文章编号: 1006-4729(2000)04-0007-08

锌点炉炉温程序控制设定曲线的确定

朱星照[1], 杨 平[2]

(1. 上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093;
2. 上海电力学院 信息与控制技术系, 上海 200090)

摘 要: 在大量试验的基础上, 整定出两条锌点炉炉温程序控制设定温度曲线. 试验结果表明: 用这两条设定温度曲线可获得良好的控制效果. 在试验过程中还总结出一套调整设定温度曲线的规则, 这些规则可为炉温自适应控制提供最基本的调整策略.

关键词: 锌点炉; 炉温程序控制; 设定温度曲线

中图分类号: TP 206^{+}.1; TP 273^{+}.1　　文献标识码: A

引 言

根据物理学, 每一种晶体在熔化过程和凝固过程中的温度值是相同的, 而且是固定不变的. 这个固定数值只与晶体的纯度有关. 这个特性早已被温度计量界所利用. 金属锌定点炉就是利用纯晶体凝固特性生成标准温场的一种设备. 当锌的纯度达 99.999 9%时, 其凝固温度值与名义值 419.527℃相差不超过±6 mK. 这样的温度场生成特性对管式检定炉(±5℃)和检定油槽(±0.2℃)来说是可望而不可及的. 金属锌凝固点炉在标准铂电阻温度计的检定过程中已成为必不可少的设备.

传统的锌凝固点炉的温度控制设备是碳膜程序控温仪. 它的温度控制的设定曲线刻在碳膜纸上. 当碳膜控温仪开启后, 同步电机带动碳膜纸匀速转动, 探针在碳膜纸的凹槽中滑动, 随时间探测设定温度的变化, 自动控温设备使炉内温度跟随设定温度而变化.

现代的锌点炉温度控制设备已有多方面的改进: 用智能温度控制仪表可以设定多段温度设定值和持续时间, 以及执行智能监控过程; 用微机可以监测温度控制过程并随时改变温度控制仪表的设定程序.

无论是用传统的还是现代的温控设备, 关键在于合理地设定温度控制过程, 使金属锌凝固过程稳定出现并保持长久. 温度控制过程的设计归结为温度控制设定曲线的确定. 目前, 这个设定曲线是由检定人员通过多次的探索性试验整定出来的. 由于是人工经验的产物, 所以没有公开发表的规则和确立方法. 然而, 利用微机监控的自动检定系统要求这个设定曲线能用微机自动确定, 至少是确定预先参考曲线. 这就需要研究并总结设定曲线的确立过程和方法. 本文工作就

收稿日期: 2000-06-15

是根据这个需要而展开的.

1 锌点炉特性的简单分析

为了研究锌点炉的温度控制设定曲线,熟悉锌点炉的结构和特点是十分必要的.

1.1 锌点炉结构

锌点炉主要由定点芯管、均热管、加热管和保温层 4 部分组成. 锌点炉结构如图 1 所示. 定点芯管由高纯金属材料锌(纯度按重量为 99.999 9%)、高纯石墨坩埚和石英玻璃管构成. 其中锌装在坩锅里,坩锅封在石英玻璃管中. 加热管由加热丝绕在高温瓷管上构成. 保温层由高硅氧纤维、石英纤维、绝缘材料及外壳组成,主要起保温绝缘作用. 均热管由铁镍合金与铜(H62)材料制成,使炉芯温场均匀. 测量时将标准铂电阻温度计插入定点芯管容器中,当温度达到平衡时,温度计的测量值就反映定点芯管温度值.

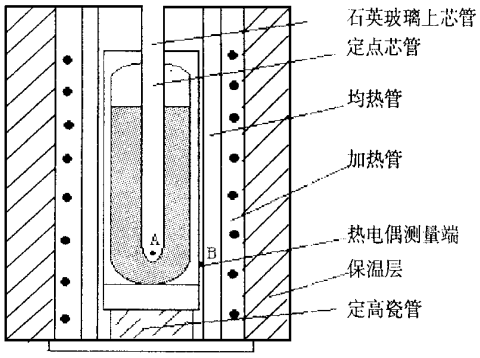


图 1 锌点炉结构示意图

根据国际温标 ITS-90 规定要求, 金属锌固态和液态的平衡温度(即凝固点)的实现,主要采取高纯金属锌(99.999 9%)材料安置在有盖的高纯细沫石墨坩埚中,坩锅外又有石英玻璃芯管全部密封等措施. 首先加热升温至金属锌完全熔化,然后缓慢降温,经过一定时间到金属锌慢慢处于固态和液态共存时,进行恒温,得到温度与时间曲线的一个平直部分,即实现金属锌凝固点的温度值.

1.2 锌的熔解热总量的估算

设定温度值的大小直接决定了锌点炉的加热功率,因此设定温度及其持续时间决定了锌点炉的供热总量. 锌要完全熔化需要一定量的熔解热. 为了设定适当的温控曲线,使炉内的锌能完全熔化,同时又不造成大量的能量浪费,有必要估算一下炉内的锌完全熔化所需要的熔解热总量. 理论上,熔解锌所需的总热量应与加热能量相当. 而实际上,加热能量一部分用来熔化锌,另一部分因锌点炉的自身散热而被耗散. 所以加热能量要比理论上锌熔解所需的总热量大. 经多次试验证明,本实验所采用的锌点炉锌的熔化时间大约为 1 h. 因此要使锌能够充分熔化,比锌点高的设定温度值至少应持续 1 h.

1.3 锌点炉散热量的估算

温坪段是锌缓慢凝固的阶段,在这个阶段要使锌凝固足够慢,即温坪持续时间足够长,就要以锌点炉的散热性能为依据来确定本阶段加热功率. 在理想情况下,一定量的锌凝固时所放出的热量被同量的固态锌完全吸收,这些锌就会完全熔化,这个过程体现为边凝固边熔化,即锌处于一个固液共存的稳定状态. 这也是我们所期望的结果. 而现实情况下,锌的凝固和熔化要受到

外界环境的影响(比如锌点炉的散热). 要最大可能的与理想情况接近,需要估算温坪段锌点炉的散热功率,以此为依据来确定此阶段的设定温度值(定义为保持温度),使加热功率和散热功率基本相等. 根据锌点炉的总表面积、试验环境温度及试验环境下空气的自然对流系数,由空气自然对流换热公式,可以计算出温坪段锌点炉的散热功率. 大量的试验表明,保持温度为412 ℃ 时,不仅加热功率与散热功率比较接近,而且在此设定温度下温坪持续时间大于 3 h.

2 锌点炉炉温控制的目标

2.1 炉温控制过程

锌点炉炉温控制过程分为 6个阶段,按定点芯管温度的变化曲线依次为: 升温段(0-t_1),熔化段(t_1-t_2),保温段(t_2-t_3),诱导段(t_3-t_4),温坪段(t_4-t_5)和锌完全凝固段(t_5-),见图 2. 图中, θ_1 为设定温度, θ_2 为均热管温度(是从图1 中 B 点测得的), θ 为定点芯管温度(是从图1中A点测得的), θ_{1max} 为设定温度最大值,f 点温度为定点芯管温度峰值 θ_{max}. 从a 点到b 点(b 点温度为锌点温度 θ_0),其温度的下降速度 v_θ 应小于0.15 ℃/min. c 点温度为$\theta_1(t_3')$,d点温度为 $\theta_1(t_4')$.

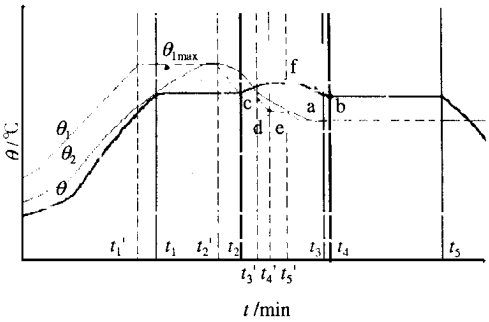


图 2 锌点炉炉温控制过程

升温段是锌熔化前的加热阶段,从开始加热到锌开始熔化时止. 对于冷炉来说,开始加热前,定点芯管温度 θ 较低,接近室温,假如大功率加热,定点芯管外围温度 θ_1就会迅速升高,短时间内定点芯管的内外温差就会很大,这样就会产生较大的应力. 为了减小应力,保护材料,延长炉子的使用寿命,对于冷炉的升温段应缓慢加热,这个缓慢加热的过程就是冷炉的预热过程. 对于热炉而言则不需要缓慢加热的预热过程.

熔化段是锌开始熔化到完全熔化的整个过程. 在这个过程中,定点芯管的温度保持恒定,稳定在锌凝固点附近.

保温段是使锌完全熔化的阶段. 是定点芯管温度缓慢上升然后又缓慢下降直至锌开始凝固的整个过程. 根据 JJG160-92《中华人民共和国国家计量检定规程》(以下简称《规程》)要求,定点锌管温度峰值 θ_{max}高于锌凝固点温度 θ_0的差Δq 应大于 2℃,即 $\Delta\theta=\theta_{max}-\theta_0>2$℃, θ_{max} 为定点芯管温度峰值, θ_0 为锌凝固点温度值. 定点锌管温度 θ 从峰值 θ_{max} 下降至锌点温度 θ_0 附近时,其温度的下降速度 v_q 应小于 0.15℃/min,即 $v_q=\left|\frac{dq}{dt}\right|<0.15$℃/min.

诱导段是当定点芯管温度停止下降并开始回升时,取出插在锌容器中的标准铂电阻温度计,插入石英管进行诱导,然后再插入标准铂电阻温度计,直到温度计的指示值再恢复到锌凝固点温度值 θ_0的一个过程.

温坪段是锌开始凝固到完全凝固的阶段,即锌的固液两相共存阶段. 在此阶段,定点芯管温度稳定在锌点温度 θ_0 附近波动. 根据《规程》要求,温坪持续时间 $T>3$ h. 锌完全凝固阶段是锌完全凝固后,定点芯管温度 θ 迅速下降的阶段.

从图 2 中可以看出设定温度值 θ_1与定点芯管温度 θ 及均热管温度 θ_2 之间存在一定的时延,比如 θ_1 在 t_1' 时已经达到最大值 θ_{1max},而 θ_2 又经过了 $\Delta t_1 = t_2' - t_1'$ 才达到最大值. 而且设定温度值 θ_1 与定点芯管温度 θ 之间也存在一定的时延. 比如 θ_1 在 t_1' 时已经达到峰值 θ_{1max}, θ_{1max} 比锌点温度高 10℃左右,而此时锌并未熔化,而是又经过了 $\Delta t_1' = t_1 - t_1'$ 才开始熔化. 因此设定温度曲线时要考虑到这个时间差.

2.2 炉温控制目标

根据《规程》和锌点炉炉温控制过程特点可制定控制目标如下:

1 Δq 的值要适当,要满足 2℃< Δq <8℃. Δq 太大,既会造成不必要的能量浪费,又会使定点芯管温度从峰值q_{max} 下降到锌点q_0 需要很长时间而浪费时间.

2 保温段,定点芯管温度q从峰值q_{max} 下降到接近锌点温度 θ_0 时的下降速度不能太快,要满足 v_q <0.15℃/ min.

3 温坪段,温坪持续时间 T >3 h($T=t_5-t_4$).

3 炉温控制设定曲线的确定

3.1 升温阶段温度设定值的确定

在这个阶段,对于冷炉来说,为防止定点芯管内外温差太大、应力过大而损坏锌点炉,刚开始不能满功率加热,要先预热一段时间后再提高加热功率. 热炉则不需要预热,可以直接大功率加热.

3.2 熔化阶段设定温度值的确定

在熔化阶段,要保证锌能完全熔化,选择适当的设定温度最大值 θ_{1max} 及其持续时间($t_2' - t_1'$)非常关键. θ_{1max} 不应太大,持续时间($t_2' - t_1'$)不应太长,否则会造成供热过多,$\Delta\theta$偏大. 同时,设定温度峰值 θ_{1max} 不应太小或持续时间($t_2' - t_1'$)不应太短,否则造成供热不足,锌不能完全熔化,从而无法判断温坪的出现时间,如图 3(a)、(b)所示.

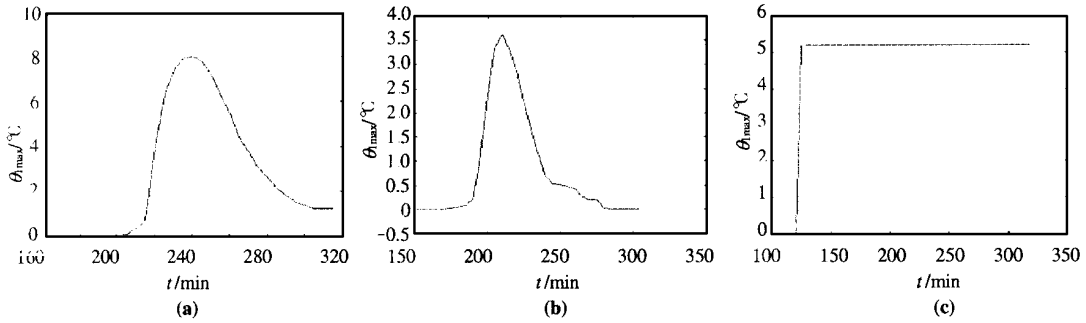


图 3 3 种设定温度最大值及持续时间下的试验结果

图 3(a)是 θ_{1max} 为 448℃,持续时间($t_2' - t_1'$)为 30 min 时 θ 的相对于凝固点的变化曲线. 根据一般标准铂电阻温度计电阻值与温度值的换算关系,由图 3(a)知 $\Delta\theta$ > 8.8℃,而《规程》要求 $\Delta\theta$为 2~ 8 ℃. 图 3(c)是 θ_{1max} 为 440℃,持续时间为 20 min 时 θ 的相对于凝固点的变化曲线. 由图 3(c)

可以看出 θ 在锌开始熔化后近似一条直线, $\Delta\theta$ 近似为零. 为了使 $\Delta\theta$ 满足《规程》要求,应适当减小图 3(a)中 θ_{1max} 的值或适当延长图 3(c)中 θ_{1max} 的持续时间,如图 3(b) 所示. 图 3(b) 是 θ_{1max} 为 440 ℃,持续时间为 30 min, θ 相对于凝固点的变化曲线. 由图 3(b) 知 $\Delta\theta = 3.8$℃,这是一个较好的试验结果.

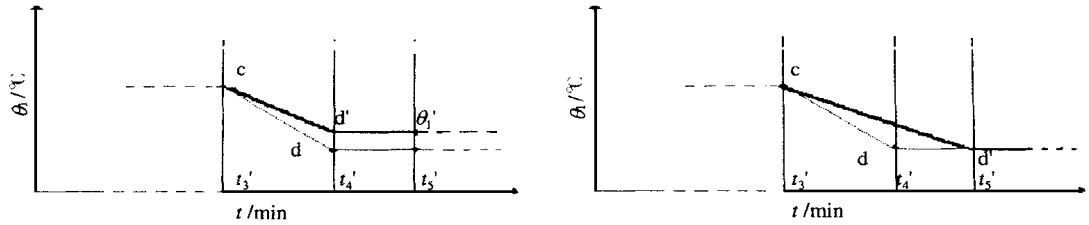
3.3 保温阶段设定温度值的确定

保温段关键要控制 θ 的下降速度 v_q,特别是当 θ 降温至锌凝固点 θ_0 附近时,要使 v_q 不大于 0.15℃/min,设定温度 θ_1 的下降速度就要适当. 如果 $v_q > 0.15$℃/min,设定温度 θ_1 应作如下调整:

1 可以适当增加保温段 θ_1 的值,比如将 d 点温度 $\theta_1(t_4')$增至 d′ 点温度 $\theta_1'(t_4')$,见图 4(a);

2 可以适当延长设定温度 θ_1 的下降时间,比如将 c 点温度 $\theta_1(t_3')$降至 d 点温度 $\theta_1(t_4')$所用时间$(t_4' - t_3')$延长为$(t_5 - t_3')$,见图 4(b);

3 也可以同时增加保温段的 θ_1 的值和延长设定温度 θ_1 的下降时间. 具体调整方法如图 4 所示. 图中虚线表示省略,细实线为原设定温度曲线,在此设定温度下, $v_q > 0.15$℃/min. 粗实线为两种调整后的曲线.



(a) 适当增加保温段 θ_1 的值　　(b) 适当延长保温段 θ_1 的下降时间

图 4 保温段设定温度 θ_1 的两种调整方法

3.4 温坪段设定温度值的确定

温坪段要选择适当的保持温度使温坪持续时间 T 足够长且稳定. 这个保持温度的选择与所采用的锌点炉的结构特性和室内环境温度有关. 在室温为 20℃左右时,保持温度取 412℃较好. 若保持温度设定过高会导致温坪出现太迟,浪费时间,这时应适当降低保持温度. 若保持温度设定偏低,则会使温坪持续时间不够长,这时应适当增加保持温度. 图 5(a)、(b)分别是两种保持温度下的试验结果. 图 5(a)是保持温度设定为 415℃的试验结果. 由图 5(a)可以看出,经

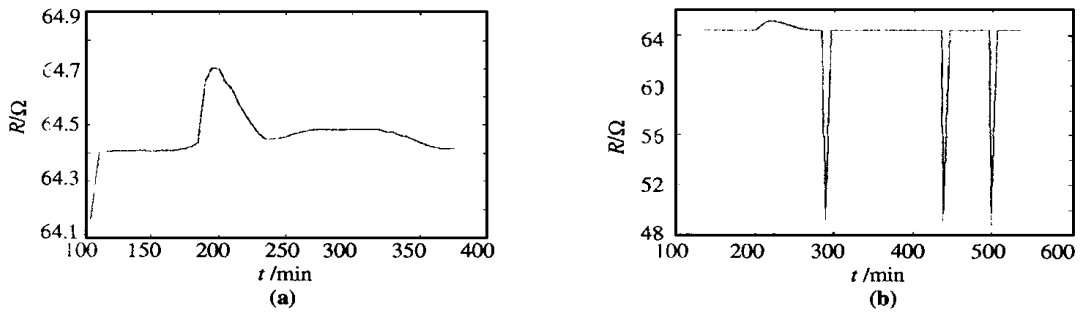


图 5 两种保持温度下的试验结果

过很长一段时间温坪才出现. 图5(b)是将保持温度降低为412℃的试验结果. 由图5(b)可以看出,温坪出现较早,持续时间足够长(T 约为 4 h).

4 最佳设定温度曲线的拟定和试验结果

在多次试验的基础上,对大量的试验数据进行分析、综合,得出两条最佳设定温度曲线.

1 冷炉设定温度值如表 1 所示.

表 1 冷炉设定温度值

程序段	q_t/℃	T/min	程序段	q_t/℃	T/min
1	25	10	7	426	20
2	100	70	8	414	20
3	430	30	9	414	20
4	441	30	10	413	30
5	441	30	11	412	1000
6	426	20	12	412	100

设定温度 θ_1 的曲线(实线)、实际温度 θ_2 的(均热管温度)变化曲线(点线)及定点芯管温度 θ 的变化曲线(点线)如图 6 所示. 图中,A—B 为升温段,B—C 为熔化段,C—D 为保温段,D—E 为诱导段,E—F 为温坪段. 在温坪段进行了两次模拟测量. 图中定点芯管温度是用标准铂电阻温度计的电阻值表示的,且为了方便与设定温度进行比较,将电阻值放大了10 倍. 根据标准铂电阻温度计的电阻值与温度值的对应关系,由图 6 可以计算得到下列参数值: $\Delta\theta\approx6$℃, $\Delta t\approx57$ min, $v_q\approx0.105$℃/min, 温坪持续时间 $T\approx250$ min. 各项指标均达到《规程》要求,而且由图 6 可以看出两次模拟测量温坪均很稳定.

2 热炉设定温度值如表 2 所示.

表 2 热炉设定温度值

程序段	q_t/℃	T/min	程序段	q_t/℃	T/min
1	150	60	7	414	20
2	430	30	8	414	30
3	440	30	9	413	30
4	440	30	10	412	1000
5	426	20	11	412	100
6	426	30			

设定温度 θ_1 的曲线(实线)、实际温度 θ_2 的(均热管温度)变化曲线(点线)及定点芯管温度 θ 的变化曲线 (点线) 如图 7 所示. 图中, A—B 为升温段, B—C 为熔化段, C—D 为保温段, D—E 为诱导段, E—F 为温坪段. 在温坪段进行了 6 次模拟测量. 计算方法同图 6, 可以得到下列参数值: $\Delta\theta\approx5.8$℃, $\Delta t\approx65$ min, $v_q\approx0.09$ ℃/ min, 温坪持续时间 $T\approx350$ min. 各项指标均达到《规程》要求,而且由图 7 可以看出 6 次模拟测量温坪都很稳定.

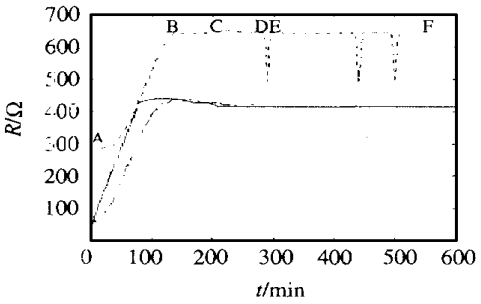


图 6 冷炉的最佳设定温度曲线及试验结果

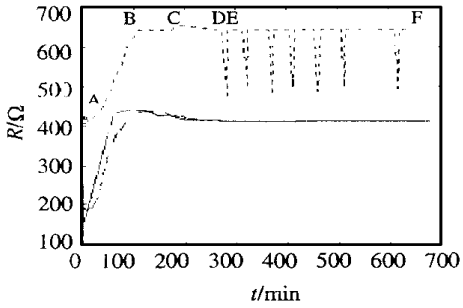


图 7 热炉的最佳设定温度曲线及试验结果

5 设定温度自适应调整策略

1 控制 $\Delta\theta$ 的策略 如果 $\Delta\theta$ 偏大, 应适当降低设定温度最大值或缩短加热时间; 如果 $\Delta\theta$ 偏小, 应适当增加设定温度最大值或延长加热时间.

2 控制 v_q 的策略 使 $v_q < 0.15$℃/min, 若 $v_q > 0.15$℃/min, 有 3 种调整方法: (1)适当增加保温段的设定温度值 $\theta_1(t_4')$; (2)适当延长保温段的时间($t_4' - t_3'$); (3)同时增加保温段的设定温值 $\theta_1(t_4')$ 和延长保温段的时间($t_4' - t_3'$).

3 控制温坪的策略 若温坪持续时间偏短, 应适当增加保持温度; 若温坪迟迟不出现, 应适当降低保持温度.

6 讨论与结论

1 在大量试验的基础上, 本文得到两条最佳的设定温度曲线(冷炉、热炉各一条), 经试验证明这两条设定温度曲线具有良好的控制效果, 使各项控制指标都符合《规程》要求. 并总结出一套行之有效的设定温度曲线的调整策略和确立方法.

2 由于具体锌点炉的特性差异, 本文的设定温度曲线和调整规则会因具体锌点炉的不同而略有不同, 需要稍作调整.

3 本文的设定温度曲线是在室温 20℃左右得到的. 如果试验条件有所改变, 则设定温度曲线应做适当调整. 如果试验室温度低于 20℃, 设定温度值 θ_1 及其相应的持续时间应适当增大; 如果试验室温度高于 20℃, 设定温度值 θ_1 及其相应的持续时间应适当减小.

参考文献:

[1] JJG 160—92 中华人民共和国国家计量检定规程[S]. 北京: 计量出版社, 1992.

[2] 姚仲鹏等. 传热学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.

[3] 马庆芳等. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.

Establishment of Temperature Curve of Zinc Freezing Point Stove with Program Control

ZHU Xing-zhao[1], YANG Ping[2]

(1. *University of Shanghai for Science and Technology, Optics and Electronics Engineering, Shanghai* 200093, *China*; 2. *Shanghai University of Electric Power, Department of Information and Control, Shanghai* 200090, *China*)

Abstract: Based on lots of experiments, two temperature curves of Zinc freezing point stove with program control are established. The test results show that the two temperature curves can control the Zinc freezing point stove well and give good results. A set of rules for adjusting the temperature curve is also summarized. These rules can be used as the most basic adjustment strategy for adaptive control of Zinc freezing point stove temperature.

Key words: Zinc freezing point stove; program control of stove temperature; set of temperature curve