

材料与成形性能

新型“拳头式”锻模“骨头层”材料性能研究与有限元分析

陈沿宏, 夏玉峰, 廖海龙, 张 雪, 彭梦霞

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400000)

摘要: 为了适应大型锻件高温重载的工艺环境, 设计了一种新型的“拳头”式锻模, 该锻模主要由“皮肤层”、“骨头层”和铸钢基体组成。选择铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”, 对其多道次热压缩前后的组织成分和力学性能变化规律进行了探究。同时, 利用有限元模拟软件 DEFORM 对铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”时的服役情况进行了分析。采用光学显微镜 (OM)、X 射线衍射 (XRD)、能谱仪 (EDS) 观察了材料多道次热压缩前后的显微组织变化, 采用显微硬度实验观测了其力学性能变化。结果表明: 铁基高温合金 JX03 中较多的索氏体分布为其带来了较好的综合力学性能, 主要成分为 Cr_{23}C_6 的合金碳化物形成了弥散强化, 而结合面处强化元素含量的降低对结合强度造成了一定的负面影响, 但铁基高温合金 JX03 的显微硬度在热压缩后有了一定提升。有限元分析显示铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”可在凸台与侧壁提供较优的结构支撑, 在平台与凹陷处提供足够的应力缓冲。

关键词: 热锻模; 铁基高温合金; 多道次热压缩; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.030

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0204-08

Research and finite element analysis on properties of “bone layer” material for new “fist type” forging die

Chen Yanhong, Xia Yufeng, Liao Hailong, Zhang Xue, Peng Mengxia

(Department of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China)

Abstract: In order to adapt to the process environment of high temperature and heavy load for large forgings, a new type of “fist type” forging die was designed, which was mainly composed of “skin layer”, “bone layer” and cast steel matrix. Then, taking the iron based superalloy JX03 as the “bone layer”, its microstructure and mechanical properties changes law before and after multi-pass hot compression were studied. At the same time, the service condition of iron based superalloy JX03 as “bone layer” was analyzed by the finite element simulation software DEFORM, the microstructure changes of materials before and after multi-pass hot compression were observed by optical microscope (OM), X-ray diffraction (XRD) and energy dispersive spectrometer (EDS), and the mechanical properties changes were observed by microhardness test. The results show that the more sorbite distribution in iron based superalloy JX03 leads to better comprehensive mechanical properties, and the alloy carbides mainly composed of Cr_{23}C_6 form dispersion strengthening. However, the decreasing of strengthening element content at the joint surface has a negative effect on the bonding strength, but the microhardness of iron based superalloy JX03 is improved after hot compression. Thus, the finite element analysis shows that iron based superalloy JX03 as a “bone layer” can provide better structural support in the boss and side wall and provide enough stress buffer in the platform and depression.

Key words: hot forging die; iron based superalloy; multi-pass hot compression; microstructure; mechanical properties

热锻模在船舶、能源、航空航天与石油化工等诸多领域有着十分广泛的使用, 但随着难变形大型锻件的出现, 锻造过程中的变形抗力大, 表面温度

可高达 800 ℃ 以上, 传统锻模已难以满足热锻工艺的需求, 新型锻模的诞生成为工业发展的必经之路^[1]。传统锻模采用钢坯经锻造后机加成形的制备方法, 锻模的力学性能良好。后续也研发出精密铸造法制备锻模, 与传统锻造法相比, 工作量减少超过 50%, 材料利用率提高超过 60%。早在 20 世纪 50 年代, 国内便开始研究用 5CrNiMo 铸钢锻模替代锻钢锻模, 取得了良好成果^[2-3]。但无论是普通铸钢锻模还是锻钢锻模, 其在强韧度与高温性能上仍

收稿日期: 2021-04-01; 修订日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51775068)

作者简介: 陈沿宏 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: cyh1021767795@163.com

通信作者: 夏玉峰 (1972-), 男, 博士, 教授

E-mail: xyfeng@cqu.edu.cn

难以满足锻造难变形大型锻件的要求，因此，本文提出“拳头式”锻模制备新方法，锻模采用分层结构，在铸钢基体上依次堆焊“夹心层”、“骨头层”与“皮肤层”。“夹心层”采用软材料，可以有效地达到力学缓冲作用，避免应力集中；“骨头层”采用两层铁基高温合金，且硬度依次递增，形成类似于“骨头”的结构支撑，以应对大型锻件制备时的巨大冲击力；“皮肤层”采用镍基高温合金，常温下的硬度低于“骨头层”，但其高温性能良好、塑韧性好，可以应对大型锻件表面的高温环境，避免热裂纹的产生^[4-6]。

因此，选择一种既能承受服役过程中的热循环载荷，又能与镍基高温合金良好结合的铁基高温合金作为“骨头层”材料成为首要课题。Zhou Y F 等^[7]研究了添加铈对 Fe-Cr-C 堆焊合金高温性能的影响，发现在添加 2wt.% CeO₂ 的合金中，初生 M₇C₃ 碳化物的平均尺寸减小并达到最细化状态，强化了材料的力学性能。Yang K 等^[8]研究了钛含量对铁基高温合金显微组织特征的影响，结果表明，钛的加入能够有效地促进铌钛复合碳化物的析出，这是由于碳化钛的优先析出为复合碳化物的形核起到了固定位置的作用。Masaylo D V 等^[9]分析了耐热铁基合金在初始条件和几种热处理条件下的结晶转变。Shen L 等^[10]研究了用钴基高温合金（CoO₃）和铁基高温合金（JXHC15）堆焊的大型热锻模的使用寿命。

然而，目前的研究大多集中在合金成分对铁基高温合金性能的影响上，而对铁基高温合金在堆焊后的高温服役性能的研究较少。

本文选取常温硬度在 50 HRC 左右，可适应 300~500 ℃ 服役温度的铁基高温合金 JX03。因热锻模在使用过程中的失效主要受机械载荷与热循环影响，因此，对“拳头式”锻模安排多道次热压缩作为检验其材料性能的实验方式，探究热压缩前后（500 ℃）材料的组织成分与力学性能的变化规律，为锻模选材标准提供一些思路，同时，利用有限元模拟软件对分层锻模的温度场与应力场进行分析，进一步验证铁基高温合金 JX03 作为锻模“骨头层”的服役表现。

1 实验材料与方法

1.1 材料选择与实验方法

“皮肤层”材料强调韧性，且需要在 600~800 ℃ 温度下服役时仍然维持稳定的力学性能，于是选用镍基高温合金 CHN327，其化学成分如表 1 所示。本文中主要研究的“骨头层”材料强调高强度，由此为“皮肤层”材料提供良好的结构支撑，但同时材料本身不能拥有过多的硬脆相，导致应力缓冲能力差，致使“皮肤层”应力集中，且“骨头层”的主要服役温度区间为 350~550 ℃，由此选用了铁基高温合金 JX03，其化学成分如表 2 所示。

表 1 镍基高温合金 CHN327 化学成分（%，质量分数）

Table 1 Chemical compositions of nickel based superalloy CHN327（%，mass friction）

C	Mn	Cr	Si	Mo	P	S	Cu	Nb+Ta	Fe	Ni
0.034	2.640	15.890	0.370	1.300	0.003	0.009	0.020	3.200	7.740	余量

表 2 铁基高温合金 JX03 化学成分（%，质量分数）

Table 2 Chemical compositions of iron based superalloy JX03（%，mass friction）

C	Mn	Cr	Si	Mo	W	V	Al	Ni	P	S	Fe
0.25	1.610	5.510	0.720	1.690	1.040	0.240	0.210	1.500	0.013	0.004	余量

利用电弧熔丝增材制造工艺制备堆焊试样，试样采用缩尺比实验方法，将“拳头式”模具的分层结构缩小后展现。设备使用全自动龙门焊接设备 KEMPPI SYN500，焊接时焊接速度和送丝速度分别为 450 和 6000 mm·min⁻¹，保护气体为氩气与二氧化碳按 1：4 比例混合的混合气体。铸钢基体在焊接前进行了 450 ℃ 的预热，完成堆焊后在 550 ℃ 下进行了 12 h 的回火处理，随后空冷。随后在堆焊试样

取切块进行了多道次热压缩。进行热压缩的试样尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm，且此试样取自“皮肤层”与“骨头层”的结合面，同时包含了两种材料与其结合区，切块位置如图 1 所示。多道次热压缩在 500 ℃ 下进行，且每一道次压缩量为 10%，即总压缩量为 30%。热压缩加热速率为 5 ℃·s⁻¹，保温 2 min，压缩速率为 0.1 s⁻¹。多道次热压缩流程如图 2 所示。

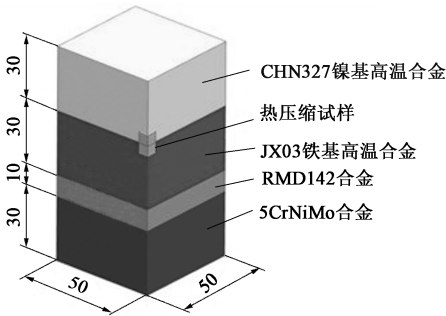


图 1 堆焊试样及多道次热压缩取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of welding sample and multi-pass hot compression sampling positions

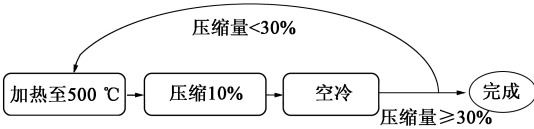


图 2 多道次热压缩流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-pass hot compression

为了观察多道次热压缩前后试样金相组织的变化，热压缩试样的侧面被打磨抛光以备观察。腐蚀液选用 $\text{HNO}_3 : \text{HF}$ 体积比为 5 mL : 5 滴的混合溶液，腐蚀时间为 10 s^[11]。成功腐蚀后，利用 OLYMPUS GX-41 光学显微镜观察“骨头层”材料以及其与“皮肤层”结合面的金相组织。运用 Rigaku D/Max 2500PC X 射线衍射仪分析合金相成分。运用 TESCAN VEGA3 LMH 扫描电镜分析热压缩试样分层结合面附近 2 mm 范围内的元素扩散。力学性能方面，测量了铁基高温合金在多道次热压缩前后距离其与“皮肤层”结合面 4.5 mm 范围内的维氏硬度分布，硬度测量点之间的距离为 0.3 mm。维氏硬度计型号为 HVS-1000z，载荷为 1000 g，保压时间为 10 s。

1.2 有限元模拟设置

利用有限元模拟软件 DEFORM 进行多层锻模服役模拟，探究铁基高温合金的服役表现。在模拟过程中将“拳头式”锻模简化，设计为 3 层结构，分别为“皮肤层”、“骨头层”与铸钢基体，如图 3 所示。锻模选用某飞机钛合金梁接头的预锻模具，工艺过程采用其预锻工艺。其中，“皮肤层”与“骨头层”厚度分别设定为 10 与 15 mm。

本文中涉及到的“皮肤层”镍基高温合金 CHN327 与“骨头层”铁基高温合金 JX03 均为国内市场自研的焊接材料，并不存在于 DEFORM 自带的材料库中，于是运用材料性能模拟软件 Jmatpro 分析，将镍基高温合金 CHN327 与铁基高温合金 JX03

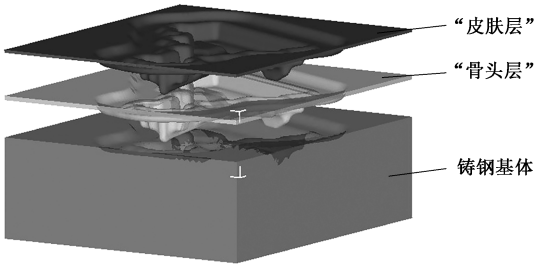


图 3 分层模具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of layered die

的各元素含量输入模拟软件中，得到各温度下的应力-应变曲线图、泊松比、热辐射率与密度，并导入 DEFORM 材料库中建立新的材料模型。材料性能的模拟结果如表 3 所示。

表 3 有限元模拟中各材料性能参数

Table 3 Performance parameters of various materials in finite element simulation

材料	泊松比	热辐射率	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
镍基高温合金 CHN327	0.31	0.6	8.45
铁基高温合金 JX03	0.29	0.7	7.77

在预锻之前通常会对模具进行预热处理，模拟中定义预热温度为 300 ℃，环境温度为 20 ℃。堆焊过程中存在模具与环境的热交换和模具中各层之间的热交换，于是定义模具与环境的热交换系数为 $0.02 \text{ N} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ，模具各层之间的热交换系数为 $11 \text{ N} \cdot (\text{mm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。最后，为了观察“皮肤层”的损伤情况，将模具各层设置为弹塑性体的同时选择断裂模型为 Normalized C&L，并在 Advanced 属性中点击 Element Data 为各层设置合理的硬度值，“皮肤层”的硬度值选择 30 HRC，“骨头层”的硬度值选择 50 HRC。

2 试验结果与分析

2.1 组织成分分析

铁基高温合金 JX03 的金相组织形貌如图 4 所示。图 4a 为铁基高温合金 JX03 在多道次热压缩前的金相形貌。可以明显看到索氏体、下贝氏体与残余奥氏体的存在，富含 Cr、V 和 Mn 元素的铁基高温合金易在 500 ℃ 以上温度回火后形成合金碳化物，因此，也可见晶界处分布着较多的合金碳化物，且碳化物在索氏体中的分布可以帮助索氏体获得更好的综合力学性能^[12]。图 4a 中下贝氏体主要呈板条状且异向分布，这有利于增强材料的塑性与强度。

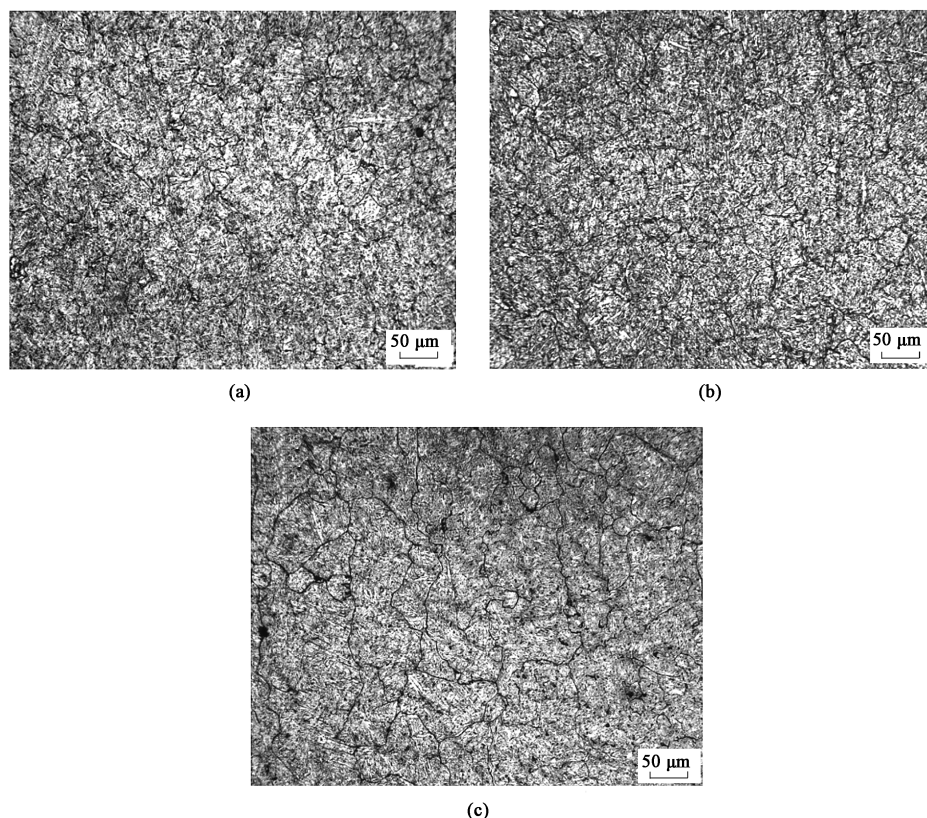


图4 铁基高温合金 JX03 的金相组织形貌
(a) 热压缩前 (b) 2 道次热压缩后 (c) 3 道次热压缩后
Fig. 4 Metallographic morphologies of iron based superalloy JX03

(a) Before hot compression (b) After two passes of hot compression (c) After three passes of hot compression

同时还可以在金相组织形貌中看到少量再结晶晶体。图 4b 为试样在经历了两个道次的热压缩后, 即变形量达到 20% 时的金相组织形貌, 此时铁基高温合金 JX03 中产生更多的再结晶晶粒, 且总体晶粒尺寸变小。图 4c 为试样经历了 3 个道次的热压缩后, 即变形量达到 30% 时的金相组织形貌, 总体晶粒尺寸并未进一步变小而是略微增大, 其原因为: 再结晶晶粒在 3 次热循环后充分长大。同时可以观察到碳化物明显增多, 其原因为: 残余奥氏体在热循环中向回火索氏体转变, 碳容量降低, 析出了大量合金碳化物。

“皮肤层”与“骨头层”结合面附近的金相组织形貌如图 5 所示。图 5a 展现了堆焊加回火后的结合面附近的金相形貌。可以观察到结合面基本平滑, 仅有轻微锯齿状交互。同时, 也可以在靠近结合面处发现明显的柱状晶粒。在凝固组织的形成中, 凝固速率 V_s 与固液分界面的温度梯度 G 均为较为关键的变量因素。在堆焊过程中, 越靠近结合面处的区域散热速率越快, 温度梯度在垂直于结合面方向也越大, 因此, 温度梯度与凝固速率的比值 G/V_s 也越大, 柱状晶粒便越易形成^[13]。另外, 在“骨头层”

材料铁基高温合金 JX03 越靠近结合面处的区域, 碳化物的数量越是减少, 考虑为碳迁移的结果。堆焊过程中, 高温环境下碳元素从含量较高的铁基高温合金一侧向碳含量较低的镍基高温合金一侧迁移, 导致了“骨头层”一侧在靠近结合面处的碳化物明显减少^[14]。图 5b 为试样经历了 2 道次热压缩后, 即变形量达到 20% 时的结合面金相组织形貌。结合面的平滑度降低, 锯齿交互进一步加深。柱状晶粒也在两次热循环之后长大。同时, 还可以发现更多的碳化物在柱状晶间析出, 考虑这是因为: 结合面附近的碳向镍基高温合金一侧迁移, 导致碳含量降低, 铁基高温合金基相中的碳则向结合面附近迁移, 迁移过程中因为热循环被从柱状晶间析出。试样经历了 3 道次热压缩后, 即变形量达到 30% 时结合面的金相组织形貌如图 5c 所示。可以看到两种材料剧烈地熔合在一起, 互相嵌入, 结合面不再平滑, 镍基高温合金一侧夹杂着部分铁基高温合金碎片, 以上结果考虑为过大的形变造成的。结合区的晶粒大小不再均匀, 考虑是多次热循环下晶粒的加速长大和较小的再结晶晶粒的产生同时进行的结果。

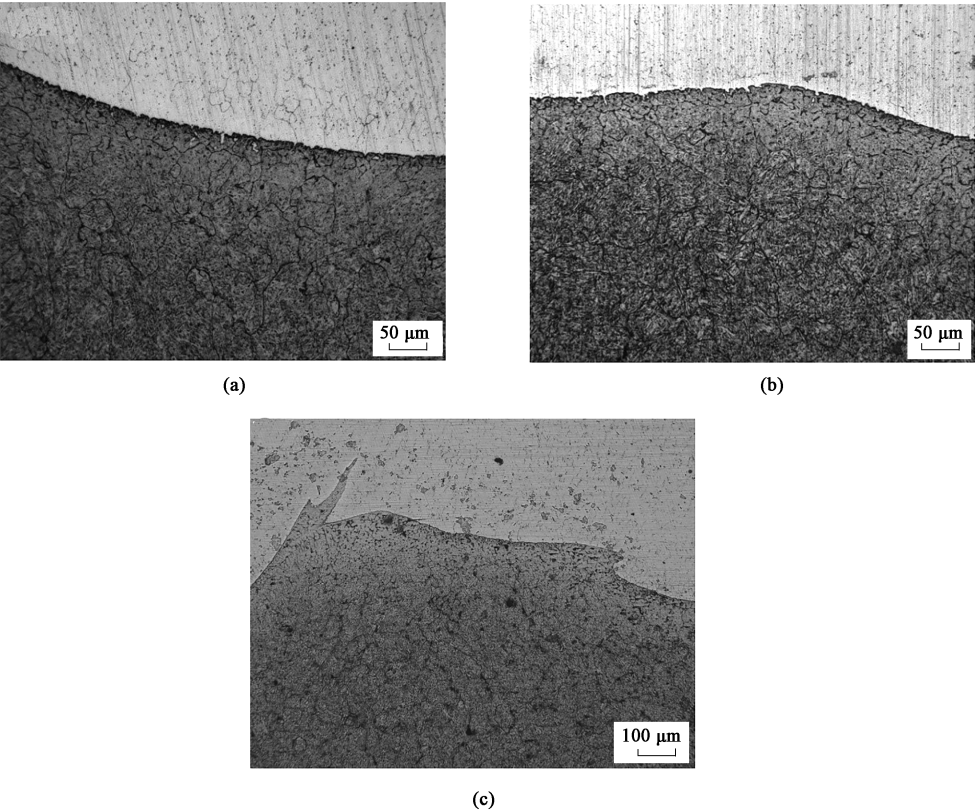


图 5 铁基高温合金 JX03 与镍基高温合金 CHN327 结合面附近的金相组织形貌
(a) 热压缩前 (b) 2 道次热压缩之后 (c) 3 道次热压缩之后

Fig. 5 Metallographic morphologies near joint surface of iron based superalloy JX03 and nickel based superalloy CHN327
(a) Before hot compression (b) After two passes of hot compression (c) After three passes of hot compression

铁基高温合金 JX03 的 XRD 观测结果如图 6 所示。合金碳化物被证实主要为 Cr_{23}C_6 ，且其含量会随着热压缩道次的增加而增加。同时，因为热循环下与氧气环境的互动，VO 的含量也随之增加。结果还表明，铁基高温合金基体组织中含有 Ni-Cr-Fe 合金与 Al-Fe-Si 合金。

图 7 为 EDS 观测下铁基高温合金 JX03 在结合面 2 mm 范围内的元素扩散结果。Cr 元素作为铁基

高温合金的主要强化元素，可以有效地提升铁基高温合金的塑性，观测结果显示：结合面附近的 Cr 元素含量高于铁基高温合金基相中的含量，Cr 元素向结合面的聚集可以有效地提升两层材料的结合效果，增大结合强度^[15]。而在经历了 3 道次热压缩后，铁基高温合金 JX03 中所含 Cr 元素与 Mn 元素含量均大幅降低，考虑原因为：镍基高温合金 CHN327 为面心立方结构，并且在温度变化过程中不会发生异构转变，而铁基高温合金 JX03 在温度变化过程中存在异构转变，因此铁基高温合金的原子活化能较低，当热压缩温度达到 500 ℃ 时，铁基高温合金中的活化原子更多，元素更易向镍基高温合金一侧迁移，导致合金元素含量降低。此外，镍基高温合金的相稳定性更佳，可以比铁基高温合金容纳更多的合金元素。因此，元素扩散观测结果表明：铁基高温合金 JX03 与镍基高温合金 CHN327 堆焊结合后，铁基高温合金 JX03 在结合区附近并不能较好地存留合金元素，而具有强化作用的合金元素的迁移减少会一定程度上影响结合面处的综合力学性能^[16]。

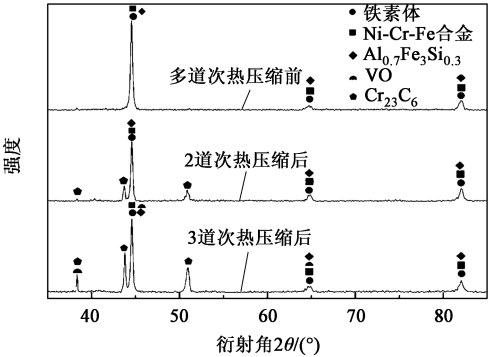


图 6 铁基高温合金 JX03 在多道次热压缩前后的 XRD 图谱
Fig. 6 XRD patterns of iron based superalloy JX03 before and after multi-pass hot compression

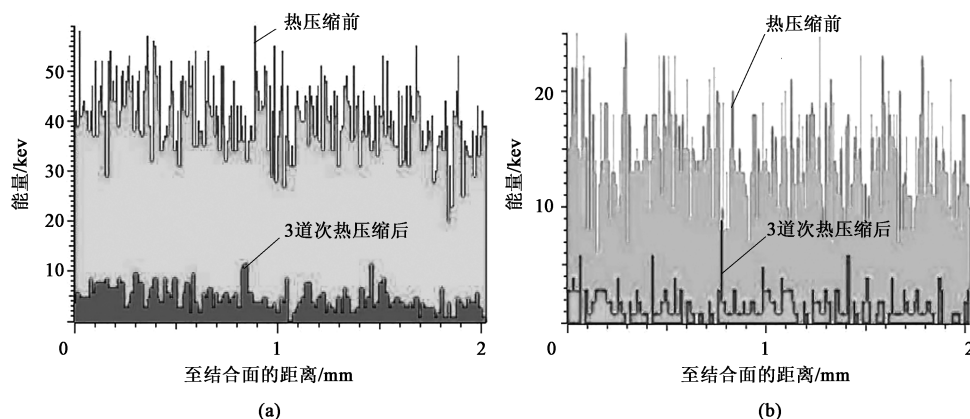


图7 铁基高温合金JX03在多道次热压缩前后合金元素的变化

(a) Cr (b) Mn

Fig. 7 Changes of alloy elements for iron based superalloy JX03 before and after multi-pass hot compression

2.2 显微硬度分析

显微硬度实验可以在一定程度上反应出材料的强硬度和结构支撑性,在“拳头式”模具中也可以反应“骨头层”材料对层间摩擦的抵抗能力。同时,显微硬度实验也是探测层间元素扩散效果和异种材料结合稳定性的良好手段^[17]。铁基高温合金JX03在距离结合面4.5 mm范围内的显微硬度变化如图8所示。可以发现:铁基高温合金JX03的显微硬度分布较为稳定,变化范围较小。多道次热压缩之前的平均显微硬度为482.2 HV,结合面处的显微硬度为274.5 HV,多道次热压缩之后的显微硬度增长了约8%。这是因为:在热压缩过程中残余奥氏体向索氏体转变,晶粒进一步细化,碳化物进一步析出,材料强硬度得到了提升。此外,铁基高温合金JX03的硬度分布在变形量达到30%时也并未出现明显下降,证明铁基高温合金JX03在承受较大的压缩量与较多的热循环次数后显微硬度依旧稳定。

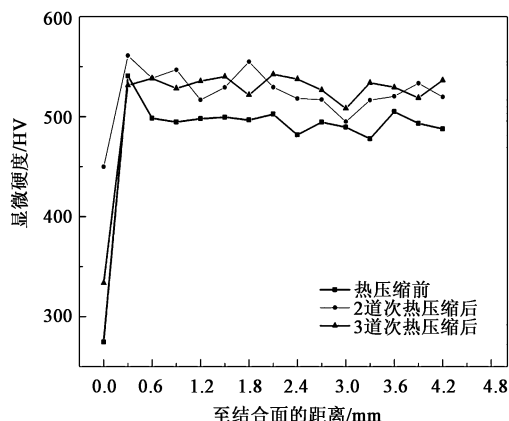


图8 “骨头层”距结合面4.5 mm范围内显微硬度变化

Fig. 8 Microhardness changes within 4.5 mm from “bone layer” to joint surface

2.3 有限元模拟分析

经过预锻模拟之后的“皮肤层”与“骨头层”的温度场分布如图9所示。观察图9a发现,模具“皮肤层”表面最高温度为768℃,最高温度控制良好,并未超出镍基高温合金预计工作温度,且大部分区域温度范围为500~550℃,温度分布均匀,这表明分层材料选择合理,“骨头层”能够提供良好的支撑与力学缓冲,材料散热能力良好。观察图9b可以发现:模具“骨头层”服役温度集中在300~500℃之间,但超过450℃区间较少且主要集中在型腔侧壁和凸台处,符合所选铁基高温合金的合理工作温度。而“皮肤层”和“骨头层”侧壁与凸台处温度均较高,如图9中圆圈所示。结合显微硬度实验结果分析,铁基高温合金JX03并不会在热循环载荷之后发生明显的硬度下降,因此,铁基高温合金JX03在局部温度较高(超过450℃)的侧壁与凸台处仍然维持较好的硬度分布,力学性能保持稳定,因此“骨头层”对“皮肤层”支撑紧密,结构支撑性较优的同时导致凸台等处“皮肤层”力学缓冲较小,变形较小,坯料流动摩擦力偏高,局部热量集中。所以,当铁基高温合金JX03作为“骨头层”材料时,可以在凸台与侧壁等形状变化较大处提供更强硬的支撑,但应更加注意此处“皮肤层”材料的选择,避免局部温度过高导致模具热磨损缺陷的出现。

经过预锻模拟的“骨头层”等效应力场分布如图10所示。“骨头层”表面的等效应力场分布反应了“皮肤层”在经受热锻的机械载荷与热载荷后向模具内部应力的传递。可以看到:铁基高温合金JX03作为“骨头层”材料时,“骨头层”表面的等效应力值较小处主要分布在模具平坦处和凹陷处。

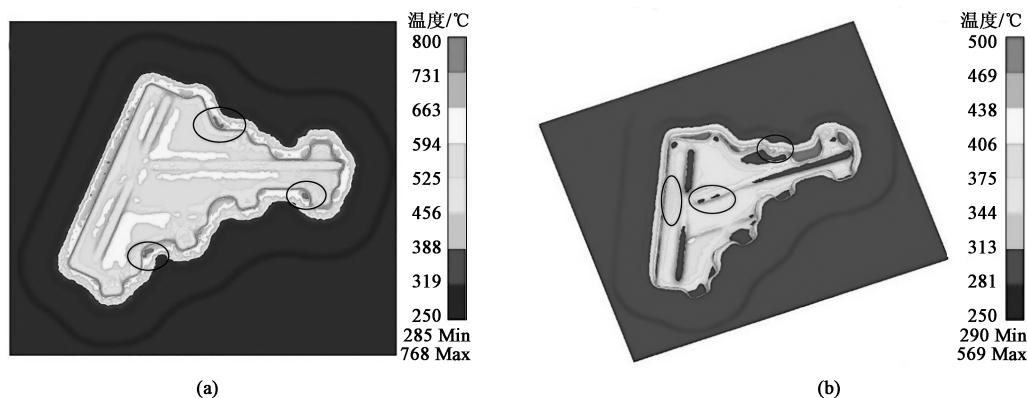


图 9 预锻模拟后的温度场分布

(a) “皮肤层” (b) “骨头层”

Fig. 9 Temperature field distributions after pre-forging simulation

(a) “Skin layer” (b) “Bone layer”

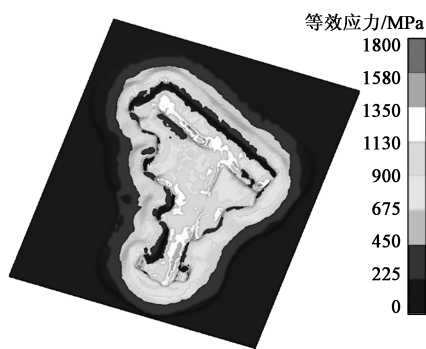


图 10 预锻模拟后“骨头层”等效应力场分布

Fig. 10 Distribution of equivalent stress field in “bone layer” after pre-forging simulation

结合金相观测结果分析,铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”材料时,基相中较多的回火索氏体展现出优良的综合力学性能,较好的韧性为“皮肤层”在平坦处与凹陷处提供了良好的力学缓冲,使坯料在模具型腔中的流动更加均匀,不易产生机械应力集中,但因此也需要注意铁基高温合金 JX03 在平坦处与凹陷处的强硬度偏低会使结构支撑能力减弱,“皮肤层”更易产生热变形。

3 结论

(1) 铁基高温合金 JX03 在堆焊且回火后的主要金相组织为回火索氏体、残余奥氏体与合金碳化物。残余奥氏体含量较少,索氏体含量较高,为其带来了较好的综合力学性能。晶间的合金碳化物主要为 Cr_{23}C_6 ,呈弥散分布,起到了弥散强化作用。结合面附近强化元素含量在多道次热压缩后明显降低,在一定程度上对结合强度造成负面影响。

(2) 铁基高温合金 JX03 在结合面附近 4.5 mm

范围内硬度分布较为稳定,未随距离发生明显变化。在 2 道次热压缩后变形量达到 20% 时,显微硬度增长约 8%,且 3 道次热压缩后变形量达到 30% 时,显微硬度虽然停止上升,但无明显下降。由此可见,铁基高温合金 JX03 在多道次热压缩后仍可以保持稳定的硬度分布。

(3) 锻模采用“拳头式”分层设计时,表面最高温度仅有 768 °C,且大部分区域温度分布在 300~500 °C 之间,对比传统不分层模具,模具表面温度有所下降,证明模具分层设计合理,材料选择合理,成功地降低了模具表面的高温。而铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”材料时,在凸台与侧壁等易产生局部热量集中部位,其硬度无明显下降,对“皮肤层”保持高强度支撑,但同时提高了热磨损风险。铁基高温合金 JX03 作为“骨头层”材料时,在平坦处与凹陷处等效应力值分布较小,避免了应力集中致使热裂纹缺陷的出现。

参考文献:

- [1] 何丹琪,石颢. 钛合金在航空航天领域中的应用探讨 [J]. 中国高新技术企业, 2016, (27): 50-51.
He D Q, Shi H. Application of titanium alloy in aerospace field [J]. China High-Tech Enterprises, 2016, (27): 50-51.
- [2] 姜启川,方健儒,张瑞卿,等. 热锻模具精密铸造工艺的研究与应用 [J]. 铸造, 2002, 51 (7): 408-410.
Jiang Q C, Fang J R, Zhang R Q, et al. Study and application of hot work die precision casting process [J]. Foundry, 2002, 51 (7): 408-410.
- [3] 王树奇,崔向红,王峰,等. 铸造热锻模具钢的研究与应用 [J]. 铸造, 2006, 55 (6): 555-559.
Wang S Q, Cui X H, Wang F, et al. Research and application of precision cast hot-forging die steels [J]. Foundry, 2006, 55 (6): 555-559.

(下转第 225 页)