

[文章编号] 1004-0609(2001)S2-0221-05

铝合金半固态感应加热的计算机模拟^①

张恒华, 许珞萍, 邵光杰
(上海大学 材料学院, 上海 200072)

[摘 要] 根据实际条件确定了感应加热线圈的计算结构和材料的有关参数, 应用改进的商业 ANSYS 软件, 采用一维轴对称模型对铝合金中频感应加热温度及其分布进行了模拟。结果表明, 在大功率和小功率的加热条件下, 模拟结果与实测结果均相当吻合。

[关键词] 铝合金; 半固态; 感应加热; 计算机模拟

[中图分类号] TG 146.2; TG 156.97; TP 311.54

[文献标识码] A

半固态金属加工(Semisolid metal forming, 简称 SSM) 是上世纪 70 年代初美国麻省理工学院(MIT)Flemings 等^[1]发展起来的一种新工艺。由于该工艺具有成形温度低、模具使用寿命长、成形零件组织致密、性能优异以及近终成形等优点, 因而受到各国科技人员的重视^[2~4], 并在汽车等工业中得到广泛应用^[5~9], 是 21 世纪材料加工先进技术之一。

半固态金属加工有两种方法: 一种是将经搅拌获得的半固态金属浆料在保持其半固态温度的条件下直接进行半固态加工, 通常被称为流变成形(Rheofforming); 另一种是先将半固态浆料冷却凝固成坯料后, 根据产品尺寸下料, 再重新加热到半固态温度, 然后进行成形加工, 通常称为触变成形(Thixoforming)。由于半固态料浆储运困难, 因此在实际工业生产中, 目前主要采用触变成形工艺。

在半固态坯料触变成形之前, 先要进行局部重熔, 重新加热, 其一是为了获得不同工艺所需要的固相体积分数, 其二是使剧烈搅拌获得的局部细小枝晶碎片逐渐长大, 并转化为球状结构。该方法具有很多优点, 如加热速度快, 加热效率高, 氧化少及作业环境好等。坯料感应加热温度及其分布是否精确和均匀将直接关系到触变成形的成败, 因此, 必须对铝合金的感应加热特性进行研究, 以便更好地控制半固态坯料二次加热时的组织形态和固相率, 推进其在半固态触变成形中的应用。目前由于金属半固态感应加热过程的复杂性, 至今还存在着不少问题, 如模拟参数难于精确确定(材料参数以及随温度变化规律多而杂)、材料感应涡流精确计

算困难、模拟精度不高等, 尤其是半固态时, 拟合结果与实测仍有较大的误差^[10~12]。

本文目的是结合实验结果, 并应用 ANSYS 商业软件, 对铝合金半固态坯料中频感应加热过程进行计算机有限元模拟, 以便确定实际感应加热的最佳工艺。

1 基本原理

1.1 感应加热基础

在通有交变电流感应圈中, 工件在交变磁场作用下将产生感应电动势(ε):

$$\varepsilon = - \frac{\delta \phi}{\delta t} = - \phi_m 2\pi f \cos(2\pi f t)$$

式中 ε 为感电动势的瞬时值, ϕ 为工件上交变电流所产生的总磁通, 与交变电流强度及工件导磁率有关, ϕ_m 为最大磁通。

材料涡流回路的阻抗 Z 为

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}$$

式中 R —涡流回路电阻, X_L —涡流回路感抗。

因为工件本身犹如一个闭合回路, 故在感应电动势作用下将产生感应电流, 通常称为涡流, 此涡流在工件里产生热量, 其值为

$$\begin{aligned} Q &= i^2 R t = \left(\frac{\varepsilon_i}{Z} \right)^2 R t \\ &= \frac{[\phi_m 2\pi f \cos(2\pi f t)]^2}{X_L^2 + R^2} R t \end{aligned}$$

式中 Q 为工件中产生的热量, ε_i 为感应电动热, t 为加热时间, f 为频率。

涡流在被加热工件中的分布可由表面至中心呈

① [收稿日期] 2000-12-12; [修订日期] 2001-06-26

[作者简介] 张恒华(1963-), 男, 博士, 副教授。

指数规律衰减, 这种电流分布不均匀的现象, 即为集肤效应。随频率升高电流集肤效应将更加显著。电流透入深度可表示为

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu f}} = 5033 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

式中 δ 为电流分布的透入深度, cm; ρ 为金属的电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$; μ 为金属的相对导磁率; f 为电流频率, Hz。

可见电流透入深度(δ)随着工件材料电阻率的增加而增加, 随工件材料的导磁率及电流频率的增加而减小, 因此感应加热时, 由于集肤效应, 坯料表面快速升温, 而中心部分则需要靠热传导作用来升温。

1.2 热传导

经推导可得到静止的均匀物体内部含有热源的各向同性物体的热传导微分方程为

$$\nabla \cdot [K \nabla T(r, t)] + Q_i(r, t) + G(r, t) = \rho_p \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}$$

式中 Q_i 为感应加热热源, 即内热源; G 为铝合金结晶潜热; K 为热导率; c_p 为比热容; ρ 为密度。

对于感应加热情况, 坯料表面与气体之间的热辐射为主要散热因素, 因而属于即第三类边界条件。对于一般物体, 其辐射换热方程为

$$Q_c = \alpha_b A (T_1^4 - T_2^4)$$

式中 Q_c 为单位时间由物体单位表面积辐射到环境气体的热流量, A 为物体表面积, T_1 , T_2 分别为物体及环境的绝对温度, α_b 为灰体的辐射常数。

2 实验

2.1 实验材料

实验材料为电磁搅拌技术制备的非枝枝晶 ZL101 铝合金棒料, 主要成分为 Si 6.9%, Mg 0.36%, 余量为 Al, 共晶温度 577 °C。棒料经机加工成尺寸为 $d 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的感应加热试样, 然后应用中频(1000 Hz)感应电源对铝合金试样进行不同工艺条件下的加热实验。

2.2 感应加热线圈的结构

为了模拟感应线圈内铝合金加热的情况, 首先要对感应线圈的结构进行分析与简化。实际感应线圈的结构如图1所示。图中各部件尺寸为: 铝合金

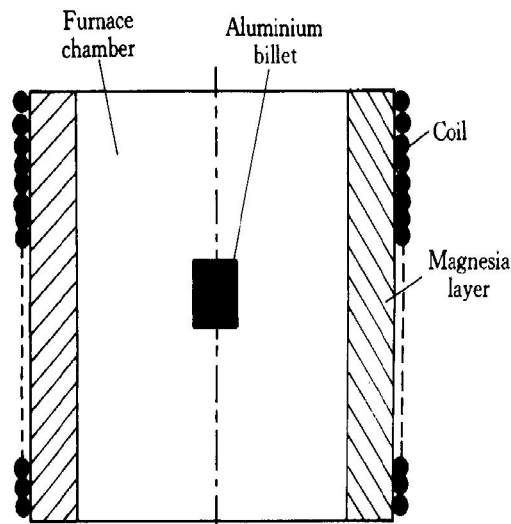


图1 感应加热装置简图

Fig. 1 Sketch of induction heating equipment

试样为尺寸为 $d 60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$; 线圈总高度为 320 mm; 线圈(圆形铜管)匝数为 21 匝; 线圈外径为 10 mm; 壁厚为 3 mm, 且为空心结构, 可以通过冷却水, 以降低线圈本身的温度。

2.3 计算机模型的建立

从图1所示结构可知本实验的感应加热模型可用一维轴对称来模拟, 因此模型只取右边一半。另外根据感应加热原理, 交流电流有集肤效应, 即感应线圈可简化为两根细长的矩形, 同时在室温和中频条件下, 铜线圈的电流透入深度约为 2 mm, 而线圈总长度为 320 mm, 因此简化线圈的尺寸为 $320 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。具体线圈及计算机的模拟结构简图如图2所示。

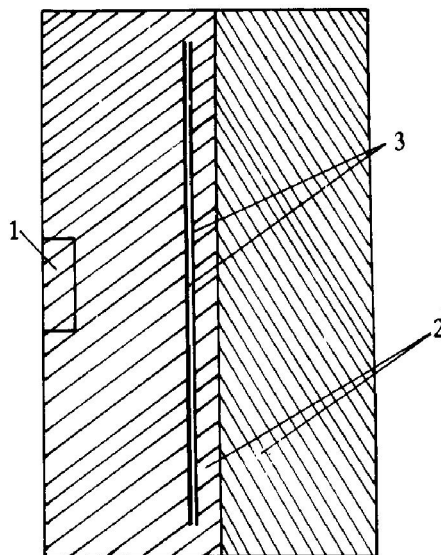


图2 感应加热的计算机模拟模型

Fig. 2 Simulation model of induction heating

1—Billet; 2—Air; 3—Coil

模拟过程中所需的 ZL101 铝合金坯料的有关参数, 经查阅文献[9, 10] 或经计算后列于表 1。

3 结果与讨论

3.1 大功率感应加热

铝合金坯料实际大功率加热条件下为: 频率(f) 1 000 Hz, 功率 60 kW, 相应的线圈电流密度计算值 $J_s = 1.6 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 。模拟时取黑度 $S = 0.057$, 时间间隔取 3 s。模拟结果与实测结果同列于表 2。

根据表 2 有关数据作出的曲线如图 3(a), (b) 所示。

3.2 小功率感应加热

铝合金坯料实际小功率加热条件为: 频率(f) 1 000 Hz, 功率 30 kW, 相应的线圈电流密度计算值 $J_s = 1.14 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 。模拟时取黑度 $S = 0.057$, 时间间隔取 3 s。模拟结果与实测结果同列于表 3 所示。

根据表 3 有关数据作出的曲线如图 4(a), (b) 所示。

从表 2 和表 3 的结果可知, 对于尺寸为 d 60 mm $\times$ 60 mm 的 ZL101 铝合金坯料(共晶温度为 577 $^{\circ}\text{C}$), 在本实验的感应加热条件(频率 1 000 Hz 及大尺寸的感应线圈)下, 当功率为 60 kW 时, 坯料加热到半固态的时间约 300 s, 而当功率为 30 kW 时, 则加热时间需要 600 s, 均具有加热速度高的特点。

同时从表还可知, 不管加热功率高与低, 坯料加热到半固态时, 其内外温差大约为 3 $^{\circ}\text{C}$, 因而可以满足铝合金半固态触变成形时对坯料温度均匀性的苛刻要求, 该结果与崔成林等^[13] 实验结果相近。

从图 3(a), (b) 及图 4(a), (b) 中可以看出, 不管是大功率加热, 还是小功率加热, 计算机模拟结果和实际情况均吻合得比较理想, 说明本文设计的计算机模拟模型以及感应线圈的简化模型是合理、

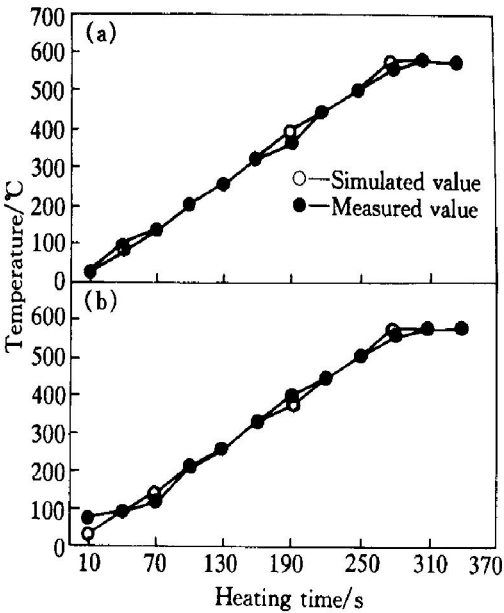


图 3 大功率感应加热实测与计算机模拟温度曲线

Fig. 3 Simulated values and measured values under induct heating with higher power
(a) —Temperature in core of billet;
(b) —Temperature in surface of billet

表 1 模拟所需的铝合金有关数据

Table 1 Data of aluminum alloy required for simulation

$w_l/\%$	$w_s/\%$	$t/^\circ\text{C}$	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$\rho_r/(10^{-8}\Omega\cdot\text{m})$	$N(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$H/10^9\text{ J}$
1	0	20.00	2 675.8	913.68	383	153.90	0.91
1	0	100.00	2 659.2	950.00	5.74	157.10	1.10
1	0	200.00	2 638.4	995.40	7.31	161.10	1.35
1	0	300.00	2 617.6	1 040.80	8.70	165.10	1.60
1	0	400.00	2 596.8	1 086.20	10.1	169.10	1.87
1	0	500.00	2 576.0	1 131.60	11.4	173.10	2.14
1	0	576.90	2 560.0	1 166.51	12.5	176.18	2.33
0.489	0.51	577.01	2 524.6	1 153.40	18.9	127.03	2.94
0.31	0.69	600.00	2 506.5	1 153.40	21.2	110.10	3.15
0.002	1	614.90	2 480.8	1 153.40	25.0	80.20	3.52
0	1	615.00	2 480.7	1 153.40	25.0	80.00	3.52
0	1	700.00	2 458.3	1 153.40	25.0	80.00	3.37

Note: w_l , w_s are content of liqui and solid in semi-solid aluminum alloy respectively; ρ_r is resistivity, z is thermal conductivity; H is enthalpy.

表 2 大功率加热模拟结果与实测结果

Table 2 Simulated results and measured results under heating condition with higher power

No.	Heating time /s	t_{sc} / °C	t_{ss} / °C	t_{mc} / °C	t_{ms} / °C
1	10	29.9	33.1	41.8	63.8
2	40	92.1	95.5	74.2	85.0
3	70	136.4	139.8	135.2	122.6
4	100	205.6	209.2	197.6	199.0
5	130	252.9	256.6	255.8	261.4
6	160	325.1	328.8	328.4	334.4
7	190	373.8	377.6	390.6	397.6
8	220	447.1	450.9	451.2	446.2
9	250	196.9	500.6	505.4	507.6
10	280	570.5	574.3	560.2	557.6
11	310	576.9	577.1	572.0	578.8
12	340	576.9	579.8	573.6	577.8

Note: t_{sc} and t_{ss} represent simulated temperature of surface and core at middle billet respectively; t_{mc} and t_{ms} represent measured temperature of surface and core at middle billet respectively.

表 3 小功率加热模拟结果与实测结果

Table 3 Simulated results and measured results under heating condition with lower power

No.	Heating time /s	t_{sc} / °C	t_{ss} / °C	t_{mc} / °C	t_{ms} / °C
1	312	287.4	289.0	230.0	230.6
2	342	314.7	316.3	369.6	281.4
3	372	341.9	343.6	311.8	331.6
4	402	369.4	371.0	349.0	347.4
5	432	397.1	398.8	381.4	379.2
6	462	424.4	426.0	419.0	393.6
7	492	451.7	463.4	448.0	449.4
8	522	479.3	480.9	480.2	483.0
9	552	507.8	509.5	507.4	512.6
10	582	538.7	540.0	535.8	526.4
11	612	569.7	571.4	562.4	565.2
12	642	576.9	576.9	576.4	567.8
13	671	576.9	576.9	575.8	570.4
14	702	576.9	576.9	577.8	570.4
15	732	576.9	576.9	578.2	580.8
16	761	576.9	577.6	574.8	579.4
17	791	576.9	579.3	576.9	576.9

Note: t_{sc} and t_{ss} represent simulated temperature of surface and core at middle billet respectively; t_{mc} and t_{ms} represent measured temperature of surface and core at middle billet respectively.

有效的。

模拟结果与实测结果还存在的微小差别主要为: 1) 实测时, 嵌入试样内部的热电偶在电磁力的

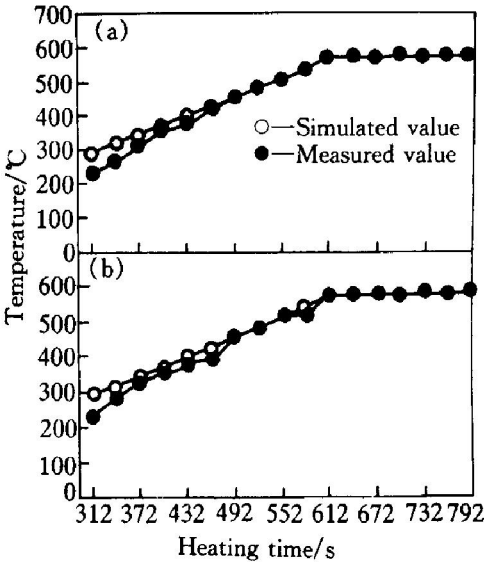


图 4 小功率感应加热实测与计算机模拟温度曲线

Fig. 4 Temperature curves simulated and measured from induction heating with lower power

(a) —Temperature in core of billet;
(b) —Temperature in surface of billet

作用下发生震动, 从而影响了测量精度; 2) 计算机模拟时, 由于所需的有关参数来源渠道多, 数值差异较大, 尤其是铝合金半固态辐射散热黑度系数难于精确确定, 这些因素均给理论模拟结果带来一定的误差; 3) 感应线的简化及加热坯料有限单元的划分(即网格划分的粗细)等需要进一步细化; 4) 感应加热线圈的计算还有一定的误差。

5 结论

- 1) 中频感应加热方法可以满足铝合金半固态触变成形技术对二次重熔加热温度及其分布的苛刻要求。
- 2) 经过对拟合参数的精确确定及对感应加热线圈的合理简化, 应用 ANASYS 商业软件模拟感应加热过程, 可以得到与实验相吻合的结果。

[REFERENCES]

[1] Spencer D B, Mehrabian R, Flemings M C. Rheological behaviour of Sr-15pct Pb in the crystallization range [J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3(7): 1925- 1932.
[2] Flemings M C. Behaviour of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transactions, 1991, 22A (5) :

- 957– 981.
- [3] JIANG Peng(蒋 鹏), HE Xiaomao(贺小毛). 半固态金属成形技术的研究概况[J]. *Journal of Plasticity Engineering* (塑性工程学报), 1998, 5(3): 1– 7.
- [4] ZHANG Kui(张 奎), ZHANG Yongzhong(张永忠), LIU Guojun(刘国钧), et al. 半固态 AlSi7Mg 合金二次加热工艺与组织转变机制[J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 1999, 35(2): 127– 130.
- [5] MAO Weimin(毛卫民), ZHAO Aimin(赵爱民), ZHONG Xueyou(钟雪友). 半固态金属成形应用的新近进展与前景展望[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys* (特种铸造和有色合金), 1998, (6): 33– 36.
- [6] Garar M. Aluminum semisolid processing from the billet to the finished part [A]. 5th International Conf on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Colorado: Colorado School of Mines, 1998: 199– 213.
- [7] TANG Jinglin(唐靖林), ZENG Daben(曾大本). 半固态加工技术的发展和现状[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering* (兵器材料科学与工程), 1998, 21(3): 56– 65.
- [8] Kenneth P Y. Recent advances in semisolid metal (SSM) cast aluminum and magnesium composites [A]. 4th International Conf on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Sheffield, England: The University of Sheffield Press, 1996. 229– 233.
- [9] ZHANG Kui(张 奎), LIU Guojun(刘国钧), ZHANG Jingxin(张景新), et al. 铝合金半固态加工技术应用[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2000, 10(S1): 135– 140.
- [10] Nagy E K, Raphael C, Willem L. A mathematical model for induction heating of thixoformable aluminum billets [J]. *Light Metals*, 1998: 1097– 1102.
- [11] Kapranos P, Gibson R C, Kirkwood D H, et al. Induction heating and partial melting of high melting point thixoformable alloys [A]. 4th International Conf on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. England, Sheffield: The University of Sheffield, 1996: 148– 153.
- [12] Kirkwood D H. The numerical modeling of heating, melting and slurry flow for semisolid processing of alloys: a review [A]. 5th International Conf on Semisolid Processing of Alloys and Composites [C]. Colorado: Colorado School of Mines, 1998. 78.
- [13] CUI Chenglin(崔成林). 感应加热对半固态 AlSi7Mg 合金连铸坯温度场和组织的影响[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2000, 10(6): 809– 814.

Simulation on induction heating of aluminum billets in semi-solid

ZHANG Heng-hua, XU Luo-ping, SHAO Guang-jie

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University,
Shanghai 200072, P. R. China)

[Abstract] The simplified layout of the induction coil and all the required parameters were determined reasonably according to the experimental conditions. The temperature and its distribution in aluminum billets were simulated by modified ANSYS software with one dimension axis symmetrical model. It is shown that the results of simulation can be compared with the measured values very well under large and small power heating conditions.

[Key words] aluminum alloy; semi-solid; induct heating; computer simulation

(编辑 龙怀中)