



问题讨论

固溶热处理对发动机用 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 滚动轴承钢的组织 and 力学性能的影响

温禄淳

(煤科集团沈阳研究院有限公司检测分院, 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113006)

摘要: 采用扫描电镜、硬度和冲击韧性测定等手段分析 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢在不同固溶温度处理后的组织和力学性能。研究结果表明: 随着固溶温度从 1050°C 上升到 1095°C , $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢组织的平均晶粒尺寸会随之快速增大, 增大幅度约 30%。在 1050°C 与 1065°C 下等温淬火可以生成细小的贝氏体组织, 以及没有完全溶解的、均匀分布的碳化物颗粒。随着固溶温度升高到 1080°C 与 1095°C , 贝氏体的尺寸开始不断变大, 在钢基体中形成了非常粗大的贝氏体组织。当固溶温度从 1050°C 上升到 1095°C 时, 其硬度从 HRC 60.4 增大到了 HRC 64.3, 其冲击功从 $162.2\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 减小到了 $84.6\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 。随固溶温度的上升, 硬度表现出不断增大, 冲击功不断减小。

关键词: 固溶; $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$; 组织; 力学性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.05.030

中图分类号: TG156.94; TG142.33

文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2019) 05-0144-04

$\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢具备高强度、高韧性以及良好的疲劳寿命等优点, 并且在 400°C 下依然可以达到 58HRC 的硬度, 表现出优异的综合性能^[1-3]。现阶段, $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢被大量应用于制造航空发动机滚动轴承。当前, 各项航空技术不断发展, 也因此促进了航空器飞行速度的迅速提升, 因此对航空发动机的推重比提出了更高的要求。由此导致发动机轴承需要承受更高的工作载荷并能以更快的转速运行, 进一步导致轴承工作环境的温度也不断提高, 这些都给发动机轴承的寿命带来了不利影响。如何进一步提高轴承服役寿命^[4-6]已经成为改善我国航空发动机综合性能的一个最关键的因素。

考虑到发动机的工作环境条件正变得更加苛刻, 要求高温轴承材料具备更高的性能, 尤其是在满足高温与高应力使用条件时还需要具备良好的韧性与塑性。对钢铁材料进行固溶处理后再对其试施冷却时, 将会发生高温、中温与低温三种相转变情况。其中, 高温相转变时通常会生成许

多珠光体组织, 由于轴承表面必须能够达到较高的硬度与良好的耐磨性, 但珠光体硬度较低, 从而使这种含有较高比例珠光体组织的钢无法满足轴承部件的性能要求。低温相转变时基本以生成马氏体组织为主, 该组织可以促进 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 轴承钢的硬度与耐磨性获得显著增强^[7-9]。为了进一步提高 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢的高温硬度与韧性, 还应对其试施高温回火处理, 使基体内析出二次碳化物来达到强化基体的效果。由于目前航空发动机的制造技术不断进步, 要求轴承达到更高工作应力的情况下还要能够满足韧性、塑性与工作寿命的使用标准。如果进行低温相转变将会使基体中主要形成马氏体组织, 无法有效提高钢材的塑性与韧性。进行中温相变则可以生成下贝氏体组织, 从而获得比马氏体组织更优异的力学性能, 尤其是韧性与塑性能够显著提高^[10-11]。本文主要研究了对 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 轴承用钢以不同温度试施固溶处理的过程, 同时采用等温盐浴方法使其发生中温相转变, 分析了在不同固溶温度下进行中温相转变得到的

收稿日期: 2018-06-11; 改回日期: 2018-11-23

作者简介: 温禄淳 (1985-), 男, 高工, 硕士, 主要从事于矿用产品安全监测。

下贝氏体组织结构并测试了该组织的力学性能。

1 试验材料与方法

选择球化退火态的 20 mm 厚的热轧 Cr4Mo4V 钢作为试验材料（化学成分见表 1）。

表 1 试验钢的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel

C	Si	Mn	Ni	P	S	Fe
0.8	0.25	0.30	0.16	0.01	0.008	Bal.

首先在 Q500 四辊精轧机（无锡市瑞华冶金机械厂）上进行轧制，控制压下量为 2 mm，轧制速度为 1.5 m/s。然后将其放入箱式电阻炉内分别加热到 1050℃、1065℃、1080℃ 与 1095℃ 与 1110℃ 并保温 1 h，试现 Cr4Mo4V 钢的奥氏体化转变，同时促使钢材中的碳化物尽量溶入到基体内，再将钢材试样淬入 280℃ 盐浴中进行 8 h 等温处理，最后将试样取出并空冷。

把盐浴淬火得到的 Cr4Mo4V 钢降至室温状态并去除其表面盐渍，通过线切割方法除去表面氧化皮与脱碳层，对试样表面进行打磨与抛光处理，在液氮 (-196℃) 温度进行低温冲击试验，并观察冲击断口的形貌。再利用 JSM-6301F 光学显微镜对其微观组织进行观察并测量晶粒的平均尺寸，最后绘制得到不同固溶温度下对应的晶粒平均尺寸变化曲线。利用 ZXYD-1 硬度仪测试等温淬火钢材试样的硬度，要求各温度分别测试 3 个试样，并在每个试样上测试 5 个点。在真空热炉内将淬火试样加热到 550℃ 回火处理 2.5 h，总共回火 3 次。

2 结果与分析

2.1 固溶温度对晶粒尺寸的影响

图 1 是在不同温度下进行固溶处理得到的 Cr4Mo4V 钢组织的晶粒形貌，表 2 给出了平均晶粒尺寸与固溶温度的关系。根据图 1 可知，在 1050℃ 与 1065℃ 的固溶温度下，Cr4Mo4V 钢组织的平均晶粒尺寸约 $35 \pm 1 \mu\text{m}$ 。随着固溶温度从 1050℃ 上升到 1065℃，钢材晶粒尺寸并未发生显著的变大现象。当固溶处理温度继续上升至 1080℃，钢基体平均晶粒尺寸增大至 $40 \pm 1 \mu\text{m}$ ，

此时晶粒发生了明显长大的情况。当固溶处理温度进一步升高至 1095℃，钢材平均晶粒尺寸增大到 $45 \pm 1 \mu\text{m}$ 。根据以上测试数据可知，当固溶温度超过 1080℃ 之后，随着温度的上升，钢材平均晶粒尺寸会随之快速增大。对经过固溶处理的 Cr4Mo4V 钢进行观察可以发现其晶粒上存在许多点状的黑色组织相，并且当固溶温度上升后黑色点状相尺寸发生了明显的减小，同时数量也不断降低。此类黑色相基本都是在固溶处理后钢基体中还没有发生溶解的碳化物成分。

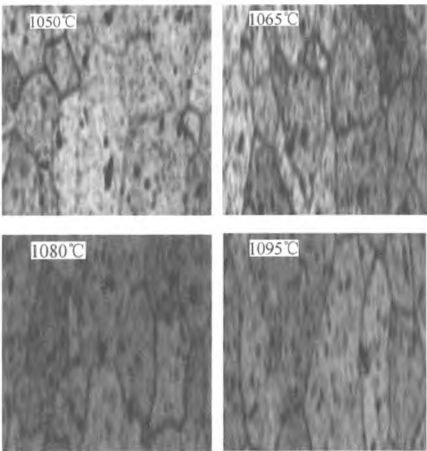


图 1 在不同温度固溶后淬火钢的晶粒形貌

Fig .1 Grain morphologies of steel after quenching at various solution temperatures

表 2 平均晶粒尺寸与固溶温度的关系

Table 2 Relationship between average grain size and solution temperature

固溶温度 /℃	1050	1065	1080	1095
平均晶粒尺寸 / μm	35.2	34.9	40.3	45.2

2.2 固溶温度对 Cr4Mo4V 钢贝氏体微观组织的影响

采用 280℃ 等温盐浴方法对 Cr4Mo4V 钢试样进行 8 h 保温处理后，其基体中的奥氏体组织将发生中温相转变并大部分转化为贝氏体。在之后的冷却过程中剩余奥氏体还会进一步转变成马氏体，最终残余的奥氏体数量很少。经过 280℃ 等温淬火处理生成的中温相转变组织基本都是下贝氏体。在 1050℃、1065℃、1080℃ 与 1095℃ 的不同温度下对 Cr4Mo4V 钢进行 1 h 固溶处理后，再将其淬入 280℃ 等温盐浴中进行 8 h 保温，之后在 550℃

下进行 2.5 h 回火共 3 次, 得到图 2 的贝氏体组织。可以看到, 在 1050℃ 与 1065℃ 下等温淬火可以生成细小的贝氏体组织, 同时还生成了没有完全溶解的具有均匀分布状态的碳化物颗粒。随着固溶温度升高到 1080℃ 与 1095℃, 贝氏体的尺寸开始不断变大, 在钢基体中形成了非常粗大的贝氏体组织, 并且产生了更多的剩余基体组织。

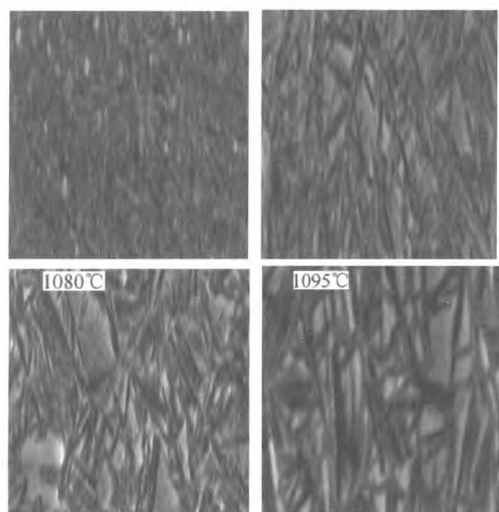


图 2 在不同温度固溶回火后 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢中的贝氏体组织
Fig. 2 Bainite microstructure in $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ steel after solution tempering at various temperatures

2.3 固溶温度对 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢硬度和冲击韧性的影响

当 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢的固溶温度从 1050℃ 上升到 1095℃ 时, 其硬度从 HRC 60.4 增大到了 HRC 64.3。试样硬度表现出随固溶温度上升不断增大的现象, 见表 3。

表 3 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢的硬度和冲击韧性与固溶温度的关系
Table 3 Relationship between hardness and impact toughness solution temperature of $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ steel

固溶温度 /℃	1050	1065	1080	1095
硬度 /HRC	60.4	61.2	62.2	64.3
冲击功 /($\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	162.2	108.4	94.6	84.6

对 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢进行回火处理并测试冲击功, 可以发现当固溶温度升高后冲击功不断减小, 当 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢的固溶温度从 1050℃ 上升到 1095℃ 时, 其冲击功从 162.2 kJ/m^2 减小到了 84.6 kJ/m^2 , 还可以发现当固溶温度上升后试样的冲击韧性明显下降。

此外, 固溶温度还会对 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢基体中的 C、V、Cr 等元素的固溶量产生明显影响。在较低

的固溶温度下, 钢基体中只溶解了少量的碳化物, 此时基体中的 C、V、Cr 元素比高固溶温度下的基体碳化物含量更低。进行低温固溶处理时, 基体中将会生成许多细小的贝氏体组织, 有助于促进钢的冲击韧性提高。当固溶强化作用增大后, 钢的塑性将减小, 从而降低钢的冲击韧性。

3 结 论

(1) 随着固溶温度从 1050℃ 上升到 1095℃, $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢组织的平均晶粒尺寸会随之快速增大, 增大幅度约 30%。

(2) 在 1050℃ 与 1065℃ 下等温淬火可以生成细小的贝氏体组织, 同时生成了没有完全溶解的、均匀分布的碳化物颗粒。随着固溶温度升高到 1080℃ 与 1095℃, 贝氏体的尺寸开始不断变大, 在钢基体中形成了非常粗大的贝氏体组织, 并且产生了更多的剩余基体组织。

(3) 当固溶温度从 1050℃ 上升到 1095℃ 时, 其硬度从 HRC 60.4 增大到了 HRC 64.3, 其冲击功从 162.2 kJ/m^2 减小到了 84.6 kJ/m^2 。随固溶温度的上升, 硬度不断增大, 冲击功不断减小。

参考文献:

- [1] 何春双, 罗志强, 郭军, 等. $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 高温轴承钢滚动接触表面特征与疲劳损伤机制 [J]. 金属热处理, 2018, 43(2): 1-7.
- [2] 龚建勋, 雷建中. 热处理工艺对 $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢显微组织及断裂韧性的影响 [J]. 轴承, 2015(9): 35-37.
- [3] 沈伟毅, 李昭昆, 龚建勋, 等. $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 钢轴承套圈尺寸稳定性热处理试验 [J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(3): 27-29.
- [4] 郭淑娟, 才丽娟. 金属 Mg 对高碳轴承钢 $\text{S8Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ 碳化物及热塑性的影响 [J]. 热加工工艺, 2012, 41(4): 71-73.
- [5] Ken Yukimura. The Structure and Mechanical Properties of $\text{Cr}_4\text{Mo}_4\text{V}$ Steel Treated by PIII Carbonitriding [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(S1): 176-179.
- [6] Liang X J, Anthony J, Deardo A. Study of the influence of thermo-mechanical controlled processing on the microstructure of bainite in high strength plate Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(21): 5173-5179.
- [7] Zhou M X, Xu G, Wang L, et al. Combined effect of the prior deformation and applied stress on the bainite transformation [J]. Metals and Materials International, 2016, 22(6): 956-961.

[8] LiWS, Gao H Y, Li Z Y. Effect of lower bainite/martensite/retained austenite triplex microstructure on the mechanical properties of a low-carbon steel with quenching and partitioning process [J]. Inter-national Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2016, 23(3): 303-309

[9] Liang X, Deardo A J. A Study of the influence of thermomechanical controlled processing on the microstructure

of bainite in high strength plate steel[J]. Metallurgical Transactions A, 2014, 45(11):5173-5177

[10] 叶健熠,袁新生,邱志仁,等. 高温渗碳轴承钢 10Cr4Ni4Mo4V 的渗碳热处理 [J]. 轴承,2000(8):28-31, 45-46.

[11] 温鸣,谷臣清,冉丽萍. 12Cr4Ni4Mo4V 钢碳氮共渗、渗硼复合处理渗层组织与性能 [J]. 热加工工艺,1997,26(6):10-11.

Effect of Solid Solution Treatment on Microstructure and Mechanical Property of Ball Bearing Steel Cr4Mo4V

Wen Luchun

(Shenyang Research Institute of Coal Science Group co., Ltd., Detection branch, State key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun, Liaoning, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of Cr4Mo4V steel treated at different solid solution temperatures were observed by means of scanning electron microscope, hardness and impact toughness analyses. The results showed as the solid solution temperature was increased from 1050 °C to 1095 °C, the average grain size of Cr4Mo4V steel group was increased rapidly, with the increase rate of about 30%. At 1050 °C and 1065 °C isothermal quenching can generate tiny bainite, with uniform distribution of not completely dissolved carbide particles. As the solid solution temperature was increased to 1080 °C and 1095 °C, the size of the bainite started to grow, forming very thick bainite structure in the steel substrate. When the solid solution temperature was increased from 1050 °C to 1095 °C, the hardness was increased from HRC 60.4 to 64.3 HRC, and the impact work was decreased from 162.2 kJ/m² to 84.6 kJ/m². With the increase of solid solution temperature, the hardness was increased and the impact work was decreased continuously.

Keywords: Solid solution; Cr4Mo4V; Microstructure; Mechanical properties

////////////////////////////////////
(上接 156 页)

Effect of the Coal Type on Reaction Kinetics of Gasification and Combustion of Coal

Xu Chao, Wang Xinrui, Che Zhichao, Liu Xiaojie, Lan Chenchen, Xu Qingwei

(North China University of Science and Technology, College of Metallurgy & Energy, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: Using the high-temperature and suspended test bench for gas-solid reaction, the experiments with different proportion between bitumite and anthracite were carried out. And the reaction kinetics was analyzed by unreacted nuclear model. The result shows that, with decrease in the proportion of bitumite, the rate of gasification reaction decreases. And it also gradually decreases with the increasing of conversion rate. When the proportion of bitumite decreases from 90% to 60% the is the controlling step of gasification is a chemical reaction, In addition, with the decreasing of bitumite, the rate of combustion reaction also reduces, and it also gradually reduces with the increasing of conversion rate. When the proportion of bitumite decreases from 90% to 60% the controlling step of combustion is a chemical reaction.

Keywords: Coal type; Gasification reaction; Combustion reaction; Kinetics