

离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的热变形行为及热加工图

裴蒙蒙¹ 齐会萍¹ 秦芳诚² 李永堂¹
(1.太原科技大学材料科学与工程学院; 2.桂林理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 以离心铸造 40Cr/Q345B 双金属为研究对象,基于 Gleeble-3500 热模拟试验机,在变形温度为 1 223~1 473 K,应变速率为 0.005~1 s⁻¹,变形量为 60% 条件下,进行恒温压缩试验,对含 40Cr/Q345B 双金属结合层的金属热变形行为进行研究,建立了本构方程及热加工图。结果表明,离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的流变应力随着温度的上升和应变速率的降低而减小,热变形激活能为 241.589 kJ·mol⁻¹。基于热加工图及微观组织,确定了热加工工艺参数范围:变形温度为 1 293~1 373 K、应变速率为 0.5~1 s⁻¹。

关键词 离心铸造;双金属;热变形;热加工图

中图分类号 TG142.7;TG249.4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.022 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Hot Deformation Behavior and Processing Maps of 40Cr/Q345B Bimetallic Bonding Layer by Centrifugal Casting

Pei Mengmeng¹, Qi Huiping¹, Qin Fangcheng², Li Yongtang¹
(1.School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology;
2.College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology)

Abstract: The thermostatic compression experiment of centrifugal casting 40Cr/Q345B bimetal was conducted under deformation temperature of 1 223~1 473 K, strain rate of 0.005~1 s⁻¹, and deformation rate of 60% based on Gleeble-3500 thermal simulation testing machine. The thermal deformation behavior of 40Cr/Q345B bimetal bonding layer by centrifugal casting was investigated and the thermal processing diagram was established. The results indicate that the rheological stress of 40Cr/Q345B bimetal is decreased with the increase of temperature and the decrease of strain rate, and the thermal deformation activation energy is 241.589 kJ·mol⁻¹. Based on the hot working map and microstructure, the parameters of hot working were determined as follows: deformation temperature of 1 293~1 373 K, strain rate of 0.5~1 s⁻¹.

Key Words: Centrifugal Casting, Bimetallic, Hot Deformation, Hot Processing Maps

随着深空探索、风核电、新能源等制造业的快速发展,对环形构件的性能要求越来越高。尤其是在内外层性能要求差异较大的应用场合,单金属环件在性能上越来越难以满足实际使用性能的要求。双金属环形构件可兼具两种金属材料的优点,减少贵金属用量,降低成本,最大限度地实现材料的优势互补,提高零件的使用性能、使用寿命和可靠性,故双金属环件的应用越来越广泛,需求量越来越大。现有的大型双金属环件制造方法,一种是将两种单金属环件组合装配成双金属环件,另一种是两种金属环坯套在一起进行轧制。这两种方

法生产均费时费力,而且结合层不可靠,给大型双金属环件的使用带来隐患,难以满足日益增加的大型双金属环件的需求。近年来,提出了一种双金属复合环件短流程制造工艺,其包括金属冶炼-铸造双金属环坯-加热-热辗扩-机加工-热处理,利用离心铸造双金属环坯直接热辗扩成形大型双金属环形类构件,可为大型双金属环形类构件(直径 1 m 以上)提供一种节能高效的生产方法。

通过离心铸造将两种金属冶金结合在一起,再热辗扩成形大型环类构件。在热辗扩过程中,主要是通过芯

收稿日期:2021-02-20;修改稿收到日期:2021-03-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875383,51575371)
第一作者简介:裴蒙蒙,男,1994 年出生,硕士研究生,太原(030024),E-mail:1195257720@qq.com
通信作者:齐会萍,女,1974 年出生,教授,太原(030024),E-mail:qhp9974@tyust.edu.cn
引用格式:裴蒙蒙,齐会萍,秦芳诚,等. 离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的热变形行为及热加工图[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 031-1 036.
PEI M M, QI H P, QIN F C, et al. Hot deformation behavior and processing maps of 40Cr/Q345B bimetallic bonding layerby centrifugal casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 031-1 036.

辊、驱动辊对环坯的施压,使得环形构件壁厚变薄,直径扩大。同时,成形的环形构件尺寸精度高,微观组织及力学性能都得到明显改善。然而,在离心铸造双金属铸辗复合成形工艺中,环形类构件截面形状的改变和微观组织的转变主要集中在热辗扩过程中,要分析铸态组织(特别是双金属结合层金属铸态组织)在热辗扩过程中的破碎细化机理和规律,确定内、外及双金属结合层金属铸态组织转变为锻态组织的热力学条件。因此研究离心铸造双金属铸坯的热变形行为,尤其是双金属结合层的热变形,对揭示关键性工艺参数对微观组织演变的影响机理十分重要,有助于实现对双金属复合环形构件短流程控形控性一体化制造。近年来,国内外关于环件在热辗扩过程中微观组织的研究较多。ZHU S 等^[1]基于 ABAQUS 软件模拟研究了变形量和辗扩温度对合金环件热辗扩过程中组织演变的影响,得出了变形量为 25%~35%、辗扩温度为 1 203~1 213 K 时,初生 α 相与晶粒尺寸分布比较均匀。KIL T D 等^[2]基于热变形加工图对 SAF2205 双相不锈钢环件热辗扩过程微观组织演变进行了定量研究,提出了一个描述单位变形体面积分数的定量成形性指标,确定了不同温度下辗扩时的最佳毛坯尺寸。YEOM J T 等^[3]基于有限元模拟,再结合试验研究了 TC4 钛合金的热辗扩工艺,分别观察了模拟和试验得到的环件截面的微观组织,识别出环件辗扩成形过程中出现的裂纹等缺陷,确定了最佳工艺参数。金蕾等^[4]研究了 C-Mn 钢热力学变形行为及其所引起的动态回复与动态再结晶的规律,并建立了一整套 C-Mn 钢流动应力模型。QIN F C 等^[5,6]、秦芳诚等^[7~9]、武永红等^[10]对铸态 42CrMo、Q235 钢的热变形行为及动态、静态、亚动态再结晶规律进行系统的研究,获得了铸态钢的本构关系模型以及再结晶模型,分析了各变形参数对环形铸坯热辗扩工艺的影响,并得出了铸坯的最佳辗扩工艺参数。宋亚虎等^[11]研究了双尺度 SiC_p/A356 复合材料的热变形行为,同时构建了基于应变补偿的本构模型和基于 BP 神经网络的本构关系模型。本课题基于 Gleeble-3500 高温压缩试验模拟环坯的热辗扩过程,得出了离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结

合层不同温度、不同速率的真应力-应变曲线,构建出双金属本构模型及热加工图,为其应用提供参考。

1 试验材料及方法

通过离心铸造制备外层金属为 40Cr、内层金属为 Q345B 的双金属环坯,其尺寸见表 1。铸造后切割成长为 150 mm 的环坯,图 1 为铸造后切割环坯及取样位置。经检验结合层实现了良好的冶金结合,无明显孔洞和裂缝。图 2 为结合层附近的原始组织。其化学成分见表 2。先沿环坯径向取矩形截面的试样,通过研磨抛光,采用体积分数为 4% 的硝酸酒精腐蚀。然后根据高温热压缩试验要求,将材料加工成 $\phi 10\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 的试样(双金属结合层在圆柱试样的中间位置,见图 1b),在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行恒温压缩。将试样以 5 $^{\circ}\text{C/s}$ 的速度加热至变形温度(1 223、1 323、1 423、1 473 K),保温 5 min,然后在设定的应变速率下等温压缩。采用的应变速率分别为 0.005、0.05、0.5、1 s^{-1} ,变形量为 60%。试样压缩完后,立即进行水冷以保留原奥氏体晶界。

表 1 双金属离心铸造环坯的尺寸
Tab.1 Geometrical dimensions of centrifugal casting bimetallic ring blank

外径/mm	内径/mm	长/mm	壁厚/mm
360	200	3450	80(内外层各 40)

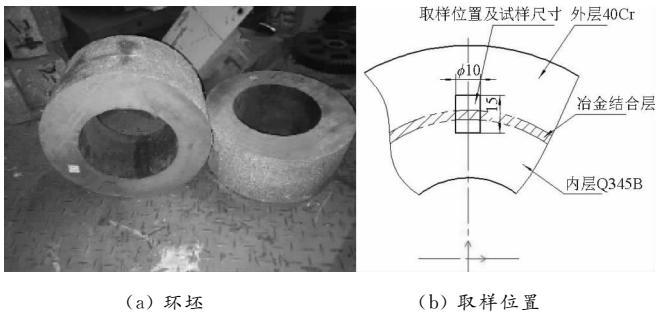


图 1 原始环坯和取样位置

Fig.1 Original bimetallic ring blank and sampling position

将试样沿轴向切开,经镶嵌研磨抛光后,用饱和苦味酸(含少量海鸥牌洗发膏)腐蚀出晶界,见图 3。可以

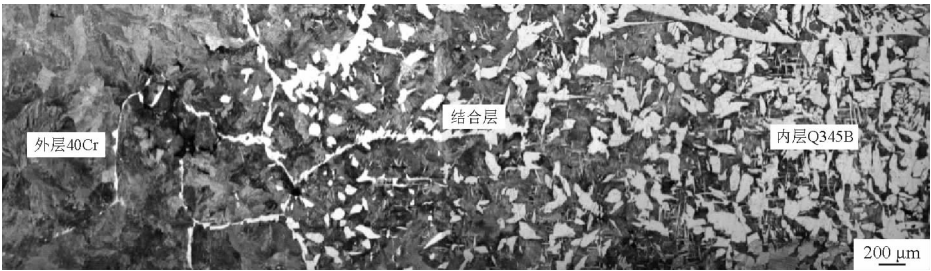


图 2 40Cr/Q345B 离心铸造双金属的原始组织

Fig.2 Original microstructure of 40Cr/Q345B bimetallic ring blank by centrifugal casting

表 2 40Cr/Q345B 双金属离心铸造的化学成分
Tab.2 Chemical composition of 40Cr/Q345B bimetallic ring

材料	blank by centrifugal casting									%
	C	Cr	Mn	Si	P	S	Ni	Cu	Fe	
40Cr	0.445 7	1.091 2	0.595 1	0.300 8	0.010 1	0.004 8	< 0.3	≤ 0.030	余量	
Q345B	0.168 4	0.298 5	1.609 1	0.461 7	0.013 2	0.007 2	≤ 0.5	≤ 0.030	余量	

看出,外层金属 40Cr 更容易腐蚀,与内层金属 Q345B 有很明显的界面结合层,且压缩后结合层在试样的中间位置。

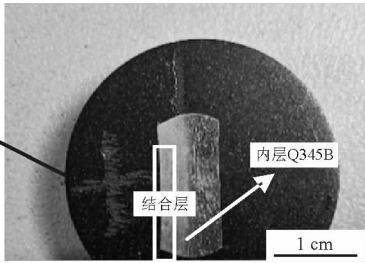
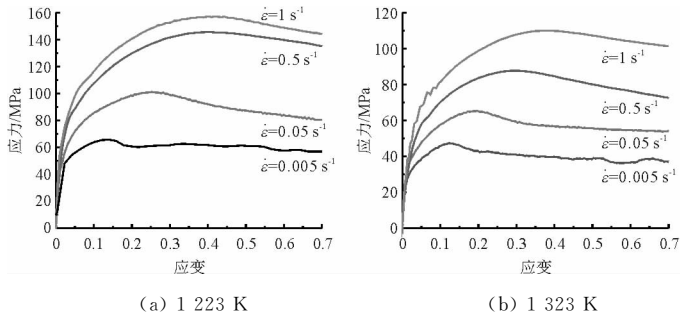


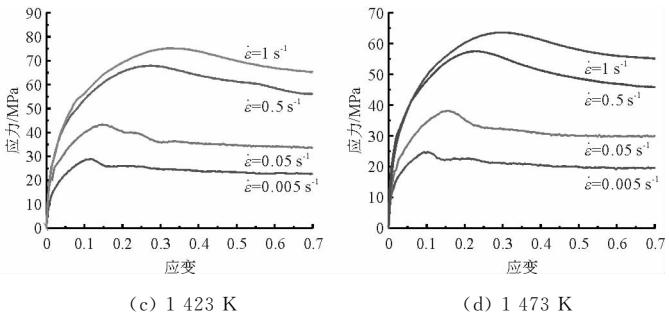
图 3 压缩后的结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the compressed structure



(a) 1 223 K

(b) 1 323 K



(c) 1 423 K

(d) 1 473 K

图 4 40Cr/Q345B 离心铸造双金属真应力-真应变曲线

Fig.4 True stress-strain curve of 40Cr/Q345B bimetal by centrifugal casting

和应变速率的影响。当应变速率一定时,随着变形温度升高,热激活过程加快,出现更多的滑移系,动态软化速率加快,导致峰值应力和稳态应力降低;当变形温度一定时,随着应变速率升高,不利于动态回复与再结晶的发生,硬化效果较为显著,故峰值应力和稳态应力也升高^[12]。

2.2 本构模型

热变形本构模型可表征材料的流变行为与热加工工艺参数之间的关系。40Cr/Q345B 离心铸造双金属的高温压缩是热激活过程,在热加工时,材料的流变应力与应变速率、应变温度之间的关系采用 Arrhenius 型动力学方程进行描述:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot F(\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为峰值应力或稳定流变应力, MPa; Q 为热变形激活能, $kJ \cdot mol^{-1}$; T 为变形温度, K; R 为摩尔气体常数, $8.314 \, 4 \, J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; A

2 试验结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

图 4 为通过压缩试验获得的离心铸造 40Cr/Q345B 双金属在不同变形温度和不同的应变速率下的真应力-真应变曲线。可以看出,随着应变增加,应力曲线迅速上升并达到峰值,然后缓慢降低最后趋于稳态流变特征,由于结合层金属在真应变为 0.7 时达到稳态应力,故真应力-真应变曲线横坐标取 0.7,这是因为材料在塑性变形的过程中,加工硬化、动态回复和动态再结晶软化等行为同时发生,并且决定着真应力-真应变曲线的变化趋势^[8]。开始变形时,晶粒发生滑移,造成位错增殖,位错间相互作用引起的加工硬化程度大于软化,使得加工硬化显著,故流变应力迅速增加。随着压缩进行,材料的动态软化明显增强,软化作用显著提高,使得流变应力达到峰值后逐渐减低,当加工硬化与动态软化达到动态平衡状态,这时应力基本保持不变,变形达到稳态。同时也可以看出,材料流变应力受变形温度

为材料相关系数。

应力函数 $F(\sigma)$ 有几种形式:

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma^{n_1} & (\alpha\sigma < 0.8) \\ \exp(\beta\sigma) & (\alpha\sigma > 1.2) \\ [\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2} & (\text{通用}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ 为应力, MPa; α 、 n_1 、 n_2 、 β 均为与材料相关的常数,且满足 $\alpha = \beta/n_1$ 。将应力函数 $F(\sigma)$ 代入式(1)得到相对应力水平下应变速率与流变应力的关系,并分别对两边去对数可得:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (\alpha\sigma < 0.8) \quad (3)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta\sigma - Q/(RT) \quad (\alpha\sigma > 1.2) \quad (4)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_3 + n_2 \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (\text{通用}) \quad (5)$$

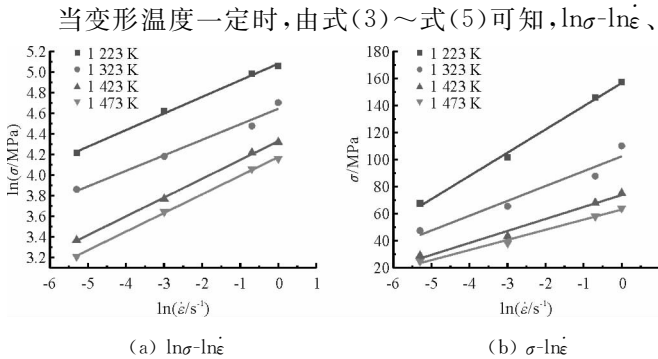
式中, A_1 、 A_2 、 A_3 均为常数。

在本构关系模型中,式(1)中的 σ 可以取峰值应力 σ_p 或稳定流变应力 σ_{ss} ,由于 σ_p 直接在试验数据中提取,

故采用 σ_p 对本构关系进行计算。

表 3 不同变形参数下的峰值应力

Tab.3 Peak stress under different deformation parameters MPa				
应变速率	变形温度 T/K			
$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	1 223	1 323	1 423	1 473
0.005	67.54	47.42	29	24.76
0.05	101.42	65.41	43.35	38.17
0.5	145.69	87.76	67.98	57.95
1	157.29	110.13	75.16	63.99



$\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$ 呈线性关系,且 $n_1=\partial\ln\dot{\epsilon}/\partial\ln\sigma$, $\beta=\partial\ln\dot{\epsilon}/\partial\sigma$, $n_2=\partial\ln\dot{\epsilon}/\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$, $b_T=\ln A_3-Q/(RT)$ 。

基于离心铸造 40Cr/Q345B 双金属的峰值应力和相应的应变速率分别绘制 $\ln\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\sigma-\ln\dot{\epsilon}$ 、 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln\dot{\epsilon}$ 散点图进行线性拟合(见图 5a~图 5c),并对每组直线的斜率取平均值,得 $n_1=5.932\ 96$, $\beta=0.089\ 94$,故 $\alpha=\beta/n_1=0.015\ 16$, $n_2=4.337\ 8$ 。

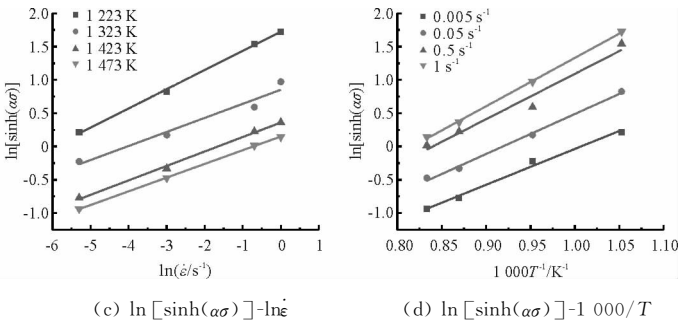


图 5 峰值应力与应变速率、变形温度的关系曲线

Fig.5 Relationship curve of peak stress and strain rate or deformation temperature

当变形速率一定时,由式(5)知 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1\ 000/T$ 也呈线性关系,再将表中的峰值应力、应变温度代入式(5)中绘制点图并进行线性回归拟合(见图 5d),取斜率的平均值 $K=Q/(n_2R)=7.698\ 84$,故可计算得 $Q=241.589\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

应变速率和变形温度对高温流变行为的影响可用指数方程表示为:

$$Z=\dot{\epsilon}\exp[Q/(RT)]=A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{6}$$

律。 Z 参数值随应变速率的增大而增大,随变形温度的增大而减小。

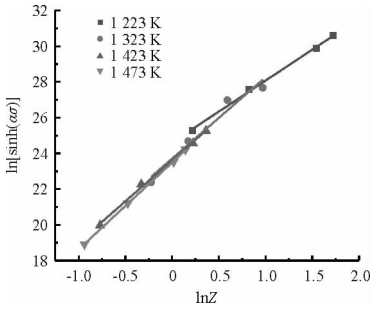


图 6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln Z$ 曲线
Fig.6 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln Z$ curve

对式(6)两边取对数,得到:

$$\ln Z=\ln A+n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{7}$$

将不同热变形工艺参数条件下的 $\ln Z$ 值(见表 4)和峰值流变应力进行线性拟合(见图 6)。显然, $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\ln Z$ 曲线呈线性关系,且曲线斜率为应力指数 n 。

基于高温热压缩模拟试验数据,使用应力函数的不同形式,通过线性回归的方法得出了材料的相关系数。根据数学上双曲正弦函数的定义,可得 Arrhenius 型本构方程流变应力的表达式:

$$\sigma=\frac{1}{\alpha}\ln\left\{\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{1}{n}}+\left[\left(\frac{Z}{A}\right)^{\frac{2}{n}}+1\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{8}$$

表 4 不同热变形工艺参数条件下的 $\ln Z$ 值

Tab.4 Values of $\ln Z$ under different thermal deformation process parameters				
应变速率	变形温度/ K			
$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	1 223	1 323	1 423	1 473
0.005	25.29	22.37	19.97	18.92
0.05	27.59	24.68	22.27	21.22
0.5	29.89	26.98	24.57	23.52
1	30.59	27.67	25.27	24.21

由式(6)、式(7)可知,只要已知 n 、 A 、 α 和 Q 等材料相关常数,即可得 40Cr/Q345B 双金属离心铸造环坯在辗扩过程中变形温度、变形速率与流变应力的关系,从而为合理制定环坯热辗扩工艺提供参考。

综上所述,40Cr/Q345B 双金属离心铸造环坯的热塑性本构关系模型:

$$\dot{\epsilon}=3.847\ 2\times 10^{11}\sinh(0.015\ 16\sigma)^{5.932\ 96}\cdot\exp\left[\frac{-241\ 589}{8.314\ 4T}\right] \tag{9}$$

由图 6 的拟合曲线关系可知,可得 $n=4.368$ 。截距的平均值: $\ln A=26.675\ 8$,即 $A=3.847\ 2\times 10^{11}$ 。此时线性拟合得出的 n 、 A 值比前面拟合得出的 n 、 A 值更为准确,二者相对误差为 0.778%,表明材料在高温热变形过程中可以用 Z 参数来描述流变应力的变化规

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{-241\,589}{8.314\,4T}\right) = 3.847\,2 \times 10^{11} [\sinh(0.015\,16\sigma)]^{5.939\,26} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{1}{0.015\,16}$$

$$\ln\left\{\left(\frac{Z}{3.847\,2 \times 10^{11}}\right)^{\frac{1}{5.932\,96}} + \left[\left(\frac{Z}{3.847\,2 \times 10^{11}}\right)^{\frac{2}{5.932\,96}} + 1\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (11)$$

2.3 构建热加工图

热加工图能更有效地揭示材料在热加工过程中在不同变形温度、变形量、应变速率下微观组织的演变,便于评估材料的可加工性。同时热加工图可直观反映出材料热成形工艺的“安全工艺区”和“不安全工艺区”,为实际生产优化工艺参数。采用 Prasad 等基于大塑性变形连续介质力学、物理系统和不可逆力学理论提出的动态材料力学模型,环形构件热辗扩过程相当于一个能量耗散系统。单位时间、单位体积材料所耗散的总能量 P 主要包括因材料塑性变形消耗的耗散量 G 和因微观机制变化消耗的耗散协量 J ,这两部分能量所占比例由应变速率敏感指数 m 决定。

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (12)$$

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} = \frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial(\ln \dot{\epsilon})} \quad (13)$$

热加工图是由功率耗散图和失稳图叠加而成。功率耗散图是任一应变条件下,功率耗散因子 η 与应变速率、应变温度的等高线图,无量纲参数 η 反映了材料热变形金属微观机制变化消耗的能量与总耗散能量的比例关系^[8]。

$$\eta = 2\left(\frac{P - G}{P}\right) = \frac{2m}{m + 1} \quad (14)$$

失稳图是任一应变条件下,失稳参数 ξ 与应变速率、应变温度的等高线图,通过无量纲参数 ξ 判断材料塑性流变是否失稳,当 $\xi < 0$ 时,即材料变形“不安全工艺区”。

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m + 1)]}{\partial \ln(\dot{\epsilon})} + m < 0 \quad (15)$$

通过分别计算 $\epsilon = 0.4$ 、 $\epsilon = 0.6$ 、 $\epsilon = 0.8$ 对应的 η 、 ξ 值,绘制出与应变温度、应变速率的二维平面等高线图,叠加可得热加工图,见图 7。

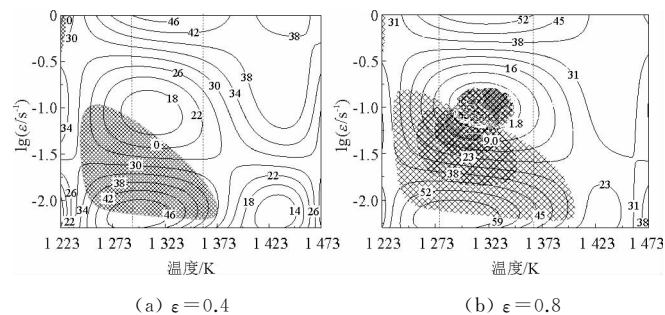


图 7 不同应变变量下的热加工图

Fig.7 Heat working map under different stress variables

从图 7 可以看出,离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的失稳区域主要集中在应变速率为 $0.005 \sim 0.05 \text{ s}^{-1}$ 、应变温度为 $1\,248 \sim 1\,398 \text{ K}$ 范围及 $0.5 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、 $1\,223 \text{ K}$ 内。一般来说,功耗效率值越大的区域,越有利于材料的成形加工,所对应的变形参数能使得材料再结晶比较完全,易获得大小均匀、综合性能优异的组织。从热加工图可以看出,安全区有两个最大功耗效率区域,第一是变形温度为 $1\,293 \sim 1\,353 \text{ K}$ 、应变速率为 $0.7 \sim 1 \text{ s}^{-1}$,在 $1\,323 \text{ K}$ 、 0.7 s^{-1} 处达到峰值功耗效率 46%;第二是变形温度为 $1\,281 \sim 1\,363 \text{ K}$ 、应变速率为 $0.5 \sim 1 \text{ s}^{-1}$,在 $1\,323 \text{ K}$ 、 0.5 s^{-1} 处达到峰值功耗效率为 52%;同时考虑到金属环坯辗扩时温度随着热辗扩的进行不断降低及变形参数对材料软化变形的影响,使得再结晶完全,获得细小均匀性能优异的组织。故选择变形温度为 $1\,293 \sim 1\,373 \text{ K}$ 、应变速率为 $0.5 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 和应变量为 0.8 作为离心铸造 40Cr/Q345B 双金属热辗扩时的最佳参数范围。

图 8 是安全区和失稳区的组织及绝热剪切带的 SEM 组织。从图 8a 看出,内层、结合层、外层的晶粒均匀,双金属结合层动态再结晶晶粒有互相吞噬长大的迹

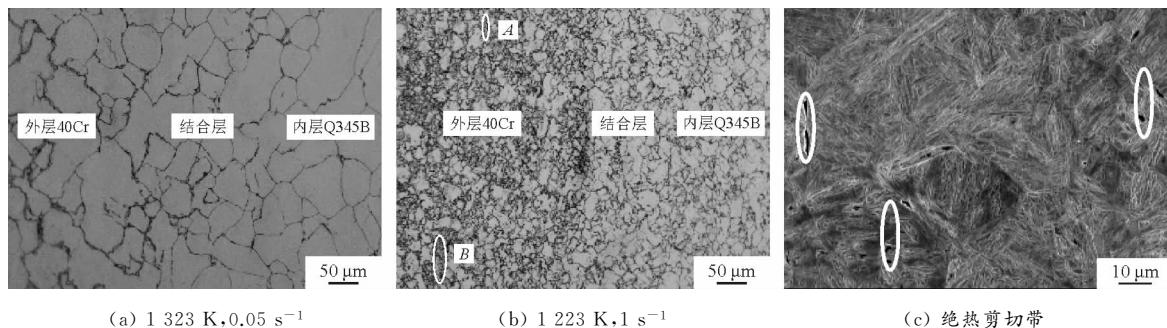


图 8 不同区域的微观组织及绝热剪切带 SEM 组织

Fig.8 Microstructures and SEM images of adiabatic shear band in different regions

象,这是由于此时的温度较高,位错活动能力强,晶粒的长大驱动力较大,故有利于动态再结晶的发生,使得材料能够获得优异的组织与性能。从图 8b 可以看出,晶界锯齿化,有大量细小等轴状晶粒出现,但动态再结晶小晶粒与形变大晶粒共存的组织不均匀现象明显,且 A 处发生了局部塑性变形,大晶粒周围出现直线状小晶粒,有些晶粒被严重碎化;B 处产生了绝热剪切带,主要是因为材料热导率、比热容较低,又加上塑性变形产生的热量没来得及向其他地方耗散,造成内部失稳,最终导致局部塑变,严重时可发生失稳开裂。从图 8c 很明显看出,合金中裂纹产生。故离心铸造 40Cr/Q345B 双金属在进行热辗扩时,需要选择合理的工艺参数^[13~15]。

3 结 论

(1)离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的真应变-应变曲线综合了加工硬化、动态再结晶、动态回复。首先流变应力随着应变的增大迅速增大至峰值应力,然后随着应变的增大缓慢降低直至区域稳态。

(2)离心铸造 40Cr/Q345B 双金属结合层的峰值应力随温度的降低和应变速率的升高而增大;基于峰值应力构建了本构模型,热变形激活能为 $241.589 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

(3)基于热加工图,确定变形温度为 $1\,293 \sim 1\,373 \text{ K}$ 、应变速率为 $0.5 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 是离心铸造 40Cr/Q345B 双金属热辗扩时的最佳参数范围。

参 考 文 献

[1] ZHU S, YANG H, GUO L G, et al. Investigation of deformation degree and initial forming temperature dependences of microstructure in hot ring rolling of TA15 titanium alloy by multi-scale simulations[J]. Computational Materials Science, 2012, 65: 221-229.

[2] KIL T D, LEE J M, MOON Y H. Formability estimation of ring rolling process by using deformation processing map[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 30(6): 220-226.

[3] YEOM J T, KIM J H, PARK N K, et al. Ring-rolling design for a large-scale ring product of Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187-188: 747-751.

[4] 金蕾,徐有容.C-Mn 钢热变形行为及流变应力模型的研究[J].上海大学学报(自然科学版),1999,5(2): 123-127.

[5] QIN F C, LI Y T, QI H P, et al. Microstructure-texture-mechanical properties in hot rolling of a centrifugal casting ring blank[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2016, 25(3): 1 237-1 248.

[6] QIN F C, LI Y T, QI H P, et al. Advances in compact manufacturing for shape and performance controllability of large-scale components-A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(1): 7-21.

[7] 秦芳诚. 环件铸辗复合成形中 Q235B 钢热变形及组织演变研究[D]. 太原:太原科技大学, 2014.

[8] 秦芳诚,齐会萍,李永堂,等.离心铸造 Q235B 钢环件热辗扩过程中的组织演变[J].材料导报, 2020(12): 12 132-12 138.

[9] 秦芳诚,齐会萍,李永堂,等.铸态 Al-Zn-Mg-Cu 铝合金多道次压缩变形行为及组织演变[J].塑性工程学报, 2020, 27(2): 79-86.

[10] 武永红,李永堂,齐会萍.42CrMo 铸造环坯高温拉伸性能[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(12): 1 288-1 291.

[11] 宋亚虎,王爱琴,王震,等.双尺度 $\text{SiC}_p/\text{A356}$ 复合材料的热变形行为及本构模型[J].材料热处理学报, 2020, 41(12): 135-145.

[12] 胡强,闫亮明,杜青春,等.压铸 A356 铝合金的热变形行为[J].特种铸造及有色合金, 2020, 40(10): 1 099-1 103.

[13] 钱东升,姚瑶,郭俊.GCr15 铸环热辗扩孔洞形状演变预测模型研究[J].塑性工程学报, 2017, 24(1): 168-173.

[14] 钱东升,曾旭东,华林,等.304 不锈钢大型环件细晶轧制实验[J].塑性工程学报, 2012, 19(2): 60-65.

[15] 张锦文,王文先,高建兵,等.DZ2 高速列车车轴钢的热变形行为及热加工[J].材料热处理学报, 2020, 41(10): 123-129.

(编辑:刘卫)

中国科学家成功将廉价铜变成近似“黄金”材料

来自中国科学院大连化学物理研究所的一个科学家团队在《科学进展》杂志上披露了一项让人好奇的研究成果,文章中描述了他们如何设法将普通铜变成一种与黄金和白银“基本性能几乎相同”的材料。

大连化学物理研究所洁净能源国家实验室碳资源小分子与氢能利用研究组组长孙剑和他的同事们,利用一股带电的热氦气对一块铜片进行轰击。快速移动的电离粒子将铜原子从目标上炸飞,然后铜原子会在收集装置的表面冷却并凝结,形成一层薄薄的纳米晶层。

这种纳米晶层可以用作催化剂,将煤转化为酒精。煤转化为酒精,这个过程复杂而困难,目前科学上的认知是只有像金银这样的贵金属才能有效处理该过程。

“铜纳米颗粒的催化性能与金或银极其相似,”发布在科学院网站上的一份声明中说。“该研究结果证明了金属铜经过加工后可以从乌鸡变成凤凰”。

该过程使得原子充电,让它们的电子更致密、更稳定,使合成的材料在抗侵蚀、抗氧化和耐高温方面更接近黄金。该研究指出,以廉价铜为基础的新材料可以替代昂贵的金、银,用于电子器件的生产。

(摘自中国有色网)