

# 数控机床齿轮 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金粉末锻造研究

刘 波<sup>1</sup>, 刘军强<sup>2</sup>

(1. 济源职业技术学院 机电工程系, 河南 济源 459000;

2. 河南理工大学 材料科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 为了研究新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金粉末锻造的可行性以及探讨始锻温度对齿轮材料耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响。采用不同的始锻温度进行了齿轮材料的粉末锻造试验, 并进行了耐磨损性能、耐腐蚀性能和密度的测试与分析。结果表明: 采用粉末锻造方法, 可以制备出综合性能较佳的齿轮材料。随着始锻温度从 800 ℃ 增至 1200 ℃, 齿轮材料的磨损体积先减小后增大、腐蚀电位先正移后负移、密度先增大后减小, 齿轮材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能先提高后下降。与始锻温度为 800 ℃ 时相比, 始锻温度为 1100 ℃ 时, 粉末锻造的齿轮材料的磨损体积减小 28.4%、腐蚀电位正移 23.1%、密度增大 7.0%。粉末锻造新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的始锻温度优选为 1100 ℃。

**关键词:** 粉末锻造; Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金; 耐磨损性能; 耐腐蚀性能; 齿轮材料

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.005

**中图分类号:** TG132.25

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0023-07

## Study on powder forging of Fe-Ni-Cu-C-Mo-V alloy for NC machine tool gears

Liu Bo<sup>1</sup>, Liu Junqiang<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Technology, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of powder forging for new NC machine tool gear material Fe-Ni-Cu-C-Mo-V alloy and explore the influences of initial forging temperature on the wear and corrosion resistance properties for the gear material, the powder forging test of gear material was carried out at different initial forging temperatures, and the wear resistance property, corrosion resistance property and density were tested and analyzed. The results show that the gear material with better comprehensive properties can be prepared by powder forging method. When the initial forging temperature increases from 800 ℃ to 1200 ℃, the wear volume of gear material first decreases and then increases, the corrosion potential first moves positive and then negative, the density first increases and then decreases, and the wear and corrosion resistance properties of gear material first increase and then decrease. Compared with the initial forging temperature of 800 ℃, the wear volume of powder forged gear material at the initial forging temperature of 1100 ℃ is reduced by 28.4%, the corrosion potential moves positive by 23.1%, and the density increases by 7.0%. Thus, the initial forging temperature of powder forged new NC machine tool gear material Fe-Ni-Cu-C-Mo-V alloy is preferably at 1100 ℃.

**Key words:** powder forging; Fe-Ni-Cu-C-Mo-V alloy; wear resistance property; corrosion resistance property; gear material

在现代工业蓬勃发展的今天, 数控机床及其零部件已成为工业生产不可或缺的部分。齿轮是数控机床的重要零部件。材料及其成形工艺是齿轮性能的重要影响因素。粉末锻造作为一种常用的成形工艺备受业界的关注。王旭青等<sup>[1]</sup>分析了时效制度对挤压+锻造工艺路线的 FGH95 合金粉末高温合金组

织和性能的影响, 发现双级时效虽然降低了合金的持久寿命, 但提高了持久塑性。王海英等<sup>[2]</sup>研究了锻造粉末冶金 Ti6Al4V 合金的性能和组织, 研究表明二次锻造的粉末冶金 Ti6Al4V 合金具有较佳的力学性能 (抗拉强度大于 994 MPa、屈服强度大于 960 MPa、伸长率大于 17%)。辛立军等<sup>[3]</sup>研究和分析了锻造对粉末冶金纯铁软磁材料磁性能的影响规律, 获得了最佳的粉末冶金纯铁软磁材料的锻造工艺。孙露等<sup>[4]</sup>分析了锻造温度对含钼粉末热锻合金的显微组织及力学性能的影响, 发现 Mo 的质量分数和锻造温度共同影响合金的横向断裂强度, 并得

收稿日期: 2021-08-16; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 河南省科技厅软科学项目 (182400410039)

作者简介: 刘 波 (1967-), 男, 学士, 讲师

E-mail: linkong273770383@163.com

到了优选的 Mo 的质量分数 (1.46%) 和锻造温度 (950 ℃)。张广为等<sup>[5]</sup>研究了新型 Fe-C-Cu 系合金粉末锻造双材料连杆不同部位的疲劳性能,发现连杆大头的疲劳强度和疲劳极限较杆部低,其原因主要是 MnS 颗粒促使了疲劳裂纹扩展。王振宁等<sup>[6]</sup>研究了不同包套材料对钨粉末锻造中塑性变形和致密化的影响,发现在 45 钢、304 不锈钢和 GH4169 高温合金这 3 种包套材料中,最适合的材料为 304 不锈钢。侯琮等<sup>[7]</sup>探索了新型粉末高温合金多火次等温锻造过程中的晶粒细化机制,并采用 DEFORM-3D 软件进行了等温锻造过程的数值模拟。李月英等<sup>[8]</sup>研究和分析了不同铬含量铁基粉末烧结锻造钢的显微组织与性能,获得了优选的铬含量 (0.55%), 此时抗拉强度达到 1310 MPa。李心蕊等<sup>[9]</sup>对螺旋锥齿轮锻造成形过程进行了数值模拟并分析了模具变形规律,得到了终锻成形过程中的应力、应变等的演变与分布规律。张义帅等<sup>[10]</sup>基于减小热处理畸变技术进行了 20CrMnMoH 高性能齿轮钢预先热处理工艺研究。张冰清等<sup>[11]</sup>研究了合金粉末锻造齿轮材料 Q61 合金 (Fe-Ni-Cu-C-Co) 的组织与性能,获得了密度为  $7.87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、抗拉强度为 1052.8 MPa 的高质量行星直齿轮。王琪等<sup>[12]</sup>研究和分析了合金粉末锻造 Fe-Ni-Cu-C-Mo 合金齿轮材料的热处理及性能,发现了马氏体体积分数、材料硬度与冷却速率之间的对应关系。

现有的研究主要集中在粉末锻造材料的组织与力学性能,较少关注粉末锻造材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能。随着高端数控机床的快速发展,市场对数控机床齿轮材料提出了更高的性能要求。目前常用的 Fe-Ni-Cu-C-Co 合金材料难以满足市场要求,尤其是材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能不够理想,迫切需要开发新的材料以满足高端数控机床齿轮发展。合金元素钒 (V) 是一种有助于提高铁基材料强韧性、耐磨损性能、抗腐蚀性能、承受冲击载荷能力的常用合金元素。但目前关于在 Fe-Ni-Cu-C-Co 合金齿轮材料中添加合金元素 V 的研究还鲜有报道。为此,笔者在前期研究的基础上,进行了数控机床齿轮新型材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的粉末锻造研究,以期对粉末锻造齿轮材料提供新的思路和试验数据,以促进含钒 Fe-Ni-Cu-C-Co 合金齿轮材料的工业化应用。始锻温度是粉末锻造中极其重要的一个工艺参数,为此本文重点研究始锻温度对粉末锻造含钒 Fe-Ni-Cu-C-Co 合金齿轮材料耐磨损性能和耐腐蚀性能的影响,探讨始锻温度对材料耐磨损性能

和耐腐蚀性能的影响机理,并获得优化的始锻温度。

## 1 试验材料和方法

试验以新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金试样 (以下简称为试验材料) 为研究对象,试验材料的化学成分如表 1 所示。用铁粉、镍粉、铜粉、碳粉、钨粉、钼粉为原料,粉末原料粒径为  $\Phi 15 \sim \Phi 30 \mu\text{m}$ , 试验材料的制备工艺流程如图 1 所示。球磨时采用 MITR 行星球磨机,球料比为 8:1、球磨转速为  $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、球磨时间为 60 min,球磨的主要目的是使原料充分混合均匀。真空烧结是在 VMK-1800 型真空烧结炉中完成的,烧结温度为 1150 ℃、保温时间为 60 min、真空度为 58~62 Pa。烧结坯的密度测量结果为  $6.82 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。粉末锻造前将烧结坯在中频感应炉中进行感应加热,保温时间为 30 min,加热温度为试验材料始锻温度。粉末锻造时采用自制模具,在 TXCJ-1000 型金属挤压机上进行试验材料的闭式模锻,锻造前将模具和顶料杆预热至 250 ℃。试验材料的粉末锻造模具示意图如图 2 所示,模具采用进口 H13 钢制作而成。粉末锻造得到的试样为方形,尺寸为  $350 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。试验材料的具体锻造工艺参数如表 2 所示。由于始锻温度是粉末锻造中的一个重要工艺参数<sup>[11-12]</sup>,为此,本文重点研究始锻温度对粉末锻造试验材料的影响,试验过程中仅改变始锻温度,终锻温度、锻造压力、模具预热温度、顶料杆预热温度、润滑条件等其他工艺参数均保持不变。

表 1 试验材料的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of test materials  
(%, mass fraction)

Ni	Cu	C	Mo	V	其他杂质元素	Fe
1.786	1.072	0.591	0.547	0.188	<0.100	余量

在各试样中部位置切取磨损试样 (圆片型, 尺寸为  $\Phi 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ), 在摩擦磨损试验机 (型号为 MMW-1) 上进行室温磨损试验, 选用试验材料本体作为对磨的材料, 磨损时间设定为 10 min、磨轮转速选择为  $350 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、相对滑动速度设定为  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 以磨损体积作为试验材料耐磨损性能的具体表征, 并采用扫描电子显微镜 (型号为 JSM6510) 观察试样表面的磨损情况。

在各试样中部位置切取腐蚀试样 (长方形, 尺寸

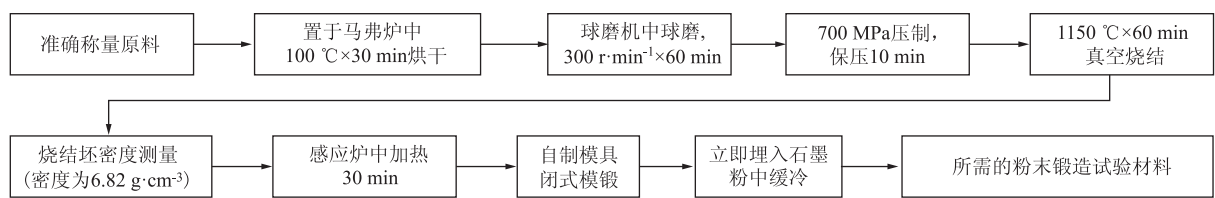


图 1 试验材料的制备工艺流程  
Fig. 1 Preparation process flow of test materials

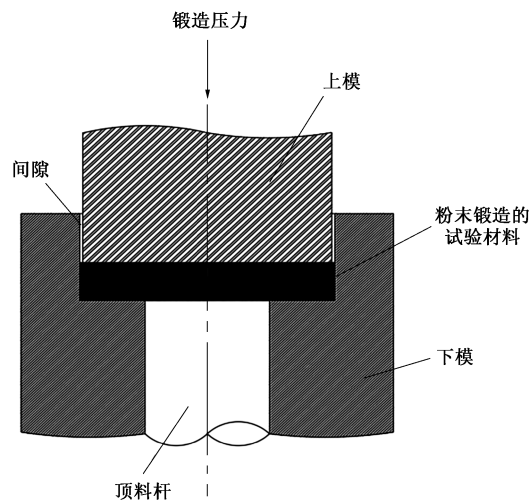


图 2 试验材料粉末锻造模具示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of powder forging die for test materials

表 2 各试样的粉末锻造工艺参数

Table 2 Powder forging process parameters of each sample

试样 编号	始锻温度/ °C	终锻温度/ °C	锻造压力/ MPa	模具预热 温度/°C	顶料杆预热 温度/°C
1 <sup>#</sup>	800	360	450	250	250
2 <sup>#</sup>	900	360	450	250	250
3 <sup>#</sup>	1000	360	450	250	250
4 <sup>#</sup>	1100	360	450	250	250
5 <sup>#</sup>	1200	360	450	250	250

为 30 mm×20 mm×10 mm)，在电化学工作站（型号为 Gamry-Reference 600）上进行室温电化学腐蚀试验，腐蚀试样作为工作电极，甘汞电极作为参比电极，铂黑电极作为辅助电极，腐蚀液为 5 mol·L<sup>-1</sup> 氯化钠溶液。测试前先在 -1.0 V 恒电位下极化 180 s，以去除试样表面氧化物等杂质。以腐蚀电位作为各试样耐腐蚀性能的具体表征，也采用扫描电子显微镜（型号为 JSM6510）观察试样表面的腐蚀情况。

在试验材料各试样中部位置切取密度测试试样（圆片形，尺寸为  $\Phi 20$  mm×10 mm），采用排水法准确测试各试样的密度。试验材料的孔隙率计算公式

如式（1）所示。

$$\gamma = (1 - \rho_1 / \rho_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中： $\gamma$  为孔隙率； $\rho_1$  为试验材料的测试密度； $\rho_0$  为试验材料的理想密度（无间隙）。

2 试验结果及讨论

2.1 密度

经计算，试验材料的理想密度（无间隙）为 8.04 g·cm<sup>-3</sup>。不同始锻温度下各试样的密度和孔隙率测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，始锻温度影响了试验材料的密度和孔隙率。随着始锻温度从 800 °C 逐步提高至 1200 °C，试验材料的密度先增大后减小，试验材料的孔隙率先减小后增大，试验材料的致密性先提高后下降。当始锻温度低至 800 °C 时，试验材料密度最小（7.46 g·cm<sup>-3</sup>）、孔隙率最大（7.21%）、致密性最差。当始锻温度提高至 1100 °C 时，试验材料密度最大（7.98 g·cm<sup>-3</sup>）、孔隙率最小（0.75%）、致密性最好，此时密度较始锻温度为 800 °C 时的试样的致密度增大了 0.52 g·cm<sup>-3</sup>，增大幅度达到 7.0%，孔隙率较始锻温度为 800 °C 时的试样减小了 6.46%。当始锻温度进一步提高至 1200 °C 时，试验材料的密度较始锻温度为 1100 °C 时的试样减小，孔隙率非但未进一步减小反而增大，致密性有所下降。由此可以看出，当始锻温度为 1100 °C 时，试验材料具有最佳的致密性。

2.2 耐磨损性能

不同始锻温度下各试样的室温耐磨损性能测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，始锻温度对试验材料耐磨损性能产生了显著影响。随着始锻温度从 800 °C 逐步提高至 1200 °C，试验材料的磨损体积先减小后增大，试验材料的耐磨损性能先提高后下降。当始锻温度低至 800 °C 时，试验材料的磨损体积最大、耐磨损性能最差。当始锻温度提高至 1100 °C 时，试验材料的磨损体积最小、耐磨损性能最好，此时磨损体积较始锻温度为 800 °C 时的试样减小了 6.5×10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>，减小幅度达 28.4%。当始锻



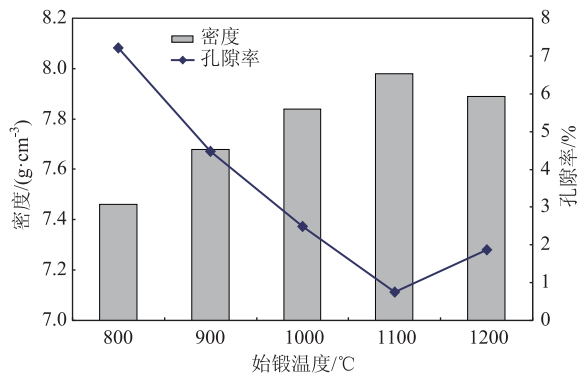


图 3 始锻温度对试验材料致密性的影响

Fig. 3 Influence of initial forging temperatures on compactness for test materials

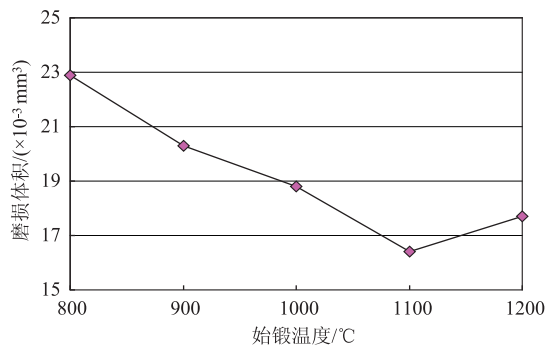


图 4 始锻温度对试验材料耐磨损性能的影响

Fig. 4 Influence of initial forging temperatures on wear resistance property for test materials

温度进一步提高至 1200 °C 时, 试验材料的磨损体积有所增大、耐磨损性能有所下降。由此可以看出, 当始锻温度为 1100 °C 时, 试验材料具有最佳的室温耐磨损性能。

图 5 为不同始锻温度下各试样在磨损试验后表面形貌的扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 照片。从图 5 可以看出, 当始锻温度低至 800 °C (图 5a) 时, 磨损试验后试样表面堆积较多形状、大小不一的团状或片状的脱落及起皮, 磨损现象严重, 试样的耐磨损性能较差。随着始锻温度逐渐提高, 在磨损试验后试验材料表面的脱落及起皮逐渐减少, 磨损现象逐渐减轻, 试验材料的耐磨损性能逐渐提高。当始锻温度为 1100 °C (图 5d) 时, 在磨损试验后试验材料表面仅有少量的脱落或起皮, 磨损现象明显减轻, 试验材料的耐磨损性能最佳。但是当始锻温度进一步提高至 1200 °C (图 5e) 时, 在磨损试验后, 试验材料表面的脱落或起皮增加, 磨损现象有所加重, 试验的材料耐磨损性能非但未下降反而有所增大。

在粉末锻造过程中, 始锻温度是一个重要的工艺参数。但采用过低的始锻温度对试验材料进行粉

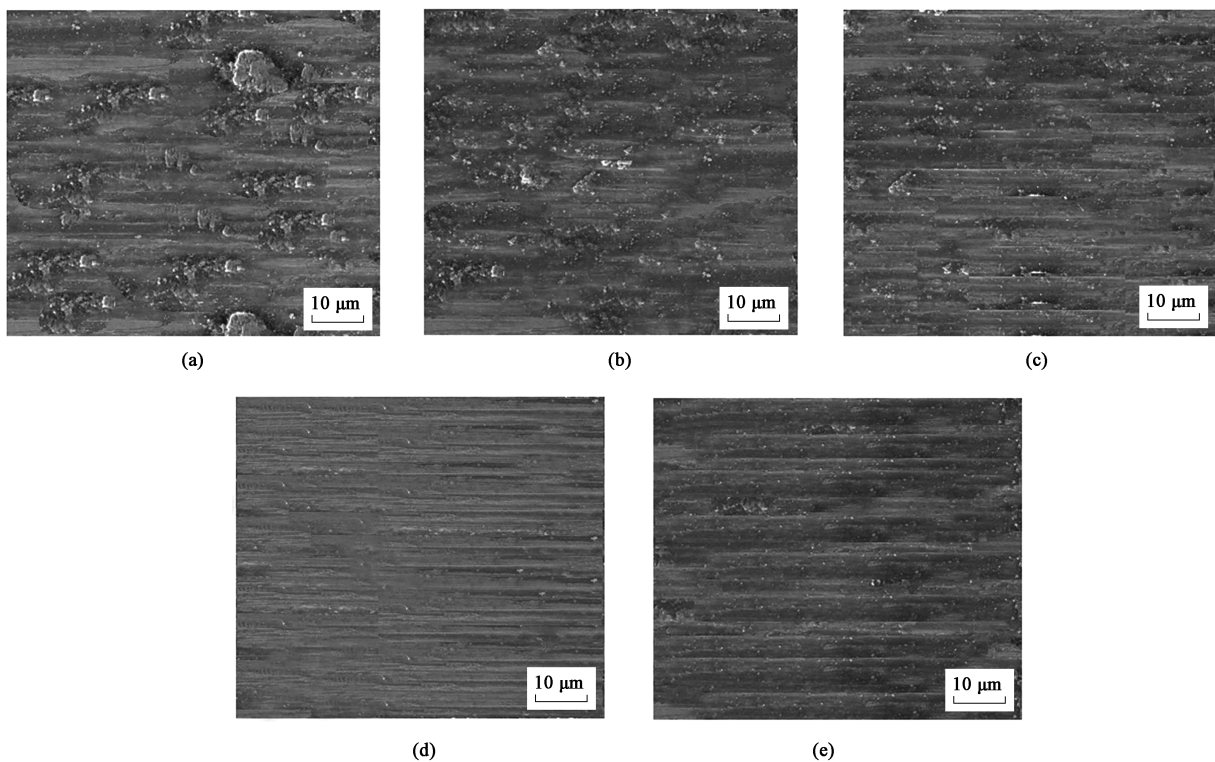


图 5 不同始锻温度下试验材料磨损试验后的表面形貌

(a) 800 °C (b) 900 °C (c) 1000 °C (d) 1100 °C (e) 1200 °C

Fig. 5 Surface morphologies after wear test of test materials at different initial forging temperatures



未锻造时, 试验材料的塑性较差、变形抗力过大, 使得试验材料在粉末锻造过程中产生过大的孔隙率, 导致试验材料在磨损试验过程中由于内部不够密实容易出现团状或片状的脱落及起皮现象, 耐磨损性能较差。提高始锻温度有助于改善试验材料在粉末锻造过程中的塑性, 降低变形抗力, 从而获得内部空隙更少、孔隙率更低的密实材料, 可以更有效地抵御外界的摩擦磨损, 故可有效提高试验材料的耐磨损性能。但是, 如果始锻温度过高, 试验材料容易出现脱碳、严重氧化、过热、过烧等问题, 导致材料的孔隙率变大、组织粗化, 使其在磨损试验过程中无法具有更佳的耐磨损性能, 使耐磨损性能下降。因此, 选择合适的始锻温度是确保试验材料具有较佳耐磨损性能的重要保证。从提高耐磨损性能的角度出发, 试验材料的始锻温度优选为 1100 ℃。

### 2.3 耐腐蚀性能

不同始锻温度下, 试验材料各试样的室温耐腐蚀性能测试结果如图 6 所示, 其中  $I$  为电流。从图 6 可以看出, 始锻温度对试验材料的耐腐蚀性能产生了较为明显的影响。随着始锻温度从 800 ℃ 逐步提高至 1200 ℃, 试验材料的腐蚀电位先正移后负移, 试验材料耐腐蚀性能先提高后下降。当始锻温度低至 800 ℃ 时, 试验材料的腐蚀电位最负 ( $-0.438$  V)、耐腐蚀性能最差。当始锻温度提高至 1100 ℃ 时, 试验材料的腐蚀电位最正、耐腐蚀性能最好, 此时腐蚀电位较始锻温度为 800 ℃ 时的试样的腐蚀电位正移了 102 mV, 正移幅度达到 23.1%。当始锻温度进一步提高至 1200 ℃ 时, 试验材料的腐蚀电位较始锻温度为 1100 ℃ 时的试样发生了负移、耐腐蚀性能有所下降。由此可以看出, 当始锻温度为 1100 ℃ 时, 试验材料具有最佳的室温耐腐蚀性能。

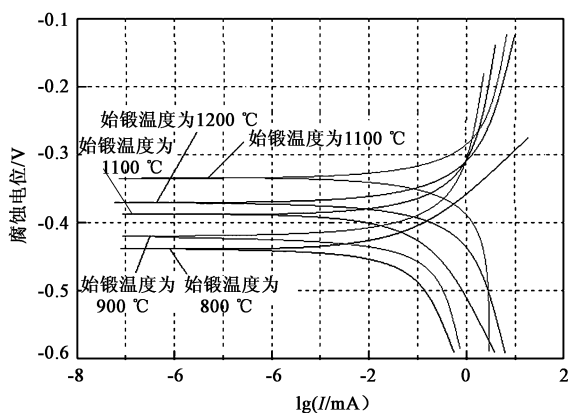


图6 始锻温度对试验材料耐腐蚀性能的影响

Fig. 6 Influence of initial forging temperature on corrosion resistance property for test materials

图 7 为不同始锻温度下各试样在电化学试验后的表面形貌 SEM 照片。从图 7 可以看出, 当始锻温度低至 800 ℃ (图 7a) 时, 试验材料在电化学试验后表面出现较多、较大的腐蚀孔洞, 腐蚀现象严重, 试样的耐腐蚀性能较差。随着始锻温度逐渐提高, 在电化学腐蚀试验后试验材料表面的腐蚀孔洞逐渐减少, 腐蚀现象逐渐减轻, 试验材料的耐腐蚀性能逐渐提高。当始锻温度为 1100 ℃ (图 7d) 时, 在电化学腐蚀试验后试验材料表面仅有少数的细小腐蚀坑, 腐蚀现象明显减轻, 试验材料的耐腐蚀性能最佳。但是当始锻温度进一步提高至 1200 ℃ (图 7e) 时, 在腐蚀试验后试验材料表面的腐蚀孔洞数量有所增加, 腐蚀现象进一步加重, 试验材料的耐腐蚀性能非但未提高反而有所下降。

始锻温度作为试验材料粉末锻造的一个重要工艺参数, 对材料的耐磨损性能产生重要影响。这主要是因为始锻温度对试验材料粉末锻造过程中的塑性和变形抗力产生了显著影响, 对粉末锻造产品的空隙率产生了重要影响。如果始锻温度过低, 试验材料的塑性很差、变形抗力很大, 使得粉末锻造材料的孔隙率较大, 材料内部的密实性较差, 导致材料在腐蚀介质中难以抵抗介质侵蚀, 很容易出现较大的腐蚀孔洞, 表现出较差的抗腐蚀能力。适当增大始锻温度, 将增大材料的塑性、减小变形抗力, 使得粉末锻造材料的孔隙率降低, 提高材料的内部密实性, 从而在腐蚀介质中具有较好的抵抗侵蚀能力, 展现出较好的抗腐蚀能力。但是, 如果选择过高的始锻温度, 在粉末锻造过程中容易出现脱碳、严重氧化、过热、过烧等问题, 使得粉末锻造材料的孔隙率增大、组织发生粗化, 导致材料在腐蚀介质中难以拥有较佳的抗腐蚀能力, 使得材料的耐腐蚀性能下降。所以, 为了提高试验材料的耐腐蚀性能, 需要选择合适的始锻温度。从提高耐腐蚀性能的角度出发, 试验材料的始锻温度优选为 1100 ℃。

### 2.4 讨论与分析

作为一种将粉末冶金与精密锻造融为一体的新型锻造技术, 粉末锻造不仅提高了模锻的制坯工序, 还可以有效地提高材料的利用率和成形精确性, 并可以降低锻造能耗, 在数控机床齿轮、汽车连杆等产品成形上具有广阔的应用前景<sup>[13]</sup>。在新型数控机床齿轮试验材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金粉末锻造过程中, 始锻温度是极其重要的工艺参数, 不仅关系到锻件的质量, 还影响能耗、生产成本等。因此,

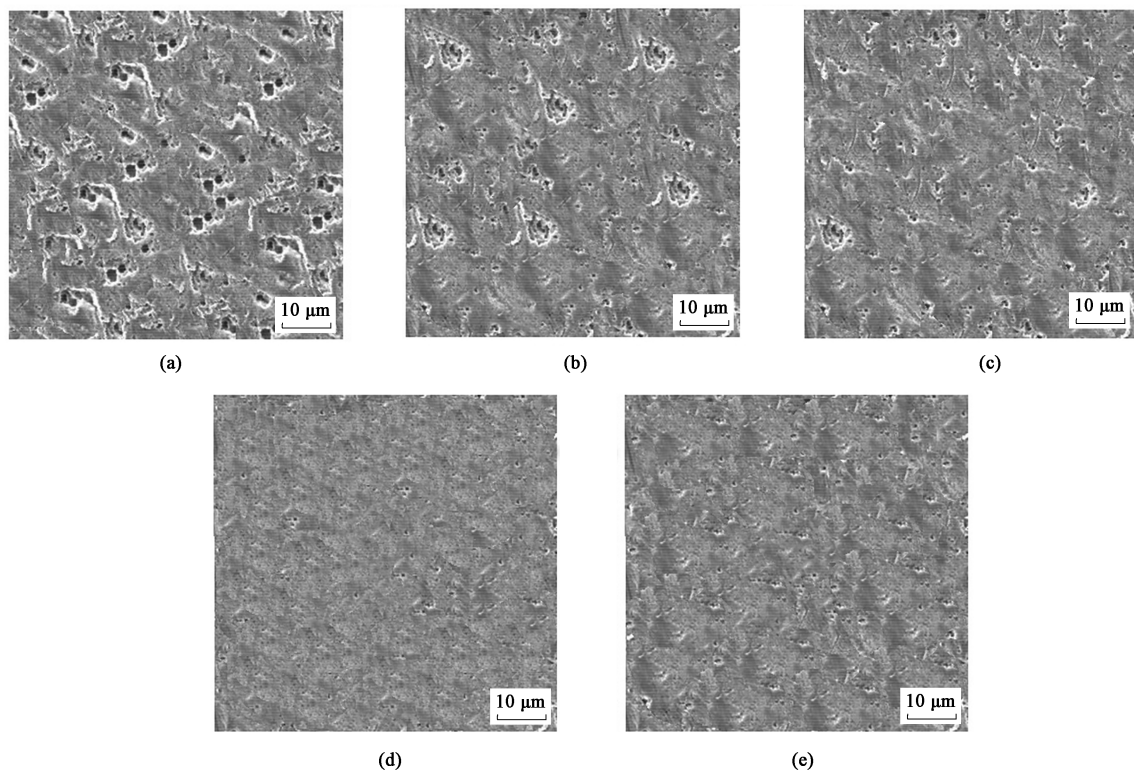


图 7 不同始锻温度下试验材料腐蚀试验后的表面形貌

(a) 800 °C (b) 900 °C (c) 1000 °C (d) 1100 °C (e) 1200 °C

Fig. 7 Surface morphologies after corrosion test of test materials at different initial forging temperatures

深入研究粉末锻造过程中的始锻温度,将有助于促进新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的推广应用。在粉末锻造中,如果始锻温度过低,试验材料变形不充分、变形抗力大,材料成形性差,使得制备得到的试验材料的致密性较差,试验材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能较差。在粉末锻造过程中,提高锻造温度可以起到两个方面的主要作用:(1)减小试验材料的变形抗力,增大试验材料的流动性,促进试验材料在锻造过程中得以充分变形,从而促使内部原有的孔隙发生变形与闭合,有助于消除原有孔隙,提高材料的致密度;(2)有助于抵消加工硬度,使得试验材料的密度增大,并且有助于发生动态再结晶,改善试验材料的内部组织,从而有效地提高试验材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能。这也是始锻温度从 800 °C 逐步提高至 1100 °C,试验材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能逐步提高的原因。但是,始锻温度过高,容易造成试验材料内部的晶粒粗化,甚至产生过烧等问题,导致试验材料的致密性和内部组织未进一步得到改善,反而出现恶化,导致试验材料的耐磨损性能和耐腐蚀性能下降。所以,在新型数控机床齿轮试验材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V

合金粉末锻造中,始锻温度不宜过高也不宜过低,优选为 1100 °C。

### 3 结论

(1) 采用粉末锻造方法,可以制备出耐磨损性能和耐腐蚀性能均较佳的新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金。

(2) 随着始锻温度从 800 °C 逐步提高至 1200 °C,新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的磨损体积先减小后增大、腐蚀电位先正移后负移、密度先增大后减小,齿轮材料的耐磨损性能和耐磨损性能先提高后下降。

(3) 与始锻温度为 800 °C 时比较,始锻温度为 1100 °C 时,粉末锻造的新型数控机床齿轮试验材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的磨损体积减小  $6.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$ ,减小幅度达到 28.4%;腐蚀电位正移 102 mV,正移幅度达到 23.1%;密度增大  $0.52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,增大幅度达到 7.0%。新型数控机床齿轮材料 Fe-Ni-Cu-C-Mo-V 合金的始锻温度优选为 1100 °C。

## 参考文献:

- [1] 王旭青, 彭子超, 罗学军, 等. 时效制度对挤压+锻造工艺路线 FGH95 粉末高温合金组织和性能的影响 [J]. 材料工程, 2020, 48 (5): 120-126.
- Wang X Q, Peng Z C, Luo X J, et al. Effect of aging treatment on microstructure and properties of HEX + HIF FGH95 superalloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48 (5): 120-126.
- [2] 王海英, 杨芳, 郭志猛, 等. 锻造粉末冶金 Ti6Al4V 合金的性能和组织研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (8): 2855-2860.
- Wang H Y, Yang F, Guo Z M, et al. Properties and microstructure of forged powder metallurgy Ti6Al4V alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49 (8): 2855-2860.
- [3] 辛立军, 江利民, 张广安, 等. 锻造对粉末冶金纯铁软磁材料磁性能的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2019, 24 (4): 334-339.
- Xin L J, Jiang L M, Zhang G A, et al. Effect of forging on magnetic properties of powder metallurgy pure iron soft magnetic materials [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2019, 24 (4): 334-339.
- [4] 孙露, 张继峰, 邱天旭, 等. 锻造温度对含钼粉末热锻合金显微组织及力学性能的影响 [J]. 粉末冶金技术, 2020, 38 (3): 174-182.
- Sun L, Zhang J F, Qiu T X, et al. Effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of powder hot-forged alloy contained molybdenum [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2020, 38 (3): 174-182.
- [5] 张广为, 张广明, 毛敏捷, 等. 新型 Fe-C-Cu 系粉末锻造双材料连杆不同部位的疲劳性能 [J]. 机械工程材料, 2020, 44 (4): 52-56.
- Zhang G W, Zhang G M, Mao M J, et al. Fatigue properties of different parts of new Fe-C-Cu powder-forged bimaterial connecting rod [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44 (4): 52-56.
- [6] Wang Z N, Li J, Shu J X. Plastic deformation and densification behavior by different sheath materials in molybdenum powder forging [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46 (11): 3239-3243.
- [7] 侯琼, 陶宇, 贾建. 新型粉末高温合金多火次等温锻造过程中晶粒细化机制 [J]. 工程科学学报, 2019, 41 (2): 209-215.
- Hou Q, Tao Y, Jia J. Mechanism of grain refinement of an advanced PM superalloy during multiple isothermal forging [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41 (2): 209-215.
- [8] 李月英, 许兆一, 倪慨宇. 不同铬含量铁基粉末烧结锻造钢的显微组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (11): 42-46.
- Li Y Y, Xu Z Y, Ni K Y. Microstructure and properties of ferrous powder sintering forging steel with different Cr content [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42 (11): 42-46.
- [9] 李心蕊, 邢彪, 管延锦, 等. 螺旋锥齿轮锻造成形过程数值模拟及其模具变形规律 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (9): 16-21.
- Li X R, Xing B, Guan Y J, et al. Numerical simulation on forging process of spiral bevel gear and mold deformation law [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (9): 16-21.
- [10] 张义帅, 孙红星, 张超, 等. 基于减小热处理畸变的 20CrMnMoH 高性能齿轮预先热处理工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (3): 184-191.
- Zhang Y Si, Sun H X, Zhang C, et al. Pre-heat treatment process of 20CrMnMoH high performance gear based on reducing heat treatment distortion [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (3): 184-191.
- [11] 张冰清, 王琪, 王邃, 等. 粉末锻造齿轮材料的组织与性能研究 [J]. 粉末冶金技术, 2020, 38 (2): 113-120.
- Zhang B Q, Wang Q, Wang S, et al. Study on the microstructure and properties of powder-forged gear materials [J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38 (2): 113-120.
- [12] 王琪, 张冰清, 王邃, 等. 粉末锻造 Fe-Ni-Cu-C-Mo 齿轮材料热处理及性能研究 [J]. 粉末冶金技术, 2021, 39 (1): 33-40.
- Wang Q, Zhang B Q, Wang S, et al. Heat treatment and properties of powder forged Fe-Ni-Cu-C-Mo gear materials [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2021, 39 (1): 33-40.
- [13] 牛彤. 高性能环形制件粉末锻造工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- Niu T. Research on Powder Forging Process of High Performance Ring Parts [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

## 警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn), 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net), 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃处理, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: [fst@263.net](mailto:fst@263.net); 010-62920652。

《锻压技术》编辑部