

基于比色法的纯镁及镁合金燃点测试系统

闫白 郝晓剑 周汉昌

(中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要 针对纯镁及镁合金的燃点难判定及热电偶测量破坏被测温度场分布、使用寿命短、难以小型化等问题,设计了一种新的比色测温装置。介绍了装置的基本结构及测温原理;提出了根据装置接收的两路光辐射变化的拐点来确定其起燃时间的方法,其对应温度即为燃点温度;利用光纤光谱仪测量纯镁燃烧前后的光谱作为系统波长和带宽选取的参考,计算发射率比值并将其用于温度修正;利用中温黑体炉对比色测温装置进行静态标定,获得静态灵敏度系数;最后以 CO₂ 激光器作为热源来点燃纯镁和镁合金 AZ91D,同时用比色测温装置和红外测温仪进行燃点测试。实验结果表明,纯镁和镁合金 AZ91D 测量结果的相对误差分别为 1.43% 和 1.08%。

关键词 光学器件;纯镁;镁合金;比色测温;燃点;CO₂ 激光器

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.112301

Ignition Test System of Pure Magnesium and Magnesium Alloys Based on Colorimetric Method

Yan Bai Hao Xiaojian Zhou Hanchang

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract Due to the difficulties of judgments in magnesium and its alloys' ignition points and problems of measured temperature field distribution influenced by thermocouples, short lifespan and inconvenient miniaturization, a new kind of colorimetric temperature test device is designed. The basic structure and test principle of this device are introduced. According to the inflection point of changes in two channels of received optical radiation, the burning time is confirmed and the corresponding temperature is just the ignition point. A fiber optic spectrometer is used to test the spectra before and after combustion, which provide a reference for choosing system's wavelength and bandwidth, and temperature correction is performed with calculating the ratio of emissivity. A temperature of blackbody furnace is used to do static calibration for the colorimetric test device to decide the systematic wavelength and bandwidth. Finally, a CO₂ laser is employed as the heat source to ignite pure magnesium and magnesium alloy AZ91D. The colorimetric temperature test device and infrared thermometer are used to do ignition test. The results test show that the relative error of pure magnesium and magnesium alloy AZ91D are 1.43% and 1.08%, respectively.

Key words optical devices; pure magnesium; magnesium alloys; colorimetric temperature test; ignition point; CO₂ laser

OCIS codes 230.0250; 250.0040; 250.4745

1 引言

镁合金材料比重轻,比强度和比刚度,导电及导热性好,具有良好的切削加工和塑性成形性能,在航空、航天、通信电子等行业有着广泛的应用^[1-3]。目前,国内外大多采用接触式热电偶^[4-8]作为纯镁及镁合

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-07-08; 网络出版日期: 2013-10-14

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2012-068)、太原市科技局明星专项(120247-20)

作者简介: 闫白(1989—),女,硕士研究生,主要从事光电探测理论与技术等方面的研究。

E-mail: yanbai_1989@126.com

导师简介: 郝晓剑(1969—),女,博士,教授,主要从事动态测试技术与光电仪器设计等方面的研究。

E-mail: haoxiaojian2013@126.com

金燃点温度测试的手段,破坏了其自身燃烧温度场,且存在响应速度慢、测温仪器易受侵蚀、以肉眼观察或切线法来判断燃烧点^[9-10]重复性差等不足。

为此,本文设计了一种精度高、响应快的用于纯镁及镁合金燃点测试的比色测温装置,减小了发射率变化带来的干扰,且系统体积小、成本低,既可用于镁合金冶炼和加工生产线上的实时温度监测,又可用于阻燃镁合金研究中燃点参数的快速测试。

2 比色测温装置

2.1 比色测温装置设计

比色测温装置的原理框图如图 1 所示,它由蓝宝石窗、准直透镜、透镜、两个不同波长的窄带干涉滤光片、二象限探测器、调理电路构成,用金属外壳将其封装固定。

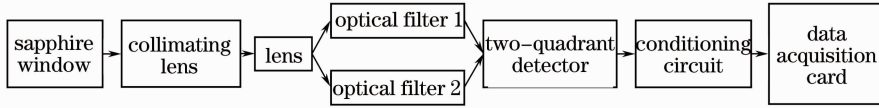


图 1 比色测温装置的原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of colorimetric temperature test device

蓝宝石窗为系统内部提供对高温、粉尘等的防护;准直透镜和透镜会聚接收热辐射能;二象限探测器由四个 PIN 光电二极管和覆铜板构成,其中左右两侧的上、下两个 PIN 管分别相连;调理电路用于光电信号转换,并将信号进行放大、滤波;利用数据采集卡与主机通信并采集数据。

2.2 比色测温原理

比色测温的原理是根据热辐射体在两个不同波段下的辐射出射度比值与温度的对应关系来确定温度^[11]。其理论基础是普朗克定律。由于光电探测器接收的两个波段范围内的辐射能量转化成了两路光电流,则有

$$R(T) = \frac{I_1(T)}{I_2(T)} = \frac{S(\lambda_1) \times \psi(\lambda_1) \times \tau(\lambda_1) \times \epsilon(\lambda_1, T) \times \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} M_1(\lambda, T) d\lambda}{S(\lambda_2) \times \psi(\lambda_2) \times \tau(\lambda_2) \times \epsilon(\lambda_2, T) \times \int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} M_2(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

式中 $M_1(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda_1 T)}$, $M_2(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda_2 T)}$ 分别是热力学温度为 T 的非黑物质的同一点在波长为 λ_1, λ_2 下的单色辐射出射度, $\Delta\lambda$ 是两滤光片的带宽, $R(T)$ 是两波段的辐射功率的比值, $S(\lambda)$ 、 $\Psi(\lambda)$ 、 $\tau(\lambda)$ 分别是与波长为 λ 时滤光光学系统的光谱透射率、二象限探测器响应、光学系统光谱透射率相关的函数。分别令

$$K = \frac{S(\lambda_1) \times \psi(\lambda_1) \times \tau(\lambda_1) \times \epsilon(\lambda_1, T)}{S(\lambda_2) \times \psi(\lambda_2) \times \tau(\lambda_2) \times \epsilon(\lambda_2, T)}, \quad (2)$$

$$R_1(T) = \frac{\int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} M_1(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} M_2(\lambda, T) d\lambda}, \quad (3)$$

则

$$R(T) = K \cdot R_1(T). \quad (4)$$

在两滤光片波长值邻近时, K 是与温度无关的装置常数,可由静态标定来确定。然后根据

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln[\epsilon(\lambda_1, T)] / [\epsilon(\lambda_2, T)]}{C_2 [(1/\lambda_1) - (1/\lambda_2)]}. \quad (5)$$

进行温度修正^[12],其中 T 是真实温度, T_c 是比色测温装置测得的温度。

2.3 发射率比值的计算

采用 Ocean Optics 公司的 USB4000 微型光纤光谱仪来测量纯镁起燃前和燃烧中的光谱,分别如图 2 和图 3 所示。

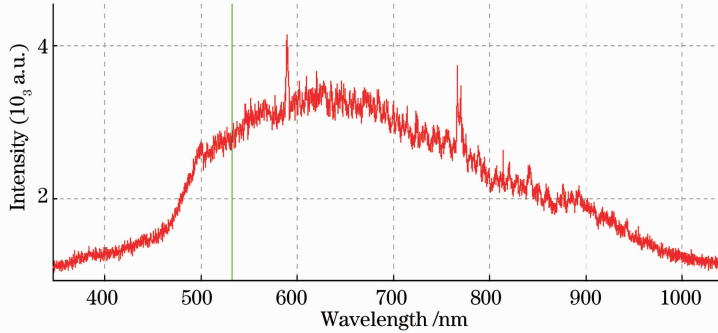


图 2 纯镁起燃前光谱

Fig. 2 Spectrum before igniting pure magnesium

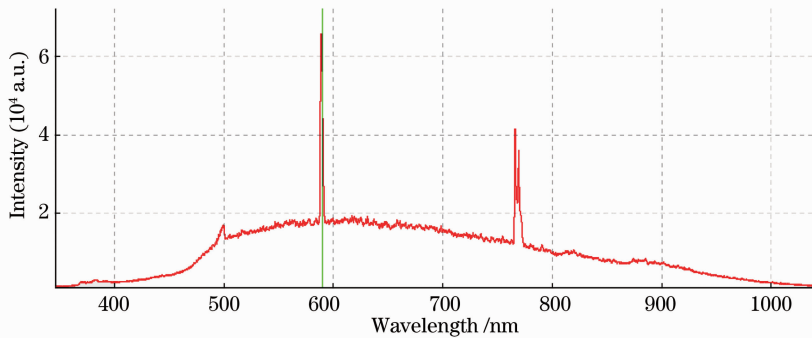


图 3 纯镁燃烧中光谱

Fig. 3 Spectrum when igniting pure magnesium

纯镁未燃烧时在 350~1000 nm 波长范围内的整体辐射强度与燃烧时相比要低很多,而燃烧中的光谱集中分布在 480~900 nm 波长范围内,其中又以 590 nm 和 767 nm 处的辐射强度最大。可以看出,纯镁燃烧点确定前后光谱辐射能量会在 590 nm 和 767 nm 附近出现爆发性的增长,显示在探测器的输出曲线上就是一个斜率最大点,为比色测温装置系统波长的选取提供了参考。

在不同滤光片波长组合中选取靠近 590 nm 和 767 nm 且对应 $R(T)-T$ 曲线线性好、斜率大的波长组合,按照灵敏度曲线平稳且数值较大的原则确定带宽,最终选定的波长组合为 650 nm 和 850 nm,带宽为 ± 30 nm。由图 2 可以计算得到在 650 nm 和 850 nm 处的光谱强度比值为 1.662。

3 静态标定

装置静态标定采用 SR20-32 型中温黑体炉,设置温度起点为 500 °C,每隔 20 °C 采集一次数据,到 800 °C 采集结束。装置的静态标定框图如图 4 所示,设中温黑体炉的温度显示值为 T ,由(3)式求出 $R_1(T)$;同时用

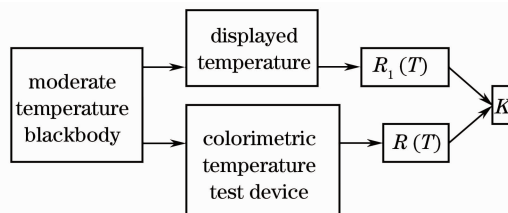


图 4 比色测温装置的静态标定框图

Fig. 4 Block diagram of static calibration of colorimetric temperature test device

比色测温装置测量它的温度,读取两路输出电压,计算对应的两路光电流,求出 $R(T)$ 值,根据(4)式求出 K 值。从中选取合适的 K 值,使 K 值修正后的比色测温装置温度测量结果与中温黑体炉显示温度的误差最小。绘出 K 值修正后的 $R(T)-T$ 曲线,在 $R(T)$ 值已知的情况下,通过查表得到对应的温度。

4 纯镁及镁合金燃点测试

4.1 实验材料及原理

实验采用的镁试样是纯镁和镁合金 AZ91D。根据 CO_2 激光器发出的激光能量集中和持续时间短的特点,将镁试样加工成 $12\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ 的薄片,使其便于引燃,其燃点测试原理框图如图 5 所示。采用 CO_2 激光器点燃纯镁或镁合金,用比色测温装置和红外测温仪(美国 IRCON 公司 Modline5 系列 5R-1410 型,以下简称 M5)采集数据,其中红外测温仪作为标准测温仪器,即以红外测温仪测温结果作为真实温度。

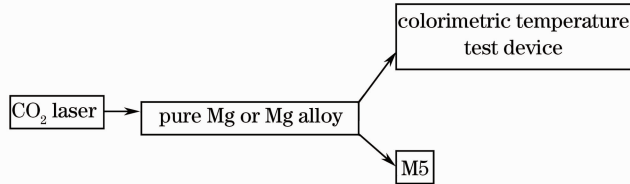


图 5 纯镁及镁合金燃点测试原理框图

Fig. 5 Functional block diagram of ignition test for pure magnesium and magnesium alloy

4.2 纯镁燃点测试结果及分析

M5 和比色测温装置的输出电压变化曲线如图 6 所示,其中 CH1 为红外测温仪的输出,CH2 和 CH3 分别对应滤光片波长为 650 nm 和 850 nm 的电压输出。

由图 6 可知,CH1 输出电压首先增长然后减至零,这是由于纯镁燃烧时的辐射能量主要集中于 $500 \sim 850\text{ nm}$ 波段,而高于 1000 nm 的波段相对很小,造成 M5 红外测温仪在 $750 \sim 1050\text{ nm}$ 波段接收的能量很大而在 $1000 \sim 1100\text{ nm}$ 波段接收的能量很小,两路信号的比值超出其设置的范围,电路输出为零。利用 TOPVIEW 软件对 CH2 输出曲线进行低通滤波,得到如图 7 所示的曲线。通过光标读数得出在 6.4748 s 时曲线的变化率开始增大,故判定这个时间点即是纯镁起燃的时间。通过对 M5 和比色测温装置在该时间点的输出来得到它们各自测得的起燃温度,如表 1 所示。

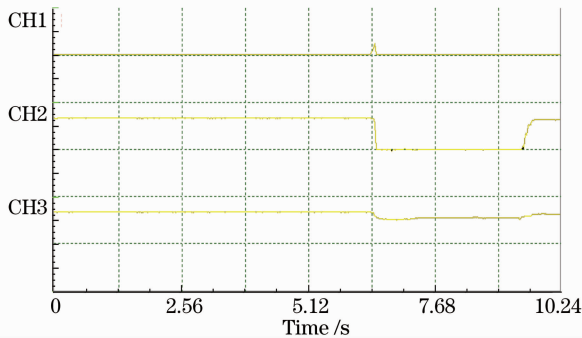


图 6 纯镁燃点测试三路输出曲线

Fig. 6 Three output curves of pure magnesium ignition test

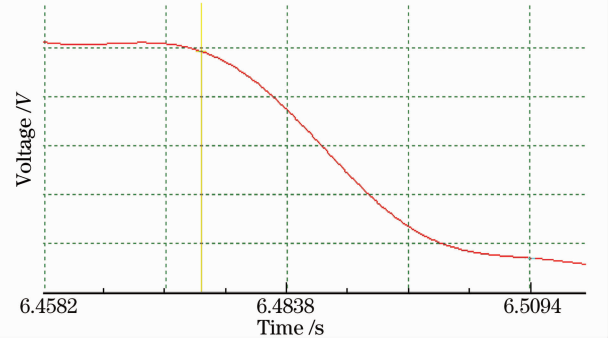


图 7 CH2 低通滤波后的波形图

Fig. 7 Waveform of CH2 channel after lowpass filtering

表 1 纯镁燃点测试结果

Table 1 Test result of pure magnesium's ignition point

CH1 /mV	CH1 / $^{\circ}\text{C}$	CH2 /V	CH3 /V	$R(T)$	$T_c /^{\circ}\text{C}$	$T /^{\circ}\text{C}$	$\epsilon / \%$
10.75	608.6	2.46	2.36	0.29	653.2	617.3	1.43

由表 1 可知,M5 和测温系统经发射率修正后的相对误差 ϵ 为 1.43% 。

4.3 镁合金燃点测试结果及分析

镁合金燃点测试选用的镁合金是 AZ91D,其成分 Al 和 Zn 质量分数分别为: 9.5% 和 1.3% ,其余部分

主要为镁元素。M5 和比色测温装置的输出电压变化曲线如图 8 所示,其中 CH3 为红外测温仪的输出,CH1 和 CH2 分别对应滤光片波长为 650 nm 和 850 nm 的电压输出。图 9 为 CH1 经低通滤波后的曲线。

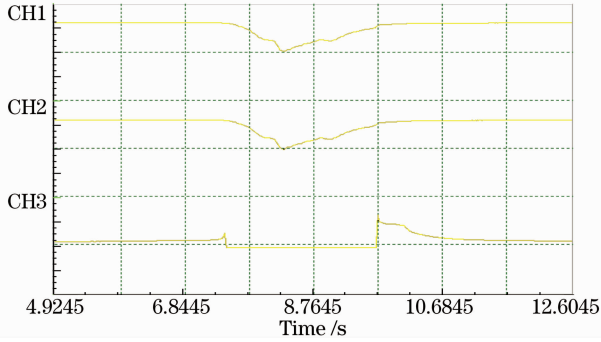


图 8 镁合金 AZ91D 燃点测试三路输出曲线

Fig. 8 Three output curves of magnesium alloy AZ91D ignition test

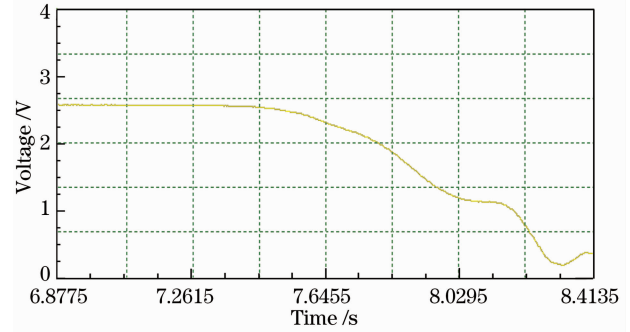


图 9 CH1 通道低通滤波后的波形图

Fig. 9 Waveform of CH1 channel after lowpass filtering

由图 9 可知,在 7.5825 s 时曲线的变化率开始增大,故判定这个时间点即是镁合金起燃的时间。镁合金 AZ91D 燃点测试结果如表 2 所示, M5 和测温系统经发射率修正后的相对误差 ϵ 为 1.08%。

表 2 镁合金 AZ91D 燃点测试结果

Table 2 Test result of magnesium alloy AZ91D ignition point

CH1 /V	CH1 /°C	CH1 /V	CH2 /V	$R(T)$	$T_c/°C$	$T/°C$	$\epsilon /%$
673.8	92.25	2.37	1.69	0.252	726.9	681.1	1.08

5 结 论

提出了一种通过纯镁及镁合金燃烧点建立前后光谱辐射强度的变化来准确判定起燃时间点,并利用比色测温法对纯镁和镁合金燃点温度进行测试的新方法。采用标定好的比色测温装置对使用 CO₂ 激光器加热的纯镁及镁合金燃点进行测试,测试结果和 M5 的测量结果分别相差 1.43% 和 1.08%。

参 考 文 献

- 1 Quan Yajie. Research status and development trends of laser welding of magnesium alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050001.
全亚杰. 镁合金激光焊的研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050001.
- 2 Ge Maozhong, Xiang Jianyun, Zhang Yongkang. Effect of laser shock processing on resistance to stress corrosion cracking of tungsten inert-gas welded AZ31B magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1203007.
葛茂忠, 项建云, 张永康. 激光冲击处理对 AZ31B 镁合金焊接件抗应力腐蚀的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1203007.
- 3 Zhao Hongjin, Zhang Yinghui, Kang Yonglin. Effect of cerium on the ignition point of AZ91D magnesium alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008, 36(2): 42-57.
赵鸿金, 张迎辉, 康永林. 稀土元素 Ce 对 AZ91D 镁合金燃点的影响[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(2): 42-57.
- 4 Zhao Biao, She Jun. Research and design of cold junction compensation in thermocouple temperature measurement[J]. J Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2013, 36(1): 50-53.
赵 标, 余 俊. 热电偶测温及冷端补偿研究与实现[J]. 上海船舶运输科学院技术学报, 2013, 36(1): 50-53.
- 5 Xu Dehui, Xiong Bin, Wang Yuelin. CMOS compatible self-aligned micromachined thermopile IR detector[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2817-2820.
徐德辉, 熊 斌, 王跃林. CMOS 兼容自对准微机械热堆红外探测器[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2817-2820.
- 6 Wang Dazhen. Development and Application Study of Two-Color Infrared Thermometer and Multichannel Thermocouple Acquisition System[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.
王大振. 多通道热电偶和双色红外测温系统的研制及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- 7 Chen Ping, Zhang Maoxun. Measurement for the flammability point of Mg and Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous alloys, 2002, (s1): 323-326.
陈 萍, 张茂勋. 镁及镁合金燃点的测试[J]. 特种铸造及有色合金, 2002, (s1): 323-326.
- 8 Wen Peng, Shinozaki Kenji, Yamamoto Motomichi. Evaluation of solidification cracking susceptibility during laser welding

- by *in-situ* observation method[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603005.
- 温 鹏, 荻崎贤二, 山本元道. 基于在线观察的激光焊接凝固热裂纹敏感性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603005.
- 9 B L Bobryshev. Ignition of magnesium and its alloys[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1988, 30(3): 219–222.
- 10 Wang Haifu, Zheng Shan, Ma Shunshan, *et al.*. Design of the experiment system for the determination of the minimum ignition temperature of dust clouds[J]. China Safety Science Journal, 2001, 11(6): 52–54.
- 王海福, 郑 珊, 马顺山, 等. 粉尘云最小点火温度测试实验系统设计[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(6): 52–54.
- 11 Zhu Jianhua, Hao Xiaojian, Zhou Hanchang. Implementation of the measurement method and system for transient high-temperature based on colorimetric temperature measurement[J]. Automation & Instrumentation, 2010, (9): 5–8.
- 朱剑华, 郝晓剑, 周汉昌. 基于比色测温的瞬态高温测试方法及系统实现[J]. 自动化与仪表, 2010, (9): 5–8.
- 12 Yuan Zundong. A new background radiation-balanced model for the size of source effect measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212002.
- 原遵东. 消除背景辐射影响的辐射源尺寸效应测量模型[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212002.