



C630R 新型马氏体耐热转子钢的热变形行为研究

邱佳佳¹, 何西扣¹, 唐正焮¹, 霍 洁²

(1 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081;

2 中国一重天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

摘要:通过 Gleeble-3800 试验机, 开展了 C630R 转子钢在温度 1 000 ~ 1 200 °C、应变速率 0.01 ~ 1 s⁻¹ 条件下的热压缩试验, 研究了热变形行为及不同工艺参数对其显微组织的影响, 计算了 C630R 转子钢的本构方程, 并绘制了真应变为 0.8 时的热加工图。结果表明, C630R 转子钢的流变应力随变形温度升高和应变速率减小而降低; 随着变形温度升至 1 200 °C, 或者应变速率降至 0.01 s⁻¹, C630R 转子钢更倾向于产生动态再结晶。利用修正的流变应力曲线, 计算出 C630R 转子钢的热变形激活能 Q 为 530.155 kJ/mol, 本构方程为 $\dot{\epsilon} = 5.85 \times 10^{18} [\sinh(0.0114\sigma)]^{4.852} \exp(-530155/RT)$, 绘制了真应变为 0.8 时的热加工图。结合显微组织, C630R 转子钢在真应变 0.8 时合理的热加工工艺参数为变形温度 1 075 ~ 1 200 °C, 应变速率 0.01 ~ 0.11 s⁻¹。

关键词: C630R 转子钢; 变形温度; 应变速率; 本构方程; 热加工图

DOI: 10.20057/j.1003-8620.2023-00220 **中图分类号:** TG142

Research on the Thermal Deformation Behavior of C630R New Martensitic Heat-resistant Rotor Steel

Qiu Jiajia¹, He Xikou¹, Tang Zhengxin¹, Huo Jie²

(1 Research Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081, China;

2 Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., CFHI, Tianjin 300457, China)

Abstract: Thermal compression test of C630R rotor steel was carried out by Gleeble-3800 thermal simulation testing machine at temperature range of 1 000-1 200 °C and strain rate of 0.01-1 s⁻¹, the thermal deformation behavior and the influence of different process parameters on the microstructure were studied, the constitutive equation and hot processing map of the C630R rotor steel at true strain of 0.8 was constructed. The experimental results indicate that the true stress of the C630R rotor steel decreases with the enhancement of deformation temperatures to 1 200 °C and the reduction of true strain rate to 0.01 s⁻¹. When the deformation temperature is higher and the compression strain rate is lower, C630R rotor steel is preferred to produce dynamic recrystallization. Thermal deformation activation energy Q of the C630R rotor steel is calculated to be 530.155 kJ/mol by using the corrected flow stress curves, and the constitutive equation is $\dot{\epsilon} = 5.85 \times 10^{18} [\sinh(0.0114\sigma)]^{4.852} \exp(-530155/RT)$, the processing maps at true strain of 0.8 are plotted. The reasonable thermal processing parameters for C630R rotor steel under true strain of 0.8 is: deformation temperature of 1 075-1 200 °C, strain rate of 0.01-0.11 s⁻¹.

Key Words: C630R Rotor Steel; Deformation Temperatures; Strain Rate; Constitutive Equation; Hot Processing Map

9% ~ 12%Cr 马氏体耐热钢由于其优异的热稳定性、良好的蠕变强度和抗疲劳性在超超临界电站中得到广泛应用。随着节能减排的迫切要求, 发展大容量高参数超超临界电站成为先进清洁高效燃煤发电技术的主旋律, 新一代超超临界电站将在 630 °C 运行^[1-2]。C630R 转子钢(专利申请号: 2023106036010)是钢铁研究总院研发的新一代能满足 630 °C 超超临界电站汽轮机转子服役要求的耐热钢。其在 G115 钢和 COST FB2 钢的研究基础上,

通过优化元素配比, 采用 W 和 Mo 元素复合添加的思路, 有效抑制大量粗大 Laves 相的析出, 提高马氏体耐热钢的高温持久强度和韧性, 并改善大锻件成分偏析; 同时添加 B 元素, 提高晶界强化效果, 配合高 B、低 N 成分设计, 避免形成大尺寸夹杂物, 提高其韧性和疲劳性能。

在热加工过程中通过选择合理的热变形温度与应变速率可以调控材料的晶粒尺寸与显微组织, 进而改善材料性能。由于 C630R 转子钢合金体系

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3704100, 2021YFB3704101); 钢铁研究总院自主投入研发专项基金(事 21T62610B)

作者简介: 邱佳佳(1994—), 男, 博士; **E-mail:** qiujiatia1994@126.com; **收稿日期:** 2023-10-30

通信作者: 何西扣(1985—), 男, 博士, 正高级工程师; **E-mail:** he_xikou@163.com

复杂,且含对热加工行为影响较大的B元素,研究C630R转子钢的热变形行为,对于优化其热加工工艺,改善其组织特征和力学性能具有重要的参考价值。

通过开展热模拟压缩试验,研究了C630R转子钢的热变形行为及不同的变形工艺参数对其显微组织的影响,构建了C630R转子钢的本构方程与真应变为0.8时的热加工图,可为实际生产热变形工艺的设计提供指导。

1 实验材料及方法

选用的C630R转子钢为50 kg真空感应炉炼制后锻成的 $\phi 18$ mm圆棒,合金成分见表1。锻后原始组织如图1所示,为马氏体组织。沿圆棒纵向取样,制得 $\phi 8$ mm $\times 15$ mm的圆柱形样品,通过Gleeble-3800试验机开展变形温度为1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 $^{\circ}\text{C}$,应变速率为0.01、0.1、0.5、1 s^{-1} ,真应变 ε 为0.8的等温压缩试验,具体的热压缩工艺如图2所示。

为确保受热均匀,将试样升至1 200 $^{\circ}\text{C}$ 后先保温300 s,之后降至变形温度后再保温30 s,最后进行压缩变形,压缩结束后水冷保存变形组织。热压缩试样沿轴线对切,对试样进行原始奥氏体腐蚀试验,其具体流程为试样经研磨和机械抛光后,采用1 g KMnO_4 +2.5 mL H_2SO_4 +97.5 mL H_2O 的混合溶液,将试样腐蚀出晶界,通过光学显微镜分析热压缩过程中原奥氏体的再结晶行为。

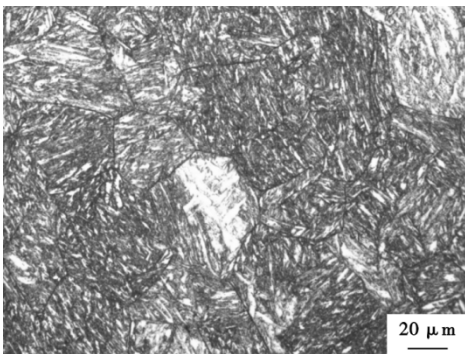


图1 锻态C630R转子钢的显微组织

Fig. 1 Microstructure of the forged C630R rotor steel

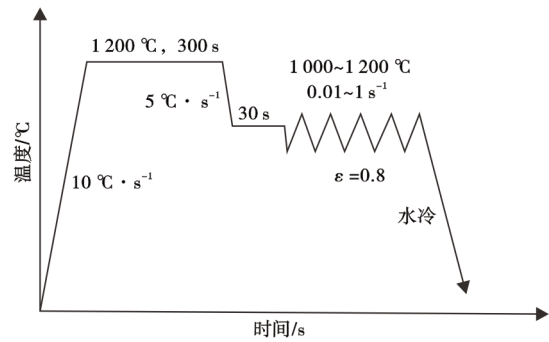


图2 C630R转子钢热压缩变形工艺示意图

Fig. 2 Schemidiagram of thermal compression deformation process of the C630R rotor steel

2 实验结果与分析

2.1 C630R转子钢热变形行为

在热压缩试验过程中,试样端面增大,试样末端与压头之间的摩擦损耗增加,试样产生不均匀塑性变形,使得流变应力升高,导致真应力-真应变曲线的尾端向上翘起^[3],因此,需要对试验获得的真应力-真应变曲线进行摩擦效应修正。通常用鼓肚系数 B 来表示摩擦效应的影响是否严重,根据 B 值大小确定是否对真应力-真应变曲线进行修正^[4]。 B 值可由式(1)求得。

$$B = \frac{hR_M^2}{h_0R_0^2} \quad (1)$$

式中, h 与 R_M 分别为原始试样经热压缩变形后的高度与“鼓肚”的最大半径,mm; h_0 与 R_0 分别表示未经压缩时的原始尺寸,mm。当 B 值 ≥ 1.1 时,表明摩擦效应产生的影响较大,需要修正真应力-真应变曲线。通过计算可知C630R转子钢的不同热变形工艺对应的 B 值均大于1.1,因此,对其真应力-真应变曲线均进行了修正,修正后的真应力由式(2)求得。

$$\sigma = \frac{\sigma_i c^2}{2(e^c - c - 1)} \quad (2)$$

式中, σ 与 σ_i 分别为经摩擦修正得到的真应力与原始真应力,MPa; c 为材料相关系数,计算过程可参考文献^[5]。

C630R转子钢原始的与摩擦修正的(图中实线)真应力-真应变曲线如图3所示,后续研究均基于摩

表1 C630R转子钢的合金成分构成(质量分数)

Table 1 The alloy composition of C630R rotor steel

项目	C	Mn	Cr	W	Mo	Co	V	Nb	N	B	Fe
标准范围	0.08 ~ 0.15	0.35 ~ 0.80	8.60 ~ 9.50	1.80 ~ 2.55	0.20 ~ 0.60	2.50 ~ 3.20	0.17 ~ 0.27	0.04 ~ 0.07	0.006 ~ 0.014	0.010 ~ 0.017	Bal.
实测成分	0.12	0.52	9.00	2.10	0.50	3.06	0.21	0.06	0.008	0.014	Bal.

擦修正后的真应力-真应变曲线。C630R 转子钢在变形初期,应力迅速线性增加,呈现出明显的加工硬化;随着变形的增加,在真应变到达 0.2 的过程中,位错滑移导致动态回复,动态软化作用抵偿掉部分加工硬化效果,使得应力增加的速度逐渐减缓。之后,部分曲线动态软化作用或与加工硬化达到平衡,如变形参数为 1 200 °C、0.5 s⁻¹ 的曲线所示;或大于加工硬化,应力增加至峰值应力后降低,最后保持平衡状态^[6-7],如变形参数为 1 100 °C、0.01 s⁻¹ 的曲线所示。图 3 中部分曲线出现了锯齿状波动,如变形参数为 1 050 °C、0.5 s⁻¹ 的曲线所示,这是由于动态软化作用与加工硬化效果交替发生引起的。表 2 为各热变形工艺参数对应的 C630R 转子钢的峰值应力,随着变形温度升至 1 200 °C 及应变速率降至 0.01 s⁻¹,对应峰值应力最低。变形温度升高至 1 200 °C 时可促进原子扩散,位错运动的驱动力也较大,加速了位错滑移的开动,促进了动态再结晶^[8];应变速率减小至 0.01 s⁻¹ 时,原子扩散的时间增加,位错滑移产生的动态回复增加。

2.2 热变形工艺对显微组织的影响

在应变速率为 0.1 s⁻¹ 时,不同热变形温度 C630R 转子钢的显微组织如图 4 所示。变形温度为 1 050 °C 时,C630R 转子钢呈现出典型的“项链状”组

表 2 各热变形工艺参数对应的 C630R 转子钢峰值应力/MPa

Table 2 The peak stress of C630R rotor steel corresponding to different deformation process parameter/MPa

变形温度/°C	应变速率/s ⁻¹			
	0.01	0.1	0.5	1
1 000	104.4	146.2	181.9	197.9
1 050	88.5	117.6	146.8	157.8
1 100	63.4	96.1	114.7	130.6
1 150	49.5	77.9	96.5	102.4
1 200	35.9	53.6	69.6	75.9

织特征,出现了部分再结晶,如图 4(a) 中箭头所指,但热变形提供的驱动力较低,限制了位错和晶界迁移,导致再结晶晶核长大较为困难,晶界处细小的再结晶晶粒未能充分长大^[9]。变形温度升高,热激活能增加,动态再结晶数量增多,变形温度升至 1 150 °C 时,再结晶晶粒尺寸细小,且较为均匀;当变形温度为 1 200 °C 时,晶粒长大的驱动力较大,晶粒长大显著,晶粒较为粗大。

在变形温度为 1 150 °C 时,不同应变速率对应的 C630R 转子钢显微组织如图 5 所示。当应变速率较小时,C630R 转子钢的动态再结晶较为完全,对热变形加工有益,但 0.01 s⁻¹ 应变速率下,有充足时间进行再结晶形核长大及晶界迁移,C630R 转子钢的

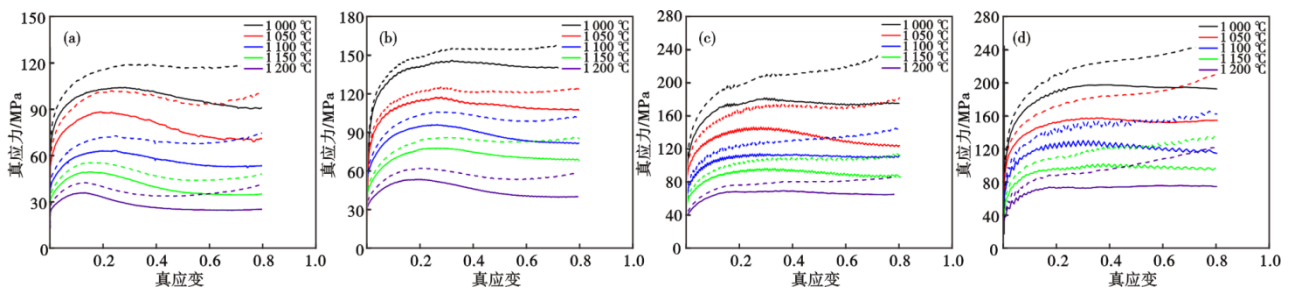


图 3 摩擦修正前后 C630R 转子钢的真应力-真应变曲线:(a)0.01 s⁻¹,(b)0.1 s⁻¹,(c)0.5 s⁻¹,(d)1.0 s⁻¹

Fig. 3 The original and friction-corrected true stress-true strain curves of C630R rotor steel: (a)0.01 s⁻¹, (b)0.1 s⁻¹, (c)0.5 s⁻¹, (d)1.0 s⁻¹

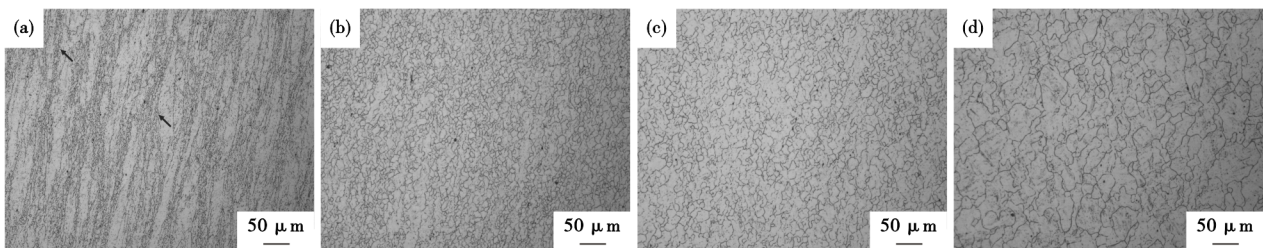


图 4 应变速率 0.1 s⁻¹ 时不同热变形温度对应的 C630R 转子钢显微组织:(a)1 050 °C,(b)1 100 °C,(c)1 150 °C,(d)1 200 °C

Fig. 4 The microstructures of C630R rotor steel corresponding to different hot deformation temperatures at strain rate of 0.1 s⁻¹: (a) 1 050 °C, (b)1 100 °C, (c)1 150 °C, (d)1 200 °C

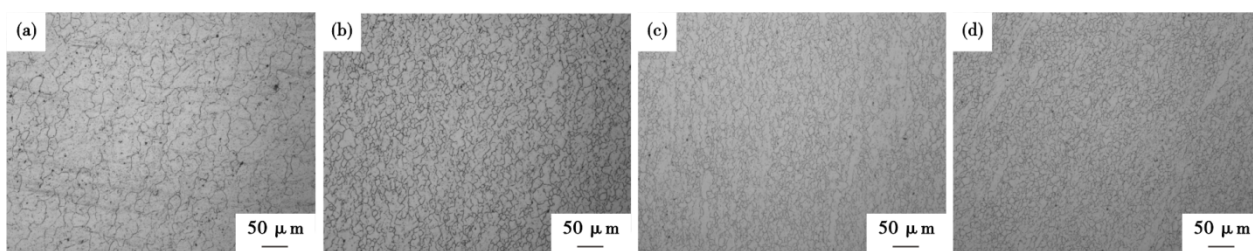


图5 变形温度为1150 °C时不同压缩应变速率对应的C630R转子钢显微组织:(a)0.01 s⁻¹, (b)0.1 s⁻¹, (c)0.5 s⁻¹, (d)1.0 s⁻¹
Fig. 5 The microstructure of C630R rotor steel corresponding to different strain rates at 1150 °C: (a)0.01 s⁻¹, (b)0.1 s⁻¹, (c)0.5 s⁻¹, (d)1.0 s⁻¹

再结晶晶粒长大较为显著。当应变速率较大,为0.5、1 s⁻¹时,形变储能较高,促进动态再结晶的发生,同时应变较快,再结晶形核长大的时间较短^[10-12],因此,C630R转子钢的晶粒尺寸较为细小,但动态再结晶尚未完全完成,少量残存的原始晶粒沿变形方向被明显拉长。可见在较高的变形温度(如>1100 °C)和较小的应变速率(如<0.5 s⁻¹)下进行热加工,C630R转子钢的晶粒尺寸较为均匀。

2.3 C630R转子钢本构方程的构建

流变应力、应变速率和变形温度的本构关系如式(3)~(5)^[13]。

$$\dot{\varepsilon} = A [\sin(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \text{所有应力} \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A' \sigma^{n'} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \alpha\sigma < 0.8 \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = A'' \exp(\beta\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \alpha\sigma > 1.2 \quad (5)$$

式中, $\dot{\varepsilon}$ 表示热变形时的应变速率,s⁻¹; σ 为热变形时的流变应力,MPa; Q 为激活能,kJ/mol; R 为气体常数,8.314 J/(mol·K); T 为热变形时的绝对温度,K; $A, A', A'', n, n', \alpha$ 和 β 为材料相关常数。

通常情况下, Z 参数可表示应变速率与变形温度的相互作用,如式(6)^[14]。

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (6)$$

对应变为0.8时C630R转子钢的本构关系进行构建,线性拟合过程如图6所示,计算过程可参考文献[6],求得各材料常数分别为 $n' = 6.741, \beta = 0.077, \alpha = \beta/n' = 0.0114, n = 4.852, Q = 530.155$ kJ/mol, $A = 5.85 \times 10^{18}$ 。C630R转子钢的热变形激活能略高于620 °C耐热转子钢FB2(Q 为449.56 kJ/mol),主要由于MX相溶解温度较高,在热变形过程中,弥散分布MX相在奥氏体区未能完全溶解,阻碍了位错运动,使得C630R转子钢的热变形激活能较高。将各参数代入式(3),获得C630R转子钢的本构方程

如式(7)。

$$\dot{\varepsilon} = 5.85 \times 10^{18} [\sinh(0.0114\sigma)]^{4.852} \cdot \exp\left(-\frac{530.155}{RT}\right) \quad (7)$$

2.4 C630R转子钢热加工图绘制

通过功率耗散图和流变失稳图构建C630R转子钢在真应变为0.8时的热加工图^[15],通过热加工图,可以判断不同变形工艺下C630R转子钢热加工性能的优劣,对于优化其热加工工艺和改善显微组织特征具有重要的意义。

功率耗散图表示功率耗散因子的变化,功率耗散因子如式(8)^[16]。

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (8)$$

式中, η 为功率耗散因子; J 与 J_{\max} 分别为能量耗散量及其最大值; m 为应变速率敏感性因子, $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\varepsilon}$ 。

通过流变失稳判据,可获得流变失稳图,流变失稳判据如式(9)^[17]。

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m \quad (9)$$

式中, $\xi(\dot{\varepsilon})$ 为流变失稳判据,当 $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$ 时,材料易失稳。

真应变为0.8时C630R转子钢的热加工图如图7所示。图中阴影部分代表可能发生失稳的区域。从图中可以看出,在失稳区,功率耗散因子很低,大部分区间低于22%。在变形过程中,大部分能量用在材料形状的变化上,使得局部变形量过大,从而可能导致失稳。在试验温度和应变速率内,C630R转子钢在变形温度从1075至1200 °C,应变速率为0.01~0.11 s⁻¹,功率耗散因子较高,大于26%,且材料动态再结晶较为明显。因此,C630R转子钢的最佳加工工艺参数为:1075~1200 °C,0.01~0.11 s⁻¹。C630R转子钢的最佳加工工艺参数与其他耐热转子

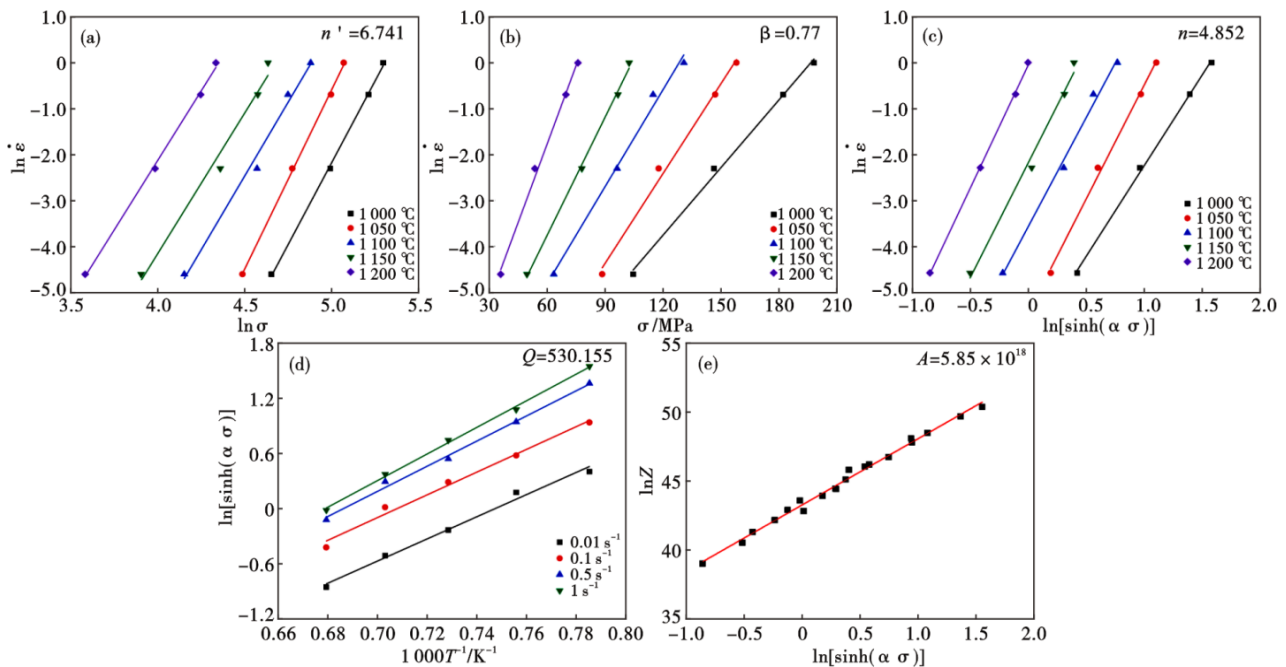


图 6 C630R 转子钢本构方程相关参数的函数关系: (a) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$, (b) $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$, (c) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$, (d) $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000T^{-1}$, (e) $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$

Fig. 6 The functional relationship among the relevant parameters of the constitutive equation of C630R rotor steel: (a) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$, (b) $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$, (c) $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$, (d) $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000T^{-1}$, (e) $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha \sigma)]$

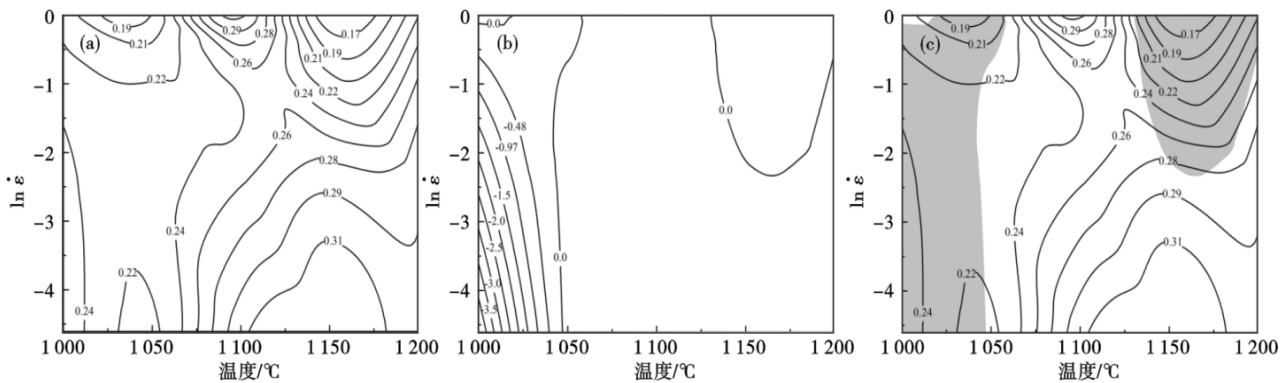


图 7 C630R 转子钢在真应变为 0.8 时热加工图的构建: (a) 功率耗散图, (b) 流变失稳图, (c) 热加工图

Fig. 7 Construction of hot processing map of C630R rotor steel at true strain of 0.8: (a) power dissipation map, (b) flow instability map, (c) hot processing map

钢较为接近, 可见 B 元素在低应变速率下对耐热钢热加工性能影响较小。

3 结论

(1) 随着变形温度升至 1 200 °C 及应变速率降至 0.01 s⁻¹, C630R 转子钢的流变应力呈现减小的趋势, 更倾向于发生动态再结晶。

(2) 通过摩擦修正后的应力应变曲线, 构建了 C630R 转子钢的本构方程, 热变形激活能 Q 的值为

530.155 kJ/mol, 其本构方程可表示为:

$$\dot{\varepsilon} = 5.85 \times 10^{18} [\sinh(0.0114\sigma)]^{4.852} \cdot \exp\left(-\frac{530155}{RT}\right)$$

(3) 利用摩擦修正后的应力应变曲线获得了 C630R 转子钢的热加工图, 结合不同变形工艺下显微组织特征, 确定了 C630R 转子钢的最佳热加工工艺参数为: 变形温度 1 075 ~ 1 200 °C, 应变速率 0.01 ~ 0.11 s⁻¹。

参考文献

- [1] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700℃超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539-548.
- [2] 李其, 陈正宗, 蒋新亮, 等. 9%~12%Cr高中压转子材料发展历程与工程化关键技术[J]. 钢铁, 2021, 56(2): 40-49.
- [3] 仇琍丽, 高文理, 陆政, 等. 7A85铝合金的热压缩流变行为与显微组织[J]. 材料工程, 2016, 44(1): 33-39.
- [4] Roebuck B, Lord J D, Brooks M, et al. Measurement of flow stress in hot axisymmetric compression tests[J]. Materials at High Temperatures, 2006, 23(2): 59-83.
- [5] 尚丽梅, 王春旭, 韩顺, 等. 基于摩擦-温度双修正的Maraging250钢热变形行为及热加工图[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 111-117.
- [6] 柯雨蛟, 陈国文, 沈国劬, 等. COST FB2钢热变形行为及热加工图[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(7): 92-101.
- [7] Sandström R, Lagneborg R. A model for hot working occurring by recrystallization[J]. Acta Metallurgica, 1975, 23(3): 387-398.
- [8] Lin Y C, Wu X Y, Chen X M, et al. EBSD study of a hot deformed nickel-based superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 640: 101-113.
- [9] 谢一夔, 王启丞, 陈子坤, 等. 18CrNiMo7-6齿轮钢的热变形行为及组织演变规律[J]. 金属热处理, 2023, 48(2): 103-109.
- [10] 曹金荣, 刘正东, 程世长, 等. 应变速率和变形温度对T122耐热钢流变应力和临界动态再结晶行为的影响[J]. 金属学报, 2007, 43(1): 35-40.
- [11] 杜丽萍, 龚志华, 赵吉庆, 等. 9Cr3 W3Co叶片钢的热变形行为研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(5): 90-96.
- [12] 付建辉. HGH3126镍基合金热变形行为及组织演变[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 1-5.
- [13] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136-1138.
- [14] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22-32.
- [15] 黄有林, 王建波, 凌学士, 等. 热加工图理论的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(S3): 173-176.
- [16] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242 [J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15(10): 1883-1892.
- [17] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Modelling of hot deformation for microstructural control [J]. International Materials Reviews, 1998, 43(6): 243-258.

“讲文明树新风”公益广告

绿色环保
人人有责