

DOI: 10.3901/JME.2014.16.077

基于铸辗复合成形的铸态 42CrMo 钢 热物理性能参数的研究*

李永堂¹ 杨卿¹ 齐会萍¹ 巨丽¹ 华林² 郭良刚³

(1. 太原科技大学材料科学与工程学院 太原 030024;

2. 武汉理工大学汽车工程学院 武汉 430070;

3. 西北工业大学材料学院 西安 710072)

摘要: 铸辗复合成形工艺是生产环形零件的先进成形技术, 具有高效短流程、节能节材和减少排放等显著优点。对铸态坯材料在成形工艺条件下的组织演变机理和变形热力学条件进行深入研究, 对于实现材料在这种短流程中的组织改善和成形性一体化调控, 具有重要意义。分析研究材料在热变形条件下热物理性能参数和建立准确的材料模型, 是分析研究材料热成形过程组织演变和实现成形性一体化调控的前提和关键。针对轴承套圈铸辗复合成形工艺, 以 42CrMo 钢为研究对象, 通过数值模拟和试验研究, 得到热变性条件下铸态 42CrMo 钢的热物性参数如热导率、比热容和热扩散系数及其变化规律, 分析影响这些热物性参数变化的因素, 可为分析 42CrMo 坯件铸辗复合成形工艺和实现成形过程中组织和性能的改善提供准确的数据和模型。

关键词: 环形零件; 铸辗复合成形; 铸态 42CrMo 钢; 热物性参数

中图分类号: TG113

Study on the Thermal-physical Characteristic Parameters of Casting 42CrMo Based on Cast-rolling Forming Technology

LI Yongtang¹ YANG Qing¹ QI Huiping¹ JU Li¹ HUA Lin² GUO Lianggang³

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;

2. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070;

3. College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Cast-rolling forming technology is a new technology to produce ring parts. It possesses many advantages such as high efficiency, short process, saving energy and materials and reducing pollution. In order to get better microstructure and mechanical properties in this new process it is very important to study the microstructure evolution mechanism and deformation thermodynamic conditions of casting materials. To investigate thermal-physical characteristics of materials under hot forming and establish accurate model is key and premise for analyzing microstructure evolution of materials and realizing the controlling of organization and mechanical properties. Aiming at the cast-rolling forming technology of bearing rings, the thermal-physical characteristics of casting 42CrMo such as thermal conductivity, specific heat and thermal diffusivity under hot forming are researched by means of numerical simulation and experiments. The variations with temperature of these parameters are achieved. The factors influencing the changes of these parameters are analyzed. The obtained results can provide accurate data and model for analyzing cast-rolling forming technology of 42CrMo steel rings and getting better microstructure and mechanical properties.

Key words: ring parts; cast-rolling forming; casting 42CrMo steel; thermal-physical characteristics

0 前言

环形零件是工业领域广泛使用的一大类关键

机械零件。目前环形零件的生产普遍采用的是“铸锭→开坯→下料→锻粗→冲孔→辗扩”生产工艺。工艺流程长, 加热次数多, 设备投资大, 浪费材料和能源, 增加了排放和污染。为了解决这些问题, 笔者提出和研究了利用环形铸坯直接辗扩成形生产环形零件的短流程铸辗复合成形工艺^[1-2]。

环形零件铸辗复合成形工艺直接用环形铸坯

* 国家自然科学基金重点(51135007)、国家自然科学基金(51174140, 51075290)、高等学校博士点基金优先发展计划(20111415130001)和山西省归国留学人员基金(2011-084)资助项目。20140103 收到初稿, 20140523 收到修改稿

辗扩成形,省去了钢厂开坯、锻压车间下料、镦粗、冲孔等工艺和相应的加热环节,与现在普遍采用的环形零件辗扩工艺相比,具有流程短,加热次数少,节约材料和能源,减少排放和污染,省去下料、镦粗、冲孔等设备投资和动力消耗等优点^[3]。

利用环形铸坯直接辗扩成形的环形零件铸辗复合成形工艺是一项全新的理论与工艺,面临着诸多的技术挑战和科学问题,例如高质量环形铸坯冶炼与凝固铸造工艺、铸坯材料的热塑性变形行为等,其中最关键的是通过辗扩工艺过程实现材料的铸态组织向锻态组织的演变和环件辗扩工艺成形/成性一体化调控。对铸态环坯材料在成形工艺条件下的组织演变机理和变形热力学条件进行深入研究,对于实现材料在这种短流程中的组织改善和成形/成性一体化调控,具有重要意义。分析研究材料在热变形条件下热物理性能参数和建立准确的材料模型,又是预测分析材料辗扩成形过程组织演变和实现环件辗扩工艺成形/成性一体化调控的前提和关键。

在 42CrMo 钢热塑性变形行为、组织演变机理和相关热物理性能研究方面,国内外学者进行了许多相关的研究。蔺永诚等^[4]系统地研究了锻态 42CrMo 钢的热力学行为和本构关系,建立了数学模型,分析了变形参数对其动态再结晶和静态再结晶的影响;骆刚^[5]通过热模拟试验,分析了变形参数对 42CrMo 钢流变应力的影响,预测了峰值流变应力;赵玲玲等^[6]采用有限元模拟与热压缩试验相结合的方法,研究了变形参数对 42CrMo 钢热变形过程晶粒长大的影响规律,提出了实现晶粒细化的途径;潘艳华等^[7]研究了 20CrMo 钢的热物理性能参数及其变化规律,为该材料的连铸生产工艺提供了依据;郭广文等^[8]测定了不同组织状态下高碳钢的热导率、比热容和热扩散系数,分析了高碳钢的显微组织、力学性能与热物理性能之间的关系;居春艳^[9]分析测定了两种不锈钢的热导率、比热容和热膨胀系数,分析了高温下组织相变对上述物理参数的影响。在环件热辗扩成形组织演变和性能控制方面,HUA 等^[10-11]系统地研究了环件辗扩工艺参数对材料组织性能的影响;QI 等^[12]通过热模拟试验、数值模拟与试验研究,得到了铸态 42CrMo 钢热压缩过程应力应变曲线,建立了本构关系模型,分析了热变形条件下铸态 42CrMo 钢静、动态再结晶过程,探讨了辗扩成形工艺参数对组织演变和力学性能的影响。研究结果表明,通过理论分析和数值模拟可以成功预测基于铸坯的 42CrMo 钢环件辗扩过程的组织演变和性能调控;同时可以看出,分析热

变形条件下的 42CrMo 钢热物性参数如热导率、比热容和热扩散系数,对于建立准确的数学模型和进行数值模拟与预测组织演变是至关重要的。

本文针对轴承套圈铸辗复合成形工艺,以 42CrMo 钢为研究对象,通过数值模拟和试验研究,研究了铸态 42CrMo 钢的热物性参数如热导率、比热容和热扩散系数,得到了热变性条件下这些热物性参数的变化规律,分析了影响这些热物性参数变化的因素,可为分析 42CrMo 环件铸辗复合成形工艺和实现成形过程中组织和性能的改善提供准确的数据和模型。

1 铸态 42CrMo 钢热物性参数模拟

建立材料模型、数学模型和对辗扩过程进行数值模拟,需要提供准确的热物性参数。在影响材料模型的热物性参数中,热导率、比热容和热扩散系数是最重要的参数。由于环件铸辗复合成形工艺是利用环形铸坯直接辗扩成形,因此只有通过分析、检测获得铸态 42CrMo 钢热物性参数的准确数据,才能建立准确的材料模型以及通过数值模拟预测成形工艺中组织演变规律。

用 JMatPro 软件中的合金热物理性能计算模块,可以模拟出上述三个热物理性能参数及其变化规律。首先针对铸辗复合成形工艺的铸态 42CrMo 环件试件,进行化学成分和晶粒组织检测,得到的试件化学成分(质量分数)如表 1 所示,得到的晶粒组织如图 1 所示。

表 1 试件的铸态 42CrMo 钢化学成分(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	S
标准值	0.38~0.45	0.30~0.60	0.60~1.00	≤0.035
检验值	0.39	0.33	0.86	0.011
元素	Cr	Ni	Mo	P
标准值	0.80~1.20	≤0.03	0.20~0.30	≤0.035
检验值	1.19	—	0.22	0.023

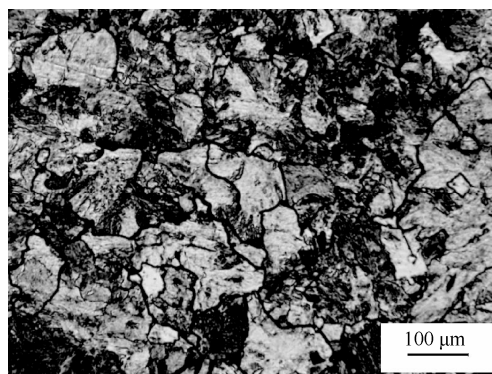


图 1 铸态 42CrMo 试件晶粒组织

将检测得到的铸态 42CrMo 试件的材料成分和初始晶粒尺寸(测得的平均晶粒尺寸为 80 μm)输入 JMatPro 软件, 模拟得到了铸态 42CrMo 钢的热导率变化曲线、比热容变化曲线和热扩散系数变化曲线。根据模拟结果可以分析影响上述热物理参数变化的因素。对于热导率而言, 温度是主要影响因素。随着温度的上升, 热导率下降明显, 但当温度超过 900 $^{\circ}\text{C}$ 后, 热导率下降缓慢。晶粒尺寸和合金元素对热导率也有影响, 晶粒愈粗大, 热导率愈高; 合金元素中, Cr 的质量分数的增加, 可导致热导率降低; 锰的质量分数的增加, 使热导率降低更明显。

表 2 是从模拟得到的铸态 42CrMo 钢的热导率变化曲线中各处温度节点数据, 与锻态 42CrMo 钢的热导率进行的比较。可以看出, 两者之间相差还是比较大, 可见用普通的 42CrMo 钢的数据为基础进行组织和性能分析会带来误差。

表 2 铸态 42CrMo 钢的高温热导率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

材料	温度/ $^{\circ}\text{C}$							
	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
铸态 42CrMo	81.0	75.8	68.2	62.0	57.9	56.4	54.1	51.3
锻态 42CrMo	43.6	40.5	36.2	32.6	28.7	27.0	26.1	25.4

2 热物性参数测定与分析

为了验证用上述模拟方法得到的热物理参数及其变化规律, 作者通过试验方法对铸态 42CrMo 钢热物性参数进行了测试和计算。

根据热导率的定义可知, 材料的热导率 λ 与热扩散系数 α 、材料比热容 c 之间存在以下定量关系

$$\lambda = \alpha \rho c \quad (1)$$

式中 ρ ——材料密度。

因此, 测得材料热扩散系数 α 和比热容 c , 就可根据材料密度 ρ 由式(1)计算得出该材料的热导率。

利用激光闪射法直接测量材料的热扩散系数, 通过激光热导仪的红外检测器连续测量铸态 42CrMo 钢样品下表面中心部位的相应温升过程, 得到温度 T 随时间 t 的变化关系和试样上表面温度升高到最大值 T_m 的一半时所需要的时间 $t_{1/2}$ (半升温时间), 根据 Fourier 传热方程, 由式(2)计算出铸态 42CrMo 钢的热扩散系数

$$\alpha = \frac{1.38L^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (2)$$

式中 L ——试样的厚度。

同样, 可通过标准试样(下标为 std), 用比较法通过式(3)计算得到铸态 42CrMo 钢(下标为 sam)的比热容

$$c_{\text{sam}} = \frac{c_{\text{std}} \Delta T_{\text{std}} m_{\text{std}}}{\Delta T_{\text{sam}} m_{\text{sam}}} \quad (3)$$

式中 ΔT ——试样吸收能量后的温升;

m ——材料的质量。

由此, 根据式(1)可计算出铸态 42CrMo 钢的热导率。

图 2 是分别采用 JMatPro 软件模拟和激光热导仪试验两种方法得到的铸态 42CrMo 钢热导率在相同温度范围内(500~1 200 $^{\circ}\text{C}$)随温度变化曲线, 图 3 是分别通过模拟和试验得到的铸态 42CrMo 钢比热容随温度变化曲线, 图 4 是分别通过模拟和试验得到的铸态 42CrMo 钢热扩散系数随温度变化曲线。

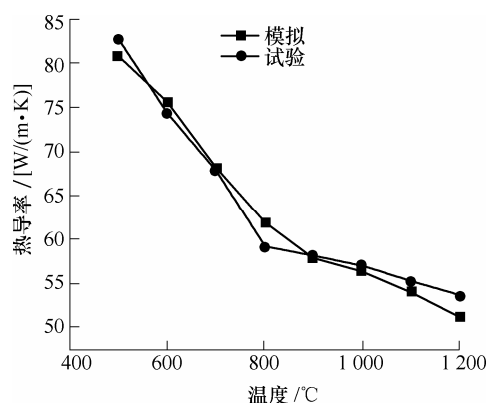


图 2 模拟与试验所得铸态 42CrMo 钢热导率随温度变化曲线

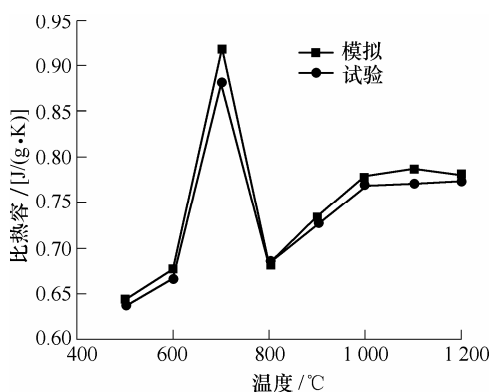


图 3 模拟与试验所得铸态 42CrMo 钢比热容随温度变化曲线

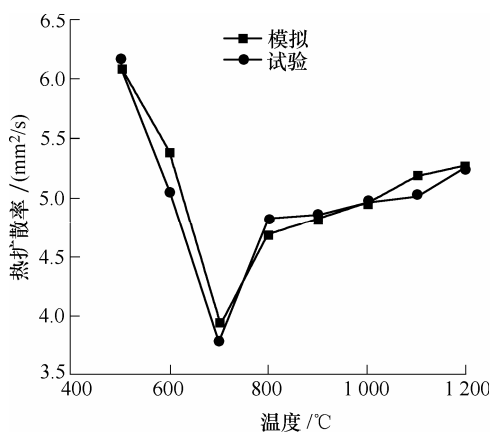


图 4 模拟与试验所得铸态 42CrMo 钢热扩散系数随温度变化曲线

从图 2~4 中可以看出,用试验测得的铸态 42CrMo 钢热导率、比热容和热扩散系数值及其变化规律与用模拟方法所得到的结果是一致的。表明用模拟所得结果和数据是可靠的,可为建立铸态 42CrMo 钢的材料模型和进行铸坯辗扩成形数值模拟与组织演变预测提供基础。

从图 3 和图 4 中可以看出,铸态 42CrMo 钢的比热容和热扩散系数在 700 °C 左右出现突变的峰值。分析其原因,是铸态 42CrMo 钢在 600~800 °C 发生了由铁素体、渗碳体组织向奥氏体组织转变的组织相变,伴随着组织结构的变化,材料吸收大量的热,因此铸态 42CrMo 钢的比热容和热扩散系数发生了突变。此后,曲线趋于平稳。

3 铸态 42CrMo 钢材料模型与环件辗扩过程模拟

笔者利用上述方法所获得的热导率、比热容和热扩散系数,建立了更符合实际情况的铸态 42CrMo 钢材料模型,并针对以铸态 42CrMo 钢为坯料的环件辗扩成形工艺,进行了数值模拟与分析。辗扩设备为 D53K-4000 数控径-轴向辗环机,芯辊直径为 280 mm,驱动辊直径为 850 mm,导向辊直径为 140 mm。所建立的热辗扩成形数值模拟有限元模型如图 5 所示。选择四面体单元网格结构,成形环件的网格数为 50 000 个,芯辊的网格数为 8 000 个,驱动辊的网格数为 20 000 个,导向辊的网格数为 6 000 个,锥形端面辊的网格数为 5 000 个。

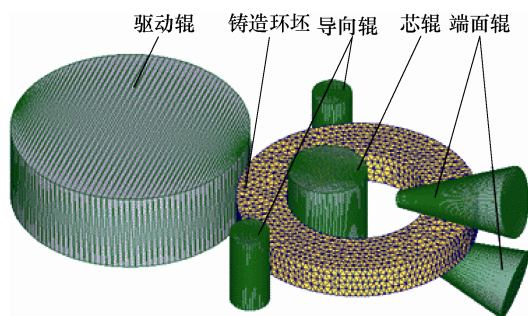
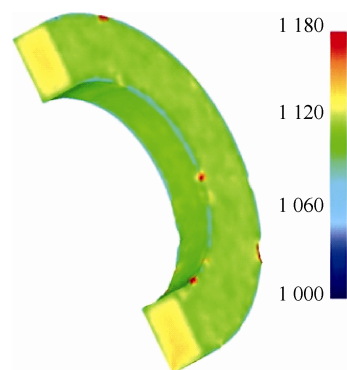


图 5 铸态 42CrMo 钢环坯热辗扩有限元模型

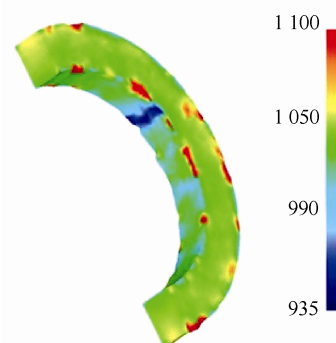
模拟过程将成形材料铸态 42CrMo 钢定义为刚/黏塑性材料模型,且做出以下基本假设:① 近似认为热辗扩成形前后工件的总体积保持不变,忽略成形过程中体积力的影响;② 不考虑热辗扩过程中材料发生的弹性变形阶段;③ 材料内部组织质地均匀,各向同性较好。将铸态 42CrMo 钢的本构关

系^[12]、材料性能参数及上述通过模拟所得铸态 42CrMo 钢的热导率、比热容和热扩散系数随温度变化曲线分别导入模拟软件,建立了铸态 42CrMo 钢的材料模型。

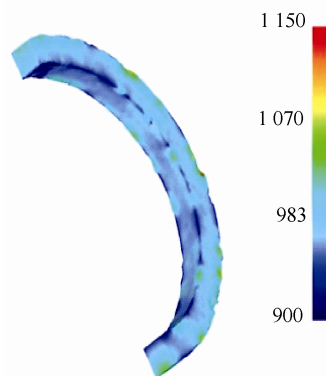
通过对铸态 42CrMo 钢环件热辗扩成形过程进行数值模拟,得到了铸态 42CrMo 钢环件辗扩成形中的温度、应变、变形和组织变化情况,并可预测环件铸辗复合成形工艺的组织、性能变化。图 6 是模拟得到的温度场,图 7 是模拟得到的等效应变场。



(a) 第 100 步



(b) 第 500 步



(c) 第 1 020 步

图 6 环形铸坯热辗扩过程中的温度场(°C)

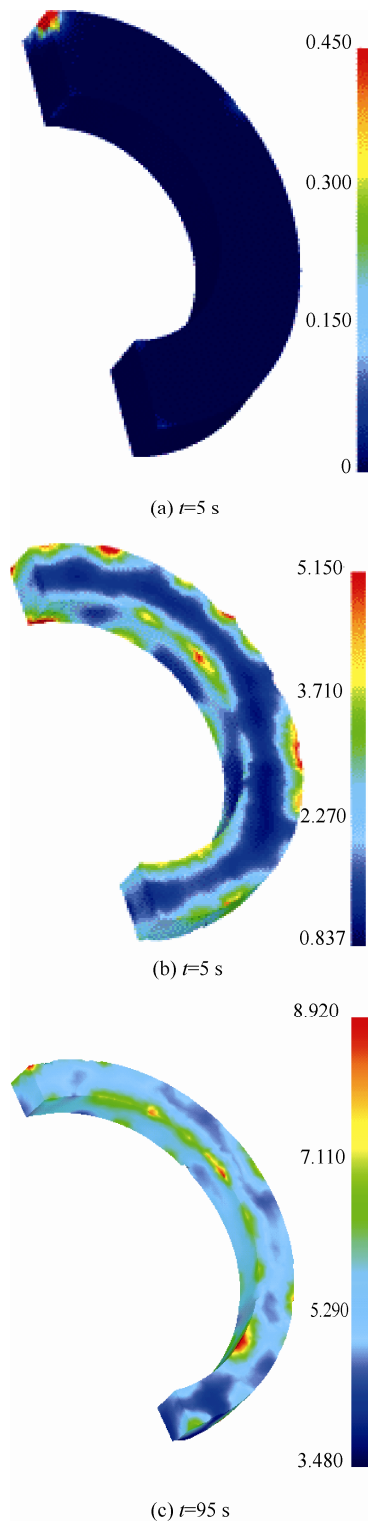


图7 环形铸坯热辗扩成形中的等效应变分布

从模拟结果可以看出, 辗扩初期, 环件的温度变化主要受热传导的影响; 外层部分塑性变形增大, 环件中层变形很小。随着热辗扩的进行, 由于受成形辊施加能量的影响, 产生了热效应, 环件外层局部温度升高, 内径处温度降低; 变形从外层向中层扩展, 变性分布区域均匀, 环件组织晶粒由于发生再结晶而得到细化。接近结束的阶段, 环件的温度场主要取决于材料内部组织的热稳定性, 材料的热

稳定性不断增强, 温度梯度随之降低, 各部分温度趋于均匀, 材料的组织晶粒已经得到了不断的均匀细化。此外通过合理控制进给量等辗扩参数, 可以有效控制和调整温度、应变和变形区的变化, 改善和控制环件辗扩成形的组织和性能。

4 结论

(1) 利用 JMatPro 软件模拟得到了铸态 42CrMo 钢热导率、比热容及热扩散系数随温度变化曲线, 探讨了温度、晶粒大小和微量元素质量分数对这些热物理性能参数的影响: 随着温度升高, 热导率下降, 比热容和热扩散系数有所增加; 材料晶粒愈大, 热导率愈小; Cr、Mn 元素质量分数增加, 可导致热导率和热扩散系数降低。

(2) 利用激光热导仪对铸态 42CrMo 钢进行热物理性能测定计算, 得到了该材料热导率、比热容及热扩散系数随温度变化曲线, 验证了模拟所得铸态 42CrMo 钢热物理性能曲线真实可靠。分析模拟与试验所得热物理性能参数的变化, 在 700 °C 左右时, 铸态 42CrMo 钢的比热容和热扩散系数出现突变峰值, 可见材料组织相变对热物性参数影响较大。

(3) 用所得铸态 42CrMo 钢热物理性能参数, 建立了材料模型并进行热辗扩工艺的数值模拟, 通过对模拟结果进行分析, 可见成形后的环件热稳定性好, 材料内部组织得到了明显的均匀和细化, 成形件质量稳定。表明所得的铸态 42CrMo 钢热物理性能参数准确、实用, 环件辗扩过程的数值模拟结果可用于指导实际生产。

参 考 文 献

- [1] 李永堂, 齐会萍, 杜诗文, 等. 一种金属环件短流程铸辗复合成形的方法: 中国, ZL201010132486.6[P]. 2010-09-01.
LI Yongtang, QI Huiping, DU Shiwen, et al. A method of casting-rolling compound forming of metal rings: China, ZL201010132486.6[P]. 2010-09-01.
- [2] 李永堂, 齐会萍, 刘志奇, 等. 一种利用铸坯辗扩成形大型环件的方法: 中国, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
LI Yongtang, QI Huiping, LIU Zhiqi, et al. A method of rolling forming large-scale rings use casting blank: China, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
- [3] 李永堂, 齐会萍, 李秋书, 等. 基于铸辗复合成形的 42CrMo 钢环坯铸造工艺与试验研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 49-54.

- LI Yongtang, QI Huiping, LI Qiushu, et al. Casting process and experimental research of 42CrMo ring blanks based on cast-rolling forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 49-54.
- [4] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢形变奥氏体静态再结晶[J]. 中南大学学报, 2009, 40(2): 411-416.
- LIN Yongcheng, CHEN Mingsong, ZHONG Jue. Static recrystallization behaviors of deformed 42CrMo steel[J]. Journal of Central South University, 2009, 40(2): 411-416.
- [5] 骆刚. 42CrMo 热塑性流变及动态再结晶行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- LUO Gang. Research on thermoplastic and dynamic recrystallization of 42CrMo steel[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [6] 赵玲玲, 安子军, 杜凤山, 等. 热变形对 42CrMo 钢奥氏体晶粒尺寸影响的试验研究[J]. 塑性工程学报, 2010, 17(4): 100-103.
- ZHAO Lingling, AN Zijun, DU Fengshan, et al. Experimental research on the effect of hot deformation on the growth of austenite grain size of 42CrMo steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(4): 100-103.
- [7] 潘艳华, 陈登福, 董凌燕, 等. 20CrMo 连铸坯高温力学性能和热物理性能分析[J]. 重庆大学学报, 2006, 29(9): 68-70.
- PAN Yanhua, CHEN Dengfu, DONG Lingyan, et al. Mechanical performance and thermology performance of 20CrMo steel at high temperature[J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(9): 68-70.
- [8] 郭广文, 马惠霞, 张健, 等. 高碳钢的热物性与显微组织的关系[J]. 理化检验-物理分册, 2006, 42(4): 167-170.
- GUO Guangwen, MA Huixia, ZHANG Jian, et al. The relationship of thermophysical properties to microstructure of high-carbon steel[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A(Physical Testing), 2006, 42(4): 167-170.
- [9] 居春艳. 两种不锈钢的高温相变及热物理性能的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.
- JU Chunyan. Research on the elevated temperature phase transformation and thermal physical properties of two stainless steel[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [10] HUA L, PAN L B, LAN J. Researches on the ring stiffness condition in radial-axial ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2570-2575.
- [11] ZHOU G, HUA L, LAN J, et al. Analysis of coupled thermo-mechanical behaviors in radial-axial rolling of alloy steel large ring[J]. Computational Materials Science, 2010, 50(1): 65-76.
- [12] QI Huiping, LI Yongtang. Metadynamic recrystallization of the as-cast 42CrMo steel after normalizing and tempering during hot compression[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 853-859.
-
- 作者简介: 李永堂(通信作者), 男, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师, 太原科技大学副校长, 材料科学与工程学科首席学科带头人。主要研究方向为材料加工先进制造技术及锻压设备理论与控制, 发表论文 150 余篇。
- E-mail: liyongtang@tyust.edu.cn