

Nb 对 Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度齿轮钢组织和力学性能的影响

王 飞 王 瑞 李建新 赵成志 于宗洋 李 如
(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001)

摘 要 所研究的 Cr-Co-Ni-Mo 齿轮钢(/% : 0.05 ~ 0.15C, 4.2 ~ 6.3Ni, 14.5 ~ 16.2Co, 4.2 ~ 6.4Cr, 3.8 ~ 5.3Mo, 0.8 ~ 1.5W, 0.1 ~ 0.4V, ≤0.005S, ≤0.008P, 不加 Nb 和加 0.01 ~ 0.03Nb) 由 200 kg 真空感应冶炼 + 真空自耗重熔冶炼, 并轧成 Φ50 mm 的棒材。试样经 1 050 °C 1 h 固溶处理, 油冷, -80 °C 2 h 冷处理, 再经 560 °C 7 h 时效处理。结果表明, 加 Nb 钢中, Nb 在晶界或亚晶界以微合金碳氮化物存在, 有细晶强化作用, 加 0.01% ~ 0.03% Nb 后钢的抗拉、屈服强度和冲击功分别由无 Nb 钢的 1 850、1 598 MPa 和 22 J 提高至 2 057、1 964 MPa 和 33 J。

关键词 Cr-Co-Ni-Mo 超高强度齿轮钢 Nb 组织 力学性能

Effect of Nb on Structure and Mechanical Properties of Cr-Co-Ni-Mo Series High Strength Gear Steel

Wang Fei, Wang Rui, Li Jianxin, Zhao Chengzhi, Yu Zongyang and Li Ru
(Technology Center, Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The studied Cr-Co-Ni-Mo gear steel (/% : 0.05 ~ 0.15C, 4.2 ~ 6.3Ni, 14.5 ~ 16.2Co, 4.2 ~ 6.4Cr, 3.8 ~ 5.3Mo, 0.8 ~ 1.5W, 0.1 ~ 0.4V, ≤0.005S, ≤0.008P, non-adding Nb or adding 0.01 ~ 0.03Nb) is steelmaking by 200 kg vacuum induction melting + vacuum arc remelting process and rolling to Φ50 mm bar products. The testing specimen is solid-solution-treated at 1 050 °C for 1 h and oil cooling, and cold-treated at -80 °C for 2 h, then aging-treated at 560 °C for 7 h. Results show that in steel bearing Nb, Nb microalloy carbon-nitride exists at grain boundary or sub-grain boundary, it has the fine grain strengthening function, as a result with adding 0.01% ~ 0.03% Nb the tensile, yield strength and impact energy of steel increase respectively from non-Nb steel 1 850 MPa, 1 598 MPa and 22 J to 2 057 MPa, 1 964 MPa and 33 J.

Material Index Cr-Co-Ni-Mo High Strength Gear Steel, Nb, Structure, Mechanical Properties

C-Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度轴承齿轮钢是第三代航空齿轮钢, 以 AISI9310 钢为代表 C-Cr-Ni-Mo 系第一代航空齿轮钢, 在其基础上调整了碳化物形成元素开发了 VASCOX-2^[1] 和 EX-53^[2] 钢, 即分别提高了 Cr 含量, 并添加了 W 含量; 以 M50NiL 钢为代表 C-Cr-Ni-Mo 系第二代航空齿轮钢, 提高了其服役温度可在 350 °C 以下稳定使用^[3]; 美国 Questek 公司开发了 C-Cr-Co-Ni-Mo 系 C61 新型第三代航空齿轮钢, 增加了 C 含量、添加了大量的 Co 和提高了 Ni 含量, 通过二次硬化效应进一步增强了力学性能^[4]。

随着航空航天工业的快速发展, 在直升机主齿轮输出速度达到 25 000 r/min 以上, 涡轮轴发动机功率不断提高, 涡喷发动机的推重比不断增加, 齿轮啮

合表面温度已到 350 °C 以上^[5], 因此, 对于高强度韧性、高温、耐蚀性高性能齿轮钢的需求日益增加, 为此, 抚顺特钢对超高强度轴承齿轮钢做了大量的试制研发。

1 试验材料和热处理工艺

试验钢采用 200 kg 真空感应冶炼 + 真空自耗重熔冶炼超纯净钢锭, 真空自耗锭 Φ180 mm, 其化学成分见表 1。

真空自耗锭经 1 020 °C 保温 60 min 后轧制成 Φ50 mm 的棒材, 冲击试样坯料, 所有试样经 1 050 °C 1 h 固溶处理, 油冷, 待冷却到室温, 立即 -80 °C 2 h 冷处理, 之后经过 560 °C 7 h 时效处理, 金相试

表 1 试验钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of tested steel / %

试验钢	C	Ni	Co	Cr	Mo	W	V	S	P	Nb
SY-3	0.05 ~ 0.15	4.2 ~ 6.3	14.5 ~ 16.2	4.2 ~ 6.4	3.8 ~ 5.3	0.8 ~ 1.5	0.1 ~ 0.4	≤0.005	≤0.008	-
SY-4	0.05 ~ 0.15	4.2 ~ 6.3	14.5 ~ 16.2	4.2 ~ 6.4	3.8 ~ 5.3	0.8 ~ 1.5	0.1 ~ 0.4	≤0.005	≤0.008	0.01 ~ 0.03

样只经过1 050 ℃ 1 h 固溶处理,油冷处理。拉伸试样坯料按照国家标准 GB/T 228-2002 最终加工成 Φ5 mm,标距长 25 mm 的标准拉伸试样,用 WE300B 拉伸试验机测试室温拉伸性能,冲击试样坯料最终按照国家标准 GB/T229-2007 加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 的标准“U”型缺口冲击试样,用 JBN-300B 冲击试验机测试冲击性能,每组热处理状态取 3 个试样测试力学性能并取均值,用 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜和 Olympus Gx51 型光学显微镜观察断口形貌及其微观组织。

2 试验结果与分析

2.1 Nb 对力学性能的影响

除硬度值外,Nb 对屈服、抗拉强度、断面收缩率、冲击功均有显著的影响(图 1a,b),添加 Nb 之后的抗拉、屈服强度相比未加 Nb 的分别提高了 207 MPa、366 MPa,断面收缩率、冲击功分别提高了 8%、11 J,Nb 提高了试验钢的强度,改善了试验钢的塑性。

2.2 Nb 对试验钢冲击性能的影响

图 2 是试验钢 SY-3、SY-4 冲击断口起裂区微观形貌,SY-3 为准解理断裂形貌(图 2a),呈现“包菜”状花样,在冲击应力的作用下,位错开始滑移,形成沿晶界或者穿晶断裂;SY-4 断口分布大量均匀小韧窝(图 2b),在冲击应力的作用下,位错滑移大量开动形成显微孔洞,之后不断长大聚集形成韧窝;冲击试样在 U 型缺口根部形成裂纹,随后裂纹快速扩展使试样断裂,冲击性能迅速下降,SY-4 的冲击功的值比 SY-3 高 11 J,Nb 对试验钢的冲击断口变化形貌有显著的影响。

2.3 Nb 对试验钢微观组织的影响

图 3 是试验钢 SY-3、SY-4 淬火态的金相微观组织形貌,SY-3 奥氏体晶粒较粗大,奥氏体晶粒内分布位向不同的板条马氏体组织,其板条马氏体内具有高密度的位错,极大的增强了试验钢的强度(图 3a);相比 SY-3 微观组织,SY-4 的奥氏体晶粒得到细化(图 3b),从 SY-3 奥氏体晶粒 73 μm 细化到 SY-4 的 36 μm,Nb 使得试验钢的微观组织得到细化,提高了试验钢的力学性能,尤其是抗拉、屈服强度分别提高了 207 MPa、366 MPa。

2.4 Nb 对试验钢力学性能结果的分析

图 4 是试验钢 SY-3、SY-4 回火态的金相微观组织形貌,C-Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度轴承齿轮钢基体是板条马氏体组织(图 4a,b)。

板条马氏体具有高密度位错,极大的增强了试验钢的强度,试验钢的屈服强度高于 1 500 MPa,而试验钢的冲击功值只有 22 J,要使得试验钢的强韧匹配最佳,在不降低或者继续提高强度的前提下,改善试验钢的韧性,唯有细晶强化处理。

Nb 对原始奥氏体晶粒有显著的细化作用,在奥氏体中,Nb 有 3 种存在方式,即以固溶的形式存在、未溶第二相存在、形变诱导析出存在,在轧制过程中,试验钢因变形而存在形变储存能,原始奥氏体晶粒在轧制过程中,形变储存能为形变奥氏体的动态再结晶提供驱动力,Nb 在奥氏体晶界或亚晶界以微合金碳氮化物形变诱导析出时(图 4b),对奥氏体晶界或亚晶界起到强烈的钉扎作用,形变奥氏体的动态再结晶的迁移和长大被抑制,使得轧制变形后的奥氏体晶粒得到细化;当 Nb 在奥氏体中以固溶的

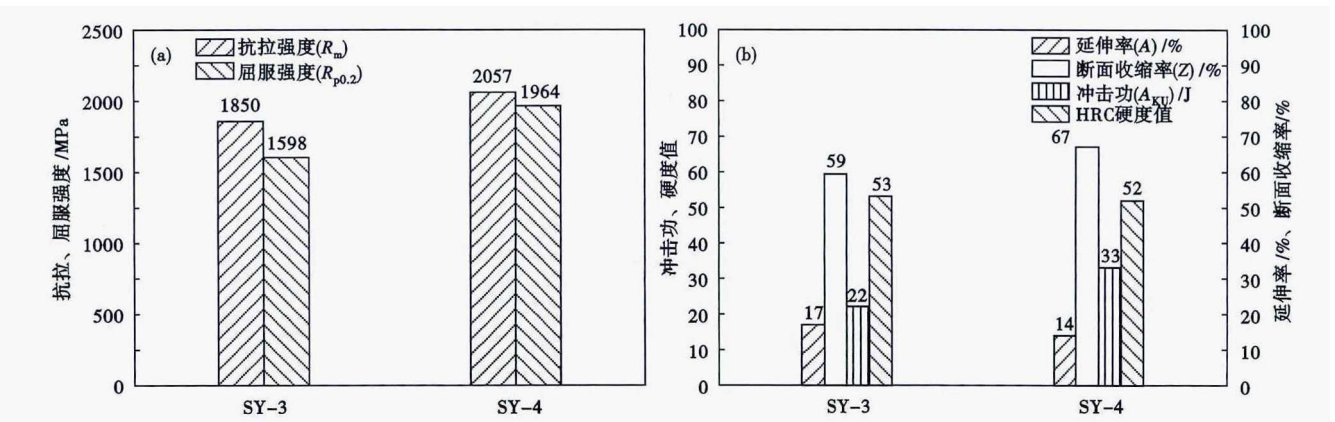


图 1 Nb 对试验钢抗拉、屈服强度(a)和延伸率、断面收缩率、冲击功和 HRC 硬度值(b)的影响,SY-3:无 Nb;SY-4:0.01% ~ 0.03% Nb

Fig.1 Effect of Nb on tensile and yield strength (a), elongation, reduction of area, impact energy and HRC hardness value (b) of SY-3: non-Nb steel and SY-4: 0.01% ~ 0.03% Nb steel

形式存在时,由于 Nb 原子半径为 0.285 nm 与铁原子半径 0.126 nm 相差较大,并且 Nb 原子的在奥氏体中的扩散系数比铁原子要大,在变形奥氏体迁移时,偏聚在晶界或亚晶界的 Nb 原子起拖曳作用,阻止晶界迁移长大,细化了轧制变形后的奥氏体晶粒,单位面积内的晶界数目增大,在轧制热变形过程中,当位错滑移到晶界时,由于晶界附近原子排列不规则,晶体畸变缺陷较多,在晶界处形成塞积阻碍位错运动,进而提高了试验钢的强度,随着细化晶粒后单位面积晶界数目的增大强化作用越大,从而使得试验钢的强度得到提高,抗拉、屈服强度分别提高了 207 MPa、366 MPa,由于细化晶粒的作用使得板条束减小及晶界面积增大,裂纹尖端穿越板条马氏体和奥氏体晶界时发生大角度转折及钝化,阻碍了裂纹扩展,改善了试验钢的塑性,试验钢的断面收缩率、冲击功分别提高了 8%、11 J,故 Nb 元素对试验钢的力学性能有显著的影响。

3 结论

(1) Nb 在 C-Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度轴承齿轮钢晶界或亚晶界以微合金碳氮化物存在。

(2) Nb 对 C-Cr-Co-Ni-Mo 系超高强度轴承齿轮钢微观组织及力学性能有细晶强化作用,从 SY-3 奥氏体晶粒 73 μm 细化到 SY-4 的 36 μm ,抗拉、屈服强度、冲击功分别提高到 2 057 MPa、1 964 MPa、33 J。

参考文献

- [1] Townsend D P and Zaretsky E V. Endurance and Failure Characteristics of Modified Vasco X-2, CBS 600 and AISI 9310 Spur Gears [J]. Journal of Mechanical Design, 1980, 103(2): 506-515.
- [2] Burd W E. A Carburizing Gear Steel for Elevated Temperatures [J]. Metal Progress, 1985, 127: 33-35.

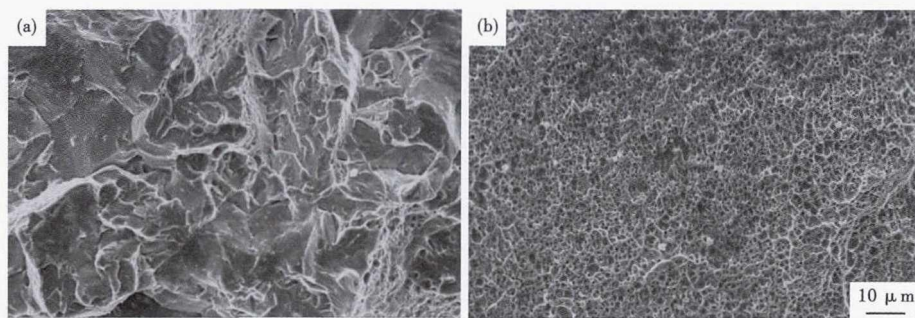


图 2 无 Nb(a)和 0.01% ~0.03% Nb 钢(b)冲击断口形貌
Fig. 2 Morphology of impact fracture of non-Nb steel (a) and 0.01% ~0.03% Nb steel (b)

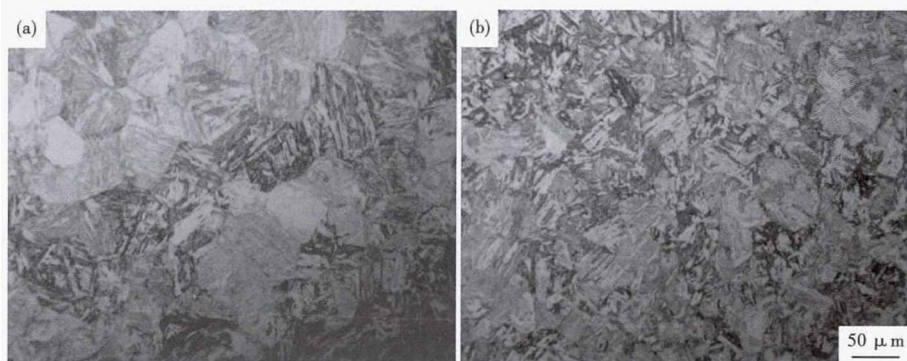


图 3 淬火无 Nb 钢(a)和 0.01% ~0.03% Nb 钢(b)的组织形貌
Fig. 3 Morphology of structure of quenched non-Nb steel (a) and quenched 0.01% ~ 0.03% Nb steel (b)

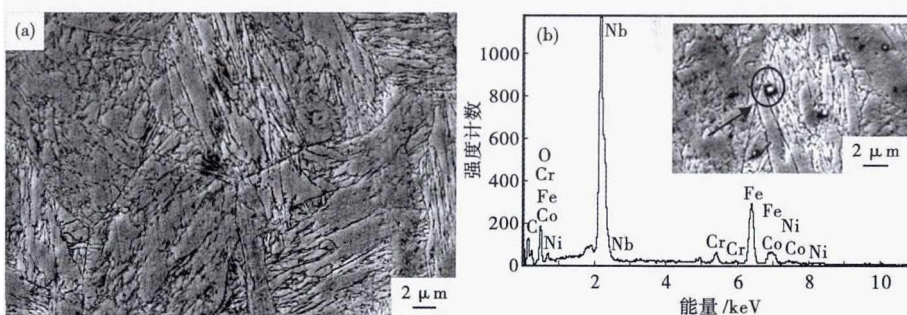


图 4 回火无 Nb 钢(a)和回火 0.01% ~0.03% Nb 钢(b)的组织形貌和能谱图
Fig. 4 Morphology of structure of tempered non-Nb steel (a) and tempered 0.01% ~0.03% Nb steel (b) and EDS

- [3] Boehmer H J, Ebert F J and Trojahn W. M50NiL Bearing Material-Heat Treatment, Material Properties and Performance in Comparison with M50 and RBD [J]. Lubrication Engineering, 1992(1): 28-30.
- [4] 周敏. 高强高韧性渗碳钢 C61 的热变形行为及强化机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [5] 赵振业. 航空高性能齿轮钢的研究与发展[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 148-157.

王飞(1989-),男,硕士(2016年钢铁研究总院/昆明理工大学),工程师,2013年长春工业大学(本科)毕业,二次硬化超高强度钢研究。E-mail: w.fwdd@163.com

收稿日期: 2018-01-17