- [5] 苏应龙, 吴国蔚, 陈桂馨, 等. 液体金属表面张力对铸造工程的影响 [J]. 铸造技术, 1986(6): 23- 25.
SU Ying-long WU Guo-wei CHEN Gui-xin, et al Effect of surface tension of liquid metal on foundry engineering[J]. Foundry Technology 1986(6): 23- 25.
- [6] 杨永正, 杨 军. 液体表面特性研究的新途径 [J]. 半导体光电, 1997, 18(6): 387- 390.
YANG Yong-zheng YANG Jun The new method for studying the property of liquid surface[J]. Semiconductor Optoelectronics 1997, 18(6): 387- 390.
- [7] 李大勇, 康九州, 邱元宏. 液态金属表面张力快速电测方法 [J]. 哈尔滨科技大学学报, 1995, 19(1): 41- 43, 53.
LI Da-yong KANG Jiu-zhou QIU Yuan-hong Study on method of testing surface tension of liquid metal[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology 1995, 19(1): 41- 43, 53.
- [8] LI Da-yong ZHANG Yu-tong DU Gang A new method and device for calculating graphite shape in cast iron in front of the furnace[J]. International Journal of Cast Metal Research 1999, 11(5): 387- 390.
- [9] 陈若辉, 谷有臣, 闫 赫. 传感器在表面张力系数测量中的应用 [J]. 北华大学学报, 2001, 2(4): 364- 366.
- CHEN Ruo-hui GU You-chen YAN He Application of transducer on measuring coefficient of surface tension [J]. Journal of Beihua University 2001, 2(4): 364- 366.
- [10] 田 峰, 纪圣谋, 徐健建, 等. 微压差测量仪在表面张力测量中的应用 [J]. 实验技术与管理, 1999, 16(3): 42- 43.
TIAN Feng JI Shen-mou XU Jian-jian, et al Application of micro-pressure apparatus in measuring surface tension[J]. Experimental Technology and Management 1999, 16(3): 42- 43.
- [11] 吴宗仁, 刘兆铭. 溶液表面张力实验数据的计算机处理 [J]. 安徽大学学报, 1997, 21(4): 65- 69.
WU Zong-ren LIU Zhao-ming Study on computer processing for experimental data of the surface tension of aqueous solutions [J]. Journal of Anhui University 1997, 21(4): 65- 69.
- [12] 于军胜, 唐季安. 表(界)面张力测定方法的进展 [J]. 化学通报, 1997(11): 11- 15.
YU Jun-sheng TANG Ji-an The development of the testing methods for surface tension[J]. Chemistry Online 1997(11): 15- 17.
- [13] 张 燕, 王鸿儒, 舒晨惠. 微机控制泡式表面张力仪的研制 [J]. 广西科学, 1998, 5(2): 125- 128.
ZHANG Yan WANG Hong-ru SHU Chen-hui The development of computer based bubble technique for detecting surface tension[J]. Guangxi Science 1998, 5(2): 125- 128.
- [14] 王学军, 胡熙恩, 鲍卫民. 吊环法表面张力自动测量仪的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 1997(11): 15- 17.
WANG Xue-jun HU Xi-en BAO Wei-min Study on automatic measurement of surface tension employing the ring method [J]. Instrument Technology and Sensor 1997(11): 15- 17.
- [15] 刘慎秋. 用拉普拉斯公式测液体表面张力系数 [J]. 物理实验, 1999, 19(1): 12- 14.
LIU Shen-qiu Testing the coefficient of surface tension of liquid by Laplace formula[J]. Physics Experiment 1999, 19(1): 12- 14.
- [16] 梁燕波, 刘 芳, 秦争龙. 金属熔体表面张力计算方法的研究 [J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2000, 18(4): 50- 52.
LIANG Yan-bo LIU Fang QIN Zheng-long Study on method for calculating surface tension of molten metal [J]. Journal of Xuzhou Normal University (Natural Science), 2000, 18(4): 50- 52.

(编辑 袁赛前)