

热等静压粉末冶金技术制备高合金冷作模具钢应用研究

王凯, 车立达, 吕周晋, 李好峰, 李向阳

钢研昊普科技有限公司 北京 100081

摘要: 采用热等静压粉末冶金技术开展了X230CrVMo13高合金模具钢成形技术研究,并结合数值仿真手段对合金粉末致密化规律进行探索。此外,通过退火热处理工艺对粉末合金性能进行调控,分析了热处理工艺对微观组织、力学性能的影响。结果表明:数值模型能够准确模拟X230CrVMo13粉末致密化过程,通过热等静压粉末冶金技术制备的X230CrVMo13粉末合金达到了理论密度,通过退火热处理工艺实现对碳化物析出控制,进而改善了X230CrVMo13粉末合金制品性能。

关键词: 热等静压; 粉末冶金; 高合金模具钢; 数值仿真; 热处理

Application of hot isostatic pressing powder metallurgy technology in preparing high alloy cold work die steel

WANG Kai, CHE Lida, Lü Zhoujin, LI Haofeng, LI Xiangyang

CISRI HIPEX Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China

Abstract: The forming technology of X230CrVMo13 high alloy die steel was studied using hot isostatic pressing powder metallurgy technology, and the densification law of alloy powder was explored through numerical simulation methods. In addition, the properties of powder alloys were regulated through heat treatment, and the influence of heat treatment processes on microstructure and mechanical properties was analyzed. The results show that the numerical model can accurately simulate the densification process of X230CrVMo13 powder. The X230CrVMo13 powder alloy prepared by hot isostatic pressing powder metallurgy technology reached the theoretical density, and the control of carbide precipitation was achieved through heat treatment, thereby improving the properties of X230CrVMo13 powder alloy products.

Keywords: hot isostatic pressing; powder metallurgy; high alloy mold steel; numerical simulation; heat treatment

1 序言

模具钢是用来制造冷冲模、热锻模、压铸模等模具的钢种^[1]。根据用途和服役条件不同,通常将

模具钢分为冷作模具钢、热作模具钢与塑料模具钢三类^[2]。其中冷作模具钢应用广泛、常用来制作冲压模具、拉伸模具、挤压模具以及辊压模具等^[3]。

基金项目:北京市科技新星资助项目(2022139)。

以D2 (Cr12M01V1) 钢为代表的Cr12型高碳高铬冷作模具钢因有很高的耐磨性在世界上被广泛采用,近年来随着模具工业的不断发展,模具成形工件强度和模具寿命要求不断提升,冷作模具钢向高韧性、高耐磨方向发展,出现了2V级(如Vasco Die)、3V级(如HYC3)和4V级(如A7)传统高耐磨冷作模具钢,甚至还开发了4V级(如K190)和9V(如A11)级等粉末冶金工具钢^[4-6]。图1所示为传统模具钢的性能对比。由图1可看出,粉末冶金模具钢从韧性、组织稳定性与耐蚀性等方面性能均得到大幅提升。ASTM A681—24《合金工具钢标准规范》中的X230CrVMo13 (D7) 粉末冶金模具钢是新型高合金工模具材料,近年来因其超高强度、硬度和耐磨性而受到了广泛关注,并且国外D7冷作模具钢已经拥有成熟粉末冶金工艺^[7, 8]。目前,国内尚未有高铬高钒模具钢品种的产品,钢号体系不完善。D7因其合金含量高,含有2%的C、12%的Cr、4%的V,莱氏体组织粗大且易生成严重的合金元素偏析,从而需通过粉末冶金工艺制备得到细小的碳化物,因此存在制备工艺复杂的问题。

采用热等静压粉末冶金方法制备D7模具钢具有碳化物细小、组织均匀、致密度高的优点,解决了传统熔铸方法产生的粗大碳化物和组织偏析等问题,避免了加工和热处理过程中发生变形和开裂,因此粉末冶金法制备高速钢可以将这种基体加碳化物的高强韧性的材料完全发挥出来,制成刀具的疲劳寿命也大幅增加^[9]。

本文旨在通过热等静压粉末冶金的方法制备高钒高铬高耐磨冷作模具钢烧结制品,对高品质工模具烧结窗口窄、致密度低等问题进行研究和分析,为进一步开发高品质工模具粉末及高性能工模具制品奠定理论基础,为新工艺、新产品的研发提供参考和依据。

2 试验材料及方法

采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法(EIGA)制备X230CrVMo13预合金粉末^[10-12],该制粉工艺具有工艺简单、成本低的显著优势,并且得到的金属粉末球形度较好,粒度分布较窄。EIGA法制备的D7模具钢典型粉末形貌和粒度分布如图2、图3所示, X230CrVMo13粉末成分见表1。受制粉工艺影响,存在少量卫星粉,这是利用惰性气体破碎金属熔滴过程中,小熔滴和较大熔滴优先凝固,黏附于大熔滴表面,最终形成卫星球。相关研究表明,EIGA法制备的预合金粉末属于快速凝固粉末,化学成分均匀,通常不存在成分偏析。X射线衍射试验德国布鲁克 D8 ADVANCE X射线衍射仪,管电流40mA,管电压35kV,扫描速度2°/min。

热等静压设备采用的是热研昊普科技有限公司的RD80型热等静压炉,工艺制度为随炉升温至1150℃,压力>120MPa,保温时间2h,然后随炉冷却至室温,工艺过程曲线如图4所示。退火热处理在真空炉中进行,先加热至900℃,炉冷至600℃空冷。图5所示为HIP后获得的X230CrVMo13粉末冶金制品,在制品中心分别进行拉伸和金相试样取样,

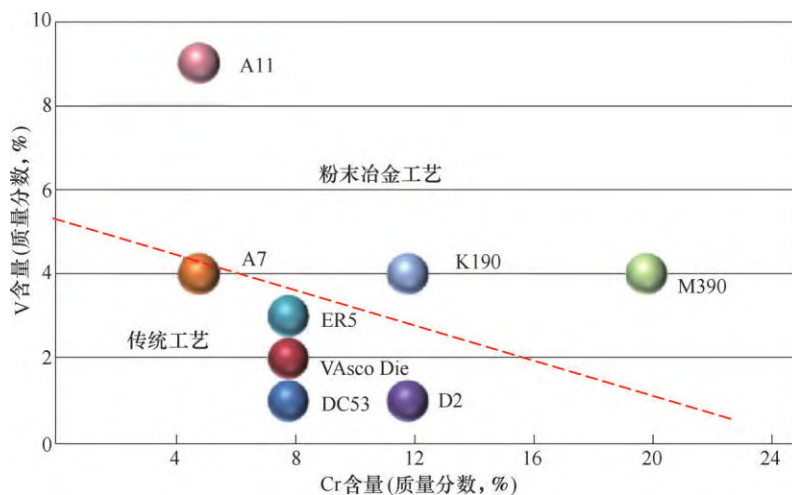


图1 冷作模具钢制备工艺及成分对比

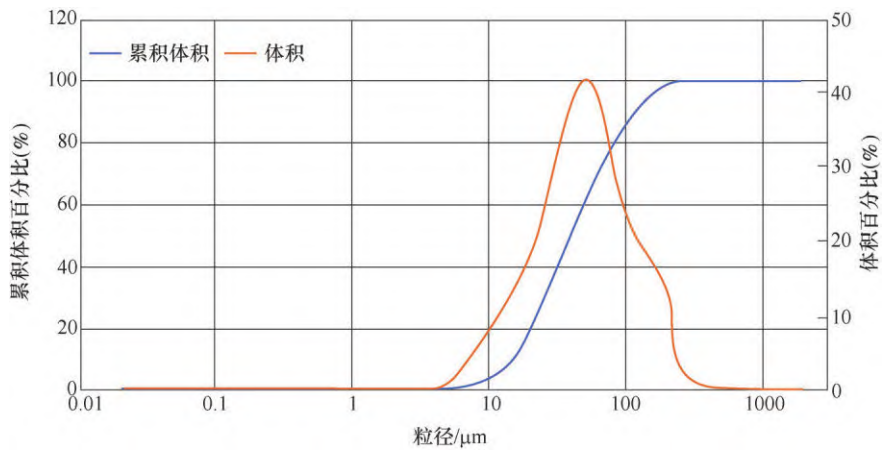


图2 D7模具钢粒度分布

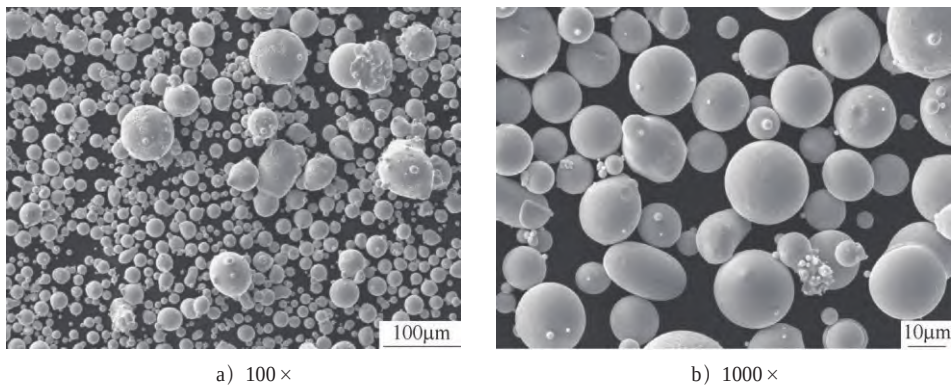


图3 X230CrVMo13预合金粉末表征

表 1 X230CrVMo13粉末成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Mo	Fe
2.15~2.50	0.10~0.60	0.10~0.60	11.50~13.50	—	3.80~4.40	0.7~1.2	余量

经研磨、抛光和4%硝酸酒精腐蚀后进行微观组织观察。每种性能测试均进行3次，取平均值作为测试结果。

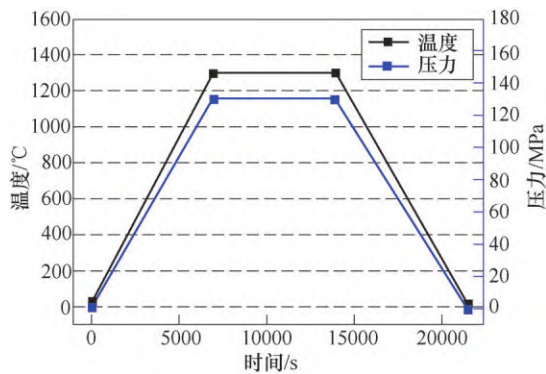


图4 HIP工艺过程曲线



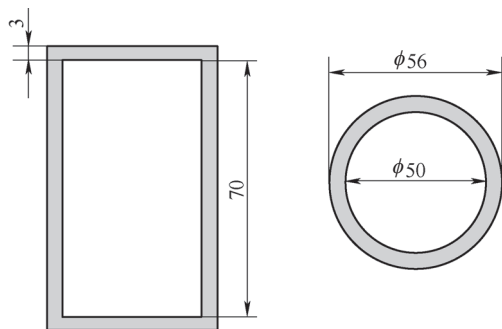
图5 HIP制品与金相取样位置

3 结果讨论

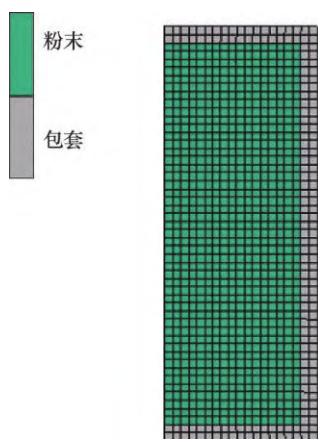
3.1 有限元分析

基于连续介质模型的有限元方法进行热等静压的数值模拟，采用商业有限元软件MSC.Marc里自带的Shima模型，对D7粉末压坯的热等静压致密化过程进行模拟。压坯结构为轴对称回转体，为减少计算量，建二维轴对称网格模型，包套尺寸与网格模型如图6所示。采用CAX4RT 单元，D7粉末的网格

边长1.5mm, 网格数量为 1130 个, 包套网格边长 1~2mm, 网格数量 4201 个。



a) 包套尺寸



b) 网格模型

图6 包套尺寸与网格模型

图7所示为热等静压过程中不同时刻压坯的相对密度变化情况。从图7可看出, 在热等静压初始阶段, 温度和压力未达到最大值, 局部密度已经发生不均匀变化, 包套拐角位置相对密度略低于其他位

置, 产生这种现象的原因是拐角结构在收缩过程中对周围粉末产生了应力屏蔽作用, 导致周围粉末补充不足, 粉末间作用力减小, 相对密度降低。当热等静压1.5h时, 此时压坯相对致密度也随温度压力开始大幅增加, 压坯内部密度不均匀现象开始逐渐减小; 当热等静压2.5h时, 温度压力达到最大值, 进入保温保压阶段, 此时压坯相对密度达到了92%以上, 绝大部分位置达到了99%以上, 零件各部分密度趋于均匀; 当热等静压4h时, 压坯致密度进一步提高, 不易致密的拐角区域致密度也超过95%, 说明经过4h的热等静压处理可以获得全致密的D7模具钢制品。

为了更清楚地了解D7粉末在HIP过程中的致密化过程, 对图7d中相对密度典型位置(节点 402, 节点447, 节点567和节点282)进行观察, 提取获得相对密度随时间变化历程曲线, 如图8所示。由图8可看出, 升温段相对密度呈现先降低后快速上升的变化趋势, 产生这种现象的原因是包套在刚开始升温时会发生热膨胀, 此时压力增加缓慢, 压力值不足以使包套发生屈服变形, 因此包套内空间增加, 相对密度下降。随着温度和压力的不断升高, 压坯相对密度随之大幅增加。当进入保温保压阶段时, 此时包套内的粉末已经基本致密。

3.2 微观组织表征

图9所示为热等静压(HIP)态和热等静压后退火热处理(HIP+HT)态微观组织。由图9可看出, 两种样品组织致密均匀, 没有明显气孔缺陷。退火处理对组织形态和分布影响不明显, 为了进一步分析相组成, 采用XRD分别对两种样品进行表征,

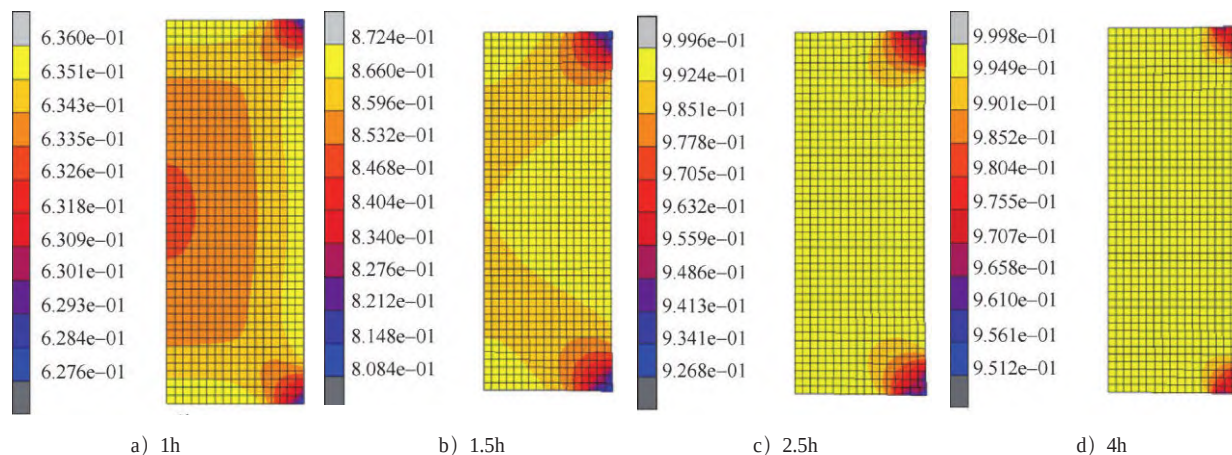


图7 不同时刻相对密度云图

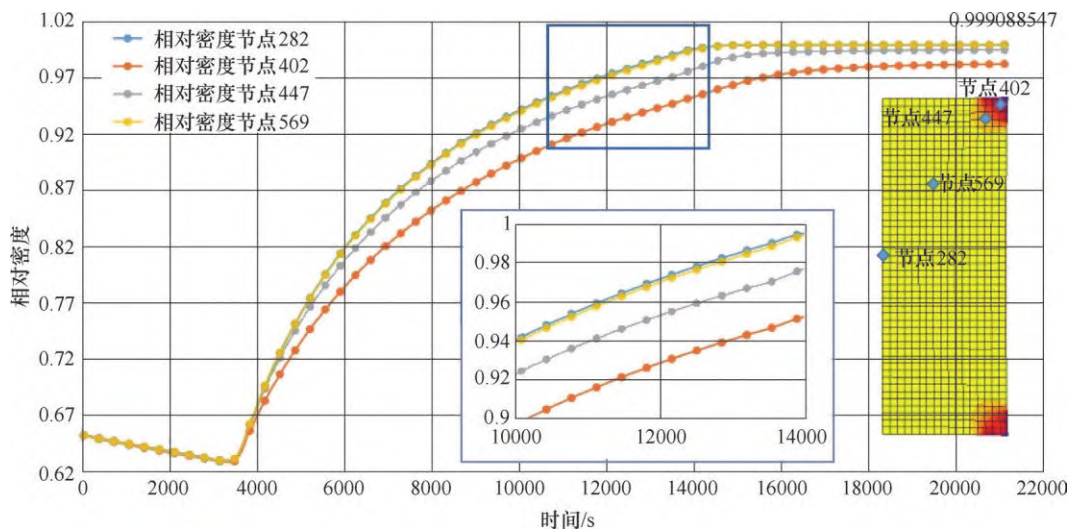


图8 取样点相对密度随时间变化历程曲线

XRD图谱如图10所示。由图10可看出，退火处理改变了HIP态D7粉末冶金物相构成，退火处理前HIP态组织主要由 α -Fe、 $\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$ 构成，可能含有 M_7C_3 碳化物。退火态组织主要由 $\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$ 、 Fe_3Ni_2 构成，由于 M_7C_3 相含量较少，仅通过XRD不能确定是否存在。通过SEM-EDS分析了退火态拉伸断口形貌，结果如图11所示。退火态的断口可以观察到碳含量较高的析出相，验证了 M_7C_3 存在。

3.3 力学性能分析

首先，通过排水法测量HIP制品密度为 $7.60\text{g}/\text{cm}^3$ ，达到理论密度，验证了致密化仿真模型预测准确性。拉伸试验参考标准GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》进行，硬度试验参考GB/T 230.1—2018《金属材料 洛氏硬度试验 第1部分：试验方法》进行，试验选用载荷9.8N，保载时间15s。每个参测试样随机选取5个点测试取平均值。试验结果见表2。根据表2数据得到的性能对比如图12所示。从图12可看出，与铸态的12Cr2Mo1V相比X230CrVMo13粉末合金的强度

大幅增加，但HIP态的硬度明显降低，退火后硬度与铸态相当。产生这种现象的原因是，退火处理工艺改变了粉末冶金制品的物相构成，退火处理消除了HIP态中的 α -Fe重新生成了 Fe_3Ni_2 ，并且伴有碳化物的析出，同时研究表明铬钼高合金模具钢退火后大量 M_7C_3 和MC类碳化物会从马氏体相析出，并且回火过程中不稳定碳原子会被不稳定Ni原子所取代，生成 $\text{Fe}_{10.8}\text{Ni}$ 和 Fe_3Ni_2 ，与XRD，EDS试验结果一致。

表2 X230CrVMo13粉末合金与常用模具钢力学性能对比

成形工艺	抗拉强度 R_m/MPa	屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	伸长率 $A(\%)$	硬度HRC
12Cr2Mo1V-Cast ^[13, 14]	620	550	24.5	61.9
HIP	902	775	18	24.7
HIP + HT	1406	1170	7.8	58.9

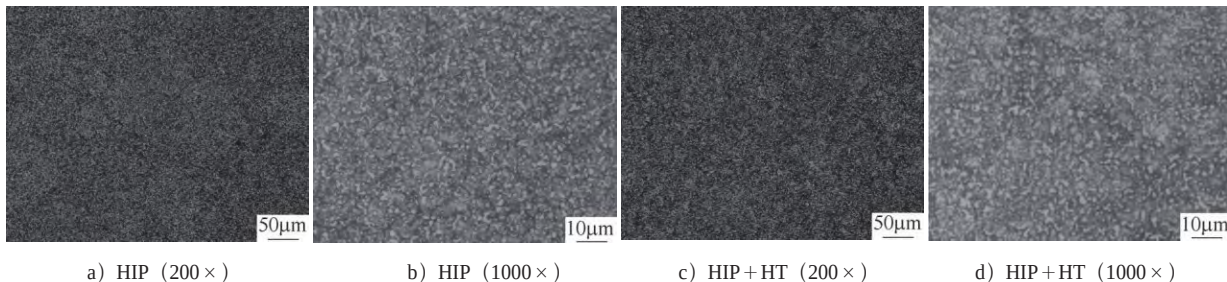
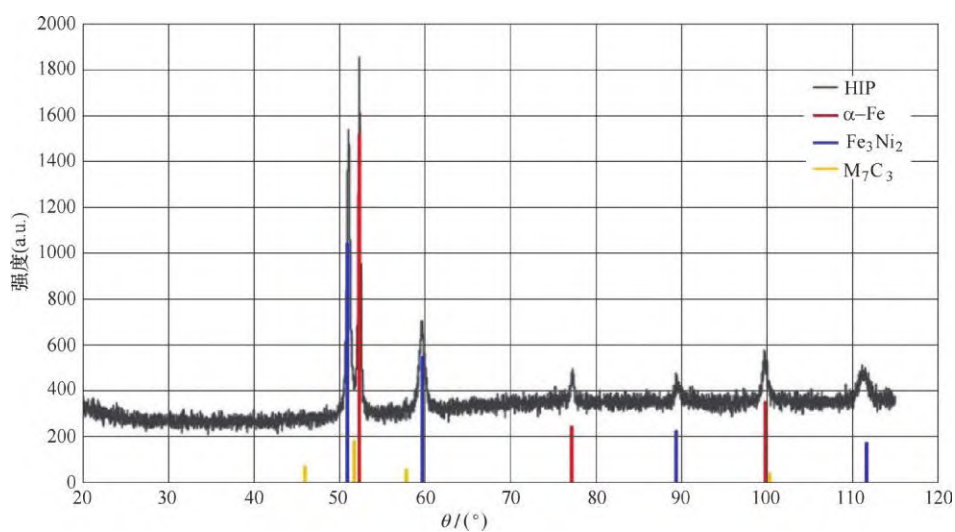
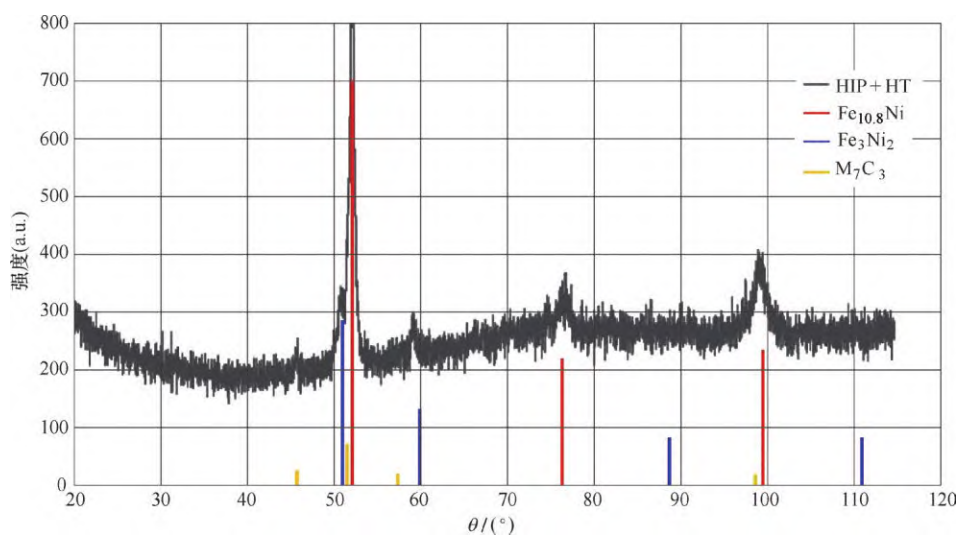


图9 HIP和HIP+HT热处理后D7粉末冶金显微组织



a) HIP



b) HIP + HT

图10 XRD衍射图谱

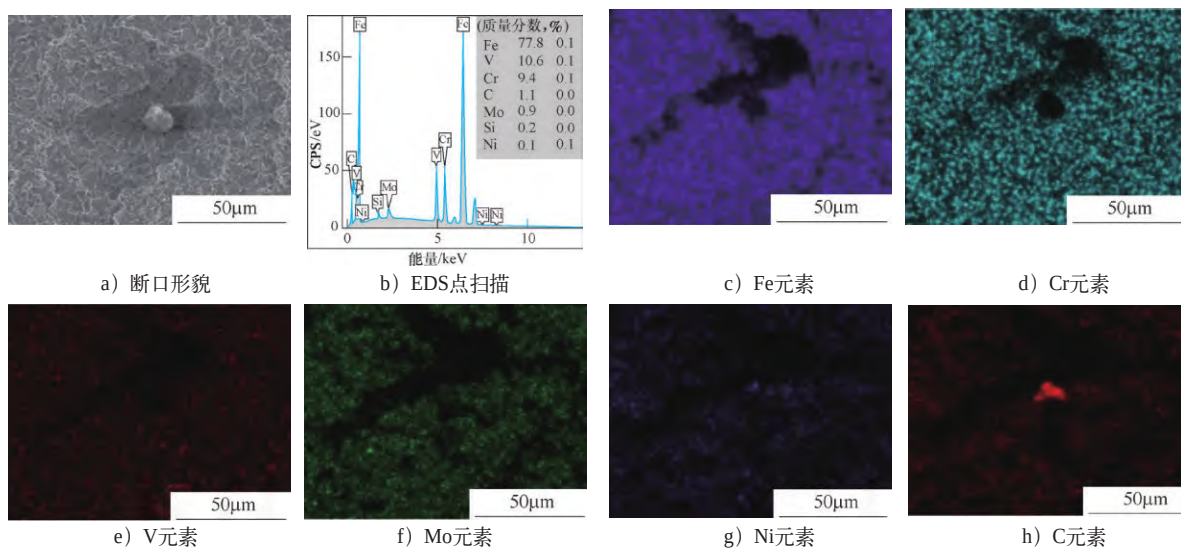


图11 退火态SEM-EDS图像

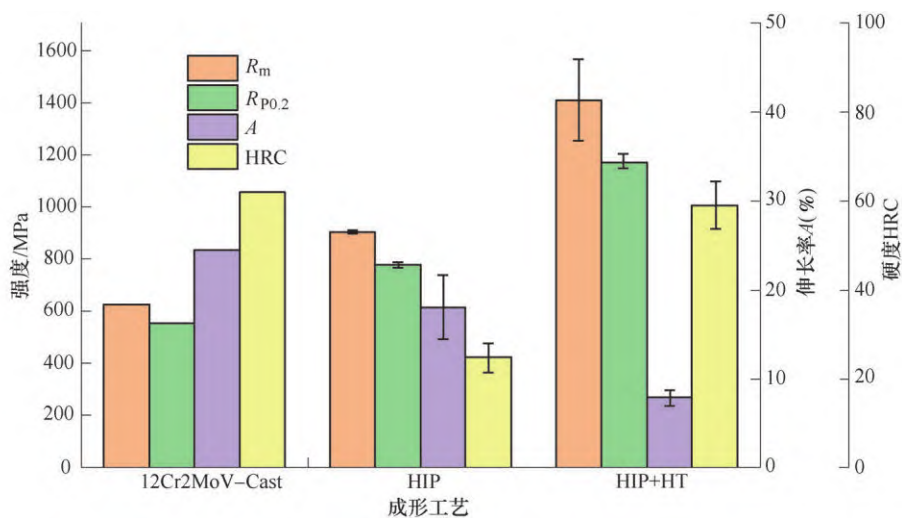


图12 不同工艺X230CrVMo13粉末合金与常用模具钢力学性能对比

4 结束语

通过试验和数值模拟的方法研究了X230CrVMo13高合金粉末冶金致密化过程和性能, 获得的主要结论如下。

1) 通过有限元软件实现了高合金粉末热等静压致密化分析, 并通过试验验证了模型准确性, 可以为高合金粉末冶金工艺制定提供指导。

2) 采用HIP方法X230CrVMo13高合金粉末冶金制品物相由 α -Fe、 $Fe_{10.8}Ni$ 构成, M_7C_3 碳化物含量较少, 退火处理使 α -Fe转变 $Fe_{10.8}Ni$ 、 Fe_3Ni_2 , 并且 M_7C_3 和MC类碳化物会从马氏体相中析出。

3) 退火热处理工艺可以有效改善X230CrVMo13粉末冶金制品的力学性能。

参考文献:

- [1] 徐进, 姜先畲, 陈再枝, 等. 模具钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [2] 陈再枝, 蓝德年, 马党参. 模具钢手册 [M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [3] 陈再良, 陈蕴博, 佟晓辉, 等. 典型冷作模具钢性能与失效关系的探讨[J]. 金属热处理, 2006, 31 (2): 87-93.
- [4] 王勇胜, 吴鹏, 何金泽, 等. Cr12型冷作模具钢加工工艺研究[J]. 模具制造, 2022, 22 (10): 76-79.
- [5] 孙秀华, 刘晓. Cr12型冷作模具钢热处理工艺及性能研究[J]. 东北特殊钢, 2016 (3): 28-32.
- [6] 孙秀华, 刘晓, 于宗洋. Cr12型冷作模具钢热处理工艺及性能分析[J]. 物理测试, 2017, 35 (6): 11-14.

- [7] ZUMSANDE K, HUTH S, KRASOKHA N, et al. Gas-solid interaction of a cold work tool steel with nitrogen - A synchrotron study[C]. Yokohama: Euro PM 2012 congress & exhibition.2012.
- [8] TYSHCHENKO A I, THEISEN W, OPPENKOWSKI A, et al. Low-temperature martensitic transformation and deep cryogenic treatment of a tool steel[J]. Materials Science & Engineering: A, 2010, 527 (26): 7027-7039.
- [9] 吉锋伟. 一种基于粉末冶金的模具钢的制备方法: CN202111603756.1[P]. 2024-05-15.
- [10] 杨芳, 李延丽, 申承秀, 等. 钛及钛合金粉末制备与成形工艺研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2023, 41 (4): 330-337.
- [11] 徐磊, 郭瑞鹏, 吴杰, 等. 钛合金粉末热等静压近净成形研究进展[J]. 金属学报, 2018, 54 (11): 1537-1552.
- [12] 阴中炜, 孙彦波, 张绪虎, 等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. 材料导报, 2019, 33 (7): 1099-1108.
- [13] 王亚安, 李慧, 李七平, 等. 加氢反应器12Cr2Mo1V钢筒体热处理工艺改进[J]. 金属热处理, 2018, 43 (9): 195-198.
- [14] 李振江, 贾鹏举. 12Cr2Mo1V钢回火的显微组织及力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (6): 201-203, 208.