

内热式电阻炉主要工作参数的匹配

陈培元 陈希达*

(精密机械工程系)

摘要 用内热式电阻炉烧结金属粉末制品, 烧结的温度、时间与电压、电流、模具的电阻和质量都有内在联系。本文通过实验和数据分析, 找出它们之间的匹配关系。

关键词 烧结, 热压, 保温, 保压

0 前言

烧结压制金属粉末零件及金刚石工具, 国外普遍采用热压工艺, 国内也开始推广。使用内热式电阻炉烧结是热压的一种。内热式电阻炉的原理是市电经变压器变成低电压大电流, 流通导电的压模。由于模具(含工件)本身有一定的电阻, 当通过电流时产生足够的热量, 由模具本身所吸收, 加热其间的工件粉末。在此同时, 上下压板会对压模轴向施压, 压缩工件粉末, 达到烧结的目的(图1)。

烧结过程如下: 先施以压制时一半的压力, 在数分钟内升温至烧结温度, 保温数分钟使温度均匀, 降温(或不降温)至较低温度, 用全压压制, 并保压数分钟, 达到烧结成型。以上的工艺参数: 压力、烧结温度、升温时间、保温时间、保压时间等, 均按被烧结件的工艺要求而定。

设计或选择某模具(含工件), 其质量和电阻值已定。在某电压下产生一定的电流。若电流太大升温太快, 不易控制烧结温度; 若电流太小升温太慢则影响生产率, 甚至达不到烧结要求。本文讨论如何选择电阻炉的电压、电流, 使能在预定的升温时间内达到工件的烧结温度, 即研究电压、电流、模具(含工件)的电阻及质量、升温时间、烧结温度六者之间的匹配。

1 试验及其结果

试验用设备是郑州三磨所生产的RYJ-C型热压电阻炉, 容量30kW, 变压器二级输出电压3.4—8V可调, 电流5kA以下。烧结铜基合金温度600—700℃上下, 升温时间一般为2—8 min。

本文1990—05—30收到。

*石材实验室陈南明、朱火明参加实验。

模具及工件的质量可称量或计算。模具及工件电阻包括材料电阻、模具间或模具与上下电极间接触面的接触电阻。前者可按电学原理计算，后者需通过测试求得。本文进行两类试验，一是求两种常用模具材料的接触电阻，二是找出在不同的电压电流下，升温温度、升温时间与模具之间的关系。根据两类数据整理分析电压 $V(V)$ ，电流 $I(A)$ ，模具及工件质量 $M(g)$ ，模具及工件电阻 $R(m\Omega)$ ，烧结温度 $T(^{\circ}C)$ ，烧结时间 $t(min)$ 的关系。由于电流流经机器上若干导电件及接头有损耗，此处电压 V 应指模具两端的电压，用表直接在上下两电极间测量。其值通常比变压器二级输出电压低1.5—2.5V。

1.1 试验1

目的：求石墨及球墨铸铁的接触电阻率 ρ_2 。

试件材料：石墨及球墨铸铁。

试件：石墨件三种，球墨铸铁件二种。圆柱形，外径 $\phi 15-25mm$ ，有或无内孔。高度6—20mm。每种十余件。

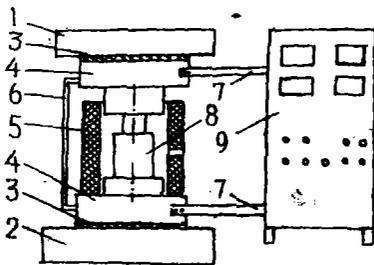


图1 内热式电阻炉

1——上压板；2——下压板；3——隔热绝缘板；4——电极；5——隔热套；6——冷却水管；7——汇流板；8——成型模具；9——电气柜

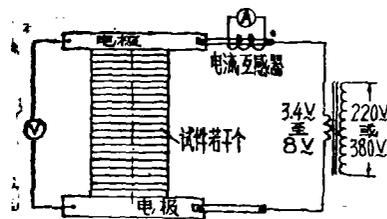


图2 试验装置简图

试验装置：见图2。上下压板对试件施压，压力为10MPa。

抄录一组石墨件试验数据如表1。

表1 试验一的石墨件数据

试件叠放个数	电压 $V(V)$	电流 $I(kA)$	电阻 $R(m\Omega)$	备注
12	5.4	0.8	6.75	试件尺寸
11	5.4	0.85	6.35	$\phi 25 \times 19.5$
10	5.4	0.9	6.00	端面积=491mm ²
9	5.4	1.03	5.20	
8	5.3	1.15	4.60	
7	5.3	1.2	4.40	
总计57			33.30	

平均每个电阻阻值: $R_{\text{平均}} = 0.584 \text{ m}\Omega$.

设材料电阻率为 $\rho_1 (\text{m}\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}})$, 接触面电阻率 $\rho_2 (\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2)$, 12 个石墨柱, 有 13 个接触面. 柱总长 $19.5 \times 12 = 234.5 \text{ mm} = 0.2345 \text{ m}$. 则 $\rho_1 \cdot 0.2345/491 + \rho_2 \cdot 13/491 = 0.0004766\rho_1 + 0.02648\rho_2 = 0.584 \times 12 = 7.008 \text{ m}\Omega$.

按文献[2], $\rho_1 = 8000 \text{ m}\Omega \cdot (\text{mm}^2/\text{m})$, 得 $\rho_2 = 120.66 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$. 从另两组石墨试件得 $\rho_2 = 111.6$ 及 125.8 , 所以 $\rho_2 (\text{平均}) = 119.35 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$.

用类似的球墨铸铁试件两种, 圆柱端面加工光洁度 1.6, 同样的试验方法, 求得球墨铸铁接触面 1.6 的接触电阻率*, $\rho_2 (\text{平均}) = 128 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2$.

1. 2 试验 2

目的: 求 $B (= VI/M)$ 、 T 、 t 的关系.

试件及材料, 试验装置: 同试验一.

抄录一组石墨件数据如表 2.

表 2 试验二的石墨件数据

试件叠放个数	V (V)	I (kA)	R (m Ω)	升温 ($^{\circ}\text{C}$)	升温时间 t (min)	备注
12	2.6	0.41	6.34	室温至	4' 06''	试件尺寸
11	2.7	0.44	6.14	600 $^{\circ}\text{C}$	2' 18''	$\phi 25 \times 19.5$
10	2.7	0.46	5.87		2' 20''	端面积
9	2.3	0.52	4.42		2' 28''	491 mm^2
8	2.25	0.54	4.17		2' 04''	每件重量
7	2.2	0.57	3.86		1' 40''	16.3g
6	2.2	0.63	3.49		1' 22''	

升温时间 t 与 VI 的积成反比, 与被加热件质量 M 成正比. 所以 VI/M 是很重要的参数, 以 B 表示, 称为单位质量瓦数.

从室温升至 600 $^{\circ}\text{C}$, 叠放 12 试件的 B 值.

$$B = \frac{VI}{M} = \frac{2.6 \times 0.41 \times 10^3}{12 \times 16.3} = 5.45 (\text{W/g})$$

同样计算得 11 件至 6 件的 B 值为: 6.625, 7.62, 7.34, 9.317, 10.99, 14.17.

绘制 $B-t$ 曲线, 见图 3 曲线 1. 从室温升至 700 $^{\circ}\text{C}$ 进行同样试验, 绘制图 3 曲线 2 (虚线). 对球墨铸铁试件也进行同样试验, 得图 3 曲线 1, 2 (实线).

2 应用步骤及举例

试验结果的具体应用步骤: (1) 热压某粉末件, 首先选择或设计模具. 若为类似金剛

*球墨铸铁材料电阻率 $\rho_1 = 600 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

石结块的小零件，应考虑并行压制及重叠压制以提高生产率。求模具（含工件）总重 M 。

(2) 计算模具（含工件）电阻 R ，应为 $m\Omega$ 级。

$R = R_1 + R_2$ ，其中， R_1 为材料电阻，按电学原理计

算； R_2 为接触面电阻。 $R_2 = \rho_2 \frac{(n+1)}{A}$ ，其中 A 为模具端

面接触面积 (mm^2)， n 为叠放的模具数。(3) 按工艺

要求确定烧结温度 ($^{\circ}\text{C}$) 及升温时间 t 。(4) 按图 3 相应

曲线得 $B = VI/M$ 值，并计算 $BM = VI$ 。(5) 根据 R, I, V, BM 诺模图 (图 4)，

选择合理的电压 V 及电流 I 。(6) 若不合适，可改变模具以变动 R 及 M ，

改变烧结时间 t 等。使 6 个参数得到合理匹配。(7) 核算电阻炉

的电压、电流及容量。

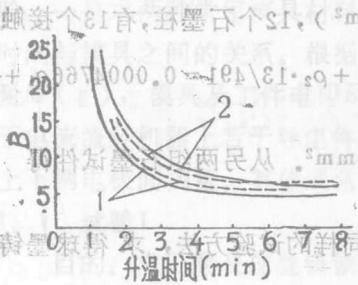


图 3 石墨和球墨铸铁的 $B-t$ 曲线
 --- 表示石墨；—— 表示球墨铸铁。
 1. 室温至 600°C ，2. 室温至 700°C

现举例进行说明。在 RYS-C 型机上压制某环形金属粉末件，使用球墨铸铁压模，叠放 10 个模同时压制。每个模及工件重 318.75g ，共重 $M = 3187.5\text{g}$ 。模具端面接触面积 $A = 1.492\text{mm}^2$ 。10 个模具总高 0.125m 。

求 $R_1 = 600 \times \frac{0.125}{1491} = 0.0503\text{m}\Omega$ (A) (V) 这个总叠数为

材料电阻	$R_1 = 0.0503\text{m}\Omega$	14.0	2.5	11
接触面电阻	$R_2 = 128 \times \frac{1}{1491} = 0.9443\text{m}\Omega$	44.0	2.5	11
总电阻	$R = R_1 + R_2 = 0.9943\text{m}\Omega$	58.0	2.5	10

若要求在 5min 左右升温至 700°C ，按图 3 (b) 曲线 2，得 $B = 5.3$ 。计算 $BM = 16894$ 。查图 4，在 $R = 0.9943\text{m}\Omega$ ， $BM = 16894$ 条件下，匹配电压电流 $V = 4.2\text{V}$ ， $I = 4.22\text{kA}$ ，如虚线所示。二级输出电压 $3.4 \sim 8\text{V}$ 分级可调，考虑损耗 $1.5 \sim 2.5\text{V}$ 后，到模具两端电压应在 4.2V

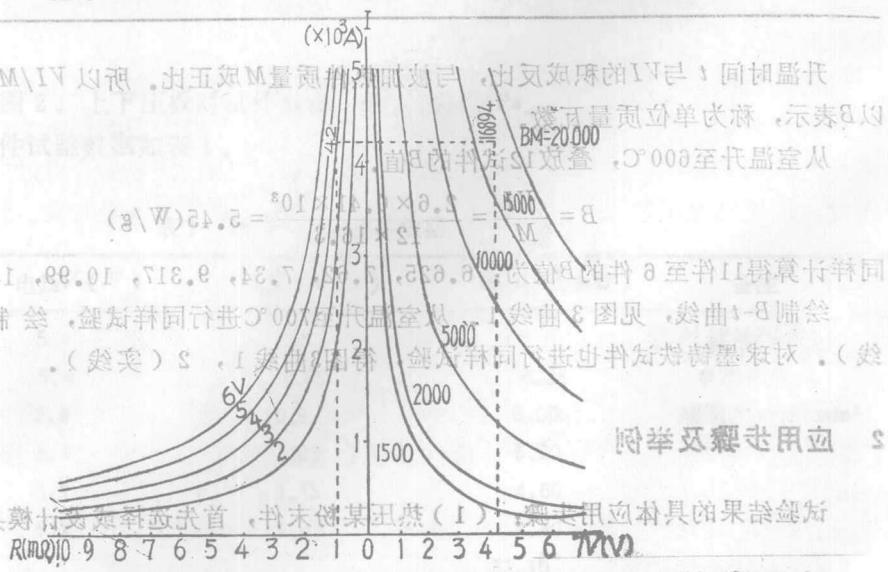


图 4 R, I, V, BM 诺模图

