# 高铬铸铁的液态模锻工艺及热处理性能研究

史今

新疆职业大学智能制造学院　新疆乌鲁木齐　830011

**摘要**：传统的高铬铸铁采用重力铸造方式，但这种方式往往存在铸造成形差和模具开裂等情况，因此研究提出一种采用液态模锻的方式。通过对液态模锻过程中模具进行设计和工艺参数分析，达到优化工艺、提升模具性能的目的，同时研究使用热处理以提升金属性能。结果表明：热处理后温度530℃时金属的硬度达56.8HRC，增加了7.1HRC；热处理后高铬铸铁冲击韧度最高可达24.8J/cm$^2$。由此可见，通过热处理后的高铬铸铁能够有效提升金属性能，同时工艺优化后的模具性能也得到有效的改善，这对高铬铸铁的液体模锻造工艺优化和锻造模具性能的提升有较好的指导意义。

**关键词**：高铬铸铁；液态模锻；热处理；工艺模拟

# Research on liquid forging process and heat treatment properties of high chromium cast iron

SHI Jin

College of Intelligent Manufacturing, Xinjiang Vocational University, Urumqi 830011, Xinjiang, China

**Abstract:** Traditional high chromium cast iron is cast by gravity casting, but this method often suffers from casting defects and model cracking. Therefore, a liquid forging method is proposed in this study. By designing the mold and analyzing the process parameters during liquid forging, the goal is to optimize the process and improve the performance of the mold. Simultaneously researching the use of heat treatment to enhance the actual performance of molten metal. The research results show that the hardness of the metal reaches 56.8HRC at a temperature of 530℃ after heat treatment, and the hardness of the metal increases by 7.1HRC. The impact toughness of high chromium cast iron metal can reach up to 24.8J/cm$^2$. It can be seen that high chromium cast iron after heat treatment can effectively improve metal properties, and the mold performance after process optimization is also effectively improved. This has good guiding significance for optimizing the liquid forging process of high chromium cast iron and improving the performance of forging molds.

**Keywords:** high chromium cast iron; liquid die forging; heat treatment; workmanship simulation

## 1　序言

高铬铸铁因其优异的耐磨性和耐蚀性，广泛应用于矿山机械、建材设备和工程机械等领域。高铬铸铁的优异性能主要归因于其高铬含量及其形成

作者简介：史今，副教授，本科，主要从事智能控制相关研究，E-mail：hyom0919@163.com。

的硬质碳化物结构[1]。然而传统铸造工艺在生产高铬铸铁时，往往面临铸件组织不均、缩松及气孔等缺陷，这不仅影响了铸件的力学性能，还增加了生产成本[2]。液态模锻（Liquid Forging）作为一种新型的锻造工艺，通过将液态金属注入模具并施加高压，使金属在高压下凝固成形，从而有效改善了锻件内部组织和表面质量[3]。液态模锻工艺结合了铸造的优点，可以显著提高锻件的致密度和力学性能，降低锻造缺陷的发生率[4]。在对高铬铸铁的生产工艺研究中，已经有很多专家学者对这一领域进行了研究分析。LI等[1]为解决铸铁过程中碳化物颗粒熔解度较低的问题，对H13和Cr8模具钢进行控制锻造和冷却提出了新的参数。发现当两次拉伸累积应变为1.609时，碳化物颗粒的分布和数量得到改善。试验结果表明，随着变形温度的升高，碳化物颗粒的尺寸和数量减少，熔解程度显著提高[5]。

基于此，为了提升高铬铸铁液态模锻中锻件的实际锻造效果，研究对高铬铸铁液态模锻工艺流程进行改进。研究创新性地使用一模四件的模具生产方式，使用可编程控制（Programmable Logic Controller，PLC）系统进行全程液态模锻控制，以此提升对高铬铸铁工艺流程控制效果。最后使用热处理对金属液进行处理，以此提升金属液的性能，提升液态模锻效果。液态模锻工艺通过高压凝固细化晶粒、减少缺陷，从而提高材料的致密度和韧性；而热处理则通过改变微观组织结构，进一步提升了材料的硬度和冲击韧度。此外，工艺参数的精确控制，对于优化材料性能和控制锻造缺陷至关重要。通过硬度和冲击韧度检测及微观组织分析，确定了最佳的热处理工艺参数，为高铬铸铁在矿山机械、建材设备和工程机械等领域的应用提供了理论支持和工艺指导。

## 2　液态模锻工艺及热处理过程分析

### 2.1　高铬铸铁液态模锻锤头设计及工艺分析

锤柄采用韧性好的低碳或中碳钢，尺寸为45mm宽、25mm厚，而锤头工作面经热处理后硬度超过60HRC，复合深度在70～90mm，能承受高达3000N的冲击力，设计寿命超过10000次冲击，磨损率低于0.05mm/h。选择高铬铸铁作为锤头材料，是因为其高强度和耐磨性，适合在矿山和工程机械中应用[6-9]。研究对象是高铬铸铁复合锤头，这种锤头因其出色的耐磨性和耐蚀性，在矿山机械、建材设备和工程机械等领域有着广泛的应用。选择液态模锻工艺是因为它结合了铸造和锻造的优势，能够显著提高铸件的致密度和力学性能，同时减少组织不均、缩松和气孔等铸造缺陷。与传统的重力锻造或单纯铸造相比，液态模锻工艺通过精确控制工艺参数，更有效地控制缩松概率，提升模具性能和锻造效果，并通过热处理进一步增强金属性能。液态模锻取决于材料的刚度大小和材质，以及模具的精度。同时对于模具的液态锻造过程精度，主要受模具和金属液的充型时间和充型程度所决定。图1所示为液态模锻的主要设计方案。

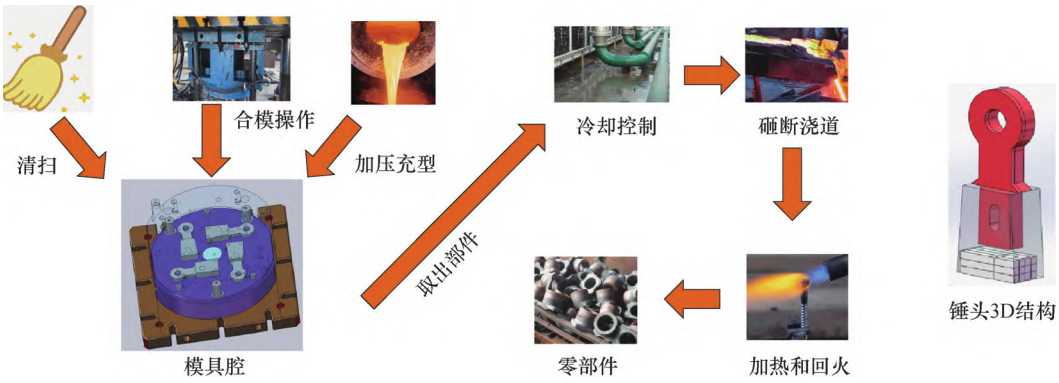



图1　液态模锻主要设计方案

从图1可看出，在液态模锻过程中，首先要选定材料和模具，明确锻造任务。接着，收集数据以确定工艺，绘制锻造图，并选择合适的设备，分析工艺参数。根据图样加工和调试模具，实现一模多件生产。模具设计成中心对称、由多个锻模组成，以满足复合型锤头的锻造需求。

### 2.2 液态模锻工艺参数分析

液态模锻模具分为上下两个部分模具，因此需要对模具的扩张力和模具的夹紧力进行设置。模具的扩张力是液态模锻比压和实际压力变化的面积比值大小，因此在工艺设计中要求总的投影面积比值需要小于模具的夹紧力即可[10-12]。在液态模锻过程中，必须精确控制加压和保压时间，以避免模具损坏和金属液裂纹。加压时间应尽可能短，而保压时间则需根据部件尺寸调整，每毫米增加1s。研究采用了集成进料、预热、卸料和冷却系统的锻造工艺，并通过PLC控制主液压缸快速下压和保压，压力范围设为0～6200kN，时间0～15s，以确保流程高效顺畅。预热系统采用电阻加热，其操作简单且加热均匀。热处理使用VBF-1200电阻炉对锤头加热，包括保温超过6h和随后的空冷机150℃低温处理超过12h。为延长模具寿命，需保持模具与环境的热平衡，避免温差过大导致损伤[13，14]。但预热时间长短也需要进行控制，保障模具的预热总功率达到一个较低状态，降低使用成本。模具的预热总功率计算公式[15]为

$$W=\frac{V\rho c(T_2-T_1)}{3.588\times10^3}+0.31A_b \tag{1}$$

式中 $W$——模具预热总功率（W）；

$V$——锻造模具体积（$m^3$）；

$\rho$——金属密度（$kg/m^3$）；

$c$——比热容[J/（kg·℃）]；

$T_2$——设定温度（℃）；

$T_1$——初始温度（℃）；

$3.588\times10^3$——用于单位转换或归一化的常数；

$A_b$——暴露表面积（$m^2$）；

0.31——表面积相关系数。

通过计算得出$\frac{\rho c}{3.588\times10^3}$近似值约为0.001，因此得到式（2）[16]，即

$$W=0.001V+0.31A_b \tag{2}$$

在进料系统的工艺设计中，熔炼好的液体会通过进料系统浇入模具中，金属液的质量计算公式为

$$m=4V\rho+\pi R^2L\rho \tag{3}$$

式中 $m$——注入金属液的质量（kg）；

$R$——料饼的半径（m）；

$L$——料饼的厚度（m）。

金属液通过进料槽进入锻造料筒，并在进料前对模具完成充分的预热。

### 2.3 液态模锻工艺热处理分析

由于液态模锻过程中部件对工艺的要求和锻造机主缸和下缸的特殊性，因此使用主缸进行压头的充型。同时在进行热处理过程中，压室在充型时会因受热膨胀，造成压头的直径变化，因此在进行热处理前需要确定压头的膨胀系数，进而决定压头的直径大小，其计算公式为[17]

$$\Delta d=ad(t_2-t_1) \tag{4}$$

式中 $\Delta d$——压头变化直径（m）；

$a$——膨胀系数；

$d$——初始直径（m）；

$t_2$——最终温度（℃）；

$t_1$——初始温度（℃）。

与此同时，为防止因工艺中的温度过高而造成黏连和磨损的情况，将浇入口的浇道工作面进行取面限制，浇道面积的计算公式[18]为

$$A_x=\frac{A_yv_y}{v_z} \tag{5}$$

式中 $A_x$——浇道面积（$m^2$）；

$A_y$——压头面积（$m^2$）；

$v_y$——压头速度（m/s）；

$v_z$——金属液填充速度。

由于顶杆固定方式的不同，因此需要对顶杆的载荷临界值进行分析，其计算式为

$$P=\eta\frac{EJ}{l^2n} \tag{6}$$

式中 $P$——顶杆的临界载荷（N）；

$\eta$——顶杆稳定状态系数；

$E$——顶杆的弹性模量（Pa）；

$J$——顶杆惯性力矩（N·m）；

$n$——顶杆的稳定程度；

$l$——顶杆长度（m）。

同时卸料板的厚度是用来固定顶板的，因此卸料板的厚度计算公式为

$$H\geqslant\sqrt[3]{\frac{PCK}{12.24B}\times10^{-7}} \tag{7}$$

式中 $H$——卸料板厚度（m）；

$C$——顶杆的最大跨度距离（m）；

$K$——跨度距离的系数；

$B$——推板宽度（m）。

由于液态模锻过程中，液态模锻模具受到金属液的影响导致温度上升，因此需要持续保持其冷却才能够完成工艺生产，锻件所需的冷却总热量计算公示为

$$Q=m[c_\rho(T'-T'')+C_n] \quad (8)$$

式中 $Q$——金属的总热量（J）；

$m$——金属液的质量（kg）；

$c_\rho$——金属液的比热容[J/（kg·℃）]；

$T'$——金属液温度（℃）；

$T''$——模具温度（℃）；

$C_n$——金属液融合的热量（kJ）。

根据上述工艺参数分析设计的总工艺流程如图2所示，该工艺流程是基于当前研究特点而搭建的。

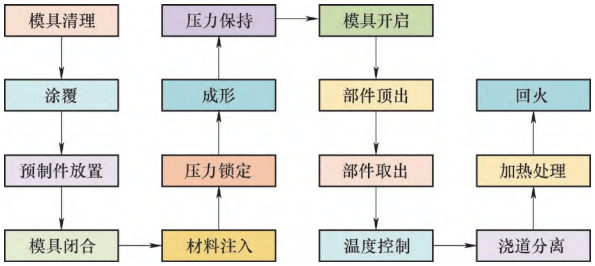
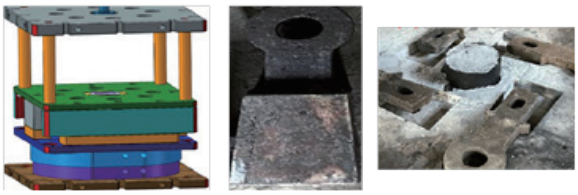



图2 总工艺流程

从图2可看出，总的工艺流程主要包含模具清理、涂覆、预制件放置、模具闭合、材料注入、加热处理及最终回火等操作步骤。锻造模具结构、锻造锤头与锻件展示如图3所示。



a）模具结构 b）锤头实物 c）锻件

图3 锻造模具结构、锻造锤头与锻件

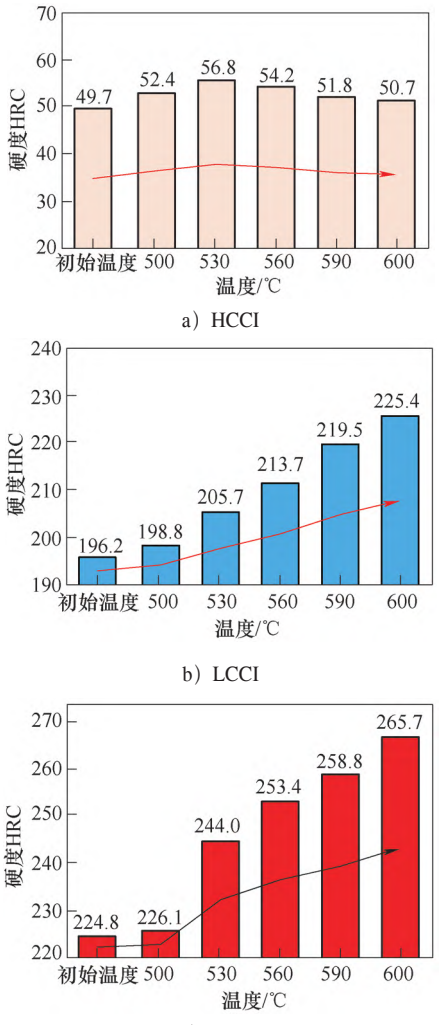
## 3 热处理试验与仿真优化工艺验证

### 3.1 试验方法与材料

将高铬铸铁的锤头，用激光切割机切割成55mm×10mm×10mm的样品，共切成四列三排样品若干，并对这些样品进行取样分析。$A_1$为奥氏体转变过程中727℃的共析线，由于高铬铸铁中金属和碳含量有所差异，因此研究中对$A_1$的取值有所变化，但研究中其临界值不能小于727℃。目前，业内一般的临界热处理温度在773～973K和500～600℃这两个范围内。本研究选择500～600℃进行试验。在模具液态模锻过程中设置浇注温度为1450℃，模具温度为180℃，比压为140MPa，保压时间为80s。试验光学显微镜选择Leica DMi8，色谱仪选择Zeiss Sigma500，X射线衍射仪选择PANalytical X'Pert Pro，硬度测试仪选择Wilson Hardness 574，冲击韧度试验机选择Instron Dynatup 8250。

### 3.2 热处理结果分析

为检测高铬铸铁液态模锻中热处理过程的实际变化情况与部件的实际情况，研究首先对液态模锻过程中的临界温度和奥氏体变化情况进行确定。检测在亚热处理下高铬铸铁（High Chromium Cast Iron，HCCI）、低铬铸铁（Low Chromium Cast Iron，LCCI）和高锰铸铁（High Manganese Cast Iron，HMCI）的硬度变化情况，检测结果如图4所示。



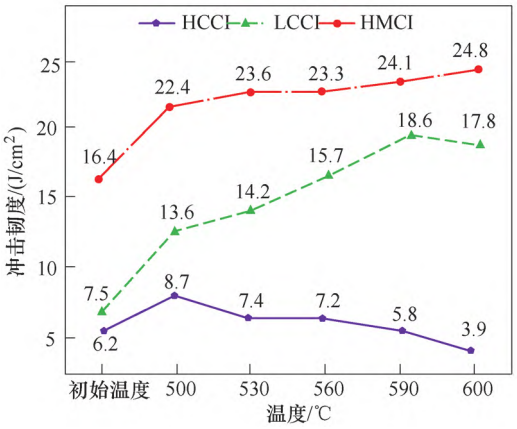

a）HCCI

b）LCCI

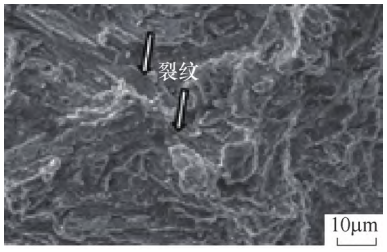
c）HMCI

图4 不同铸铁类型的亚热处理硬度对比

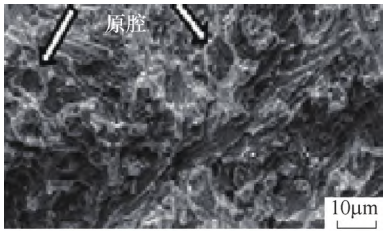
从图4a可看出，在进行亚热处理后HCCI的硬度变化呈现小幅度抛物线变化趋势。其中在温度为530℃时硬度达到最高值为56.8HRC，此时相较于初始温度其硬度增加了约7.1HRC。从图4b可看出，在LCCI亚热处理中，硬度随着温度的提升而增加，其中在600℃时硬度最高值达到225.4HRC，相较于初始温度其硬度增加了29.2HRC。从图4c可看出，在HMCI亚热处理中，硬度随着温度的升高而升高，其中硬度最高值为265.7HRC，相较于初始温度硬度提升了约40.9HRC。从图4a～c对比可看出，亚热处理后的合金硬度变化都有较大差异，这可能是由于合金中金属的含量不同而造成的，但经过亚热处理的合金硬度都不同程度得到提升，可见亚热处理能够提升金属硬度。将不同金属的冲击韧度进行对比分析，结果如图5所示。图5还展示了显微镜下不同温度HCCI的冲击断口情况。




a）不同温度下HCCI、LCCI、HMCI冲击韧度



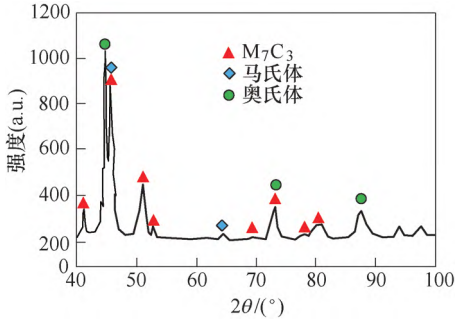

b）600℃ HCCI裂纹



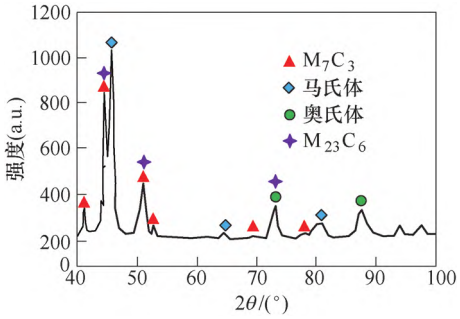

c）600℃ HCCI原腔

**图5　不同亚热处理下合金冲击韧度变化对比**

从图5可看出，在进行金属冲击韧度对比中，HCCI的冲击韧度变化随着热处理温度的升高而先出现上升趋势，之后开始出现下降趋势。其中，在500℃时出现了冲击韧度最大值，为8.7J/cm$^2$。其余两种合金材料随着亚热处理温度的升高而升高，其中HMCI的冲击韧度最高能够达到24.8J/cm$^2$，LCCI的冲击韧度最高能够达到18.6J/cm$^2$。从图5可看出，在600℃下，金属的冲击断口相对较多，同时断口较长，出现较多的断裂和空隙。断口相对较多说明材料在冲击试验中形成的断裂路径更复杂，断裂表面积增加。这可能是由于较高的温度使得金属基体受损的原因，造成了裂纹向外扩展。分析通过X射线衍射得到的500℃下，HCCI的不同碳化物基体衍射情况对比，结果如图6所示。




a）HCCI X衍射



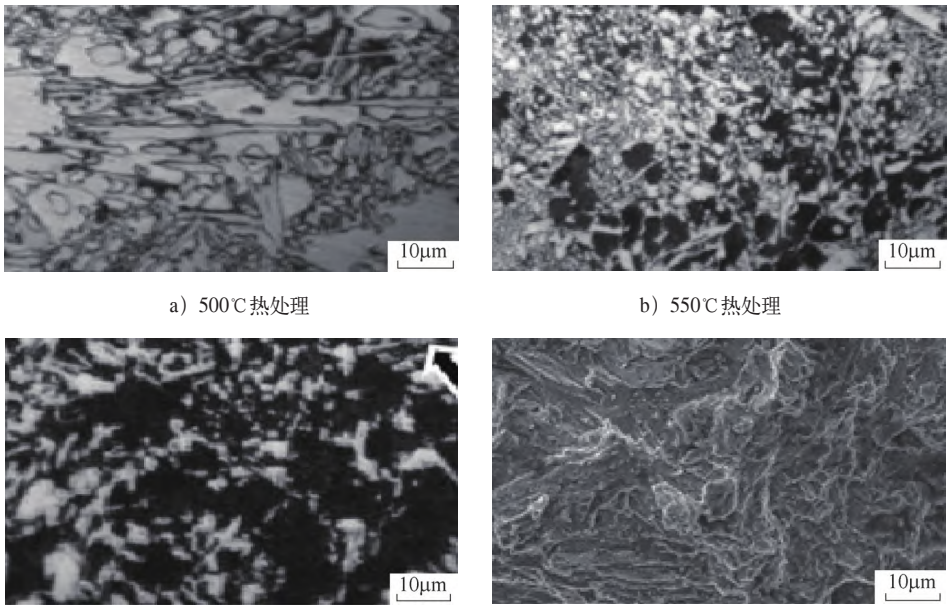

b）亚热处理后X射线衍射

**图6　亚热处理后合金X射线衍射结果**

从图6a可看出，在未进行亚热处理前模型的衍射情况中只发现$M_7C_3$碳化物、马氏体和奥氏体。从图6b可看出，在进行500℃亚热处理后合金的衍射中出现$M_{23}C_6$碳化物，同时金属中马氏体增加，奥氏体出现的次数降低。这说明通过热处理后的金属组织中马氏体的数量明显增加，同时热处理能够改变金属合金的碳化物状态和数量。因此，从3个试验中可以看出热处理温度以选择500℃较为合适。

### 3.3 仿真优化结果验证

研究使用MAGMASOFT软件进行液态模锻过程分析。将模具浇注系统导入MAGMASOFT软件，进行网格划分和条件设置。首先，在MeshWorks模块中检测模型质量，并确保网格质量良好。金属材料接触面的传热系数通常在1000～5000W/（$m^2$·℃）范围内。对于预制件与模具的固-固接触界面，传热参数设置为1500W/（$m^2$·℃）。由于压室内壁因涂覆保温材料，金属熔体与压室间的热传递效率降低，因此设定传热系数为1000W/（$m^2$·℃）。压头压力设置为80MPa，浇注时间为9s，施压时间为70s。图7所示为不同条件下高铬铸铁微观组织。




a）500℃热处理　b）550℃热处理

c）580℃热处理　d）600℃热处理

**图7　不同条件下高铬铸铁微观组织**

在显微镜下，暗黑色部分是马氏体与残留奥氏体组成的，渗碳体显亮白色。从图7所示不同温度热处理微观组织对比中可看出，在500℃热处理下锤头的马氏体基体和渗碳体基体较少，说明在该温度处理的锤头的柔韧性和硬度更好。马氏体较多会降低锤头的硬度，而渗碳体较多会增加锤头的脆性。

## 4　结束语

为提升高铬铸铁复合锤头的锻造效果和工艺流程，对液态模锻工艺进行研究分析，提出了一种热处理液态金属的方式。结果表明：热处理后，金属硬度在530℃时达到最高值56.8HRC，冲击韧度在500℃时达到最高24.8J/$cm^2$。优化后的工艺能有效地改善高铬铸铁的组织性能。由此可见，研究设计的工艺能够有效提升锤头的锻造效果和工艺数据参数，并且通过热处理后的金属性能得到有效提升。研究虽然取得了一些成果，但仍存在一些不足，如研究中热处理的温度变化只选取了一个温度段，后续研究中还将对更多热处理时间进行分析判断。

**参考文献：**

[1] LI C，HAN Y，LI E，et al. Microstructure and microhardness of H13 and Cr8 die steels in control forging and cooling process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance，2022，31（6）：4983-4997.

[2] 牛旭，刘越，王灼，等. 钒含量对秸秆膨化机螺杆用Cr20高铬铸铁组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2023，48（8）：8-15.

[3] 孔德瑜，晏洋，张浩，等. 基于GA-BP神经网络晶粒尺寸预测模型的轮端轮毂锻造工艺优化[J]. 精密成形工程，2024，16（3）：44-51.

[4] 李天瑞，冯宏伟，黄滢秋，等. 旋转锻造加工高比重W-Ni-Fe合金的退火工艺研究[J]. 热加工工艺，2024，53（6）：62-66.

[5] KARTHIKEYAN P，PRAMANIK S. Enhancement of H13 tool steel performance for die-casting process components via heat treatment[J]. JOM，2023，75（9）：3734-3744.

[6] 李艳威，韩培盛，朱晓宇. 基于包套压缩的高铬铸

铁塑性变形行为及力学性能[J]. 塑性工程学报，2023，30（5）：166-171.
[7] 韩跃. 铌对渣浆泵高铬铸铁组织和性能影响[J]. 铸造，2024，73（5）：650-652.
[8] 汪勇，余申卫，刘春溪，等. 不同陶瓷颗粒表面处理对陶瓷/高铬铸铁复合材料微观界面的影响[J]. 热加工工艺，2024，53（5）：142-146.
[9] 齐羿，薛喜云，焦斐，等. 盘式转向节锻造工艺优化与过程模拟分析[J]. 锻压技术，2023，48（9）：32-40.
[10] 王学亮，王勇杰，刘立艳，等. 熔模铸造高铬铸铁抛丸器叶片耐磨性[J]. 山东科学，2021，34（5）：42-48.
[11] 张效溥，王振兴，于延龙，等. TiC粒度对消失模铸造高铬铸铁力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2022，51（18）：68-71.
[12] 张凯，郭智，孙东云，等. 钼含量对高铬铸铁堆焊层组织及耐磨性的影响[J]. 钢铁，2024，59（4）：148-158.
[13] NODIR T，NOSIR S，SHIRINKHON T，et al. Development of technology to increase resistance of high chromium cast iron[J]. The American Journal of Engineering and Technology，2021，3（3）：85-92.
[14] 于洪军，宋传颂馨，程福超，等. 不同热处理条件下亚共晶高铬铸铁的组织和性能[J]. 金属热处理，2021，46（8）：56-60.
[15] LACAZE J，DAWSON S，HAZOTTE A. Cast iron: a historical and green material worthy of continuous research[J]. International Journal of Technology，2021，12（6）：1123-1138.
[16] SMOLIK J. Hard protective layers on forging dies—development and applications[J]. coatings，2021，11（4）：376-389.
[17] 张倩倩，陈冲，张聪，等. 硼对高铬铸铁铸渗层组织和性能的影响[J]. 材料导报，2022，36（4）：182-188.
[18] 邹廷信，聂程，毛拥军，等. 一种进口氧化锰矿焙烧还原与浸出试验研究[J]. 中国锰业，2022，40（2）：33-36.

（收稿日期：20250303）

（上接第92页）

deposition inconel 718 single track[J]. Journal of Materials Research and Technology，2024，33：1898-1909.
[15] ZHANG B，GAO Z，XIAO H，et al. Size effects and optimization during laser directed energy deposition on high thermal conductivity copper alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology，2024. DOI：10.1016/j.jmrt.2024.10.104.
[16] BAX B，RAJPUT R，KELLET R，et al. Systematic evaluation of process parameter maps for laser cladding and directed energy deposition[J]. Additive Manufacturing，2018，21：487-494.
[17] ZHANG S，ZHU H，ZHANG L，et al. Microstructure and properties of high strength and high conductivity Cu-Cr alloy components fabricated by high power selective laser melting[J]. Materials Letters，2019，237：306-309.
[18] YUE T Y，ZHANG S，WANG C Y，et al. Effects of selective laser melting parameters on surface quality and densification behaviours of pure nickel[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2022，32（8）：2634-2647.

（收稿日期：20250123）

（上接第101页）

[21] QIN L，XU J，LIAN J，et al. A novel electrodeposited nanostructured Ni coating with grain size gradient distribution[J]. Surface and Coatings Technology，2008，203（1-2）：142-147.
[22] CHENG Z，WAN T，LU L. Interface strain gradient enabled high strength and hardening in laminated nanotwinned Cu[J]. Acta Materialia，2023，256：119138.
[23] 辜敏，付遍红，杨明莉. 硫酸盐镀铜的研究进展[J]. 材料保护，2006（1）：44-47，83.
[24] 辜敏，李强，鲜晓红，等. PEG-Cl~-添加剂存在下的铜电结晶过程研究[J]. 化学学报，2007（10）：881-886.
[25] LIU X，SHEN L，QIU M，et al. Jet electrodeposition of nanocrystalline nickel assisted by controllable friction[J]. Surface and Coatings Technology，2016，305：231-240.
[26] ZHOU H，HUANG C，SHA X，et al. In-situ observation of dislocation dynamics near heterostructured interfaces[J]. Materials Research Letters，2019，7（9）：376-382.
[27] 刘觐，朱国辉. 超细晶粒钢中晶粒尺寸对塑性的影响模型[J]. 金属学报，2015，51（7）：777-783.

（收稿日期：20241217）