



1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢球座模锻 成型工艺模拟与试验验证

梅飞强¹, 赵吉庆³, 闫磊¹, 王云海^{2,3}, 杨钢³

(1 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043; 2 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010;
3 钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

摘要:通过热压缩模拟实验研究了 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢在热变形过程中的动态再结晶行为, 通过 Deform 3D 有限元数值模拟研究了应变速率和坯料尺寸对 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢球座模锻成型工艺的影响。热压缩试验结果表明, 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢发生动态再结晶、混晶现象不明显的临界变形量约为 20%, 增大应变速率有利于在小变形量下, 获得更加均匀的组织。数值模拟结果表明, 随着应变速率提高, 模锻件最小变形区域的等效应变与等效应力均增加, 随着坯料直径增加, 模锻件最小变形区的等效应变下降, 等效应力先降低后提高。应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 坯料直径 $\phi 60 \text{ mm} \sim \phi 65 \text{ mm}$, 最小变形区域工程应变可达到 20% 以上, 且具有较好的锻造成型性。根据数值模拟结果, 设计了直径 $\phi 60 \text{ mm}$ 、高度 74 mm 的坯料, 以 0.1 s^{-1} 的应变速率进行模锻验证试验, 试制出的锻件成型好、组织与硬度均匀, 验证了数值模拟结果的合理与可行性。

关键词: 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢; 数值模拟; 模锻成型; Deform 3D 软件; 动态再结晶

DOI:10.20057/j.1003-8620.2024-00037 中图分类号: TG156

Simulation and Test Validation on Die forging Process of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN Heat-resistant Steel Ball seat

Mei Feiqiang¹, Zhao Jiqing³, Yan Lei¹, Wang Yunhai^{2,3}, Yang Gang³

(1 AVIC Shenyang Liming Aeroengine Co., Ltd., Shenyang 110043, China; 2 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3 Research Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: The dynamic recrystallization behavior of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel during thermal deformation was studied by thermal compression simulation experiments. The effects of strain rate and blank size on the die forging process of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel ball seat were studied by Deform 3D finite element numerical simulation. The results of thermal compression test showed that the critical deformation of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel was about 20% when full dynamic recrystallization happened and the phenomenon of mixed crystalline was not obvious. And increasing the strain rate was conducive to obtaining a more uniform structure under small deformation. The numerical simulation results showed that with the increase of the strain rate, the equivalent strain and equivalent stress in the minimum deformation area of the die forging increased. And With the increase of the diameter of the blank, the equivalent strain in the minimum deformation zone of the die forging decreased, and the equivalent stress decreased first and then increased. When the strain rate is 0.1 s^{-1} , and the diameter of the blank is 60 mm - 65 mm, the engineering strain in the minimum deformation area can reach more than 20%, and it had good forging formability. According to the numerical simulation results, a blank size with diameter of 60 mm and height of 74 mm was designed to verifying the forming of the die forging with strain rate of 0.1 s^{-1} . The forgings were well formed, uniform in structure and hardness, which verified the rationality and feasibility of the numerical simulation results.

Key Words: 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN Heat-resistant Steel; Numerical simulation; Die forging forming; Deform 3D software; Dynamic recrystallisation

1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢具有较高的热强性、抗氧化性和耐腐蚀性能^[1], 主要用于制造航空发动机叶片、球座及紧固件等关键部位^[2]。1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢球座类锻件, 上下表

面的直径差异大, 为提高材料使用率, 获得完整的金属流线, 多采用模锻工艺成型。锻件上下表面的尺寸差异, 导致了模锻过程中上下表面的变形量也存在较大差异, 需要对模锻成型工艺参数精细化设

作者简介: 梅飞强(1989—), 男, 硕士, 工程师; E-mail: 563122861@qq.com; 收稿日期: 2024-02-23

通信作者: 赵吉庆(1984—), 男, 博士, 正高级工程师; E-mail: zhaojiqing@nercast.com

计,才能避免出现混晶。

传统模锻生产中坯料的形状、尺寸及模具等工艺参数的确定,往往依赖于生产经验及不断的反复试验过程,不仅降低了生产效率,还增加了生产周期和成本^[3]。随着数值模拟技术的快速发展,有限元模拟被广泛应用于模锻成型过程^[4-7],通过 Deform 3D 有限元模拟模锻成型工艺,可以得到模锻过程中任意位置的等效应力-应变及变形量的分布,从而实现对模锻过程中工件内部等效应力-应变及变形量的精确模拟。孙铁峰等^[8]研究了不同锻造工艺对 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢的组织与性能的影响,发现增加变形量有利于细化晶粒,合金的最佳锻造工艺参数为 1140 °C 下锻造,变形量 50% 左右。刘大海等^[9]利用 Deform 3D 软件模拟了 GH5 188 卡箍热模锻造过程,发现在 1 000 °C 和变形速度为 20 mm/s 条件下热模锻得到的锻件流线分布合理、变形均匀,卡箍整体晶粒尺寸一致,并通过实验 OM 组织验证了数值模拟结果的准确性。

通过热压缩模拟实验,获得了不同变形量下的晶粒尺寸,确定了发生动态再结晶的温度与变形量范围,以此为依据,对 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢球座模锻成型过程进行数值模拟,研究应变速率与坯料尺寸对锻件各部位变形量的影响规律,以此为依据,制定了模锻坯料尺寸与工艺参数。最后通过生产试制,验证模拟结果的可行性,为优化模锻工艺提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 热变形试验

热变形试验材料为 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢棒材,化学成分见表 1。将 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢棒材沿纵向取样并加工成 $\phi 8 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,光洁度花 7 的热压缩圆柱试样。采用 Gleeble-3800 热模拟机进行试验,以 10 °C/s 加热到 1 160 °C,保温 5 min,使组织完全奥氏体化,然后分别在 0.01、0.1 s⁻¹ 的应变速率下,按不同的变形量进行压缩试验,热压缩的同时降温,当温度降至 950 °C 时,压缩至设定的变形

量,将试样取出水冷。具体热变形工艺为:(1)第一个试样保温后直接水冷,不变形;(2)变形量分别为:5%、10%、20%、30%、40%、50%,应变速率 0.01 s⁻¹;(3)变形量分别为:5%、10%、20%、30%、40%、50%,应变速率 0.1 s⁻¹。将热变形后的试样沿中心纵向剖开,经机械抛光后使用 10% 高锰酸钾溶液腐蚀,观察试样心部区域的晶粒度形貌。

1.2 有限元数值模拟

(1) 几何模型

球座零件的示意图如图 1 所示。

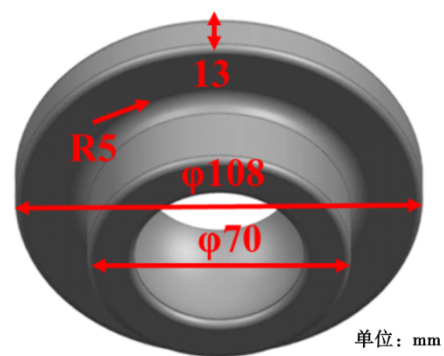


图 1 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢实际工件示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the workpiece of 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn heat-resistant steel

根据球座工件的尺寸形状,在 Deform 3D 建模工具中分别建立了不同尺寸的坯料几何模型,并对几何模型进行网格划分,工件材料为 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢棒材,上下模具材料选用 H13 钢,不考虑其磨损^[10]。故采用六面体扫描网格形式对其进行网格划分,划分节点及单元数分别为 188 090 个和 176 000 个,几何模型及划分网格如图 2 所示。

(2) 热物性参数

根据温度场理论模型^[11],材料内部热传导主要与材料本身的热物性能参数有关,包括导热系数及比热容,其中导热系数对材料内部的热传导过程影响最为显著。材料的热物性能参数可以通过热力学软件 Jmat-pro 进行计算,杨卿等^[12]对 Jmat-pro 计

表 1 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn 耐热钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn heat-resistant steel

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	W	V	Mo	N	Nb	Co
标准	0.13 ~ 0.18	≤0.60	≤0.60	≤0.020	≤0.030	15.0 ~ 16.5	1.70 ~ 2.10	0.65 ~ 1.00	0.18 ~ 0.30	1.30 ~ 1.65	0.03 ~ 0.08	0.20 ~ 0.35	4.50 ~ 5.50
试验钢	0.16	0.20	0.25	0.002 2	0.006 8	15.47	2.02	0.84	0.25	1.43	0.006 1	0.28	5.24

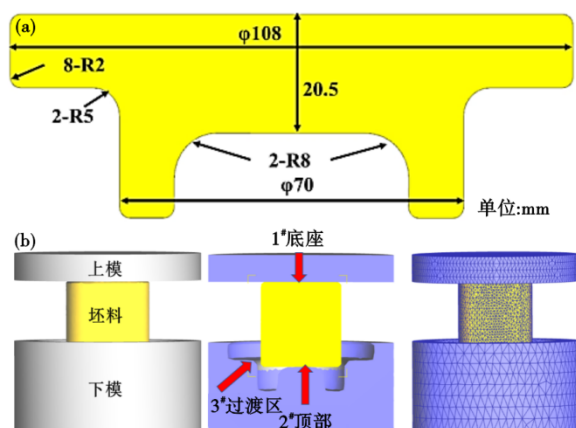


图2 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn耐热钢几何模型与坯料网格划分示意图:(a)工件尺寸,(b)坯料模型

Fig. 2 Geometric model of 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn heat-resistant steel and schematic diagram of blank meshing: (a) workpiece size, (b) blank model

算出的热物性能参数进行了实验验证,证明了Jmat-pro 计算材料热物性能参数的准确性。通过Jmat-pro 计算出1Cr16Co5Ni2MoWVNBn耐热钢的各项热物性能参数见表2。

表2 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn耐热钢Jmat-pro 计算热物性能参数结果

Table 2 Calculation results of thermal properties parameters of 1Cr16Co5Ni2MoWVNBn heat-resistant steel

Jmat-pro

温度/°C	杨氏模量/GPa	热导率/[W·(m·K) ⁻¹]	比热容/[J·(kg·°C) ⁻¹]
1 200	99	31.4	790
1 100	110	29.8	640
1 000	119	29.0	780
800	138	26.4	760
700	156	26.0	1 000
600	167	25.5	780
500	177	25.1	680
400	186	24.3	615
300	195	23.4	565
200	202	21.8	520
100	208	20.1	480

采用有限元软件进行热加工温度场分析时,准确的表面换热系数和塑性流变方程决定了模拟结果的准确性。依据工件的实际热加工工况及相关文献资料,确定了模锻成型过程中模具与工件之间的换热系数以及塑性流变方程,其中空气换热系数 $0.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 、剪切摩擦系数 $0.7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 、传热系数 $11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,塑性流变方程如式(1)。

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_1(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T) \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为工程应力、 $\bar{\sigma}_1$ 为流动应力、 $\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变、 $\dot{\varepsilon}$ 为应变率、 T 为材料的熔点。采用库伦摩擦模型来描述坯料、上下模具之间的滑动效应,坯料与模具之间的摩擦系数均设置为 $0.25 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [13]。

2 结果与分析

2.1 不同应变速率与变形量下的动态再结晶规律

应变速率 0.01 s^{-1} 不同变形量下的显微组织如图3所示。加热后未变形组织混晶明显,大尺寸晶粒直径大于 $50 \mu\text{m}$ 。5%变形量与直接加热后的晶粒尺寸相比,差异不大,5%变形量没有引起动态再结晶。10%变形量后,可以观察到细小的再结晶晶粒,大尺寸的晶粒比例下降,混晶现象有所改善,但仍有部分大尺寸晶粒,表明10%变形量发生了部分动态再结晶。20%变形量后,晶粒尺寸已比较均匀,且细小,虽然仍有少量晶粒没有发生动态再结晶,但混晶现象已不明显。30%变形量后,发生完全动态再结晶,晶粒尺寸进一步减小,且非常均匀,这表明,随着应变能的增加,动态再结晶的形核位置明显增加,形成了十分细小均匀的晶粒。压缩至40%以上变形量,形成晶粒尺寸仍十分细小,由于变形量的增加,随着变形的进行,变形温度降低,变形抗力增强,应变能增大,变形后的晶粒明显拉长。由此可见,在应变速率 0.01 s^{-1} 下,变形量大于10%,即可发生部分动态再结晶,变形量大于20%,虽然没有完全动态再结晶,但混晶现象已不明显,能够获得较均匀的晶粒度。

应变速率 0.1 s^{-1} 不同变形量下的显微组织如图4所示。在 0.1 s^{-1} 应变速率下,5%变形量,已经发生部分动态再结晶,晶粒开始变均匀;10%变形量,动态再结晶继续发生,由于应变速率快,短时间内积累了大量应变能,动态再结晶过程消耗不完全,晶粒略有拉长。20%变形量,发生完全再结晶,平均晶粒尺寸继续减小,混晶不再明显,同时晶粒变形程度进一步增加;变形量大于30%,晶粒变形已经非常明显,放大后可以观察到大量尺寸非常细小的再结晶晶粒,变形量越大,细小的再结晶晶粒数量越多。随着变形量增加,再结晶晶粒的形核数量增加,热压缩应变速率增加后,从 $1 060 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时间减少,大量的再结晶晶粒形核后,还未长大压缩试验已结束,在随后快速冷却过程被保留下来。对比不同应变速率下的试验结果可知,增大应变速率,可以降低发生动态再结晶的起始变形量,

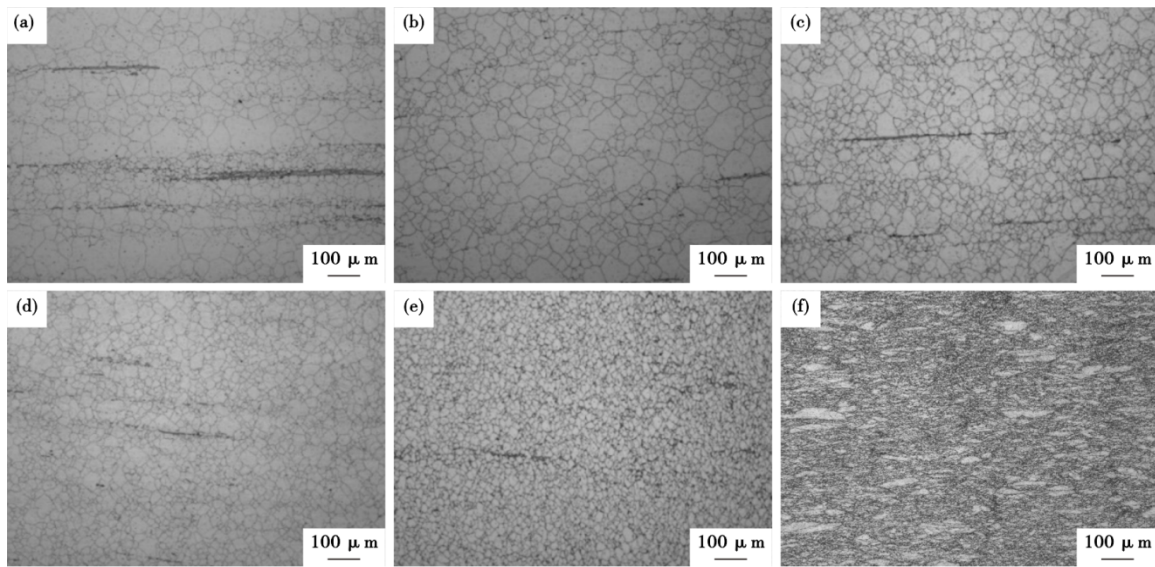


图 3 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢应变速率 0.01 s^{-1} 下不同变形量的显微组织:(a)加热后未变形,(b)变形量 5%,(c)变形量 10%,(d)变形量 20%,(e)变形量 30%,(f)变形量 50%

Fig. 3 Microstructure of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel with different amount of deformation under strain rate 0.01 s^{-1} : (a) no deformation after heating, (b) 5% deformation, (c) 10% deformation, (d) 20% deformation, (e) 30% deformation, (f) 50% deformation

有利于在小变形量下,获得更加细小均匀的组织。

变形量与应变速率对流变应力应变曲线的影响如图 5 所示。应变速率 0.01 s^{-1} 时,随着压缩变形量增加,应力先增加后减小,20%变形量时所需的压缩应力最大。应变速率 0.1 s^{-1} 时,随着压缩变形量增加,压缩应力逐渐增加,达到 40%变形量后,再增加变形量压缩应力不再明显变化。当变形量较

小时,高应变速率所需的压缩应力低于低应变速率,变形量较大时,高应变速率所需的压缩应力高于低应变速率。压缩应力是加工硬化和再结晶软化共同作用结果。低应变速率下,当变形量较小时,不发生动态再结晶或仅发生部分动态再结晶,加工硬化抗力随着变形量增加逐渐提高,随着变形量增加,动态再结晶软化作用逐渐抵消加工硬化化

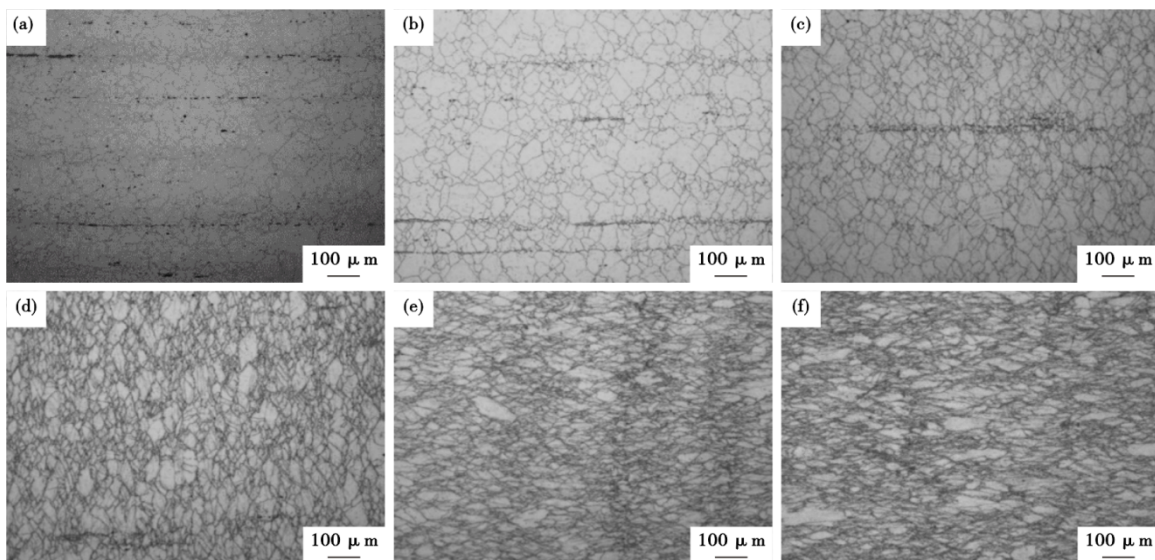


图 4 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN 耐热钢应变速率 0.1 s^{-1} 下不同变形量的显微组织:(a)变形量 5%,(b)变形量 10%,(c)变形量 20%,(d)变形量 30%,(e)变形量 40%,(f)变形量 50%

Fig. 4 Microstructure of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel with different amount of deformation under strain rate 0.1 s^{-1} : (a) 5% deformation, (b) 10% deformation, (c) 20% deformation, (d) 30% deformation, (e) 40% deformation, (f) 50% deformation

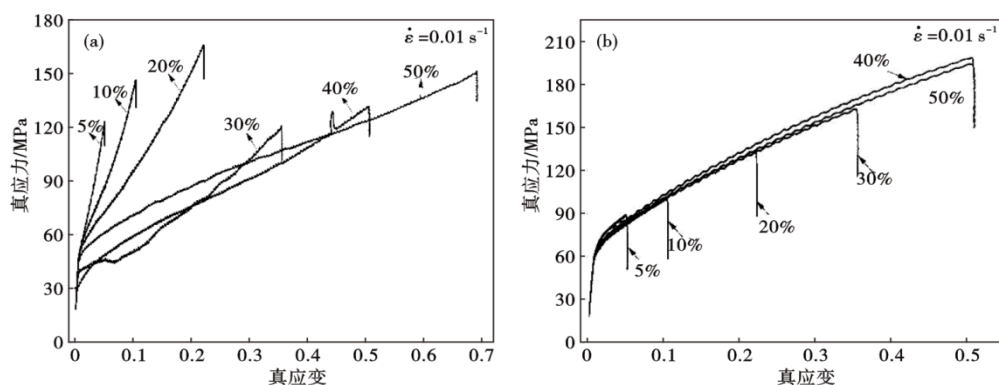


图5 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢不同应变速率与变形量下的流变应力应变曲线:(a)应变速率 0.01 s^{-1} , (b)应变速率 0.1 s^{-1}

Fig. 5 Flow stress-strain curves of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat resistant steel under different strain rates and deformations : (a) strain rates at 0.01 s^{-1} , (b) strain rates at 0.1 s^{-1}

抗力,当变形量达到20%,动态再结晶软化作用大约等于加工硬化抗力,压缩应力达到最大值;继续增加变形量,动态再结晶能够在变形早期开始,软化作用超过加工硬化抗力,压缩应力随之逐渐下降。高应变速率下,即使变形量较小,材料也能够快速开始动态再结晶形核,抵消加工硬化作用,达到设定变形量所需的压缩变形量更小;随着变形量增加,压缩应力增加主要是由变形抗力增加所引起。

由上述研究结果可知,在 $0.01\sim 0.1\text{ s}^{-1}$ 应变速率范围内,变形量大于20%,即可获得细小均匀的动态再结晶晶粒。对于模锻件,变形量最小的2#顶部区域,达到20%以上变形量,即可避免混晶。以此上述试验结果为目标,开展数值模拟研究,获得应变速率与坯料尺寸对模锻件各区域变形量的影响规律,设计模锻成型工艺参数。

2.2 应变速率对模锻件成型性与组织均匀性的影响

利用Deform 3D软件,对模锻件热加工成型过程进行数值模拟。模拟条件:坯料尺寸 $\phi 65\text{ mm}\times 63\text{ mm}$,开锻温度 $1160\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变速率分别为 0.02 、 0.1 s^{-1} ,模具预热温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模锻件不同位置等效应变与应变量的计算结果见表3。根据等效应变,按式(1)计算不同部位的变形量(压缩变形 $\varepsilon_{\text{真}}$ 取负值)。由计算结果可知,2#顶部位置的应变最小,且明显低于其它区域,为避免混晶发生,锻造时将该区域的变形量调整至20%以上。应变速率由 0.02 s^{-1} 增加至 0.1 s^{-1} ,1#底部位置与3#过渡区的应变变化不大,2#顶部位置应变增加,应变速率 0.02 s^{-1} 时,2#顶部位置工程应变13.9%,由动态再结晶规律可知,变形量小于20%,具有一定的混晶风险,应变速率提高至 0.1 s^{-1} ,工程应变增加至20.5%,

表3 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢应变速率为 0.02 、 0.1 s^{-1} 下不同位置应变量

Table 3 The strain rate of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat resistant steel is 0.02 、 0.1 s^{-1} under different position strain.

应变速率/ s^{-1}	变形部位	等效应变/%	工程应变/%
0.02	1# 底部	1.60	79.8
	2# 顶部	0.15	13.9
	3# 过渡区	2.14	88.2
0.10	1# 底部	1.59	79.6
	2# 顶部	0.23	20.5
	3# 过渡区	2.27	89.6

达到充分动态再结晶的临界变形量要求。

$$\varepsilon_{\text{真}} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{工程}}) \quad (2)$$

图6为应变速率 0.02 s^{-1} 和 0.1 s^{-1} 下的等效应力和等效应变云图。在数值模拟过程中,等效应变越大,分布越均匀,材料的可塑性越好,变形越充分。等效应力越大,分布越均匀,材料的强度和变形抵抗能力越好,越有利于进行高强度的加工。当应变速率为 0.02 s^{-1} 时,2#顶部位置等效应力为 92.8 MPa ,等效应变0.15%,当应变速率为 0.1 s^{-1} 时,2#锻件顶部等效应力为 169 MPa ,等效应变为0.23%。增大应变速率,1#底部位置等效应力、等效应变变化不大,2#顶部位置与3#过渡区的等效应力与等效应变均增大,这表明增加应变速率,锻件的变形会更加均匀。由此可见,采用较大应变速率更有利于模锻成型性与组织均匀性控制。

2.3 坯料尺寸对模锻件成型性与组织均匀性的影响

实际生产过程中,通过坯料尺寸的合理设计,可以减小模锻件各区域变形量差异,提高组织均匀性,也是生产中相对简单的工艺调整措施。设计了四种坯料尺寸,模拟计算坯料尺寸对等效应力、等

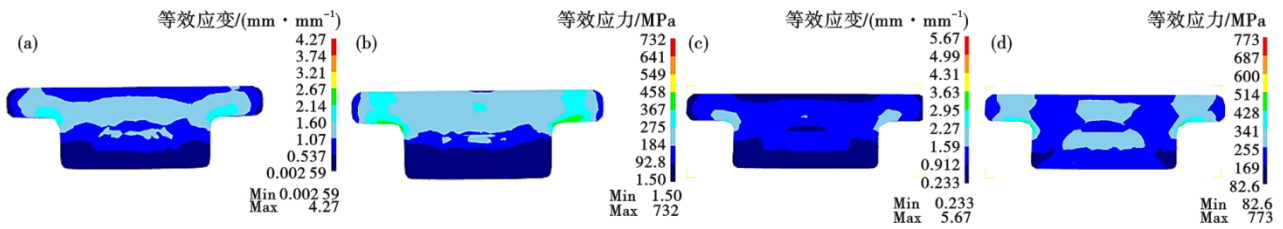


图6 不同应变速率下的1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢截面等效云图:(a) 0.02 s⁻¹等效应变,(b) 0.02 s⁻¹等效应力,(c) 0.1 s⁻¹等效应变,(d) 0.1 s⁻¹等效应力

Fig. 6 Equivalent cloud diagram of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel section at different strain rates : (a) 0.02 s⁻¹ equivalent strain , (b) 0.02 s⁻¹ equivalent stress , (c) 0.1 s⁻¹ equivalent strain , (d) 0.1 s⁻¹ equivalent stress

效应变和变形量的影响规律,见表4。以此为参考,确定模锻坯料的最佳尺寸。

采用应变速率0.1 s⁻¹,其他热物性参数不变,对不同坯料尺寸重新进行网格划分,进行模锻工艺数值模拟。表4为不同坯料尺寸下不同部位的应变量。由计算结果可知,随着坯料直径的增加与高径比的下降,锻件3个典型位置的应变量均下降,应变速率0.1 s⁻¹条件下,直径φ70 mm的坯料,2#顶部位置的工程应变仅11.3%,混晶风险非常大。直径大于φ65 mm,2#顶部位置的工程应变均大于20%的临界变形量。

图7为不同坯料尺寸等效应力与等效应变云图。随着坯料直径的增加,1#底部位置等效应力与等效应变均逐渐降低,塑性成型变差,但总体等效应力、等效应变仍较高,变形量充足,满足工件成型要求。2#顶部位置等效应力先降低后增高、等效应

表4 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢应变速率0.1s⁻¹不同坯料尺寸不同位置应变量

Table 4 Strain rate of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel 0.1s⁻¹ different billet size and different position strain

坯料尺寸/mm	高径比	变形部位	等效应变/%	工程应变/%
φ50×106	2.12	1# 底部	2.08	87.5
		2# 顶部	0.34	28.8
		3# 过渡区	2.67	93.0
φ60×74	1.23	1# 底部	1.61	80.0
		2# 顶部	0.31	26.7
		3# 过渡区	2.25	89.4
φ65×63	0.97	1# 底部	1.59	79.6
		2# 顶部	0.23	20.5
		3# 过渡区	2.27	89.6
φ70×54	0.77	1# 底部	1.32	73.2
		2# 顶部	0.12	11.3
		3# 过渡区	1.92	85.3

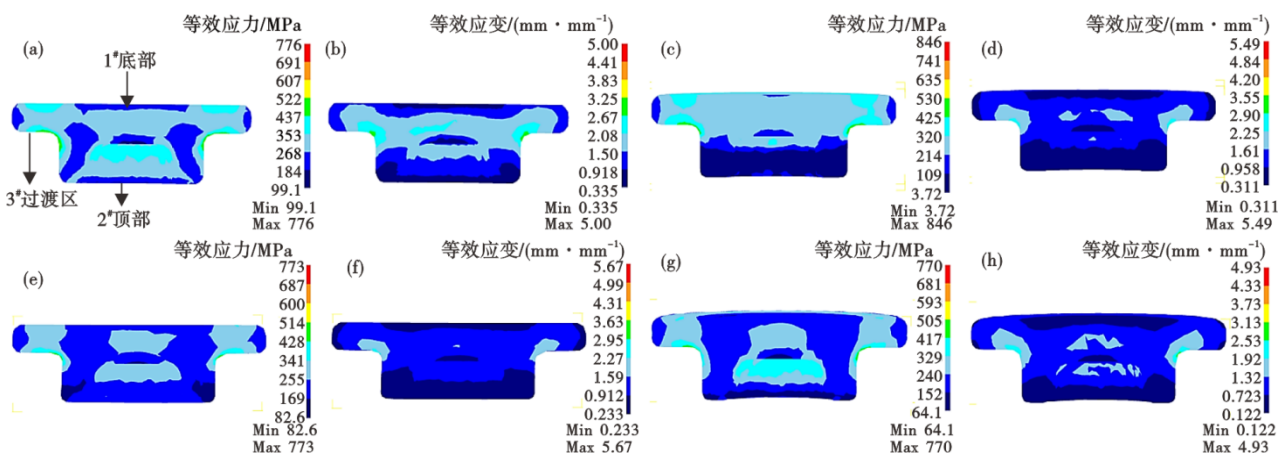


图7 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢应变速率0.1 s⁻¹下不同坯料尺寸等效云图:(a) φ50 mm×106 mm等效应力,(b) φ50 mm×106 mm等效应变,(c) φ60 mm×74 mm等效应力,(d) φ60 mm×74 mm等效应变,(e) φ65 mm×63 mm等效应力,(f) φ65 mm×63 mm等效应变,(g) φ70 mm×54 mm等效应力,(h) φ70 mm×54 mm等效应变

Fig. 7 Equivalent cloud diagram of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel with different billet size at strain rate 0.1 s⁻¹ : (a) φ50 mm×106 mm equivalent stress , (b) φ50 mm×106 mm equivalent strain , (c) φ60 mm×74 mm equivalent stress , (d) φ60 mm×74 mm equivalent strain , (e) φ65 mm×63 mm equivalent stress , (f) φ65 mm×63 mm equivalent strain , (g) φ70 mm×54 mm equivalent stress , (h) φ70 mm×54 mm equivalent strain

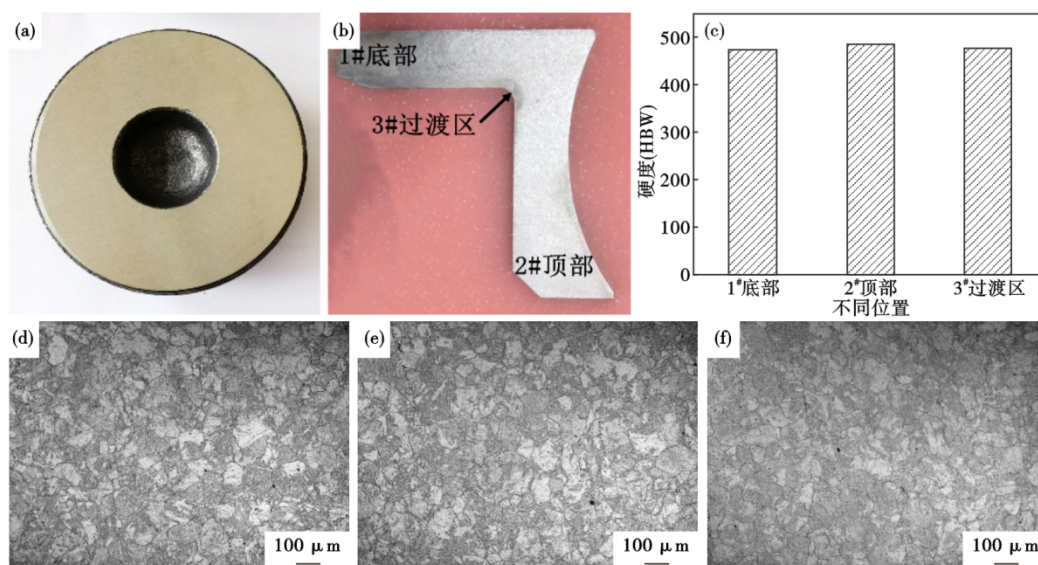


图8 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢模锻件的宏观形貌、组织与硬度:(a)宏观形貌,(b)低倍组织,(c)不同位置硬度,(d)1#底部位置组织,(e)2#顶部位置组织,(f)3#过渡区组织

Fig. 8 Macroscopic morphology, microstructure and hardness of 1Cr16Co5Ni2MoWVNbN heat-resistant steel die forging: (a) Macroscopic morphology, (b) macrostructure, (c) Hardness of different positions, (d) microstructure of 1# Bottom position, (e) microstructure of 2# top position, (f) microstructure of 3# Transition region

变逐渐降低,最低应变0.12,变形量不足,模锻件塑性成型差,抵抗变形能力低,成型性变差。3#过渡区等效应力无明显变化,总体等效应力与等效应变均较高,变形量充足。从等效应变分析,等效应变越大,模锻件成型效果越好,等效应变越均匀,锻件可塑性越好,变形更充分, $\phi 50\text{ mm} \sim \phi 65\text{ mm}$ 坯料直径符合成型要求;从等效应力分析,等效应力越大,模锻件抵抗变形能力越好,等效应力越均匀,锻件强度和热加工性能越好, $\phi 60\text{ mm} \sim \phi 70\text{ mm}$ 坯料直径符合成型要求。综上可知,应变速率 0.1 s^{-1} 时,适宜模锻坯料直径为 $\phi 60\text{ mm} \sim \phi 65\text{ mm}$, $\phi 60\text{ mm}$ 直径,2#顶部位置的应变更充分。

2.4 模锻试验验证

根据数值模拟结果,制定工艺参数,进行模锻试验验证。应变速率采用 0.1 s^{-1} ,坯料直径 $\phi 60\text{ mm}$,高 74 mm ,开锻温度 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$,模具预热 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图8为1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢模锻成型后的显微组织与硬度分布。锻件底部和纵向截面宏观形貌,样件整体无飞边裂纹,局部填充性好,如图8(a)

所示,低倍组织无明显的粗大晶粒,如图8(b)所示。三个典型位置按 $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火+ $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两次回火热处理后,硬度差异不大,如图8(c)所示,金相组织均匀,晶粒度均为5级,没有观察到明显混晶,如图8(d)~(f)所示。由此可见,根据数值模拟结果制定的坯料尺寸与应变速率参数是合理可行的。

3 结论

(1)1Cr16Co5Ni2MoWVNbN耐热钢发生动态再结晶,无明显混晶现象的临界变形量约为20%,增加应变速率,有利于在小变形量下获得更均匀的组织。

(2)提高应变速率、减小坯料尺寸,均能够提高模锻件变形量最小区域(2#顶部)的等效应变与等效应力,提高模锻件的成型性与组织均匀性。

(3)根据数值模拟结果,应变速率 0.1 s^{-1} 时,适宜模锻坯料直径为 $\phi 60\text{ mm} \sim \phi 65\text{ mm}$ 。设计直径 $\phi 60\text{ mm}$,高 74 mm 的坯料,进行了模锻试验验证,锻件成型良好、晶粒尺寸与硬度均匀,验证了数值模拟结果是合理可行的。

参考文献

- [1] 李志,支敏学,刘天琦,等. 新型超高强度高韧性马氏体沉淀硬化不锈钢的组织与力学性能初探[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 1-5.
[2] 张凯强,李激光,唐广波. Nb和V对1Cr16Co5Ni2MoWVNbN钢

中析出相影响的模拟计算[J]. 钢铁研究学报, 2018, 30(01): 54-58.

- [3] 栗 桔,许日泽,刘侠夫. 叶片精锻[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.

[4] Zhan M, Liu Y, Yang H. Influence of the shape and position of the preform in the precision forging of a compressor blade[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1) : 80-83.

[5] 张亚伟. 热轧高强度回火温度场数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.

[6] Zhu H L, Li S Y, Wang C R. Numerical simulation of temperature field of gears in quenching process[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 457 : 566-570.

[7] 杜丽萍, 龚志华, 赵吉庆, 等. 9Cr3W3Co 叶片钢的热变形行为研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5):90-96.

[8] 孙铁峰, 李许明, 宋玺玉, 等. 锻造工艺对 1Cr16Co5Ni2 MoWVNbN 钢组织和性能的影响[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2012, 29(3): 38-42.

[9] 刘大海, 陈劲东, 柴浩瑞, 等. 基于 DEFORM-3D 的 GH5188 卡箍热模锻造过程数值模拟[J]. 锻压技术, 2022, 47(6): 9-16.

[10] 葛丹丹, 金峰, 樊文欣. 筒形件强力旋压有限元数值模拟技术的研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 93-95.

[11] 封源, 黎军硕, 谢尘, 等. 铣刀深冷处理过程中残留奥氏体演变的数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(S2): 230-235.

[12] 杨卿. 基于环件热辗扩成形的铸态 42CrMo 钢热物理性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2013.

[13] Ma F, Yang H, Zhan M. Plastic deformation behaviors and their application in power spinning process of conical parts with transverse inner rib[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(1): 180-189.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团股份有限公司主管、大冶特殊钢有限公司主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于1980年创刊发行,国际标准刊号为ISSN1003-8620,国内统一刊号为CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。”

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

- (一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂ICP备2022000839号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。
- (二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济 and 法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。
- (三) 未经授权网站请于2024年8月30日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部