

差异化控冷对 C70S6 钢胀断连杆微合金碳氮化物析出相的影响

王占花¹, 惠卫军², 赵秀明³, 程 龙⁴

(1. 苏州经贸职业技术学院 机电技术学院, 江苏 苏州 215009; 2. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044;
3. 南京工程学院 材料工程学院, 江苏 南京 211167; 4. 浙江亚太机电股份有限公司, 浙江 杭州 311201)

摘要: 为了推进非调质钢 C70S6 的国产化进程, 明确 C70S6 钢生产胀断连杆时冷却速度工艺控制问题, 分析讨论了冷却速度对 C70S6 钢中微合金碳氮化物析出的影响。通过利用金相显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM) 及 X 射线衍射仪 (XRD) 等设备, 采用物理-化学相分析方法, 对热锻后空冷及风冷国产 C70S6 非调质钢胀断连杆工字筋部位微合金碳氮化物析出相的组成及粒度分布等微观特征进行观察, 并量化了微合金碳氮化物 M(CN) 析出相的析出强化行为。果表明, 冷却速度为 3 和 4 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 微合金碳氮化物析出相均为面心立方结构, 名义化学式分别为 $(\text{V}_{0.896}\text{Cr}_{0.070}\text{Mo}_{0.034})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.741})$ 和 $(\text{V}_{0.927}\text{Cr}_{0.050}\text{Mo}_{0.024})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.740})$; 析出相的尺寸分布集中在 1~18 nm; 析出相对屈服强度的贡献量分别约为 122.0 和 127.6 MPa; 冷却速度加快, 微合金碳氮化物析出相的尺寸得到一定的细化, 但效果不明显。

关键词: C70S6 非调质钢; 冷却速度; 胀断连杆; 析出相; 析出强化

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.004

中图分类号: TG142.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0027-07

Influence of differential cooling control on microalloy carbonitride precipitated phase for bulging fractured connecting rod of C70S6 steel

Wang Zhanhua¹, Hui Weijun², Zhao Xiuming³, Cheng Long⁴

(1. School of Mechanical and Electronic Technology, Suzhou Institute of Trade & Commerce, Suzhou 215009, China;
2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
3. School of Materials Science and Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;
4. Zhejiang Asia Pacific Mechanical and Electrical Co., Ltd., Hangzhou 311201, China)

Abstract: In order to promote the localization process of non-quenched and tempered steel C70S6 and clarify the problem of cooling speed process control during the production of C70S6 steel bulging fractured connecting rod, the influence of cooling speed on the precipitation of microalloy carbonitride in C70S6 steel was analyzed and discussed. Then, through the use of metallographic microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD) and other equipments, using physical-chemical phase analysis method, the microscopic characteristics such as composition and particle size distribution of the microalloy carbonitride precipitated phase in the I-beam position of domestic C70S6 non-quenched and tempered steel bulging fractured connecting rod by air cooling and wind cooling phase after hot forging were observed, and the precipitation strength behavior of microalloy carbonitride M(CN) precipitated phase was quantified. The results show that when the cooling speed is 3 and 4 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, the microalloy carbonitride precipitated phase are all face-centered cubic structures, and the nominal chemical formulas are $(\text{V}_{0.896}\text{Cr}_{0.070}\text{Mo}_{0.034})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.741})$ and $(\text{V}_{0.927}\text{Cr}_{0.050}\text{Mo}_{0.024})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.740})$. The size distribution of the precipitated phase is concentrated in 1~18 nm, and the contributions of precipitated phase to yield strength are about 122.0 and 127.6 MPa, respectively. When the cooling speed is accelerated, and the size of microalloy carbonitride precipitated phase is refined to a certain extent, but the effect is not obvious.

Key words: C70S6 non-quenched and tempered steel; cooling speed; bulging fractured connecting rod; precipitated phase; precipitation strength

胀断连杆以高精度、高质量、低成本、绿色化

等独特优势备受关注^[1-4]。目前, 国内外最普遍采用的胀断连杆用钢为 C70S6 非调质钢, 在高碳的基础上添加微量 V、N 等元素, 保证材料在胀断过程中呈现脆性断裂形貌^[4-5]。国内一般采用进口材料, 为推进连杆国产化及提升产品质量, 国内提出差异化控制连杆工艺, 使连杆的大头与工字筋部位的强

收稿日期: 2022-05-02; 修订日期: 2022-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0300100); 苏州经贸职业技术学院 2022 年校级课题 (YJ-ZX2208)

作者简介: 王占花 (1989-), 女, 博士, 讲师

E-mail: 16116344@bjtu.edu.cn

度差异化,在服役过程中受力部位与需机加工部位的强度得到差异控制^[6]。文献 [6] 研究了锻后不同冷却速度对中碳高钒非调质钢 37MnSiVS 组织及性能的影响,提出控制锻后冷却速度可以控制组织及第二相粒子的析出情况,从而实现对锻件硬度及强度的差异化控制;文献 [7] 和文献 [8] 中研究了两种不同钒含量的胀断连杆用中碳非调质钢锻造后冷却碳化物的析出情况,并讨论了其强化行为;文献 [9] 研究了冷却速度对 Nb 微合金钢组织及性能的影响,提出增加冷却速度可以提高 Nb 微合金的韧性等。而 C70S6 钢胀断连杆中微合金碳氮化物(简称为 M(CN))的情况尚未明确。因此,本实验拟探究差异化控冷对 C70S6 钢胀断连杆碳化物行为的影响,对比研究采用不同冷却方式的连杆中碳化物的形态、分布及对强度的贡献量,为 C70S6 钢胀断连杆国产化、批量化提供理论和实验依据。

1 实验材料与方法

实验对象为两种锻造工艺生产的国产 C70S6 钢胀断连杆锻造毛坯件(图 1),原材料由国内某钢铁公司自主研发,锻造实验由南京汽车锻造有限公司完成,连杆的化学成分见表 1。两种连杆锻造工艺的差别主要为终锻后的冷却方式,工艺 1 为锻后自然冷却,后文简称空冷,工艺 2 为锻后吹风冷却,后文简称风冷,具体的锻造工艺参数见表 2。



图 1 连杆锻造毛坯
Fig. 1 Forging blank of connecting rod

表 1 实验用 C70S6 钢的化学成分(%,质量分数)
Table 1 Chemical compositions of C70S6 steel for experiment(%,mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Al	N	Fe
0.70	0.17	0.55	0.011	0.065	0.15	0.036	0.003	1.25×10^{-4}	余量

在连杆工字筋部位制备金相试样,分别用光学显

表 2 连杆锻造工艺参数
Table 2 Process parameters of connecting rod forging

工艺	加热温度/ ℃	终锻温度/ ℃	冷却方式	冷却至 600℃ 时 工字筋部位的冷却 速度/(℃·s ⁻¹)
1	1200	1000	空冷	3.3
2	1200	1000	风冷至 600℃ 后 空冷	4.0

微镜(Optical Microscope, OM, 型号为 XJP-3A)和扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 型号为 JSM-6360LV)对组织进行观测并拍照,选用 Image-Proe-PlusV6.0 图像分析软件检测 15 张 OM 照片中的铁素体含量及珠光体片层间距,最后数据取均值。

在连杆工字筋部位制取尺寸为 80 mm×30 mm×5 mm 的光滑样块,并用化学方法萃取碳化物。借助 APD-10 型 X 射线衍射仪,分析析出相结构,采用光谱仪 ICP-AES 进行定量相分析。在连杆工字筋部位制备光滑短拉伸试样(原始标距 $l_0=5d_0$,原始平行长度直径 $d_0=\Phi 6$ mm),并在拉伸机上检测材料室温下的抗拉强度 R_m 、屈服强度 R_{eL} 、伸长率 A 和收缩率 Z 等性能参数,选用 3 根平行试样,最后数据取均值。

在显微硬度仪(MF700)上测定腐蚀后金相样品组织硬度,压力选择为 0.5 kg,加载时间为 5 s,每组样品测试 10 个点后取均值。

2 实验结果与讨论

2.1 冷却速度对组织的影响

图 2 为连杆工字筋部位的金相组织及扫描电镜下的片层间距形貌,表 3 为微观组织的相关参数。结合图 2 与表 3 可知,在空冷与风冷工艺下,材料组织均为珠光体(Pearlite, P)+铁素体(Ferrite, F),且冷却速度加快,晶粒尺寸略有减小,铁素体 F 的含量有所降低,珠光体 P 的片层间距减小。这主要是由于锻后冷却速度增加,材料过冷度增大,铁素体 F 和珠光体 P 的形核率变大,且 C 曲线在铁素体 F 区的停留时间较短^[9],使得铁素体 F 来不及形核或者已形核但来不及长大就发生了珠光体 P 转变,致使先共析铁素体析出不充分,导致先共析铁素体的含量降低,珠光体含量较高;同时,随着冷却速度增加,过冷度增大,在相同的温度下冷却时间缩短,缩短了奥氏体中碳原子的扩散时间,使得奥氏体中的碳浓度增加,而且温度降低,碳原子的活动能力减弱,扩散距离缩短,使得珠光体的层片间距减小^[10-12]。

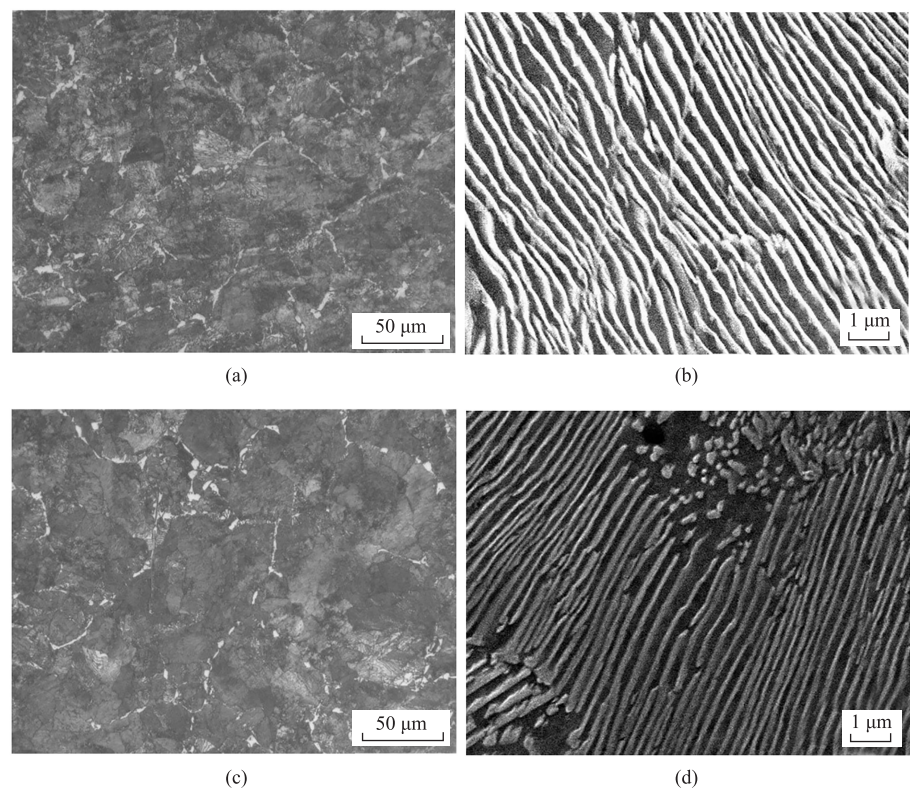


图 2 连杆工字筋部位的金相组织及 SEM 微观组织
(a) 空冷, 金相组织 (b) 空冷, SEM 微观组织 (c) 风冷, 金相组织 (d) 风冷, SEM 微观组织
Fig. 2 Metallographic structures and SEM micrographs in I-beam position of connecting rod
(a) Air cooling, metallographic structure (b) Air cooling, SEM microstructure (c) Wind cooling, metallographic structure
(d) Wind cooling, SEM microstructure

表 3 实验钢的微观组织参数

Table 3 Microstructural parameters of experimental steel				
工艺	组织	铁素体体积 分数%	珠光体片层 间距/ μm	晶粒度
空冷	珠光体+铁素体	2.13	0.23	6.5
风冷	珠光体+铁素体	1.94	0.18	7.0

2.2 微合金碳氮化物 M(CN) 析出相分析

2.2.1 析出相结构

图 3 为电解萃取析出相粉末的 XRD 衍射图谱。由图 3a 可知萃取物里主要为渗碳体 M_3C 相。将 M_3C 相溶解, 收集不溶粉末, 再进行 XRD 衍射分析, 可得到 $\text{M}(\text{CN})$ 的衍射谱峰, 见图 3b。由于 $\text{M}(\text{CN})$ 的含量少, 且尺寸细小, 导致在图 3a 中只呈现 M_3C 相, 未见明显的 $\text{M}(\text{CN})$ 的衍射谱峰。由表 4 可知, 空冷与风冷材料中的析出相主要为 M_3C 和 $\text{M}(\text{CN})$, 其中: M_3C 为正交晶系, 其点阵常数一致, 并与 Fe_3C 的点阵常数 (0.4523, 0.5089, 0.67433) 十分相近^[13], 因此判断 M_3C 为 Fe_3C ; 空冷、风冷的 $\text{M}(\text{CN})$ 相均为面心立方晶系, 其中风

冷的点阵常数比空冷的小, 更接近矾的碳化物 VC 的点阵常数 (0.4182), 由于风冷的冷却速度快、晶包收缩大, 故点阵常数比空冷稍小。

2.2.2 析出相定量分析

对萃取沉淀, 采用 ICP-AES 测定各元素的含量, 测得两种工艺材料中 $\text{M}(\text{CN})$ 相和 M_3C 相中各元素占合金的质量分数及占相量的原子分数见图 4 (其中, C^* 为 C 元素的计算值, Σ 为求和结果)。风冷时, $\text{M}(\text{CN})$ 相中总析出量的质量分数为 0.03%, 比空冷时的 0.02% 多 50%。空冷时, M_3C 相中各元素总的质量分数为 7.54%, 比空冷时的 6.78% 多 11%。且同一个冷却速度时, $\text{M}(\text{CN})$ 的析出量远远小于 M_3C 的析出量, 足以说明图 3a 仅显示 M_3C 峰值的原因。

根据图 4 所示数据, 计算得到空冷、风冷中 $\text{M}(\text{CN})$ 相的名义化学式分别为 $(\text{V}_{0.886}\text{Cr}_{0.070}\text{Mo}_{0.034})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.741})$ 、 $(\text{V}_{0.927}\text{Cr}_{0.050}\text{Mo}_{0.024})(\text{C}_{0.259}\text{N}_{0.740})$ 。可以看出, 析出相 $\text{M}(\text{CN})$ 主要以 $\text{V}(\text{CN})$ 为主, 随着冷却速度加快, 晶包中 V 原子的个数增多, $\text{V}(\text{CN})$ 的析出量增多。

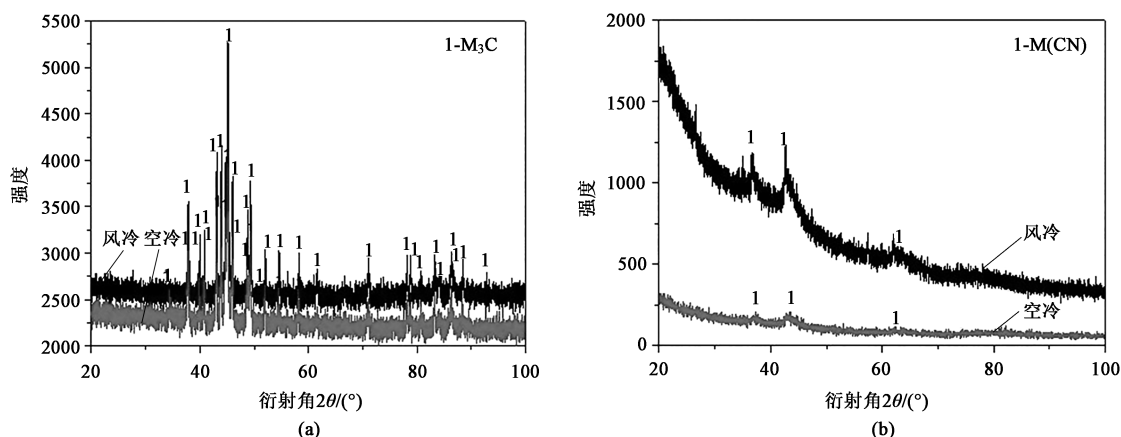


图 3 实验钢中析出相的 XRD 图谱

(a) 萃取物 (b) 去除 M_3C 后

Fig. 3 XRD spectrums of precipitated phase in experimental steel

(a) Extraction (b) After removal of M_3C

表 4 析出相的 XRD 衍射分析结果

Table 4 Analysis results of XRD diffraction for precipitated phases

工艺	析出相类型	晶系	点阵常数/nm
空冷	M_3C	正交晶系	$a_0 = 0.4483 \sim 0.4510$, $b_0 = 0.5033 \sim 0.5080$, $c_0 = 0.6730 \sim 0.6737$
	$M(CN)$	面心立方	$a_0 = 0.423 \sim 0.424$
风冷	M_3C	正交晶系	$a_0 = 0.4483 \sim 0.4510$, $b_0 = 0.5033 \sim 0.5080$, $c_0 = 0.6730 \sim 0.6737$
	$M(CN)$	面心立方	$a_0 = 0.416 \sim 0.417$

注：点阵常数指晶胞的边长。在三维空间中晶格一般有 3 个点阵常数，分别用 a 、 b 和 c 表示。立方晶体结构中 3 个常数相等，仅用 a 表示。表 4 中数据为检测数据，将检测得到的点阵常数分别表示为 a_0 、 b_0 和 c_0 。

钢中钒存在的形式有固溶态的 V 、 $M(CN)$ 中的 V 、 M_3C 中的 V 。微合金非调质钢中加入微量元素，其主要目的是发挥析出强化作用，同时利用析出相的扎钉晶界从而阻止晶粒长大，起到细化晶粒的作用。将 $M(CN)$ 中钒的比例视为钒利用率的高低^[6-7]。图 5 为钢中钒的分布情况对比图，图 5 中冷却速度加快，析出相 $M(CN)$ 中的 V 含量增多，钒的有效利用率增大。

图 6 为 $M(CN)$ 的粒度分布情况，可以看出， $M(CN)$ 中尺寸为 1~5 nm 的颗粒占的比重最大，风冷时占合金总质量的 0.0103%，空冷时为 0.0098%。颗粒的尺寸主要分布在 1~18 nm 之间，在两种冷却速度下其比重均超过 60%。而且图 6 中风冷材料中各尺寸析出相的质量分数均比空冷大（5~10 nm 尺寸的析出相除外）。可以得到，随

着冷却速度加快，析出相的颗粒得到一定的细化，与胡志力等^[14]的研究结果一致。

2.2.3 相的沉淀强化效果

本文沉淀强化参考国内外的强化研究，运用 Orowan 机制强化，预测钢铁材料中第二相的沉淀强化效果，从而获得第二相沉淀强化对屈服强度的增量 $\Delta\sigma_p$ ^[7-8,12]。

$$\Delta\sigma_p = \frac{Gb}{\pi K} \times \frac{\sqrt{f_v}}{(0.854 - 1.2\sqrt{f_v})d} \times \ln\left(\frac{1.2d}{2b}\right) \quad (1)$$

式中： G 为切变弹性模量，MPa，一般铁基材料为 80650 MPa^[7]； b 为位错柏氏矢量的绝对值，为 0.24824 nm^[7]； K 为体积弹性模量，混合位错中 $\frac{1}{K} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{1-\nu}\right)$ ； ν 为泊松比，为 0.291^[7]； f_v 为第二相的体积分数， $f_v = f_m \times \frac{\rho_{Fe}}{\rho_p}$ ； f_m 为析出相的质量分数； ρ_{Fe} 为铁的理论密度^[7]，一般为 7.875 g·cm⁻³； ρ_p 是第二相的理论密度，根据空冷工艺、风冷工艺第二相碳化合物的名义化学式，推算其理论密度相近，约为 5.998 g·cm⁻³； d 为第二相颗粒的平均直径，nm。

根据式 (1)，计算出的风冷、空冷工艺中 $M(CN)$ 相的沉淀强化效果见表 5。从表 5 中也可以看出，尺寸为 1~5 nm 的颗粒数量最多，对屈服强度的增量效果最明显。对计算得到的不同尺寸的屈服强度增量执行均方根叠加计算，得到空冷的累计强化效果为 122.0 MPa、风冷的累计强化效果为 127.6 MPa。

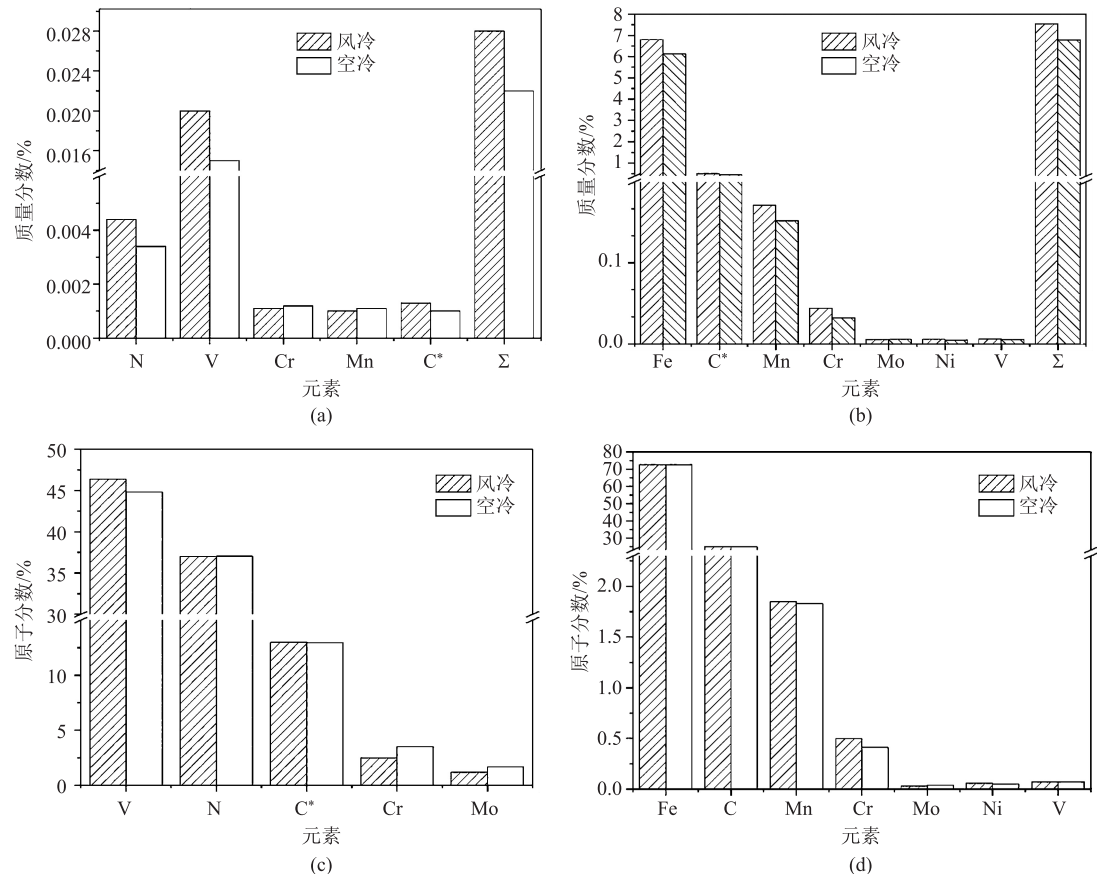


图 4 各元素在析出相中的质量分数分布及原子分数分布
(a) M(CN) 相, 质量分数 (b) M₃C 相, 质量分数 (c) M(CN) 相, 原子分数 (d) M₃C 相, 原子分数
Fig. 4 Mass fraction distributions and atomic fraction distributions of various elements in precipitated phases
(a) M(CN) phase, mass fraction (b) M₃C phase, mass fraction (c) M(CN) phase, atomic fraction (d) M₃C phase, atomic fraction

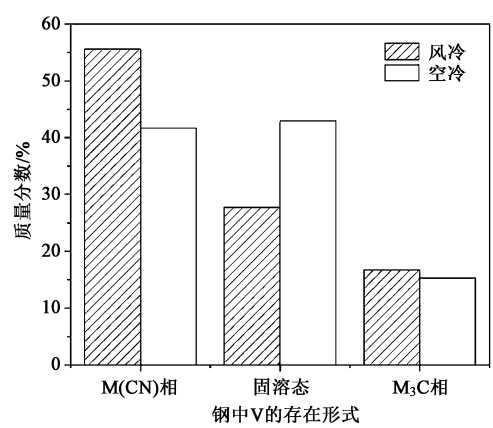


图 5 实验钢中钒的分布情况
Fig. 5 Distributions of V in experimental steel

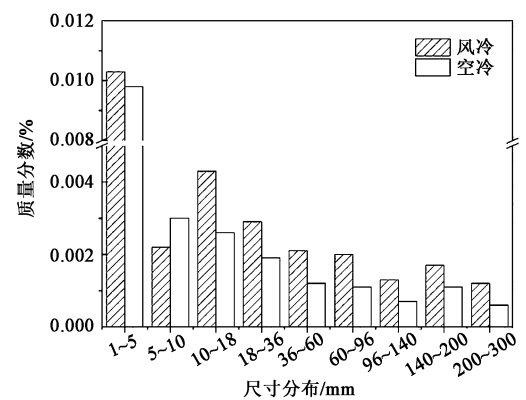


图 6 实验钢中 M(CN) 相的粒度分布情况
Fig. 6 Particle size distributions of M(CN) phase in experimental steel

2.3 力学性能

表 6 为材料的力学性能数据。风冷状态材料的抗拉强度 R_m 比空冷状态材料高 37 MPa, 屈服强度 R_{el} 高 46 MPa, 屈强比稍大, 两种状态材料的伸长率 A 与收缩率 Z 相当。

珠光体-铁素体型非调质钢的力学性能受材料化学成分、晶粒尺寸、铁素体含量、珠光体片层间距、第二相沉淀等因素的影响^[13]。本实验约定在同一材料、相同的锻造变形量、不同的锻后冷却速度条件下分析材料的组织性能关系。由实验数据得到, 锻后冷却速度加快, 材料的金相组织更细, 铁素体

表 5 沉淀强化效果的计算结果

Table 5 Calculation results of precipitation strength effect

尺寸分布/ nm	空冷				风冷			
	$f'_m/\%$	$f_m/\%$	$f_v/\%$	$\Delta\sigma_p/\text{MPa}$	$f'_m/\%$	$f_m/\%$	$f_v/\%$	$\Delta\sigma_p/\text{MPa}$
1~5	44.6	0.010	0.013	74.6	36.8	0.010	0.014	76.5
5~10	13.6	0.003	0.004	22.0	7.9	0.002	0.003	18.9
10~18	11.6	0.003	0.003	8.9	15.3	0.004	0.006	11.5
18~36	9.0	0.002	0.003	7.1	10.3	0.003	0.004	8.6
36~60	5.2	0.001	0.002	3.5	7.7	0.002	0.003	4.8
60~96	5.3	0.001	0.002	2.4	6.9	0.002	0.003	3.1
96~140	2.8	0.001	0.001	1.2	4.6	0.001	0.002	1.8
140~200	5.2	0.001	0.001	1.2	6.3	0.002	0.002	1.5
200~300	2.7	0.001	0.001	0.6	4.2	0.001	0.002	0.9
累计	100	0.022	0.029	122.0	100	0.028	0.037	127.6

注： f'_m 为不同尺寸的析出相占总析出相的质量分数，%； f_m 为不同尺寸的析出相占合金的质量分数，%。

表 6 实验钢的力学性能

Table 6 Mechanical properties of experimental steel

工艺	R_m/MPa	R_{el}/MPa	屈强比	$A/\%$	$Z/\%$	硬度/HV
空冷	973	582	0.60	12.7	24.8	291
风冷	1010	628	0.62	12.5	25.9	304

的含量更低，珠光体的片层间距更细，第二相的析出量增多，材料强度提高，硬度增大。

本文从析出强化的角度计算了空冷、风冷时析出物的强化差异，小于力学性能测出的强化差异。需继续研究晶粒尺寸差异、铁素体含量、珠光体片层间距、固溶量差异等对强度的影响，建立一个普适于预测非调质钢强度的数学模型，仍需大量的研究工作。

3 结论

(1) C70S6 钢胀断连杆的锻造温度为 1200 ℃、终锻温度为 1000 ℃、工字筋部位的空冷的冷却速度为 3 ℃ · s⁻¹、风冷的冷却速度为 4 ℃ · s⁻¹ 时，金相组织为珠光体+断续铁素体；冷却速度加快，铁素体含量降低，碳化物颗粒细化。

(2) 工字筋部位的空冷的冷却速度为 3 ℃ · s⁻¹、风冷的冷却速度为 4 ℃ · s⁻¹ 时，析出碳化物的粒度分布主要集中在 1~18 nm。

(3) 工字筋部位的空冷的冷却速度为

3 ℃ · s⁻¹、风冷的冷却速度为 4 ℃ · s⁻¹ 时，锻态 C70S6 钢材料析出的 M(CN) 相的名义化学式分别为 (V_{0.896}Cr_{0.070}Mo_{0.034}) (C_{0.259}N_{0.741}) 和 (V_{0.927}Cr_{0.050}Mo_{0.024}) (C_{0.259}N_{0.740})，对材料屈服强度的增量分别为 122.0 和 127.6 MPa。

(4) 冷却速度加快，微合金碳氮化物析出相的尺寸得到一定的细化，但不明显。

参考文献：

[1] Dhole V J, Kharde R R, Gujar U. Fracture split connecting rod for automotive engines [J]. International Journal of Engineering Research and Development, 2012, 4 (8): 37-41.

[2] 张朝磊, 胡佳丽, 李戡, 等. 胀断连杆用非调质钢 C70S6 的材料特性及组织性能控制 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S1): 444-447.

Zhang C L, Hu J L, Li J, et al. Characteristic and properties control of air-cooled forging steel C70S6 for fracture splitting connecting rod [J]. Materials Reports, 2020, 34 (S1): 444-447.

[3] 韩常海, 王志利, 施进卿. 胀断连杆用非调质钢 C70S6BY 产品研发 [J]. 特殊钢, 2021, 42 (6): 55-57.

Han C H, Wang Z L, Shi J Q. Research and development of non-quenched and tempered steel C70S6BY for expanding fracture connecting rod [J]. Special Steel, 2021, 42 (6): 55-57.

[4] Gu Z, Yang S, Ku S, et al. Fracture splitting technology of automobile engine connecting rod [J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25 (9-10): 883-887.

[5] 刘攀, 魏元生, 李卫钊, 等. 非调质钢连杆材料国产化应用开发 [J]. 热加工工艺, 2014, 43 (22): 97-99.

Liu P, Wei Y S, Li W Z, et al. Development and application of localization of non-quenched and tempered connecting rod [J]. Hot Working Technology, 2014, 43 (22): 97-99.

[6] 陈思联, 惠卫军, 邵成伟, 等. 控制冷却对中碳高钒非调质钢组织性能的影响 [J]. 钢铁, 2015, 50 (8): 77-82.

Chen S L, Hui W J, Shao C W, et al. Effect of controlled cooling on microstructure and properties of medium-carbon high-vanadium microalloyed steel [J]. Iron & Steel, 2015, 50 (8): 77-82.

[7] 陈思联, 赵晓丽, 惠卫军, 等. 胀断连杆用中碳非调质钢的析出强化行为 [J]. 钢铁, 2015, 50 (7): 77-83.

Chen S L, Zhao X L, Hui W J, et al. Precipitation behavior of medium-carbon steel for fracture splitting connecting rod [J]. Iron & Steel, 2015, 50 (7): 77-83.

[8] 巫宇峰, 惠卫军, 陈思联, 等. 钒对中碳非调质钢组织性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2016, 28 (11): 56-62, 73.

Wu Y F, Hui W J, Chen S L, et al. Influence of vanadium on microstructure and properties of medium carbon forcing mechanical steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28 (11): 56-62, 73.

[9] Shanmugam S, Ramiseti K N, Misra R D K, et al. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of Nb-mi-

- croalloyed steels [J]. Material Science and Engineering A, 2007, 460 (1): 335-343.
- [10] 王占花, 李慎, 葛宇, 等. C70S6 非调质钢锻造连杆的组织力学性能和胀断性能研究 [J]. 热加工工艺, 2015, 44 (19): 39-43.
- Wang Z H, Li S, Ge Y, et al. Research on microstructure and mechanical properties and fracture splitting properties of forged connecting rod of C70S6 non-quenched and tempered steel [J]. Hot Working Technology, 2015, 44 (19): 39-43.
- [11] 黄东, 吴明友, 文豪. 多向锻造机械轴承钢的组织与性能 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 68-73.
- Huang D, Wu M Y, Wen H. Microstructure and properties of mechanical bearing steel in multi-directional forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 68-73.
- [12] 杨超飞, 吴庆辉, 陈颖, 等. 钕对高碳钢连续冷却过程中相变和珠光体片层间距的影响 [J]. 机械工程材料, 2013, 37 (3): 16-20.
- Yong Q L. Iron and Steel Materials in the Second Phase [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [13] 雍歧龙. 钢铁材料中的第二相 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- Yong Q L. Iron and Steel Materials in the Second Phase [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [14] 胡志力, 程彬洋, 魏鹏飞, 等. 7075 铝合金热成形析出相演化规律和强度预测模型 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (9): 105-111.
- Hu Z L, Cheng B Y, Wei P F, et al. Evolution laws of precipitated phases and strength prediction model for 7075 aluminum alloy during hot forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (9): 105-111.

“第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会” 征文通知

“第十八届全国塑性工程学术年会暨第十届全球华人塑性技术研讨会”(以下简称“年会”)将于2023年10月20-22日在武汉市举行,大会主题为“提高自主创新能力 扎实推进产业基础再造工程”。本届年会将邀请国内外高等院校、科研院所和知名企业的资深专家做主旨报告,同时,还将安排分组学术交流。热忱欢迎海内外广大同仁踊跃投稿、积极参会。

一、组织单位

指导单位: 中国机械工程学会、中国机械科学研究总院集团有限公司

主办单位: 中国机械工程学会塑性工程分会

承办单位(排名不分先后): 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、武汉理工大学、华中科技大学、太原理工大学、山东大学、精密成形国家工程研究中心

协办单位(排名不分先后): 征集中

支持媒体: 《塑性工程学报》、《锻压技术》杂志

二、征文范围

- | | | | |
|------------|-------------|-------------|-----------------|
| ●金属塑性成形理论 | ●塑性成形技术与装备 | ●模具设计与制造技术 | ●材料与成形性能 |
| ●工业加热技术及设备 | ●锻后热处理技术及设备 | ●摩擦与润滑 | ●测试技术与装备 |
| ●增材制造 | ●智能制造 | ●计算机模拟及仿真应用 | ●其他与塑性工程相关或交叉领域 |

三、论文提交时间及方式

网上投稿截止时间: 2023年6月1日

投稿网址: <https://conference.cstp-cmes.org.cn/?siteid=10241>

四、塑性工程分会秘书处联系方式

地址: 北京市海淀区学清路18号711房间 邮编: 100083

电话: 010-62920654, 82415084

联系人: 秦思晓(15201461873), 周林(13811919643), 金红(13911560582)

E-mail: duanya@cmes.org

中国机械工程学会塑性工程分会