

ZGMn13Cr2 钢热变形行为及热加工图

张培彦

(郑州旅游职业学院 机电工程学院, 河南 郑州 451464)

摘要: 为研究 ZGMn13Cr2 钢的热变形行为及热加工图, 首先利用 Gleeble-3500 热模拟试验机对其进行了高温压缩实验, 研究 ZGMn13Cr2 钢在变形温度为 900、1000、1100 和 1200 °C, 应变速率为 0.01、0.1、1 和 10 s⁻¹ 条件下的真实应力-真实应变曲线, 分析其在不同变形条件下流变应力的变化规律, 并基于实验数据, 经线性拟合得到 ZGMn13Cr2 钢的 Arrhenius 本构方程及热加工图; 然后, 以某型号挖掘机斗齿为研究对象, 研究该材料的热加工性能, 制定了挖掘机斗齿的锻造工艺并利用数值模拟软件进行模拟; 最后, 根据模拟得到的工艺参数进行了工艺实验验证。研究结果表明, ZGMn13Cr2 钢的最优热加工工艺参数范围为: 变形温度为 1057~1167 °C、应变速率为 0.2~0.5 s⁻¹。工艺实验得到的斗齿锻件充填饱满, 并与模拟结果基本一致。该研究结果为 ZGMn13Cr2 钢的锻造工艺参数制定以及挖掘机斗齿的实际锻造生产提供一定的理论依据。

关键词: ZGMn13Cr2 钢; 热变形行为; 热加工图; 挖掘机斗齿; 锻造工艺

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.09.004

中图分类号: TG314.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 09-0027-09

Hot deformation behavior and hot processing map of ZGMn13Cr2 steel

Zhang Peiyan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Tourism College, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: To study the hot deformation behavior and hot processing map of ZGMn13Cr2 steel, the high-temperature compression experiments were conducted by hot simulation testing machine Gleeble-3500, and the true stress-true strain curves of ZGMn13Cr2 steel were obtained under the deformation temperatures of 900, 1000, 1100 and 1200 °C, and the strain rates of 0.01, 0.1, 1 and 10 s⁻¹. Then, the rheological stress change laws under different deformation conditions were analyzed, and based on the experimental data, the Arrhenius constitutive equation and the hot processing map of ZGMn13Cr2 steel were obtained by linear fitting. Furthermore, for a certain model of excavator bucket teeth, the hot processing properties of the material were studied, and the forging process of excavator bucket teeth was formulated and simulated by numerical simulation software. Finally, the process parameters obtained from the simulation were verified by process experiments. The research results indicate that the optimal hot processing parameters of ZGMn13Cr2 steel is the deformation temperature of 1057-1167 °C, and the strain rate of 0.2-0.5 s⁻¹. The forgings of bucket teeth obtained from the process test is fully filled, which is basically consistent with the simulation results. The research results provide a certain theoretical basis for the formulation of forging process parameters for ZGMn13Cr2 steel and the actual forging production of excavator bucket teeth.

Key words: ZGMn13Cr2 steel; hot deformation behavior; hot processing map; excavator bucket teeth; forging process

ZGMn13Cr2 钢是一种具有较高强度和韧性的低合金结构钢。多用于制造高负荷、高速的各种重要零件, 如齿轮、轴、螺栓和螺母等, 也用于制造耐磨、工作温度不高的零件, 如挖掘机斗齿^[1-2]。但由于 ZGMn13Cr2 合金钢的塑性较差, 热变形抗力

大, 热锻过程中容易出现锻造裂纹等锻造缺陷。因此, 需要研究其高温下的热变形行为、流变应力本构方程和热加工图等, 这对于 ZGMn13Cr2 钢锻造工艺参数的制定, 具有十分重要的工程意义。

目前, 国内很多学者对 ZGMn13Cr2 钢进行了相关研究, 黄河科技学院应用技术学院的熊运霞^[3]对工程机械用 ZGMn13Cr2 高锰钢热处理工艺进行了研究。得到了不同温度时效处理对 ZGMn13Cr2 钢的组织及性能的影响。广西大学朱可等^[4]对 ZGMn13Cr2 钢水韧处理中的脱碳行为进行了研究, 分析了实际脱碳深度与理论计算之间的关系。洛阳矿山机械工程

收稿日期: 2024-05-30; 修订日期: 2024-08-12

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (24B430021); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2024SJGLX0737)

作者简介: 张培彦 (1979-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: zpy20240530@163.com

设计研究院刘瑞莉等^[5]对纳米 SiC 增强 ZGMn13Cr2 钢的组织 and 性能进行了研究, 研究表明, 经改性纳米 SiC 粉末强化处理后的超高锰钢的组织有显著改善。但是, 对于 ZGMn13Cr2 钢的热变形行为及热加工图的研究及锻造工艺参数的制定等方面的研究, 还未见有报道。本文以 ZGMn13Cr2 钢为原材料, 以挖掘机斗齿为应用对象, 借助等温压缩实验, 研究其热压缩变形时的真实应力-真实应变曲线, 并建立流变应力本构方程和热加工图, 之后将流变应力曲线数据导入数值模拟软件 Deform-3D 材料库中, 然后对斗齿锻造成形工艺进行了数值模拟和工艺实验, 实验得到的斗齿锻件充填饱满, 没有锻造缺陷。为 ZGMn13Cr2 钢的锻造工艺参数制定及实际锻造生产提供了一定的理论依据。

1 ZGMn13Cr2 钢高温压缩实验及结果

1.1 高温压缩实验

首先, 利用车床和中速走丝线切割等机械加工设备, 根据 GB/T 7314—2017^[6] 和 HB 7571—1997^[7], 将材料制备成若干个 $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的压缩试样^[6-7], 如图 1 所示。对试样进行单道次热压缩实验, 根据金属

材料热加工温度范围并结合实际生产所用液压机的速度, 制定了本文的实验方案, 如表 1 所示。

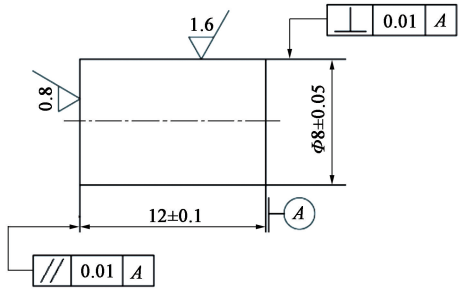


图 1 热压缩试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of hot compression specimen

表 1 高温压缩实验方案

Table 1 Experiment scheme of high temperature compression

参数	变形温度/℃	应变速率/ s^{-1}	压缩道次	压缩量/%
数值	900、1000、1100、1200	0.01、0.1、1、10	1	60

1.2 实验结果及分析

金属材料热变形是金属变形的一种, 是金属在再结晶温度以上的塑性变形, 其过程是金属材料产生内部滑移、位错滑移及由位错增值束集引起的动态再结晶^[8-9]。图 2 为不同变形条件下 ZGMn13Cr2 钢的真

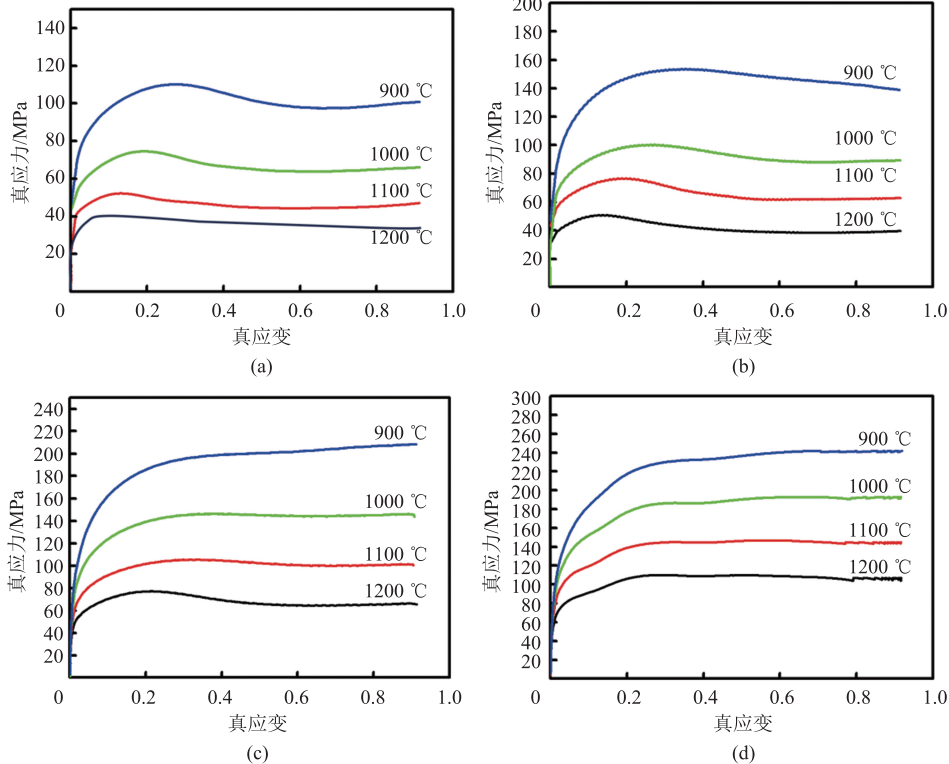


图 2 不同变形温度和应变速率下 ZGMn13Cr2 钢的真实应力-真实应变曲线

(a) 0.01 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 1 s^{-1} (d) 10 s^{-1}

Fig. 2 True stress-true strain curves of ZGMn13Cr2 steel under different deformation temperatures and strain rates

实应力-真实应变曲线,从图2中可以看出,流变应力先随应变的增大而增大,到达一个峰值后,流变应力缓慢下降,最终达到一个相对稳定值。应变速率不变时,随变形温度的升高,流变应力值减小,其主要原因:金属材料的高温变形是一个热激活过程,随着温度的升高,位错运动的能力增强,产生位错滑移或攀移;另一方面,温度升高促进了动态再结晶的发生,其软化作用抵消了一部分加工硬化作用。

图3为变形温度为1100℃时,不同应变速率下ZGMn13Cr2钢的真实应力-真实应变曲线。在变形温度和应变值一定时,应变速率越高,所对应的流变应力越高。这是由于应变速率越大,加工硬化导致的位错增殖速率越快,而动态回复引起的位错消失速率变慢。虽然在高位错密度条件下动态再结晶晶粒更容易形核,但是由于变形时间过短,动态再结晶晶核来不及长大以消除位错。因而,应变速率越大,材料内部的位错密度越高,变形过程中的流变应力也越大。

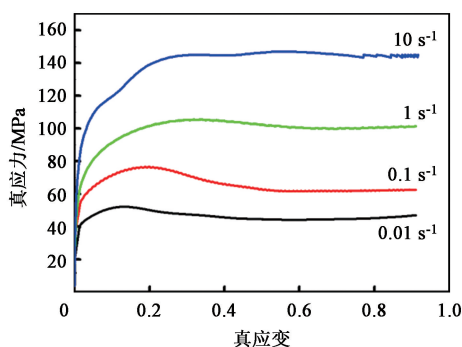


图3 变形温度为1100℃时不同应变速率下ZGMn13Cr2钢的真实应力-真实应变曲线

Fig. 3 True stress-true strain curves of ZGMn13Cr2 steel under different strain rates at deformation temperature of 1100 °C

2 ZGMn13Cr2 钢本构方程的建立

生产实践中需要建立工艺参数与材料流变应力之间的关联模型,即材料流变应力本构方程,一般用 Arrhenius 函数来表示^[10-14]:

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

将式(1)进行简化:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad \alpha\sigma \leq 0.8 \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad \alpha\sigma \geq 1.2 \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad \alpha\sigma \text{ 为任意值} \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为峰值应力, MPa; A 、 A_1 、 A_2 、 n 、 n_1 、 α 和 β 为常数; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; Q 为变形激活能, J; T 为变形温度, K。

对式(2)、式(3)和式(4)两边取自然对数,得到:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - Q/(RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (7)$$

由式(5)和式(6)可知,不同变形条件下的峰值应力 σ 可以从高温压缩实验得到的真实应力-真实应变曲线得到,如表2所示。利用 Origin 数据处理软件对 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 进行线性拟合,取拟合直线斜率的平均值便可得到 n_1 和 β 值, $n_1 = 7.18956$, $\beta = 0.06795 \text{ MPa}^{-1}$ 。再根据 $\alpha = \beta/n_1$, 计算出 $\alpha = 0.00945 \text{ MPa}^{-1}$, 如图4所示。

表2 不同变形条件下ZGMn13Cr2钢的峰值应力(MPa)

Table 2 Peak stresses of ZGMn13Cr2 steel under different deformation conditions (MPa)

应变速率/ s^{-1}	变形温度/℃			
	900	1000	1100	1200
0.01	110.56	72.03	53.15	39.56
0.1	153.32	100.45	76.94	51.15
1.0	207.91	145.76	105.43	77.30
10	241.33	192.58	146.75	110.15

将 α 值代入 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$, 又由式(7)可知,利用 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 进行线性拟合,即可得到拟合直线斜率的平均值,即 $n = 5.19305$, 如图5所示。

假设变形温度 T 与变形激活能 Q 无关,对式(7)进行变形可得:

$$\ln [\sinh(\alpha\sigma)] = \frac{Q}{Rn} \cdot \frac{1}{T} + \frac{\ln \dot{\varepsilon} - \ln A}{n} \quad (8)$$

由式(8)可知,将 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1000/T$ 进行线性拟合,可以得到拟合直线斜率的平均值 $Q/Rn = 7.7964$, 如图6所示,将 n 和 R 带入式(8),可计算出 $Q = 336.60975 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 再结合式(7)计算得到 $A = 2.83968 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ 。

将以上求解得到的数值带入式(1),得到ZGMn13Cr2钢的本构方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 2.83968 \times 10^{12} \times [\sinh(0.00945\sigma)]^{5.19305} \times \exp\left(\frac{336609.75}{8.314T}\right) \quad (9)$$

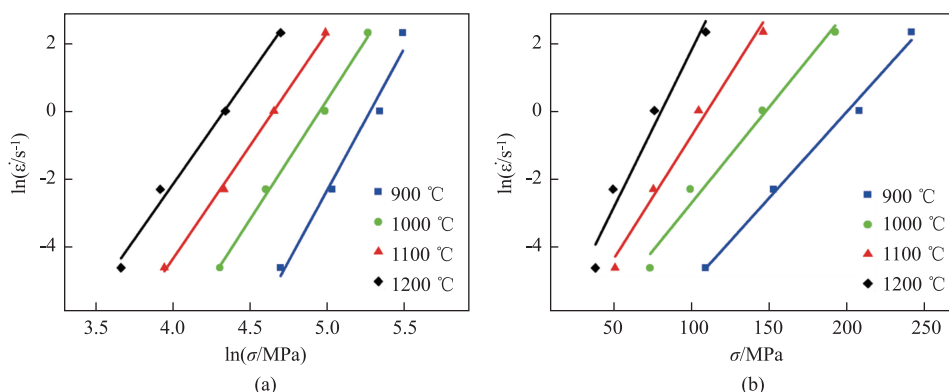
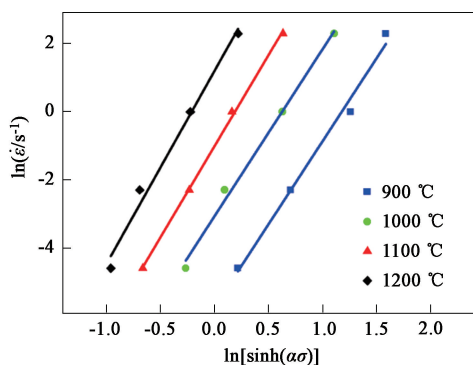
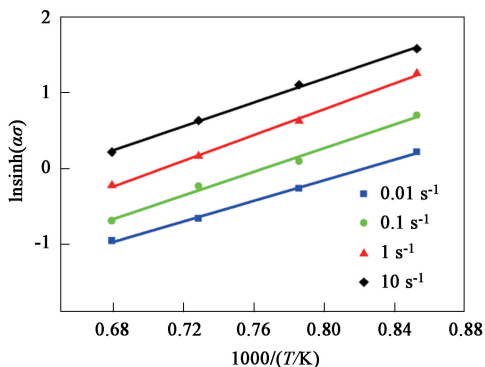


图 4 不同变形温度下 ZGMn13Cr2 钢的应变速率和峰值应力的对应关系

(a) $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ (b) $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$

Fig. 4 Correspondence between strain rate and peak stress of ZGMn13Cr2 steel at different deformation temperatures

图 5 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 的关系曲线Fig. 5 Relationship curve of $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$ 图 6 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$ 的关系曲线Fig. 6 Relationship curves of $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$

3 ZGMn13Cr2 钢热加工图

热加工图主要由功率耗散图和失稳图叠加而成,可划分为加工稳定区和加工失稳区。一般采用 Prasad 加工失稳区判据 $\xi(\dot{\epsilon})$,可表达为^[15-16]:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \lg[m/(m+1)]}{\partial \lg \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (10)$$

式中: m 为应变速率敏感指数。

根据式 (10),当 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$ 时,为非稳态流动,处于不安全变形区,主要以绝热剪切带、空洞、鞋型压裂等加工缺陷的形式表现出来。 $\xi(\dot{\epsilon})$ 随变形温度和应变速率的变化构成了流变失稳图。将不同变形温度和应变速率下的能量耗散图与流变失稳图进行叠加可得到材料的热加工图,如图 7 所示,分别为 ZGMn13Cr2 钢在真实应变 $\epsilon = 0.3$ 、 0.5 和 0.7 时的热加工图。图 7 中深色区域为加工失稳区,浅色区域为加工稳定区。从图 7 中可以看出:不同应变下的加工失稳区主要出现在上部;在变形温度为 $1057 \sim 1167$ °C、应变速率为 $0.2 \sim 0.5$ s⁻¹ 时,材料处于加工稳定区,且功率耗散因数达到最大值,所以,该变形温度和应变速率范围为 ZGMn13Cr2 钢的最优热加工工艺参数。

4 挖掘机斗齿锻造工艺模拟及结果分析

4.1 锻造工艺设计

首先,根据斗齿零件设计相应的锻件。图 8 为某型号斗齿零件,图 9 为根据该零件设计的锻件。图 10 为斗齿锻件几何尺寸参数。经过分析与计算,最终制定了下料—预锻—终锻的锻造工艺。

4.2 有限元模拟

以斗齿锻件的几何尺寸为基础,设计相应的模具几何尺寸,然后利用 Solidworks 三维制图软件绘制斗齿预锻和终锻模具结构,并组合成装配体。

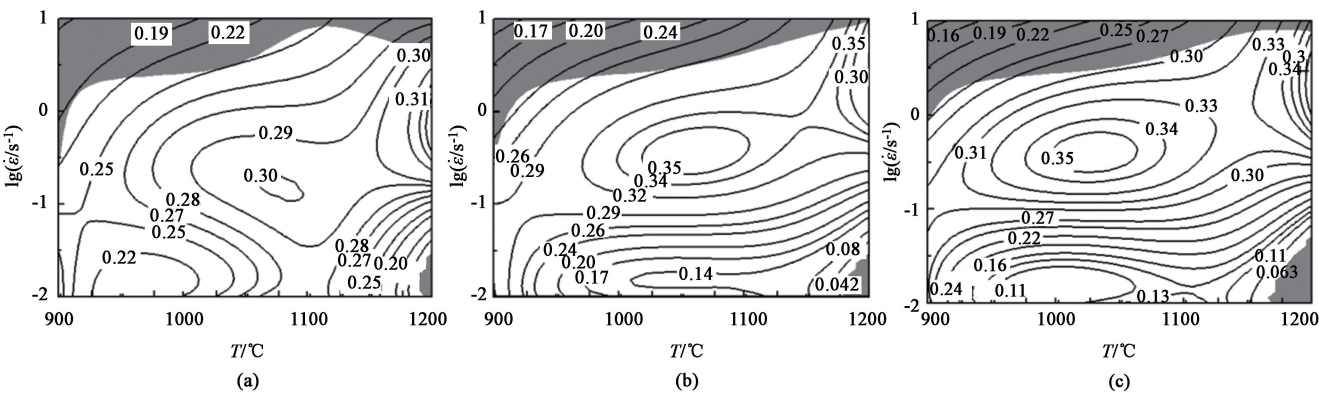


图 7 ZGMn13Cr2 钢在不同应变下的热加工图
(a) $\varepsilon=0.3$ (b) $\varepsilon=0.5$ (c) $\varepsilon=0.7$
Fig. 7 Hot processing maps of ZGMn13Cr2 steel under different strains



图 8 某型号斗齿零件
Fig. 8 A type of bucket teeth part



图 9 斗齿锻件三维模型
Fig. 9 Three-dimensional model of bucket tooth forgings

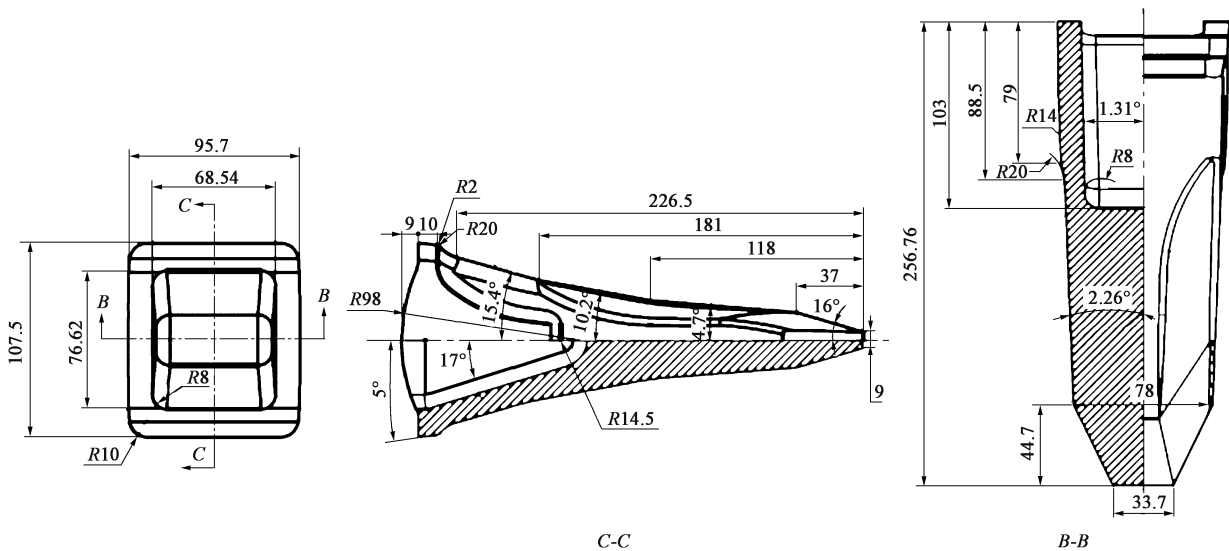


图 10 斗齿锻件几何尺寸
Fig. 10 Geometric dimensions of bucket tooth forgings

图 11 为斗齿预锻有限元模型，主要有上冲头、凹模、坯料和下模。图 12 为斗齿终锻有限元模型，主要有上冲头、预制坯、凹模、下模和顶料板。将模型导出为 STL 格式，然后导入到 Deform-3D 中进行模拟

计算^[17-18]。为了模拟结果的准确性，采用实验得到的 ZGMn13Cr2 钢的真实应力-真实应变曲线数据进行模拟，根据上述得到的最优热加工工艺参数，设置相应的模拟工艺参数，如表 3 所示^[19-20]。

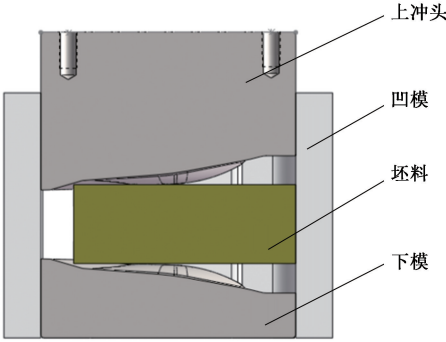


图 11 斗齿预锻有限元模型
Fig. 11 Finite element model of pre-forging for bucket tooth

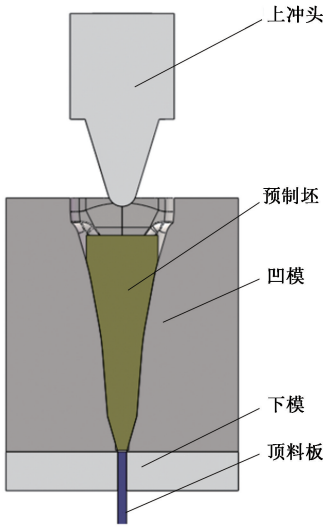


图 12 斗齿终锻有限元模型
Fig. 12 Finite element model of final forging for bucket tooth

表 3 模拟工艺参数
Table 3 Simulation process parameters

参数	数值
初始温度/℃	1150
单元类型	四面体网格
单元数量	15000
摩擦类型	剪切摩擦
摩擦因数	0.3
成形速度/(mm·s ⁻¹)	15
环境温度/℃	20

4.3 模拟结果分析

4.3.1 载荷-时间曲线

图 13 为斗齿预锻过程中上冲头的载荷-时间曲线，预锻过程为闭式模锻过程，上冲头载荷随着变形量的增加而增大，在最后阶段上冲头、凹模、下

模与坯料形成封闭模腔，金属流动阻力增大，载荷急剧增加，最大值为 6010 kN。终锻过程主要为斗齿内孔反挤压成形过程，在初始变形阶段，上冲头下端与坯料接触，金属受压变形，此时金属流动空间较大，流动阻力小，因此载荷较低；随着变形的继续，上冲头上端逐渐与坯料接触，随着接触面积逐渐增大，载荷逐渐增大；在最后阶段，金属流动空间变小，载荷增加到最大值为 3250 kN，如图 14 所示。

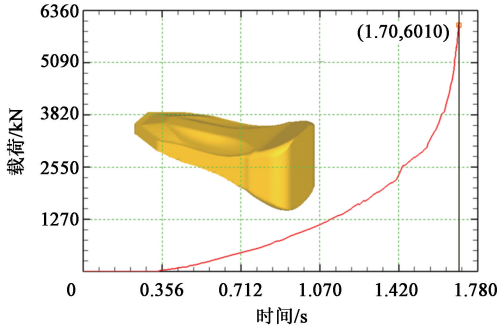


图 13 预锻过程中上冲头的载荷-时间曲线
Fig. 13 Load-time curve of upper punch during pre-forging process

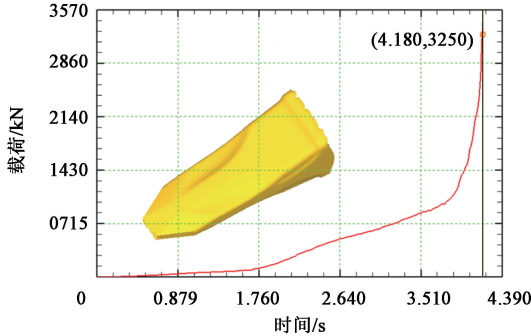


图 14 终锻过程中上冲头载荷-时间曲线
Fig. 14 Load-time curve of upper punch during final forging process

4.3.2 金属流动规律

由于预锻过程中金属流动规律比较简单，本文主要分析终锻过程中的金属流动规律。图 15 为终锻过程中坯料的速度场分布图。由图 15 可知，在金属刚开始变形时，随着上冲头向下运动，金属向两端及下端运动，如图 15a 所示；随着冲头继续运动，金属材料反挤压变形，此时大部分金属向上端流动，且流动速度较快，分析认为根据最小阻力定律，金属总是向运动阻力最小的方向移动，此时冲头上端未与金属接触，金属流动空间较大，如图 15b 所示；随着上冲头继续运动，上冲头上端也逐渐与金属接触，最后形成封闭模腔，金属流动阻力增大，迫使金属流动充满整个型腔，如图 15c 所示。

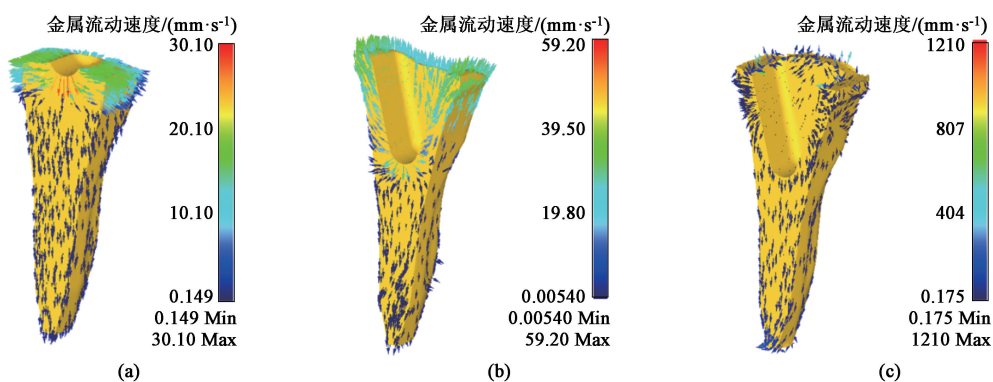


图 15 终锻过程中的金属流动规律
(a) 180 步 (b) 300 步 (c) 380 步
Fig. 15 Metal flow laws during final forging process
(a) Step 180 (b) Step 300 (c) Step 380

5 工艺实验及验证

工艺实验的目的主要是用来验证本文制定的挖掘机斗齿锻造工艺的可行性及数值模拟的准确性。模具设计需要根据模拟得到的工艺参数及现有成形设备的模架进行设计，经过计算并结合模拟结果中工件的充填情况，最终选择 $\Phi 75\text{ mm}\times 165\text{ mm}$ 的坯料。将 ZGMn13Cr2 钢棒料按实验需要的长度用带锯床锯切后，采用中频感应加热炉进行加热，加热温度控制在 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，将加热完成的坯料放入预锻模具中进行预锻工序。图 16 为实验得到的预锻件，图 17 为数值模拟得到的预锻件，可以看到工艺实验与模拟结果基本一致。最后将预锻件放入终锻模具中进行终锻工序，图 18 为实验得到的终锻件，图 19 为数值模拟得到的终锻件，通过比较可以看出，两者的充填情况基本一致，没有锻造缺陷，尺寸也符合设计要求。



图 16 工艺实验得到的预锻件
Fig. 16 Pre-forgings obtained from process test



图 17 数值模拟得到的预锻件
Fig. 17 Pre-forgings obtained from numerical simulation



图 18 工艺实验得到的终锻件
Fig. 18 Final forgings obtained from process test

6 结论

- (1) 根据高温压缩实验数据，建立了 ZGMn13Cr2 钢的 Arrhenius 流变应力本构方程。
- (2) 得到了 ZGMn13Cr2 钢的最优热加工工艺参数范围为：变形温度为 $1057\sim 1167\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，应变速率



图 19 数值模拟得到的终锻件

Fig. 19 Final forging obtained from numerical simulation

为 $0.2 \sim 0.5 \text{ s}^{-1}$ 。工艺实验得到的斗齿锻件充填饱满, 尺寸符合设计要求, 研究结果可对该类锻件的锻造工艺参数制定提供指导。

参考文献:

- [1] 孙朝远, 熊逸博, 刘德建, 等. 飞机滑轨工艺凸台增材-锻造复合制造技术 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 1-9.
Sun C Y, Xiong Y B, Liu D J, et al. Aircraft slide rail process boss additive forging composite manufacturing technology [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 1-9.
- [2] 王北平, 韩冬, 王兆楠, 等. 细长薄壁发动机金属壳体精密制造技术 [J]. 锻压技术, 2023, 47 (12): 200-205.
Wang B P, Han D, Wang Z N, et al. Precision manufacturing technology for slender and thin-walled engine metal shells [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 47 (12): 200-205.
- [3] 熊运霞. 工程机械用 ZGMn13Cr2 高锰钢热处理工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49 (14): 128-130.
Xiong Y X. Research on heat treatment process of ZGMn13Cr2 high manganese steel for construction machinery [J]. Hot Working Technology, 2020, 49 (14): 128-130.
- [4] 朱可, 李强, 曾建民, 等. ZGMn13Cr2 钢水韧处理中的脱碳行为 [J]. 金属热处理, 2021, 38 (4): 205-209.
Zhu K, Li Q, Zeng J M, et al. Decarbonization behavior in toughness treatment of ZGMn13Cr2 steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 38 (4): 205-209.
- [5] 刘瑞莉, 王文焱, 王文彬, 等. 纳米 SiC 增强 ZGMn13Cr2 组织和性能 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2014, 35 (5): 6-8.
Liu R L, Wang W Y, Wang W B, et al. Nano SiC reinforced ZGMn13Cr2 microstructure and properties [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 35 (5): 6-8.
- [6] GB/T 7314—2017, 金属材料 室温压缩试验方法 [S].
GB/T 7314—2017, Metallic materials—Compression test method at room temperature [S].
- [7] HB 7571—1997, 金属高温压缩试验方法 [S].
HB 7571—1997, Metal high temperature compression test method [S].
- [8] 柳木桐, 钟平, 刘大博, 等. 超高强度不锈钢热变形行为及加工图 [J]. 航空材料学报, 2022, 42 (4): 49-56.
Liu M T, Zhong P, Liu D B, et al. Hot deformation behavior and processing diagram of ultra-high strength stainless steel [J]. Journal of Aerospace Materials, 2022, 42 (4): 49-56.
- [9] 宁静, 王敖, 苏杰, 等. 新型中合金超高强度钢的热变形行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 234-239.
Ning J, Wang A, Su J, et al. Hot deformation behavior of new medium alloy ultra-high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 234-239.
- [10] 张芳萍, 高毅, 和蕊芳, 等. 316L/Q420 双金属热变形行为及热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (11): 98-105.
Zhang F P, Gao Y, He R F, et al. Hot deformation behavior and hot working diagram of 316L/Q420 bimetallic [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (11): 98-105.
- [11] 陈刚, 姚远超, 贾寓真, 等. 30Cr4MoNiV 超高强度钢热变形本构方程的构建与优化 [J]. 材料导报, 2022, 36 (21): 194-200.
Chen G, Yao Y C, Jia Y Z, et al. Construction and optimization of thermal deformation constitutive equations for 30Cr4MoNiV ultra-high strength steel [J]. Materials Review, 2022, 36 (21): 194-200.
- [12] Song C N, Cao J G, Xiao J, et al. High-temperature constitutive relationship involving phase transformation for non-oriented electrical steel based on PSO-DNN approach [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105210.
- [13] 毛欢, 韩莹莹. 基于应变补偿 Arrhenius 模型的 TC20 钛合金本构方程研究 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
Mao H, Han Y Y. Study on constitutive equations of TC20 titanium alloy based on strain compensation Arrhenius model [J]. Casting Technology, 2018, 39 (9): 1939-1942, 1947.
- [14] 曹建国, 王天聪, 李洪波, 等. 基于 Arrhenius 改进模型的无取向电工钢高温变形本构关系 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (4): 90-96, 102.
Cao J G, Wang T C, Li H B, et al. High temperature deformation constitutive relationship of non oriented electrical steel based on Arrhenius improved model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (4): 90-96, 102.
- [15] 周靖, 王宝雨, 徐伟力, 等. 耦合损伤的 22MnB5 热变形本构模型 [J]. 工程科学学报, 2013, 35 (11): 1450-1457.
Zhou J, Wang B Y, Xu W L, et al. A 22MnB5 thermal deformation constitutive model with coupled damage [J]. Chinese Journal of Engineering, 2013, 35 (11): 1450-1457.
- [16] 傅垒, 王宝雨, 林建国, 等. 耦合位错密度的 6111 铝合金热变形本构模型 [J]. 工程科学学报, 2013, 35 (10): 1333-1339.
Fu L, Wang B Y, Lin J G, et al. A constitutive model for 6111 aluminum alloy hot deformation coupled with dislocation density [J]. Chinese Journal of Engineering, 2013, 35 (10): 1333-1339.

(下转第 67 页)