

热变形参数对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢晶粒的影响

葛 栋^{1,2} 李京社^{1,2} 王林珠^{1,2} 杨宏博^{1,2} 杨树峰^{1,2}

(北京科技大学 1 冶金与生态工程学院; 2 钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要 试验 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢由 5 t VIM + 1 t VAR 双真空冶炼, 利用 Gleeble-1500 热模拟机试验研究了 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 钢形变温度(1 040 ~ 1 080 °C), 形变量(20% ~ 60%) 和形变速率 1 ~ 20 s⁻¹ 对钢的晶粒尺寸的影响。结果表明, 形变温度 1040 °C、形变量 60%、形变速率 20 s⁻¹ 时, Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢具有细小圆整均匀的晶粒组织, 晶粒平均尺寸为 4.03 μm。

关键词 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢 热变形参数 晶粒细化 热模拟

Effect of Hot Deformation Parameters on Grain of Gear Steel Cr14-Co13-Mo5-Ni2

Ge Dong^{1,2}, Li Jingshe^{1,2}, Wang Linzhu^{1,2}, Yang Hongbo^{1,2} and Yang Shufeng^{1,2}

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, 2 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Test gear steel Cr14-Co13-Mo5-Ni2 is melted by 5 t VIM + 1 t VAR double-vacuum melting process. The effect of deformation temperature (1 040 ~ 1 080 °C), amount of deformation (20% ~ 60%) and deformation rate (1 ~ 20 s⁻¹) on grain distribution and grain size of Cr14-Co13-Mo5-Ni2 steel has been tested and studied by using Gleeble-1500 thermal simulation machine. Results show that with deformation temperature 1 040 °C, amount deformation 60% and deformation rate 20 s⁻¹, the Cr14-Co13-Mo5-Ni2 gear steel has fine, round and homogeneous grain structure, and its average grain size is 4.03 μm.

Material Index Cr14-Co13-Mo5-Ni2 Gear Steel, Thermal Deformation Parameters, Grain Fining, Thermal Simulation

Cr14-Co13-Mo5-Ni2 是一种高性能齿轮钢, 广泛应用于航空、航天、汽车、机械制造等各个领域。近年来随着科学技术的飞速发展和工业化程度的迅猛提高, 对齿轮材料质量的要求尤为严格。组织不均匀和晶粒粗大等现象成为影响齿轮钢综合力学性能的主要原因之一。研究证明^[1-4], 材料形变过程, 控制好形变温度、形变量以及形变速率等工艺参数对晶粒细化极为有效, 研究形变过程工艺参数对晶粒细化的影响具有极高的应用价值。

目前我国对齿轮钢晶粒度级别的要求是 5 ~ 8 级, 而日本对齿轮钢的晶粒度要求 ≥ 6 级^[5]。高性能齿轮钢通过控制锻造和锻后冷却, 可以显著细化晶粒, 使钢材的强度和低温韧性有较大改善, 充分发挥多种类高含量合金元素的作用。对于锻造过程的研究, 国内外学者基本采用热模拟实验的方法来进行。Cabrera^[6] 等人利用热模拟的方法对双相不锈钢的热形变行为进行了研究, Ebrahimi^[7] 等人对高温下 Ti-IF 钢的压力应变曲线图进行了描述, 廖舒纶^[8] 等部分国内学者也利用热模拟方法对 GCr15 轴承钢的热形变行为进行了探讨。本文通过利用热

模拟的方法对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢进行实验, 以期获得细小均匀的晶粒组织, 从而提高其综合力学性能。

1 实验概述

试验采用 5 t VIM + 1 t VAR 双真空炉冶炼 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢, 其化学成分如表 1 所示。将实验钢加工成 Φ8 mm × 12 mm 热压缩试样, 采用 Gleeble1500D 热模拟试验机进行如下操作: 试样首先以 10 °C/s 的升温速率被加热到 1 150 °C, 并保温 60 s 以消除温度梯度; 随后以 5 °C/s 的降温速率降至目标形变温度进行单道次热压缩实验, 压缩完成后以水淬方式降温, 形变后的试样形状如图 1 所示, 试样中部直径最大, 两端直径较小, 试样尺寸与热变形参数相关, 在试样中部的中心部位进行取样。本次形变热压缩实验主要涉及 3 个工艺参数: 形变温度、形变速率以及形变量。每个工艺参数取 3 个变量, 其变量值如表 2 所示。采用高锰酸钾 2 g + 浓硫酸 15 ml + 水 180 ml 的溶液在 63 °C 水浴锅中加热 90 min, 进行晶粒度浸泡, 中间伴随轻微搅匀。利用 Olympus Gx51 观察晶粒度, SISCAS 8.0 分

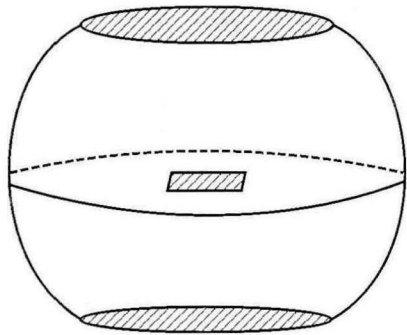


图 1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematics of sampling location

表 1 实验钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of experimental steel /%

| C | Cr | Co | Mo | Ni | V | S | P |
|------|-------|-------|------|------|------|-------|--------|
| 0.14 | 13.79 | 12.69 | 4.66 | 2.00 | 0.61 | 0.001 | ≤0.005 |

表 2 热压缩工艺参数值

Table 2 Parameters of hot compressing process

| 工艺参数 | 形变温度/ ℃ | 形变速率/ s ⁻¹ | 形变量/ % |
|------|------------|--------------------------|-----------|
| 1 | 1 080 | 1 | 20 |
| 2 | 1 060 | 5 | 40 |
| 3 | 1 040 | 20 | 60 |

析软件进行晶粒度金相图像分析。

2 实验结果与讨论

2.1 形变量对晶粒尺寸的影响

由图 2 可以看出,随着形变量的提高,晶粒平均尺寸呈直线减小趋势,尤其是形变速率为 1 s⁻¹ 时这种变化更为显著。形变温度 1 080 ℃ 形变速率 1 s⁻¹ 状态下,形变量为 20% 时,晶粒平均尺寸为 12.5 μm,形变量为 60% 时,晶粒平均尺寸为 5 μm,晶粒平均尺寸减小幅度为 60%。

这是因为在大形变状态下,在相变和再结晶之前的母相中会有较多的晶格缺陷导入,致使形核点增加,同时形核速度会因驱动力较大而增大。同时,当奥氏体晶粒受力形变时,大形变量状态下的塑形流动会使晶粒沿着形变方向被拉长,伴随此过程位错也在某些区域集中。随着位错的聚集和密度的增加,其形成形变带组织。随着此塑形形变过程的继续,使得应变诱导相变可以有效发生,细小的铁素体晶粒在应变诱导相变下主要生成于拉长奥氏体晶界或形变带处。随着形变量的提高,位错密度增加,相变时的形核点增加,形核速率加快,γ→α 相变温度升高,加快了相变速率,使得晶粒得到细化。

图 3(a) 为形变温度 1 040 ℃、形变速率 1 s⁻¹ 状态下不同形变量的晶粒尺寸区间分布图。由图 3(a) 可以看出,当形变量为 20% 时,晶粒主要分布在 1~10 μm 和 10~20 μm。结合图 2(a) 可以看出,该形变量下晶粒较大,晶粒数目较少,大小晶粒呈区域状分布,均匀性较差。随着形变量的增加,晶粒数目增多,晶粒尺寸逐渐向 1~10 μm 区间内转移,当形变量达到 60% 时,1~10 μm 区间内晶粒数量比例提高,但从图 2(b) 可以看出,此状态下大小晶粒呈区域状分割分布,晶粒混晶现象严重。当形变量达到 60% 时,晶粒尺寸主要集中在 1~10 μm,大晶粒数目较少。由图 2(c) 可以看出,此形变量状态下,晶粒细小圆整,均匀性较好。

2.2 形变温度对晶粒尺寸的影响

由图 4 可以看出,随着形变温度的升高,晶粒尺寸有长大的趋势,但变化的幅度较小。由此也可以看出,当形变温度在 1 040 ℃ 时,再结晶已经完成,此时随形变温度的改变晶粒尺寸变化幅度较小。在大形变区内晶粒尺寸都比较细小,特别是形变量为

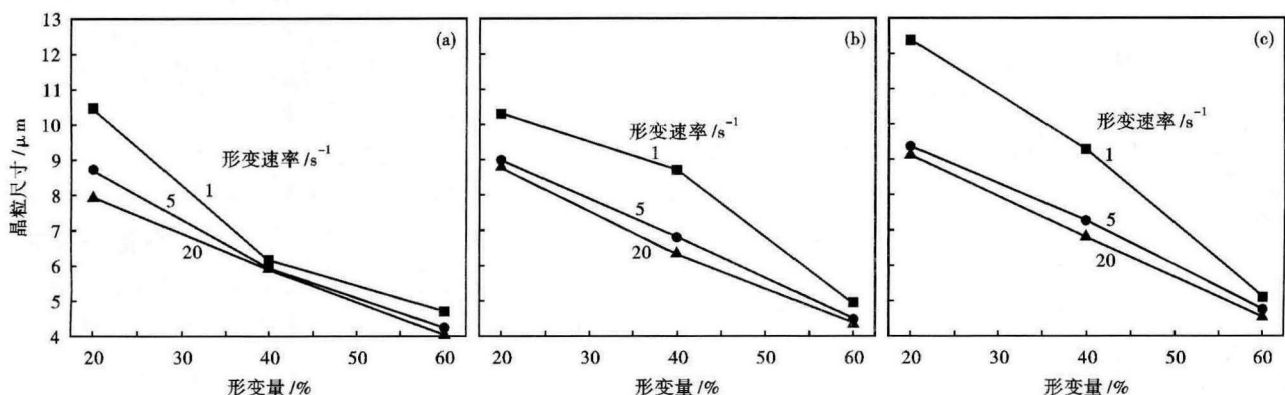


图 2 在(a)1 040 ℃;(b)1 060 ℃;(c)1 080 ℃时形变量对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢晶粒尺寸的影响

Fig. 2 Effect of amount of deformation on average grain size of gear steel Cr14-Co13-Mo5-Ni2 deformed at 1 040 ℃ (a), 1 060 ℃ (b) and 1 080 ℃ (c)

60%时,晶粒大小仅为4 μm左右。

这是因为,形变温度较低时,原始组织中还有少量初生 α 相存在,能够起到阻碍晶粒长大的作用。随着形变温度的提高,初生 α 相逐渐减少,阻碍晶粒长大的作用减弱,晶粒更容易长大。高温状态下,杂质的阻碍作用消失,晶粒更易于生长,导致晶粒粗大。另一方面,高温状态下再结晶晶粒获得的能量较高,导致晶粒聚集,致使晶粒长大。

由图 3 (a)可以看出,当形变温度为1 040 ℃,形变速率为1 s⁻¹时,晶粒数目较多,晶粒尺寸主要

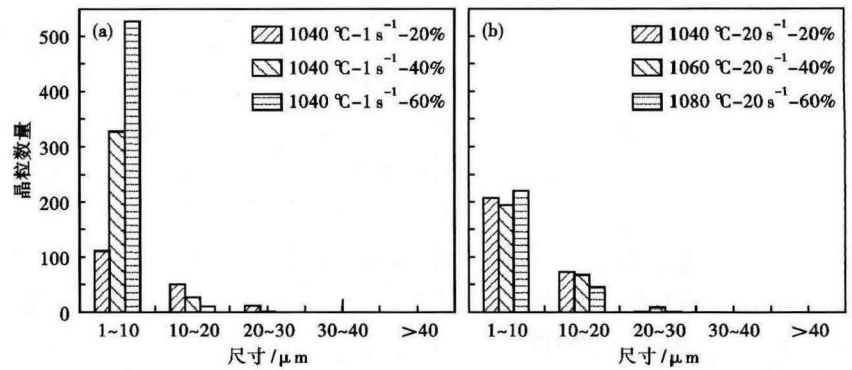


图 3 1 040 ℃,形变速率 1 s⁻¹,形变量 20%,40%,60% (a)和1 040、1 060、1 080 ℃形变速率 20 s⁻¹,形变量 20%、40%、60% (b)时 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢的晶粒尺寸分布

Fig. 3 Distribution of grain size of gear steel Cr14-Co13-Mo5-Ni2 with deformation rate 1 s⁻¹, amount of deformation 20%, 40% and 60% at 1 040 ℃ (a) and with deformation rate 20 s⁻¹, amount of deformation 20%, 40% and 60% at 1 040 ℃, 1 060 ℃ and 1 080 ℃ (b)

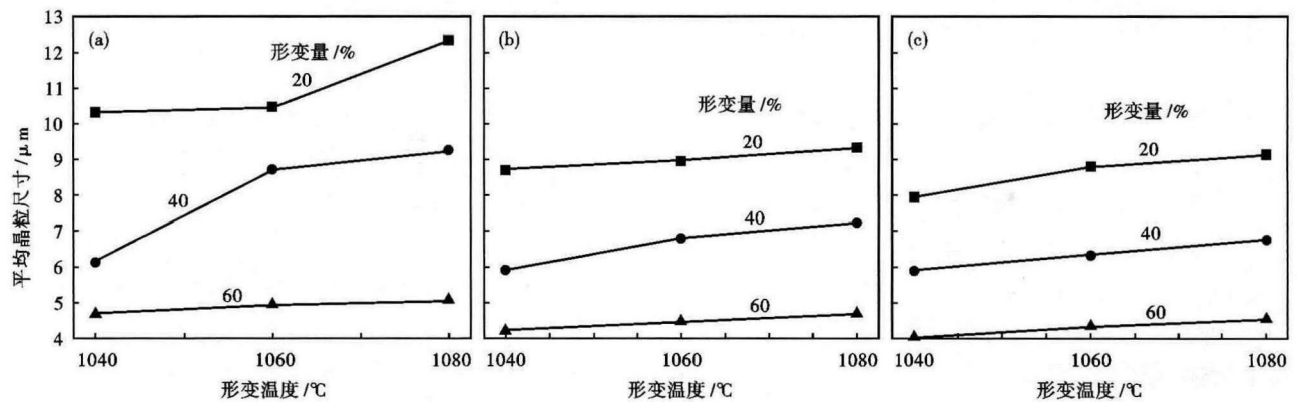


图 4 形变速率为(a)1 s⁻¹;(b)5 s⁻¹;(c)20 s⁻¹时形变温度对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢晶粒尺寸的影响

Fig. 4 Effect of deformation temperature on average grain size of Cr14-Co13-Mo5-Ni2 gear steel with deformation rate 1 s⁻¹ (a), 5 s⁻¹ (b) and 20 s⁻¹ (c)

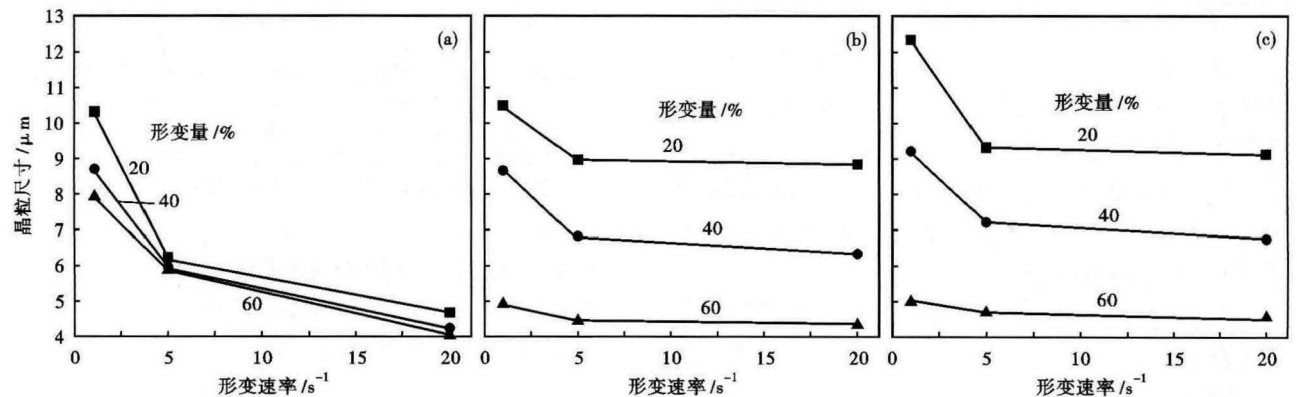


图 5 在形变温度(a)1 040 ℃;(b)1 060 ℃;(c)1 080 ℃时形变速率对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢晶粒尺寸的影响

Fig. 5 Effect of deformation rate on average grain size Cr14-Co13-Mo5-Ni2 gear steel at deformation temperature 1 040 ℃ (a) 1 060 ℃ (b) and 1080 ℃ (c)

分布在 1 ~ 10 μm。

2.3 形变速率对晶粒尺寸的影响

从图 5 可以看出,大形变量状态下形变速率对晶粒尺寸影响较大,当形变速率由1 s⁻¹变为5 s⁻¹

时,晶粒平均尺寸变化较为明显;而当形变速率由 5 s^{-1} 变为 20 s^{-1} 时,晶粒尺寸则无明显减小。形变量较小时,形变速率则对晶粒尺寸影响较小。

这是因为,大形变速率状态时,达到预定形变量所需时间较短,没有充裕的时间提供钢中奥氏体再结晶晶粒继续长大所需足够能量,新晶粒长大困难,有利于晶粒细化。反之,小形变速率在满足再结晶热力学条件后,达到预定形变量所需时间较长,增加的加热时间提供再结晶晶粒长大所需动力学条件,晶粒会迅速长大。

由图3(b)可以看出,当形变速率为 20 s^{-1} 时,晶粒主要分布 $1\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 区间。

2.4 最佳工艺参数

通过以上分析得出,控制冶炼过程中形变量大,形变温度低,形变速率在 $5\sim 20\text{ s}^{-1}$ 可细化晶粒。为进一步确定最佳工艺参数,本文通过金相显微镜观察大形变量低温下 5 s^{-1} 和 20 s^{-1} 形变速率下齿轮钢显微组织如图6所示。发现图6(a)所示晶粒组织较为粗大,图6(b)所示晶粒组织更加细小均匀。综上所述,形变温度为 $1\text{ }040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、形变量为60%、形变速率为 20 s^{-1} 时,Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢能够获得细小圆整均匀的晶粒组织,其平均直径为 $4.03\text{ }\mu\text{m}$ 。

3 结论

(1)形变量对 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢晶粒尺寸影响最为显著,形变量增大,晶粒尺寸呈直线下降趋势,最大减小幅度能达到60%。

(2)当形变温度在 $1\text{ }040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,再结晶已经完成,随着形变温度的升高,晶粒尺寸虽有长大的趋势,但变化的幅度较小。

(3)当形变速率由 1 s^{-1} 变为 5 s^{-1} 时,晶粒平均尺寸迅速减小,而当形变速率由 5 s^{-1} 变为 20 s^{-1} 时,晶粒尺寸则无明显减小。

(4)形变温度为 $1\text{ }040\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、形变量为60%、形变

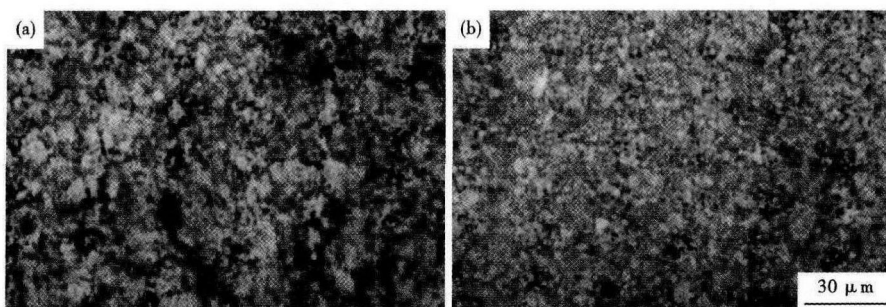


图6 形变速率 5 s^{-1} (a)和 20 s^{-1} (b)时 Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢基体形貌:形变量60%, $1\text{ }040\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.6 Morphology of matrix of Cr14-Co13-Mo5-Ni2 gear steel with deformation rate 5 s^{-1} (a) and 20 s^{-1} (b), amount of deformation 60% at $1\text{ }040\text{ }^{\circ}\text{C}$

速率为 20 s^{-1} 时,Cr14-Co13-Mo5-Ni2 齿轮钢能够获得细小圆整均匀的晶粒组织,其平均直径为 $4.03\text{ }\mu\text{m}$ 。

国家自然科学基金项目资助(51374021)

参考文献

- [1] Leskovsek V, Kalin M, Viintin J. Microstructure, Mechanical Properties and Wear Behaviour of Deep-Cryogenic-Treated HSS[C]. Ihtse: Transactions of Materials and Heat Treatment Proceedings of the 14th Ihtse Congress, 2004:540-545.
- [2] Leskovsek V, Ulee B. Influence of Deep Cryogenic Treatment on Microstructure, Mechanical Properties and Dimensional Changes of Vacuum Heat-Treated High-Speed Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 16(3):72-76.
- [3] Leskovsek V. Some Aspects of Sub-Zero Tempering at Vacuum Heat-Treatment of HSS[C]. Indianapolis: 21 AMS Heat Treating Society Conference Proceedings, 2001:5-8.
- [4] 过伸泰. 钢铁材料得晶粒超细化[J]. 世界钢铁, 2003, 38(11):16-24.
- [5] 崔玉珍. 国外汽车齿轮钢晶粒度的研究[J]. 机械工程材料, 1990, 63(10):10-12.
- [6] Cabrerajm J M, Mateo A, Lanes L, et al. Hot Deformation of Duplex Stainless Steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003(143):321-325.
- [7] Ebrahimi R, Zahir S H, Najafizadeh A. Mathematical Modelling of the Stress-Strain Curves of Ti-IF Steel at High Temperature [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006(171):301-305.
- [8] 廖舒纶. GCr15 轴承钢棒线材热连轧过程微观组织演化的数值模拟[D]. 大连:大连理工大学, 2008:20-25.

葛 栋(1972-),男,博士研究生(北京科技大学),1993年西南科技大学(本科)毕业,钢铁冶金和特殊钢研究。

E-mail:Yangshufeng@ustb.edu.cn

收稿日期:2014-10-20