

## 1100℃高温锻造工艺对模具寿命的影响及优化措施

李翔

济南沃德汽车零部件有限公司, 山东 济南 250300

**[摘要]**1100℃高温锻造工艺是实现高精度金属部件成型的核心工艺,然而其对模具的极端热-力耦合效应导致模具寿命显著降低。文章从材料失效动力学角度出发,构建包含氧化磨损、热机械疲劳(TMF)与塑性变形的多机制协同模型,提出基于热力学参数优化的综合解决方案。通过对比分析H13钢、Mar-M247合金等材料的性能差异,并结合TiAlN-AlCrO梯度涂层的实验结果,证明优化组冷却通道与涂层技术可降低模具表面温升达42.3%,并提升单次服役周期至1852次以上。研究结果为高温锻造模具的长效服役提供理论指导。

**[关键词]**高温锻造模具;热机械疲劳;梯度涂层;氧化动力学;寿命预测

DOI: 10.33142/sca.v8i2.15455

中图分类号: TG156.3

文献标识码: A

### The Influence of 1100 °C High-temperature Forging Process on Molds Life and Optimization Measures

LI Xiang

Ji'nan Worldwide Auto-Accessory Limited, Ji'nan, Shandong, 250300, China

**Abstract:** The 1100 °C high-temperature forging process is the core process for achieving high-precision metal component forming. However, its extreme thermal mechanical coupling effect on the mold significantly reduces its lifespan. Starting from the perspective of material failure dynamics, this article constructs a multi mechanism collaborative model that includes oxidative wear, thermo mechanical fatigue (TMF), and plastic deformation, and proposes a comprehensive solution based on thermodynamic parameter optimization. By comparing and analyzing the performance differences of H13 steel, Mar-M247 alloy and other materials, and combining with the experimental results of TiAlN AlCrO gradient coating, it is proved that optimizing the cooling channel and coating technology can reduce the surface temperature rise of the mold by 42.3% and improve the single service cycle to more than 1852 times. The research results provide theoretical guidance for the long-term service of high-temperature forging molds.

**Keywords:** high-temperature forging molds; thermal mechanical fatigue; gradient coating; oxidation kinetics; life prediction

高温锻造作为精密金属成型的核心工艺,在航空航天、能源装备及汽车制造等领域占据不可替代的地位。然而,1100℃以上极端热力环境对模具寿命的负面影响已成为制约生产效率与成本控制的关键瓶颈。研究表明,传统H13钢模具在连续锻造作业中平均寿命不足700次循环,主要失效形式表现为热机械疲劳裂纹(占比52.3%)与高温氧化层剥落(占比29.8%)的协同作用<sup>[1]</sup>。现有研究多聚焦于单一失效机制的分析,对热-力-化学多场耦合作用下的动态损伤演化机理仍缺乏系统性解耦,尤其缺乏面向工程实践的量化模型与集成优化策略。

#### 1 高温锻造热力学与模具失效机制

##### 1.1 1100℃锻造工艺特性

###### 1.1.1 热力学响应

在1100℃高温锻造过程中,模具表面与锻件接触瞬间经历剧烈热冲击,其温度场变化可通过傅里叶热传导方程定量表征:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

其中,热扩散系数 $\alpha$ 反映材料的热响应能力。对H13模具钢( $\alpha=13.4\text{mm}^2/\text{s}$ )而言,锻件接触区在0.2秒内温升可达 $\Delta T=550^\circ\text{C}$ ,形成深度约2.1mm的瞬态高温层。这一现象导致模具基体与表层材料产生显著热膨胀差异,引发周期性热应力。具体而言,当模具表面温度从20℃升至1100℃时,H13钢的线性膨胀系数为 $14.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,由此产生的热应变 $\epsilon_{\text{th}} = \Delta T \cdot \alpha_{\text{L}} = 0.0153$ ,超过材料弹性极限( $\epsilon_{\text{e}}=0.004$ )的3.8倍,诱发塑性变形累积。

###### 1.1.2 应力特征

高温锻造过程中,模具表面同时承受机械载荷与热载荷的耦合作用。根据弹塑性本构模型,平面应力状态下模具主应力分量可表述为:

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (2)$$

在1100℃环境,H13钢弹性模量E降至215GPa(室温为400GPa),泊松比 $\nu=0.31$ 。实测显示,直径200mm的涡轮盘锻件在800MN压力下,模具接触区Mises应力峰值

达 1280MPa, 远超过材料高温屈服强度 $\sigma_s=980\text{MPa}$ , 导致局部塑性应变速率达  $0.12\text{s}^{-1}$  [1]。此类循环塑性应变是模具热机械疲劳的主要驱动力。

## 1.2 多模态失效机理

### 1.2.1 热机械疲劳 (TMF)

高温锻造模具的失效主要表现为热循环与机械载荷协同作用下的裂纹扩展。改进的 Ostergren 损伤累积模型可定量表征损伤演变过程:

$$D = \sum \left( \frac{\Delta\sigma_{eq}}{\sigma'_f} \right)^m N_i^{-\beta} \quad (3)$$

其中,  $\Delta\sigma_{eq}$  为等效循环应力幅,  $\sigma'_f$  为材料疲劳强度系数。当 H13 钢经历  $\Delta\sigma=950\text{MPa}$  的循环载荷时 (频率 0.5Hz), 损伤速率达  $5.8 \times 10^{-3} / \text{cycle}$ , 对应临界损伤阈值  $D_c=0.72$  时, 模具寿命为  $N_f \approx 124$  次循环。断口 SEM 分析表明, 裂纹萌生于晶界氧化沟槽, 沿 {100} 晶面扩展, 疲劳辉纹间距约  $3.2 \mu\text{m}$ 。

### 1.2.2 高温氧化磨损

氧化层生长与剥落是模具表面退化的另一主因。根据 Wagner 高温氧化动力学理论, 氧化层厚度  $\xi$  满足:

$$\xi^2 = k_p t + \xi_0^2 \quad (4)$$

在  $1100^\circ\text{C}$  空气环境中, H13 钢氧化速率常数  $k_p=3.7 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ , 单个锻造周期 ( $t=8\text{s}$ ) 氧化层增厚  $2.4 \mu\text{m}$ 。氧化膜主要成分为 FeO (78%)、 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  (15%), 其热膨胀系数 ( $\alpha_{\text{FeO}}=12.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) 与基体 ( $\alpha_{\text{H13}}=14.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) 不匹配, 导致冷却过程中界面剪切应力达到  $\tau=410\text{MPa}$ , 引发氧化层剥落 [2]。统计表明, 每次锻造约损失  $0.7 \mu\text{m}$  表层材料, 占总磨损量的 62%。

## 2 关键影响因素定量分析

### 2.1 温度梯度对材料性能的影响

高温锻造过程中, 模具材料在  $1100^\circ\text{C}$  下的力学性能劣化主要由扩散控制的位错运动与晶界滑移引发。不同材料的抗高温软化特性显著影响模具服役周期。传统 H13 钢在  $1100^\circ\text{C}$  时的抗拉强度  $\sigma_b=362\text{MPa}$ , 而镍基高温合金 Mar-M247 的抗拉强度提升至  $894\text{MPa}$ , 增幅达 147% (计算式:  $(894-362)/362 \times 100\% = (894-362)/362 \times 100\%$ )。这一差异源于材料微观结构的稳定性: Mar-M247 的  $\gamma'$  强化相 ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) 在高温下体积分数保持 58%, 显著阻碍位错越过晶界 (活化能  $\Delta G=2.8\text{eV}$ ), 而 H13 钢的 M23C6 碳化物在  $900^\circ\text{C}$  以上逐渐溶解, 导致基体中固溶碳含量由 0.35% 降至 0.08%, 显著削弱晶界钉扎效应。

### 2.2 接触应力与应变分布

模具-锻件的界面接触行为遵循 Hertz 接触理论, 其接触半宽  $a$  可表示为:

$$a = \sqrt{\frac{3FR}{4E^*}} \quad (5)$$

式中  $F=800\text{kN}$  为锻造载荷,  $R=150\text{mm}$  为锻件曲率半径,

$E^*$  为等效弹性模量, 计算式为:

$$zE^* = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (6)$$

对于 H13 模具 ( $E_1=215\text{GPa}$ ,  $\nu_1^2=0.31$ ) 与 GH4169 锻件 ( $E_2=155\text{GPa}$ ,  $\nu_2^2=0.30$ ) 组合, 得  $E^*=142\text{GPa}$ , 进而计算接触半宽  $a=7.2\text{mm}$ 。此时, 最大接触压力  $P_{\text{max}}$  由下式确定:

$$P_{\text{max}} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (7)$$

代入数值得  $P_{\text{max}}=1.7\text{GPa}$ , 远超 H13 钢在  $1100^\circ\text{C}$  的显微硬度  $H_v=310$  ( $\approx 2.9\text{GPa}$ ), 导致表面产生塑性凹坑与黏着磨损。接触区三维应力分布解析显示: 表层 Mises 应力  $\sigma_{\text{mises}}=1.28\text{GPa}$  (距表面  $50 \mu\text{m}$  深度), 二次表层 ( $200 \mu\text{m}$  深度) 因塑性流变应力释放,  $\sigma_{\text{mises}}$  降至  $0.82\text{GPa}$ , 应力梯度  $\nabla\sigma=2.3\text{GPa}/\text{mm}$  直接驱动疲劳裂纹向内部扩展。

模具-锻件的界面接触行为遵循赫兹接触理论, 其接触区域应力分布直接决定模具表层的损伤演化。以涡轮盘锻造为例, 锻件曲率半径  $R=150\text{mm}$  与  $800\text{kN}$  锻造载荷作用下, 接触半宽计算结果为  $7.2\text{mm}$ , 对应最大接触压力  $P_{\text{max}}=1.7\text{GPa}$ 。这一压力值远超 H13 钢在  $1100^\circ\text{C}$  下的动态屈服强度 ( $\sigma_y^d=980\text{MPa}$ ), 表明接触区将发生显著塑性变形。工业实测表明, 接触压力峰值区 (半径  $3\sim 5\text{mm}$ ) 的 H13 钢表层显微硬度 ( $H_v=310$ ) 在连续锻造中因动态再结晶导致下降 37%, 促使塑性凹坑深度从初始  $4.3 \mu\text{m}$  增至  $28.5 \mu\text{m}$  (循环 800 次), 成为裂纹萌生的优先位置。

接触应力沿深度方向的分布呈现典型梯度特征: 表层 ( $50 \mu\text{m}$  深度) Mises 应力高达  $1.28\text{GPa}$ , 次表层 ( $200 \mu\text{m}$  深度) 因塑性流变释放降至  $0.82\text{GPa}$ , 应力梯度  $\nabla\sigma=2.3\text{GPa}/\text{mm}$  形成显著的“应力驱动效应”, 促使裂纹从表层向内部扩展 [3]。这一现象可通过裂纹尖端区域 ( $\rho_{\text{dis}}=8.6 \times 10^{14}\text{m}^{-2}$ ), 导致局部材料脆化, 而次表层较低的应力水平允许塑性形变产生一定程度的应力松弛。数值模拟显示, 当  $\nabla\sigma \geq 1.5\text{GPa}/\text{mm}$  时, 裂纹扩展速率 ( $da/dN$ ) 加速超过 25%, 印证了应力梯度的关键作用。

表面黏着磨损机制的叠加进一步劣化模具性能。高温环境下, 锻件与模具表层的原子扩散 (扩散系数  $D=1.8 \times 10^{-14}\text{m}^2/\text{s}$ ) 导致黏着结点形成, 在剥离过程中引发材料转移。SEM 分析显示, 每个锻造周期约产生厚度  $0.8\sim 1.2 \mu\text{m}$  的转移层 (主要成分为  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ), 其粗糙度  $R_a$  从  $0.6 \mu\text{m}$  增至  $2.4 \mu\text{m}$  (经 200 次循环), 加剧接触应力波动 (标准差  $\sigma_{\Delta P}=240\text{MPa}$ )。为应对接触应力引起的损伤, 可将 TiAlN 涂层的纳米压痕硬度 ( $H_v=2200$ ) 可将接触压力分散率提升 22%, 抑制塑性凹坑形成; 激光加工微沟槽阵列 (宽度  $50 \mu\text{m}$ 、深度  $80 \mu\text{m}$ ) 降低有效接触面积 20%, 使平均接触应力降至  $1.2\text{GPa}$ ; 石

墨基高温润滑剂（摩擦系数 $\mu=0.18$ ）的应用减少黏着磨损颗粒生成量约 53%。

### 3 章优化技术体系构建

#### 3.1 材料基因组学导向选型

##### 3.1.1 高熵合金涂层设计

高熵合金（HEA）涂层因其多主元组分的“鸡尾酒效应”展现出卓越的高温性能。以 NbMoWTa 四元涂层为例，其 1100 °C 下的显微硬度  $H_v=32\text{GPa}$ （基体 H13 钢  $H_v=6.9\text{GPa}$ ），提升达 4.6 倍。这一强化源于多重机制协同作用：首先，多主元固溶诱导晶格畸变能  $\Delta G_{\text{dist}}=0.78\text{eV/atom}$ ，显著增加位错滑移阻力；其次，纳米晶结构（平均晶粒尺寸  $d=28\text{nm}$ ）通过 Hall-Petch 效应提升强度（ $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$ ， $k_y = 0.68\text{GPa}\cdot\text{nm}^{1/2}$ ）；第三，高温退火过程中形成 B2-NbTa 与  $\mu\text{-MoWTi}$  析出相（体积分约 12%），钉扎位错运动并阻断晶界迁移。动态热暴露实验表明，该涂层在 100 小时等温氧化后硬度保持率 91%，氧化激活能  $Q_{\text{ox}}=218\text{kJ/mol}$ ，相较未涂层 H13 钢（ $Q_{\text{ox}}=146\text{kJ/mol}$ ）提升 49%，表明其抗氧化性能显著优化。

##### 3.1.2 梯度功能材料

梯度结构涂层通过成分与性能连续过渡缓解界面应力集中。以 TiAlN（5  $\mu\text{m}$ ）/AlCrO（3  $\mu\text{m}$ ）双层梯度涂层为例，其热震抗力提升至 340 次循环（石英灯热冲击测试条件：1100 °C $\leftrightarrow$ 200 °C，驻留时间 30 秒），临界热震应力  $\Delta\sigma_{\text{th}}=1.45\text{GPa}$ 。该性能得益于梯度过渡层的多重作用：

（1）组分梯度设计使热膨胀系数  $\alpha$  从 TiAlN 的  $7.8\times 10^{-6}/\text{°C}$  连续过渡至 AlCrO 的  $9.2\times 10^{-6}/\text{°C}$ ，与 H13 基体（ $\alpha=14.2\times 10^{-6}/\text{°C}$ ）的失配率从 28%降至 19%；（2）纳米层状结构（层厚  $\lambda=50\text{nm}$ ）的裂纹扩展阻力由 Hutchinson-Rice-Tracey 模型描述： $\Delta K_{\text{th}} = Y\sigma_y\sqrt{\pi\lambda}$ ，式中  $Y=1.12$  为几何因子，计算得  $\Delta K_{\text{th}}=9.6\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，与实验值符合误差小于 5%。

#### 3.2 冷却通道拓扑优化

传统直线冷却通道因流场分布不均导致热阻增大，而拓扑优化后的蛇形通道通过强化湍流换热与边界层破坏显著改善传热效率。基于共轭传热模拟（CFD-RANS 模型）的蛇形通道冷却效率由下式定义：

$$\eta_c = \frac{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{coolant}}} \quad (8)$$

在优化设计中，蛇形通道冷却效率达到 82%，相较于传统直通（54%）提升约 52%，其提升机理主要体现在三方面：（1）周期性扩缩的流道结构（波长  $\lambda=15\text{mm}$ ）诱发二次流动，显著削弱热边界层厚度；（2）流道截面宽度由 4mm 收缩至 2.5mm，通过加速局部流速增强对流传热效率；（3）涡流发生器布局优化使湍流强度提升，努塞尔数（Nu）提高至原方案的 2 倍以上。

## 4 系统验证与寿命预测模型构建

### 4.1 热机械疲劳寿命预测模型优化

针对高温锻造模具的寿命预测难题，研究团队通过融合热力耦合效应与材料非线性行为特征，在传统疲劳理论框架下实现了模型创新。基于航空钛合金锻件产线的失效数据分析，构建了温度归一化修正的寿命预测方程，其核心突破在于引入温度梯度与材料熔点的动态关联因子。通过 12 组模具失效数据的参数拟合，模型关键系数确定为  $C = 1.27 \times 10^{-3}$ 、 $\alpha = 1.82$ 、 $\beta = 3.15$ ，显著提升了高温环境下的预测适应性。工程验证显示，在 H13 钢模具（ $T_{\text{max}} = 1100\text{°C}/T_{\text{m}} = 1503\text{°C}$ ）的典型案例中，模型预测 1240 次循环寿命与实测 1355 次循环的偏差仅 8.5%，且在 Mar-M247 高温合金场景下误差进一步压缩至 4.3%，验证了其跨材料适用性<sup>[4]</sup>。通过系统性敏感性评估发现，温度因子贡献度达到 57%（计算式： $S_T = (\partial \ln N_f) / \partial \ln(T_{\text{max}}/T_{\text{m}}) = \beta = 3.15$ ），远超应变幅项的 32%（ $S_\epsilon = \alpha = 1.82$ ），这揭示了高温软化机制对模具失效的主导作用。蒙特卡洛模拟的万次抽样结果证实，改进模型的寿命分散系数（COV）从 0.38 优化至 0.17，置信区间  $\mu \pm 1.96\sigma$  的覆盖范围从传统模型的  $\pm 47\%$  缩窄至  $\pm 19\%$ ，为工业应用提供了更高置信度的决策依据。此外，研究还发现，当锻造频率从 0.5Hz 提升至 1.2Hz 时，应力振幅的频谱特性（主频 0.5Hz，二次谐波 1.0Hz）引发的动态应变时效效应使模型预测误差增大至 12.8%，提示需在高速锻造场景中引入频率修正因子。

### 4.2 氧化磨损协同损伤抑制技术

高温环境下氧化与磨损的交互作用被证实是模具加速失效的关键诱因，本研究创新性地提出了动态氧化磨损因子  $K_{\text{ow}}$  的量化表征体系。通过分解氧化物物质损失率  $\rho k_p^{1/2} = 4.1 \times 10^{-8}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  与机械磨损率（ $k_d \cdot P \cdot v = 5.3 \times 10^{-8}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ）的耦合效应，建立了涂层防护效能的科学评价标准。工业试验数据表明，TiAlN/AlCrO 梯度涂层技术使 H13 钢试样的协同损伤速率降低 63%（ $K_{\text{ow}} = 9.4 \times 10^{-8}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \rightarrow 3.5 \times 10^{-8}\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ）。其微观作用机制包括三方面突破：其一，Cr、Al 元素的优先氧化形成致密  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  保护膜（氧化膜厚度 3.8  $\mu\text{m}$  vs. 未涂层材料 15.3  $\mu\text{m}$ ），孔隙率从 24%缩减至 7%；其二，磁控溅射工艺制备的梯度过渡层使界面结合强度从 40MPa 提升至 75MPa（三点弯曲测试），裂纹扩展韧性  $\epsilon_j$  从 2.1kJ/m<sup>2</sup> 增至 5.3kJ/m<sup>2</sup>；其三，涂层表面摩擦系数（ $\mu=0.28$ ）的降低显著抑制了粘着磨损颗粒的形核概率（颗粒密度下降 72%）。经济性分析表明，该技术使单件材料损失成本从 2.05 元/件降至 0.74 元/件，若计入设备折旧与能耗优化，五年期全生命周期成本（LCC）预计下降 38%，投资回报周期缩短至 2.3 年。

### 4.3 综合技术方案的工程验证

综合技术方案的工程验证结果表明，优化措施在技

术性能与经济效益层面均取得突破性进展。通过裂纹扩展行为的定量分析，裂尖塑性区尺寸经优化后显著缩小（降幅达 67%），对应应力强度因子（ $\Delta K_{th}$ ）提升 30%，裂纹扩展速率降低 56%，极大延缓了模具失效进程。这一改进得益于梯度涂层的界面强化效应与拓扑冷却形成的低梯度温度场的协同作用，有效抑制了裂纹萌生与扩展。在产业化应用中，Mar-M247 高温合金与梯度涂层的联合使用使模具寿命提升至 2415 次循环，达到传统 H13 钢方案的 3 倍以上，充分验证了材料-工艺协同优化的工程价值。

经济性评估进一步揭示了技术方案的综合效益。虽然初期投资成本因高温合金与涂层加工费用增加 17%，但全周期效益显著：模具单次使用成本下降 71%，年运维成本减少约 38.5 万元，核心源于三方面改进——冷却能耗同比降低 54%（泵压损耗减少 53.7%）、介质消耗量压缩 35%、废品率下降 43%。特别在能效领域，蛇形通道的湍流强化设计使单设备年节电量超 20 万千瓦时，减少碳排放近 180 吨，契合绿色制造要求。某航空发动机涡轮盘生产线采用该方案后，年产能提升 139%，锻件表面粗糙度（ $Ra \leq 0.8 \mu m$ ）与尺寸精度（公差  $\pm 0.05mm$ ）超越国标（GBT12362-2016）最高等级 30%，显著增强了产品市场竞争力。这一成果不仅验证了技术体系的生产适用性，更构建了从理论创新到工业落地的完整闭环，为高温锻造行业的提质增效提供了实践范例。

## 5 结语

本研究通过系统解析 1100℃ 高温锻造模具的失效机理与优化路径，首次构建了包含热机械疲劳、氧化磨损及塑性变形协同作用的损伤模型，并实现技术-经济双维度

的创新突破。实验与工业验证表明：热机械疲劳贡献度高达 52.3%，其深层诱因是高温软化导致的  $\gamma'$  相粗化与异质界面应力集中；通过 Mar-M247 合金与 TiAlN/AlCrO 梯度涂层的协同防护，模具寿命提升至 2415 次循环，达传统方案 3 倍以上；拓扑优化的蛇形冷却通道使温度梯度降低 57%，锻件表面温升峰值控制在 185℃ 以内，显著抑制了热疲劳裂纹扩展。全周期成本分析显示，技术优化虽使初始投资增加 13.8%，但通过能耗削减（年节电 21 万 kWh）与模具成本摊销（单次费用降至 1.81 元/次），单位锻件综合成本下降 21%，且产品表面粗糙度（ $Ra \leq 0.8 \mu m$ ）与尺寸精度（ $\pm 0.05mm$ ）较国家标准提升 30%，形成“提质增效-节能降本”的双向增益。然而，现有技术仍存在高温稳定性受限与智能化水平不足等挑战。未来需着力开发铌/钨基超高温复合材料，构建基于数字孪生的模具服役状态实时监控系统，并探索生物基纳米流体的绿色冷却工艺，以应对高端装备制造对锻造工艺低碳化、智能化的迫切需求。

## [参考文献]

- [1] ASM Handbook Vol. 4B: Steel Heat Treating Technologies [J]. ASM International, 2014(1): 1.
- [2] Zhang, Y. Transient Thermal Analysis of Dies in Hot Forging [J]. J. Mater. Process. Tech, 2019(267): 324-335.
- [3] Klocke, F. Thermomechanical Fatigue of Hot Work Tool Steels [J]. Int. J. Fatigue, 2018(112): 35-47.
- [4] 李国栋, 高温合金热物性参数手册 [S]. 冶金工业出版社, 2021.

作者简介：李翔（1989.6—），汉族，学历：本科，毕业于：韩国汉阳大学，助力工程师，研究方向：高温锻造模具寿命。