

回收 316L 金属粉末电磁感应熔化过程数值模拟

赵 烁 朱仕彬 牛 乐 郝芳满 王冰杉
(河北工程大学材料科学与工程学院)

摘 要 以回收 316L 不锈钢粉末为例,基于 COMSOL Multiphysics 软件模拟了通电线圈感应加热并熔化 316L 粉末;通过改变金属粉末的空隙率、加热氛围、粒度和功率等参数,探究增材制造回收金属粉末形态以及加热方式对粉末熔化速率和熔化过程的影响。由模拟结果可得出较为适宜的加热条件,即使用加热频率高、线圈数量多、线圈与坩埚距离最近的真空感应炉,当 316L 粉末制备直径为 0.005 m 的致密球体时,电磁感应加热效率更高且成本最低。

关键词 金属粉末;316L 不锈钢粉末;COMSOL Multiphysics;感应加热;粉末熔化

中图分类号 TG142;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Electromagnetic Induction Melting Process of Recycled 316L Metal Powders

Zhao Shuo, Zhu Shibin, Niu Le, Hao Fangman, Wang Bingshan
(College of Materials Science and Technology, Hebei University of Engineering)

Abstract: Taking recycling 316L stainless steel powder as an example, COMSOL Multiphysics finite element software was adopted to simulate the induction heating and melting of 316L powder by energized coils. By changing the porosity, heating atmosphere, particle size and power of the metal powder, effects of morphology of metal powder recycled by additive manufacturing and the heating method on the powder melting rate and melting process were explored. The simulation results reveal that the relatively suitable heating conditions can be obtained. When 316L powder is prepared into a dense sphere with a diameter of 0.005 m, the electromagnetic induction heating efficiency is higher and the cost is the lowest by using a vacuum induction furnace with high heating frequency, large number of coils and the closest distance between the coil and the crucible.

Key Words: Metal Powder, 316L Stainless Steel Powder, COMSOL Multiphysics, Induction Heating, Powder Melting

收稿日期:2022-07-21;**修改稿收到日期:**2022-09-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904086);河北省引进留学人员资助项目(C20200310);河北省引进国外智力项目;邯郸市科技计划资助项目(19422111008-33);中央引导地方科技发展资金项目(226Z1015G)
第一作者简介:赵烁,男,1984 年出生,副教授,河北邯郸(056000),E-mail: zsz7303@vip.163.com
引用格式:赵烁,朱仕彬,牛乐,等.回收 316L 金属粉末电磁感应熔化过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2023,43(5):613-618.
ZHAO S, ZHU S B, NIU L, et al. Numerical simulation of electromagnetic induction melting process of recycled 316L metal powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):613-618.

[19] 敬云兵,彭冬冬,甘春雷,等.退火温度对 Al₂O₃/Cu 弥散强化铜合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 524-1 528.

[20] 李思远.不同热处理状态下 Cu-Ti 合金在 S²⁻ 污染海水中的腐蚀行为研究[D].太原:太原理工大学,2021.

[21] 杨冉,文九巴,周延军,等.热处理对 Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn 合金组织和腐蚀性能的影响[J].材料热处理学报,2019,40(12):74-78.

[22] VRSALOVIC L, IVANIC I, KOZUH S, et al. Effect of heat treatment on corrosion properties of CuAlNi shape memory alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1 149-1 156.

[23] 王耀,杨正海,杨倩倩,等.时效温度和 Cr 含量对 Cu-Ag-Cr 合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(3):353-358.

[24] 韩俊青,武玉英,胡家琨,等. B 在铜合金中的应用[J].特种铸造及有色合金,2021,41(6):718-721.

[25] 冷翔.合金元素(Fe、Mn、La)对 B10 白铜合金耐蚀性能的影响[D].江西赣州:江西理工大学,2020.

[26] SHAIK M A, SYED K H, GOLLA B R. Electrochemical behavior of mechanically alloyed hard Cu-Al alloys in marine environment [J]. Corrosion Science, 2019, 153: 249-257.

[27] WEI H, HOU L F, CUI Y C, et al. Effect of Ti content on corrosion behavior of Cu-Ti alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(4): 669-675.

[28] 杨倩倩,徐宇,赵墨林,等.添加微量 Cr、Al、Sn 和 Ni 对铜合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(6):690-693.

[29] 谭文龙.添加 Co 对 Cu-Ni-Si 合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1 306-1 308.

[30] 姜佳鑫,温永清.稀土在铜及铜合金中的作用及应用[J].稀土信息,2021(5):12-18.

[31] 孙军伟.稀土元素 Ce 对 CuNi10Fe1.5Mn 合金组织和性能的影响研究[D].江西赣州:江西理工大学,2019.

(编辑:刘晨辉)

金属增材制造(3D 打印)技术作为一项新的加工制造技术,目前已广泛应用于航空航天、导弹卫星、军事装备、汽车制造、生物医药等行业^[1-3]。随着全球能源不断减少、环境污染等问题的日益突出,急需寻找性能更好、功能更多的材料^[1,4]。

粉末材料是金属增材制造中应用最广泛的一种材料。金属粉末在源头上决定了增材制造的成本和产品品质,因此充分开展粉末循环使用研究对于控制成本、保障产品品质稳定性十分重要。现代冶金工业利用电磁感应加热熔化粉末的现象很普遍,通常在加热之前选择致密度较大的粉末材料进行分析^[5],而对于回收后粉末的再利用研究报道很少。回收后的粉末杂质元素、气体含量变高,相对于回收前的粉末各种性质都会有恶化。

316L 不锈钢因具有良好的耐腐蚀性能、耐热性和力学性能而在建筑、汽车、医疗、海洋、勘探等领域得到广泛使用^[6-7]。研究表明,单次粉末床增材制造时仅有质量分数为 2%~3% 的粉末打印为金属部件^[8]。采取合适的工艺,将粉末集中并加以分选、回收和利用,从而达到节省资源、降低成本、保护环境的目的。进行粉末回收操作时,不同种类、尺寸粉末的回收方法各不相同,成分越复杂,颗粒越小、回收难度越大。所以,研究粉末的成分和性能对粉末回收技术的应用意义重大^[9]。

本研究通过有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟感应加热工艺条件下的 316L 不锈钢废弃粉末熔化过程,并探究数值模拟在实际生产中的应用前景。基于金属粉末熔化原理,模拟分析不同形态 316L 回收粉末熔化速率和温度场的变化以及不同加热方式对 316L 粉末熔化过程的影响,为进一步实现废弃粉末的高效资源化利用提供参考。

1 试验方法

利用 COMSOL Multiphysics 软件同时建立磁场、固体传热耦合模型^[10]。首先选择空间维度的二维轴对称,构建二维模型使结果更加直观显示,然后感应加热研究选择“频域—瞬态”模式后即可开始构建模型。设置坩埚的材质为莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$),选取 316L 不锈钢填充粉末模型,为防止热量过多散失,在坩埚较近的位置建隔热层,选择 Silica glass 填充,隔热层外构建 3 个铜线圈使用 Copper 进行填充。为防止线圈温度过高,在线圈内构建水冷管,选择 Water 进行填充。图 1 为最终构建的几何模型。将整体模型进行网格划分,网格序列类型选择物理场网格,使用网格贡献选择磁场、固体传热和电磁热。图 2 为网格划分图。

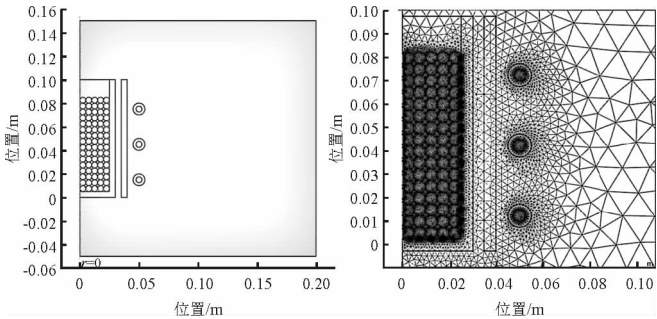


图 1 几何模型图 图 2 网格划分
Fig.1 Geometric model diagram Fig.2 Grid meshing

研究选择“频域—瞬态”求解,输出时间设定为 range(0,0.5,5),物理场接口选择磁场和固体传热,多物理场耦合选择电磁热,最终计算求解。选择二维绘图组绘制感应加热区域温度场和磁通密度模型,成功模拟出感应加热不同尺寸 316L 不锈钢粉末的冶金过程。更改加热条件,观察粉末受热后的温度场和磁场变化,利用得到的数据分析粉末熔化速度差异的原因,从而给出最佳的加热条件。316L 不锈钢粉末的主要化学成分见表 1。

表 1 316L 不锈钢的主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of 316L stainless steel %										
ω_B										
C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	S	P	O	Fe	
0.009 5	17.92	2.42	0.52	0.051	12.04	0.010 4	—	0.004 5	余量	

金属粉末熔化速率(v)计算为:

$$v = \frac{M}{S \cdot t} \tag{1}$$

式中, M 为截面粉末熔化质量,kg; S 为坩埚受热截面积, m^2 ; t 为粉末受热熔化时间,h。

2 试验结果与讨论

以回收的 316 不锈钢粉末为研究对象,进行电磁感应加热熔化,粉末中的杂质含量较高。粉末越细时,不同相粉末之间的接触面积增加,相原子之间剧烈扩散,形成固溶体的体积分数增加,产生晶格畸变,导致电导率大大减小^[11]。金属增材制造回收的粉末粒径一般为微米级别,颗粒形貌大多呈近似球形和不规则形状,不便于进行模拟计算。同时在实际感应加热条件下发现该粒径粉末导电性较差,难以熔化,所以模拟试验选用不同粒度不锈钢粉末模压成形制备尺寸为 3、5、7、9 和 11 mm 球体粉末,316L 不锈钢的熔化开始温度为 1 390 ℃,至 1 440 ℃ 完全熔化^[12]。

2.1 空隙率对 316L 粉末熔化速率的影响

将粉末粒径设为 5 mm,感应炉加热功率设为 11.5

kW,加热频率为 1 200 Hz,填充气体为氩气,在 3 个线圈的加热条件下,研究不同致密度对 316L 粉末熔化速率的影响,模拟结果见表 2。可以看到,空隙率为 0.001% 的 316L 粉末熔化速率为 0.756 kg/(m² · h),升温迅速,熔化速率较快;而空隙率为 0.05% 的 316L 粉末熔化速率为 0.376 kg/(m² · h),升温缓慢,熔化速率较慢。加热空隙率为 0.001% 的 316L 粉末时,因为空隙率较低,粉末紧密接触,热量互相传递极快,所以温度变化相对明显。在感应加热中,当粉末紧密接触,电阻增大,导致产生的热效应随之增大,释放出大量的热,与坩埚内壁接触的粉末随即开始升温,热量逐步传递至粉末内部^[13]。内部的粉末自身也受感应加热,加之边缘粉末热量的传递,两种效果叠加使得粉末中心先一步达到熔点开始熔化。所以空隙率为 0.001% 的 316L 粉末整体感应加热至完全熔化时间比空隙率为 0.05% 的 316L 粉末短。

表 2 不同空隙率粉末受热熔化速率对比
Tab.2 Comparison of thermal melting rates of powders with different porosities

空隙率/%	熔化速率/(kg · m ⁻² · h ⁻¹)
0.05	0.376
0.001	0.756

2.2 加热气氛对 316L 粉末熔化速率的影响

将粉末粒径设为 5 mm,设置感应炉加热功率为 11.5 kW,加热频率为 1 200 Hz,3 个线圈的加热条件下,初始建立的模型是以空气作为加热介质,将其转换成真空和保护气氛(氩气)^[14],观察保护气氛对 316L 粉末熔化过程的影响,结果见图 3。表 3 为不同加热气氛下粉末受热完全熔化时间。

由图 3 和表 3 可知,真空条件下通过粉末的磁通线最密集,粉末升温最快;氩气条件次之;空气条件下磁通线最稀疏,粉末升温最慢。因为 316L 不锈钢粉末在真空和氩气中性质比较稳定,有利于金属粉末的熔化,且真空条件下无需传热媒介,热量不会散失,直接加热到物体内部,因此升温速度快;氩气的比热容和传热系数比空气要大,热量在氩气中的传热能力大于空气。此外,氩气状态下升温比空气略高,散失的热量比空气散失的热量少,因此感应炉在真空和氩气加热氛围下的熔化速率要快。

表 3 不同加热气氛下粉末受热完全熔化时间
Tab.3 Complete thermal melting time of powder under different heating atmosphere

加热气氛	时间/h
空气	1.02
氩气	0.60
真空	0.50

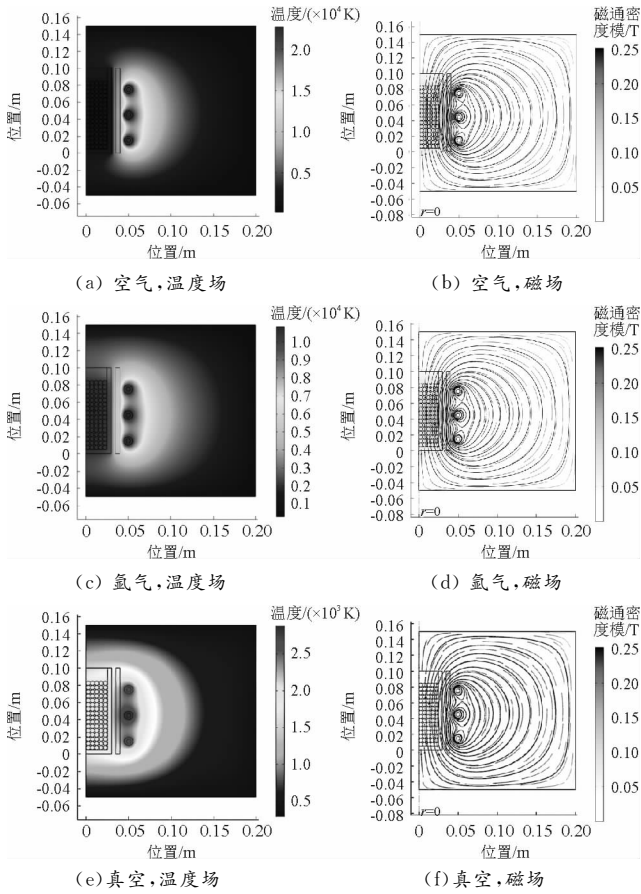


图 3 不同加热气氛下 316L 不锈钢球体粉末熔化温度场和磁场

Fig.3 Melting temperature field and magnetic field of 316L stainless steel spherical powder under different heating atmospheres

2.3 不同粒径对 316L 粉末熔化速率的影响

在感应炉加热功率为 11.5 kW,加热频率为 1 200 Hz,氩气为填充气体,3 个线圈的加热条件下,不同直径 316L 不锈钢球体粉末熔化温度场图和磁场见图 4。由图 4 可知,随着粉末粒径增大,通过粉末的磁通线越密集,熔化时间加快。控制线圈输出功率相同,加热相同时间,观察熔化速率,结果见表 4。可以看出,直径分别为 3、5、7、9 和 11 mm 球体粉末的熔化速率分别为 0.274、0.376、0.273、0.250 和 0.231 kg/(m² · h)。由此可知,粉末粒径为 5 mm 时粉末的熔化速率最快,且当粉末粒径小于 5 mm 时,粉末的熔化速率随着粒径的增大而加快;当粉末粒径大于 5 mm 时,粉末的熔化速率

表 4 不同直径粉末受热熔化速率对比
Tab.4 Comparison of thermal melting rates of powders with different diameters

直径/mm	熔化速率/(kg · m ⁻² · h ⁻¹)
3	0.274
5	0.376
7	0.273
9	0.250
11	0.231

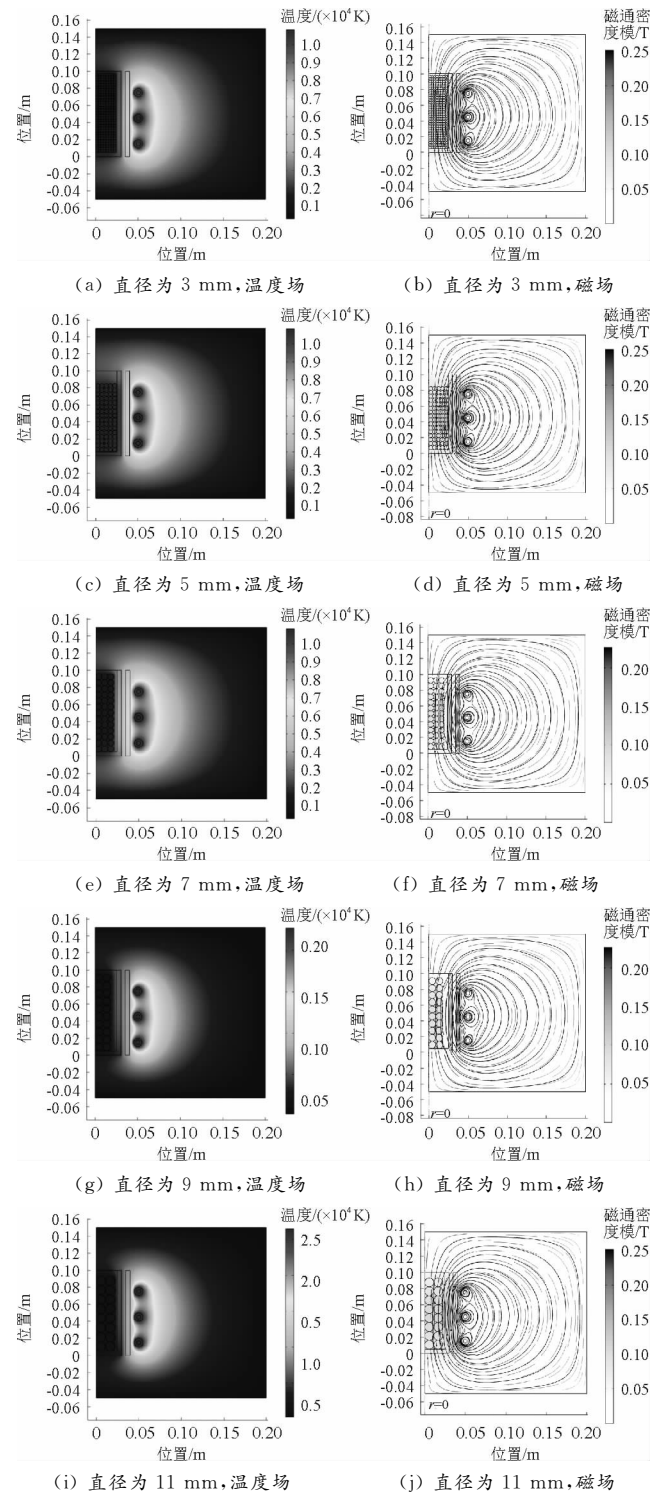


图4 不同直径316L不锈钢球体粉末熔化温度场和磁场
Fig.4 Melting temperature field and magnetic field of 316L stainless steel sphere powder with different diameters

随着粒径的增大而减慢。其原因在于粉末直径越大感应涡流越大,越容易熔化,但同时空隙率也增大,导致熔化速率降低^[15]。

2.4 加热频率对316L粉末熔化速率的影响

感应炉根据频率的不同分为超高频、高频、超音频、中频、工频。在此次试验中根据粉末性能选择中频感应

炉(1~10 kHz)^[16]。在感应炉加热功率为11.5 kW,粉末粒径为5 mm,氩气为填充气体,3个线圈的加热条件下,选择加热频率为600、900、1 200、1 500 Hz对316L粉末进行加热熔化,研究不同加热频率对316L不锈钢粉末熔化的影响,结果见图5和表5。

表5 不同加热频率粉末受热完全熔化时间
Tab.5 Comparison of complete thermal melting time of powders with different heating frequencies

加热频率/Hz	时间/h
600	0.65
900	0.62
1 200	0.60
1 500	0.55

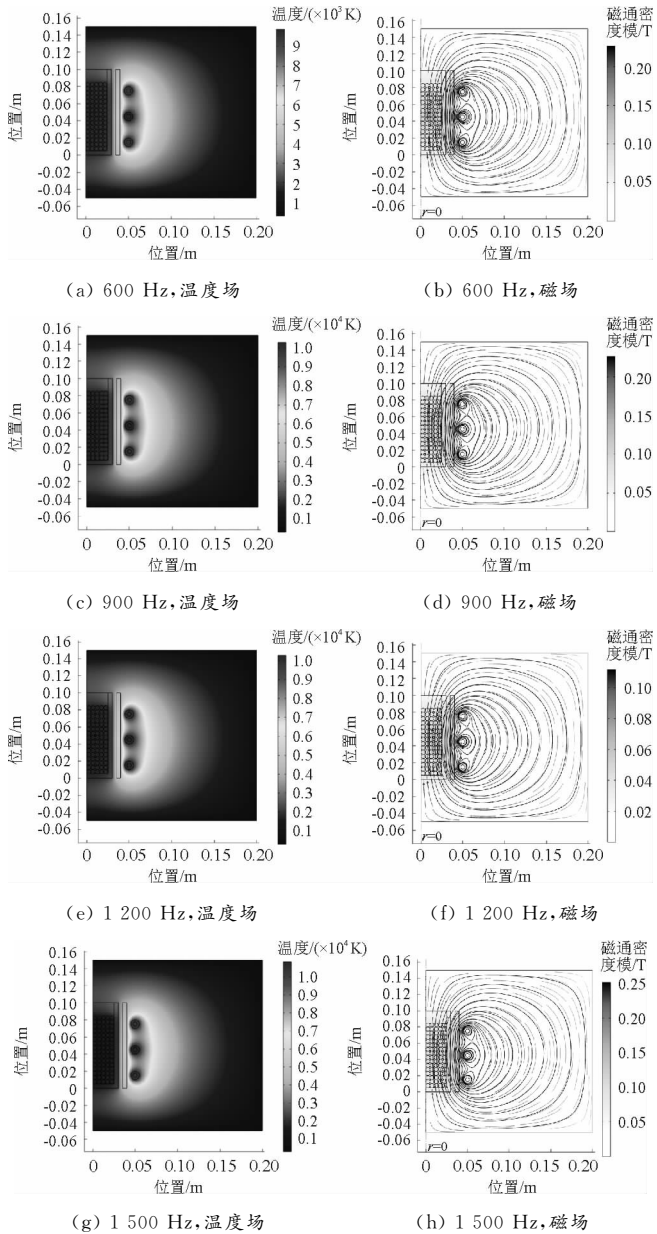


图5 不同加热频率下316L不锈钢球体粉末熔化温度场和磁场

Fig.5 Melting temperature field and magnetic field of 316L stainless steel sphere powder under different heating frequencies

感应电动势(E)和频率(f)定义为:

$$E = 4.44 \phi |f| n \tag{2}$$

式中, ϕ 为感应线圈中磁场的磁通量, Wb; n 为炉料所形成回路的匝数, 通常 $n=1$ 。

从图 5 中可见, 随着感应炉频率增加, 通过颗粒的磁通线越密集, 粉末熔化时间越短。根据表 5 可知, 当感应炉频率为 1 500 Hz 时, 316L 粉末完全熔化所需要的时间最短。随着感应炉加热频率增加, 316L 粉末完全熔化所需要的时间随之减少, 结合式(2)可知, 频率越高产生的感应电动势越大, 粉末升温速度越快, 熔化速率越大。因此, 在感应炉加热功率、粉末粒径、加热氛围、线圈数量等其他加热条件相同的情况下, 随着加热频率增加, 316L 粉末的熔化速率加快。

2.5 不同线圈数量对 316L 粉末熔化速率的影响

在感应炉加热功率为 11.5 kW, 粉末粒径为 5 mm, 感应炉加热频率 1 200 Hz, 氩气为填充气体加热条件下, 探究通电线圈数量对粉末加热的影响。因为更改线圈数量后, 无法统计粉末受热熔化的时间, 因此利用磁场内的磁通密度模量来观察, 结果见图 6。

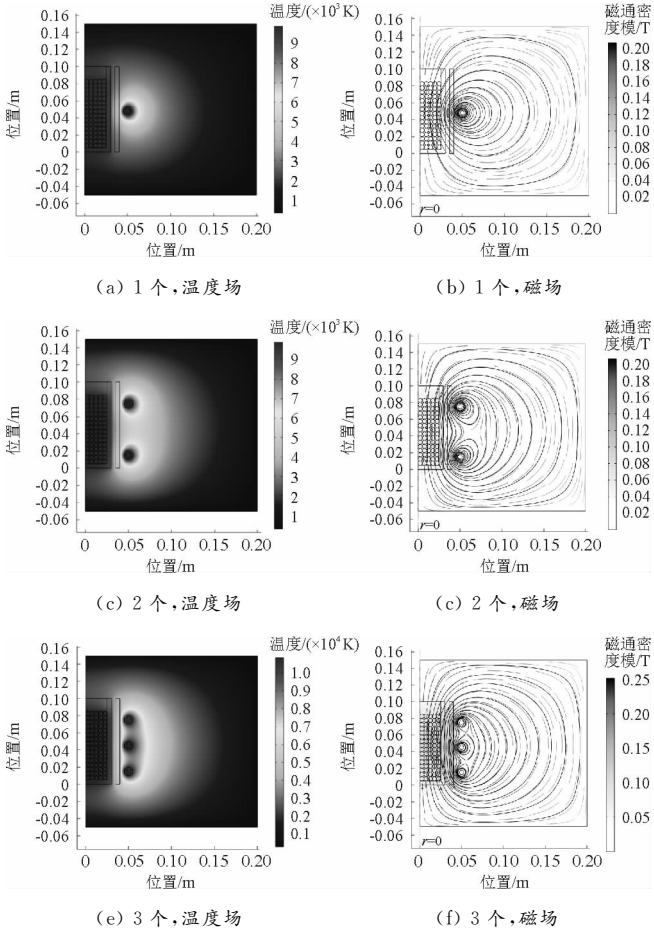


图 6 不同线圈数量下 316L 不锈钢球体粉末熔化温度场和磁场

Fig.6 Melting temperature field and magnetic field of 316L stainless steel sphere powder with different number of coils

空心线圈电感量(I)公式^[17]:

$$I = \frac{0.01 D \cdot N^2}{\frac{L}{D} + 0.44} \tag{3}$$

式中, N 为线圈匝数; L 为线圈长度, cm; D 为线圈直径, cm。

结合图 6 和式(3)可知, 电感量的大小与线圈匝数成正比, 线圈匝数越多, 电感量越大, 感应出的热量越高^[18]。电感量只与线圈自身的固有属性有关, 通过增加电线圈的匝数可以增加电感量的值。在模型中, 线圈功率、粗细、线圈与隔热层的间距均相同, 所以增加线圈数量以提供更多的磁通量可以使粉末更快熔化。

2.6 线圈与坩埚中心距离对 316L 粉末熔化速率影响

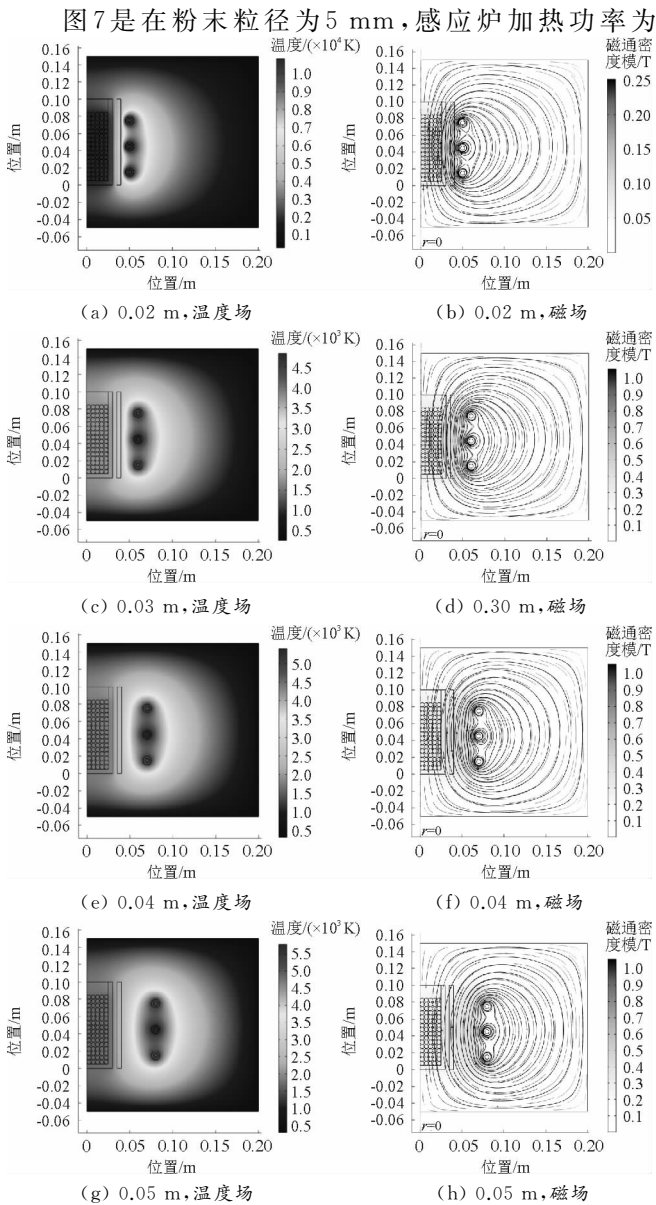


图 7 线圈与坩埚外壁不同距离下 316L 不锈钢球体粉末熔化温度场和磁场

Fig.7 Melting temperature field and magnetic field of 316L stainless steel sphere powder at different distances from the coil to the outer wall of the crucible

11.5 kW, 加热频率 1 200 Hz, 氩气为填充气体, 3 个线圈加热条件下, 将坩埚外壁、隔热层与通电线圈之间的距离设定为 0.02、0.03、0.04 及 0.05 m, 对比距离变化前后感应加热对粉末加热熔化的影响。为保护通电线圈和隔热层, 从较低功率开始逐渐增大功率, 直到功率与改变距离前相等^[19]。取粉末内同一位置进行记录, 观察粉末受热温度分布图。

由图 7 可以看出, 线圈与坩埚外壁距离越远, 加热时间长, 粉末升温速率慢; 而距离缩小后, 加热时间短, 粉末升温极快, 熔化效率高。这是因为随着线圈距离坩埚越近, 磁通线越密集, 加热效率更高, 粉末完全熔化所需时间更短。因此在进行感应加热试验时, 应确定线圈、隔热层、坩埚外壁三者之间合适的距离, 以寻求最佳工作效率, 节约成本。

3 结 论

(1) 空隙率低的 316L 粉末升温迅速, 温度场变化明显, 而空隙率高的粉末升温缓慢, 温度场变化不明显, 因为紧密接触的粉末在感应加热过程中同时受到涡电流产生的热效应和坩埚边缘粉末的向内导热, 在双重作用下, 空隙率低的粉末熔化速率为空隙率高的粉末熔化速率的 2 倍多。

(2) 真空比保护气氛条件下的粉末加热效率高且没有热量散失, 还能防止受热的金属粉末氧化; 受热材料的物理形貌特征稳定性是粉末升温熔化的重要因素, 粉末直径越大感应涡流越大, 越容易熔化, 但同时空隙率也增大, 导致熔化速率降低。从模拟结果可以得出, 最佳熔化粉末直径为 5 mm; 感应炉的加热功率越大, 粉末受热熔化速率越快; 线圈与坩埚距离越近, 粉末受热熔化时间越短; 增加的线圈越多磁场就越强, 场内的磁通量就越多, 粉末升温越快, 感应加热时间越快。

(3) 通过 COMSOL 软件模拟回收 316L 不锈钢粉末的感应加热情况, 结合成本和工艺因素, 认为真空感应加热条件下, 将金属粉末制备为空隙率 0.001% 的直径为 5 mm 球体, 采用加热频率高的多线圈感应炉进行加热, 线圈贴近坩埚时达到最高加热效率且最节省成本。

参 考 文 献

- [1] 王长军, 刘雨, 周健, 等. 金属增材技术在钢铁领域的研究进展[J]. 中国冶金, 2022, 32(5): 7-15.
- [2] 马剑雄, 夏张文, 周伟民. 金属增材制造技术的发展与展望[J]. 金属加工(热加工), 2022(3): 22-27.
- [3] 禹润琪, 余圣甫, 齐朕, 等. 电弧增材制造 HSLA 钢的组织演变行为与力学性能[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 136-145.
- [4] SHRIVASTAVA A, RAO S, NAGESHA B K, et al. Remanufacturing of nickel-based aero-engine components using metal additive manufacturing technology[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 4 893-4 897.
- [5] FAN J X, ZHANG L, WEI S S, et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends[J]. Materials Today, 2021, 50: 303-328.
- [6] 张立浩, 钱波, 张朝瑞, 等. 金属增材制造技术发展综述[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(1): 42-52.
- [7] COOKE S, AHMADI K, WILLERTH S, et al. Metal additive manufacturing: Technology, metallurgy and modelling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 978-1 003.
- [8] REVILLA-LEÓN M, MEYER M J, ÖZCAN M. Metal additive manufacturing technologies: Literature review of current status and prosthodontic applications[J]. International Journal of Computerized Dentistry, 2019, 22(1): 55-67.
- [9] HAN J K, LIU X, LEE I, et al. Structural evolution during nanostructuring of additive manufactured 316L stainless steel by high-pressure torsion[J]. Materials Letters, 2021, 302: 130 364.
- [10] WANG Y M, VOISIN T, MCKEOWN J T, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility[J]. Nature Materials, 2018, 17(1): 63-71.
- [11] 李爱宗. 熔模铸造不锈钢粉末的电选回收工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(9): 990-992.
- [12] SARTIN B, POND T, GRIFFITH B, et al. 316L powder reuse for metal additive manufacturing[A]//Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium[C]. Austin TX: University of Texas at Austin, 2017.
- [13] ANDERSON I E, WHITE E M H, DEHOFF R. Feedstock powder processing research needs for additive manufacturing development[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2018, 22(1): 8-15.
- [14] 毛楠. 316L 不锈钢焊接接头的组织和力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [15] 苗佩. 沉淀效率对激光近净成形 316L 不锈钢组织及性能的影响[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
- [16] SUTTON A T, KRIEWEALL C S, KARNATI S, et al. Characterization of AISI 304L stainless steel powder recycled in the laser powder-bed fusion process[J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 100 981.
- [17] 潘祥斌. 单层圆筒线圈电感量的计算方法[J]. 广播与电视技术, 1981(2): 45-47.
- [18] 张杰, 郑淑国, 朱苗勇. 加热功率对感应加热中间包影响的数值模拟[J]. 中国冶金, 2021, 31(10): 68-74.
- [19] 韩世昌, 徐靖, 白冬晓. COMSOL 软件模拟在传热学教学中的应用[J]. 广东化工, 2021, 48(15): 286-287.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com