

锻造

含氮 CoCrMo 合金锻造工艺

王 雷¹, 顾怀章¹, 孙岳来², 邓 军², 马步洋²

(1. 凯里学院 理学院, 贵州 凯里 556011; 2. 美特林科特殊合金股份有限公司, 江苏 南京 211153)

摘要: 通过热包覆保温方法, 使用快锻机对含氮 CoCrMo 合金电渣锭进行了开坯锻造试验, 研究了在 1150 °C 始锻温度时该合金在热包覆保温情况下的可锻性。试验采用摔圆、拔长的锻造方法, 对含氮 CoCrMo 合金圆棒坯料进行两端分段锻造。试验结果表明: 含氮 CoCrMo 合金在 1150 °C 热包覆保温 2.5 h 后采用分段锻造, 获得的材料屈服强度为 623.9 MPa、抗拉强度为 933.9 MPa、伸长率为 20.3%、硬度为 27.5 HRC, 各项力学性能均满足要求; 合金中的氮化物提高了材料的性能及晶粒细化程度, 锻造后锻料的晶粒度不大于 5.5 级, 晶粒度满足要求。通过热包覆分段锻造方法, 成功对含氮 CoCrMo 合金电渣锭进行了锻造。

关键词: 含氮 CoCrMo 合金; 分段锻造; 热包覆保温; 力学性能; 氮化物

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.001

中图分类号: TG319

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0001-05

Forging process for N-containing CoCrMo alloy

Wang Lei¹, Gu Huaizhang¹, Sun Yuelai², Deng Jun², Ma Buyang²

(1. School of Science, Kaili University, Kaili 556011, China; 2. Metalink Special Alloys Corp., Nanjing 211153, China)

Abstract: Through the method of hot wrap and heat preservation, the blanking and forging test of N-containing CoCrMo alloy electroslag ingot was carried out by rapid forging machine, and the malleability of the alloy under the condition of hot wrap and heat preservation at the initial forging temperature of 1150 °C was studied. Then, the forging method of rounding and stretching was adopted in the test, and the two ends of N-containing CoCrMo alloy bar blank were forged in sections. The test results show that the N-containing CoCrMo alloy is forged in sections after being hot wrapped at 1150 °C for 2.5 h, its yield strength is 623.9 MPa, tensile strength is 933.9 MPa, elongation is 20.3%, and hardness is 27.5 HRC, and all mechanical properties meet the requirements. The nitrides in the alloy is beneficial to improve the properties of material and the grain refinement degree. After forging, the grain size of N-containing CoCrMo alloy after forging is not greater than grade 5.5, and the grain size meets the requirements. Thus, the electroslag ingot of N-containing CoCrMo alloy is successfully forged by the method of hot wrap and sectional forging.

Key words: N-containing CoCrMo alloy; sectional forging; hot wrap and heat preservation; mechanical properties; nitrides

随着我国社会经济的发展及老龄化现象, 各种骨骼、关节疾病增多, 患者对医疗需求的增加促进了骨骼与关节移植外科的发展。常用的医用金属材料包括不锈钢、钴基合金和钛基合金。几种医用合金中: 不锈钢在人体中的耐蚀性较差, 受体液腐蚀后释放出高毒性镍离子, 易引起炎症; 钛合金较易磨损^[1]; 钴基合金因其钝化膜性能更稳定, 耐腐蚀性能较不锈钢好, 且医用金属材料中钴基合金的耐

磨性最好, 所以, 钴基合金更适用于关节部位。

CoCrMo 合金具备了钴基合金的所有优点。CoCrMo 合金早期通过铸造方法制造并应用于牙科医疗领域, 作为牙齿植入后, 表现出优异的耐蚀、耐磨性能, 成为了最可靠的生物相容性金属材料。相关研究表明, CoCrMo 合金无细胞毒性, 有良好的血液相容性, 对口腔黏膜无刺激性并无短期全身毒性^[2-4]。骨科移植材料中, CoCrMo 合金稳定、可靠^[5]、无毒副作用, 而且具有良好的耐疲劳性和抗拉强度, 适合应用于髋关节等服役期长、不会骨折、需耐应力疲劳的部位。CoCrMo 合金在人体组织液中能够始终处于钝态, 很少发生腐蚀现象, 只要未磨损即可以终身不置换^[6]。而且, CoCrMo 合金材料在人体体液环境中的耐腐蚀性能、抗磨损性能、抗生

收稿日期: 2021-04-08; **修订日期:** 2021-07-06

基金项目: 凯里学院博士启动项目 (BS201814); 省教育厅自然科学基金项目 (黔教合 KY 字 [2020] 069); 国家自然科学基金资助项目 (31760191)

作者简介: 王 雷 (1970-), 男, 博士, 副教授

E-mail: 2015163582@qq.com

物腐蚀性能等综合性能要优于其他金属材料^[7-9]。但早期使用铸造 CoCrMo 合金制作髋关节, 长期内会出现磨损腐蚀问题, 不能满足长期服役要求, 而使用锻造 CoCrMo 合金, 服役期更理想。但是, CoCrMo 合金的工艺成形性能比较差^[10], 加工硬化效果明显, 使用传统工艺加工制造比较困难, 尤其是使用传统锻造方法时, 锻件质量难以保障。因此, 本文研究了通过热包覆保温并采用快锻机锻造含氮

CoCrMo 合金的工艺方法。

1 试样制备与试验方法

1.1 试验材料

试验材料为国内厂家自产的含氮 CoCrMo 合金电渣锭, 直径为 $\Phi 240$ mm、长度为 1100 mm。化学成分如表 1 所示。

表 1 CoCrMo 合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of CoCrMo alloy (% , mass fraction)

Co	Cr	Mo	Mn	Fe	Ni	Si	N	Nb	O	C
64.6670	28.8900	6.0030	0.0017	0.0863	0.04967	0.0830	0.1350	0.0443	0.0750	0.0383

1.2 试验方法

直径为 $\Phi 240$ mm、长度为 1100 mm 的含氮 CoCrMo 合金电渣锭在天然气加热炉中加热, 自动控制炉温。室温冷料装炉, 装炉炉温不超过 700 $^{\circ}\text{C}$ 。锻坯放置于炉温均匀区域, 升温至锻造温度 1150 $^{\circ}\text{C}$, 保温 2.5 h 以上出炉锻造。选用 1600 t 快锻机进行锻造。锻造过程中采用石棉包裹, 并使用玻璃润滑剂。



图 1 电渣锭保温后包裹石棉

Fig. 1 Electroslag ingot wrapped with asbestos after heat preservation

2 试验结果与分析

2.1 锻造工艺的执行

CoCrMo 合金由于加工硬化性能明显, 采用自由锻造比较困难, 尤其是提高氮含量后, 其加工硬化效果表现更显著。初次试验采用传统的自由锻造方法, 试验使用的含氮 CoCrMo 合金出现了严重的开裂问题。本次试验改用快锻机进行锻造, 由于材料为细长型锻坯, 在保证锻造比的情况下, 采用拔长、摔圆方法进行锻造, 保证最后一道次的锻造变形量不小于 22%, 以获得足够的晶粒度。

加热炉升温至 1150 $^{\circ}\text{C}$, 保温足够时间后, 含氮 CoCrMo 合金电渣锭出炉包裹石棉, 如图 1 所示, 包裹好后, 回炉继续在 1150 $^{\circ}\text{C}$ 保温 90 min, 然后出炉开锻。

试验采用分段锻造, 即采用两端分别夹持的方式对长坯料进行锻造。锻造时, 操作机先夹持一端锻造另一端, 然后回炉保温后再锻造另一端 (原夹持端)。锻造时, 先将一端锻造至直径为 $\Phi 180$ mm; 然后回炉, 在 1150 $^{\circ}\text{C}$ 保温 1 h, 出炉再将另一端同样锻造至直径为 $\Phi 180$ mm。在分段锻造过程中, 发

现两次锻造端的过渡部位出现可见裂纹。这是因为: 锻造过程中的一端直径变小、长度增加, 会导致温降增快, 其塑性随着温度的降低而变差, 在连续变形过程中过渡部位出现应力集中; 此外, 变形端和未变形端由于温降速度不同, 也存在热应力集中。在完成第 1 次锻造后, 锻造端与未锻造端之间的拉应力可以通过回炉保温消除, 但在出炉锻造另一端时, 由于两端尺寸的差异, 在过渡处产生强烈的应力集中, 同时, 与温降引起的变形能力降低产生叠加作用, 导致开裂。但锻造过程中, 仅在过渡部位出现径向裂纹, 其他部位均未出现裂纹。因为发生径向裂纹的轴向区域不大, 为了使后续锻造过程顺畅进行, 暂不对裂纹处进行处理, 在后续锻造时可将变形后增长的坯料在此部位断开。当坯料两端均锻造至直径为 $\Phi 180$ mm 后, 将锻料回炉, 在 1150 $^{\circ}\text{C}$ 继续保温, 按照保温制度保温一定时间后包裹石棉再回炉保温足够时间, 然后锻造。通过以上锻造方式, 逐步将材料锻造至直径为 $\Phi 150$ mm, 如图 2 所示。

在直径为 $\Phi 150$ mm 的坯料冷却后, 对坯料进行

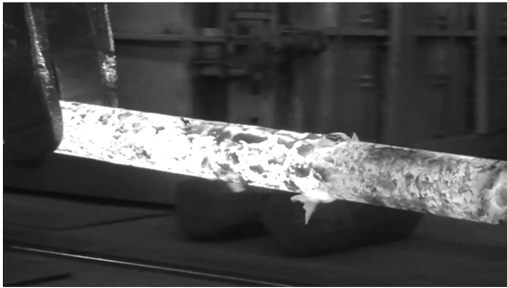


图 2 直径为 $\Phi 150$ mm 的坯料
Fig. 2 Blank with diameter of $\Phi 150$ mm

了首次修磨，打磨掉表面玻璃粘结剂、石棉及氧化物，再检查表面情况，如果表面具有细小裂纹需要将其修磨掉。由于棒料锻后直径减小、长度增加，将直径为 $\Phi 150$ mm 的棒料修磨后锯为 3 段，以便于进一步锻造。依然采用两端夹持的锻造方式，最终将 3 支直径为 $\Phi 150$ mm 的坯料依次锻造至最终直径为 $\Phi 110$ mm，如图 3 所示。图 3 中可以观察到每支锻坯分段锻造后存在非常明显的过渡区。



图 3 终锻后直径为 $\Phi 110$ mm 的坯料
Fig. 3 Blank with diameter of $\Phi 110$ mm after final forging

合金的保温温度对锻造性能有着重要的影响。国内很多研究者对 CoCrMo 合金的始锻温度进行了试验研究，林莺莺等^[11]认为，CoCrMo 合金的最佳变形温度为 1020 ~ 1150 ℃，但此为采用进口 CoCrMo 合金棒材进行锻造后得出的结论。本次含氮 CoCrMo 合金的锻造保温温度设定为 1150 ℃，发现对含氮 CoCrMo 合金进行两端锻造时，锻件过渡区受到了温降及变形影响，而其他部位未见明显缺陷。王以华等^[12]采用 135°菱形开口型砧锻造轴类零件，提高了锻件孔隙锻合率，而且加热次数大为减少。在后续的锻造试验中，尝试将含氮 CoCrMo 合金保温温度提高至 1200 ℃ 以上，以提高合金锻造时的塑性，并采用菱形开口型砧，提高锻件质量，减少径向裂纹，最大程度减轻温降对分段锻造过渡部位应力集中的影响，改善含氮 CoCrMo 合金的锻造性能，提高锻造效率。

2.2 合金性能

锻后检测含氮 CoCrMo 合金坯料热处理后的力

学性能，其抗拉强度、屈服强度及伸长率均满足 ISO 5832. 12—2019^[13]标准要求，如表 2 所示。

表 2 CoCrMo 合金的力学性能
Table 2 Mechanical properties of CoCrMo alloy

条件	抗拉强度	屈服强度	伸长率
	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A /%
ISO 5832. 12—2019 退火态	≥897	≥517	≥20
含氮 CoCrMo 合金锻后退火态	933. 9	623. 9	20. 3

对锻后含氮 CoCrMo 合金进行热膨胀率（目标值为 $14.40\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ）检测，结果如表 3 所示。由表 3 可以看出，在 20 ~ 600 ℃ 范围内热膨胀率检测值略超出目标值，但在允许的误差范围内。作为人体骨骼置换材料，合金使用温度在体温范围内，因此，合金的热膨胀系数是合格的。

表 3 CoCrMo 合金锻后热膨胀系数
Table 3 Coefficient of thermal expansion for CoCrMo alloy after forging

检测温度/℃	20~200	20~400	20~600
热膨胀率/ K^{-1}	12.87×10^{-6}	14.12×10^{-6}	14.98×10^{-6}

检测锻后含氮 CoCrMo 合金的晶粒尺寸，其金相照片如图 4 所示，晶粒度不大于 5.5 级。

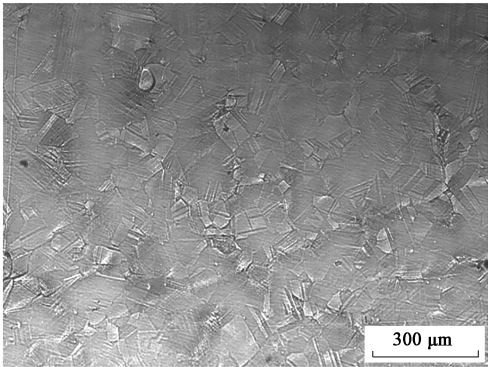


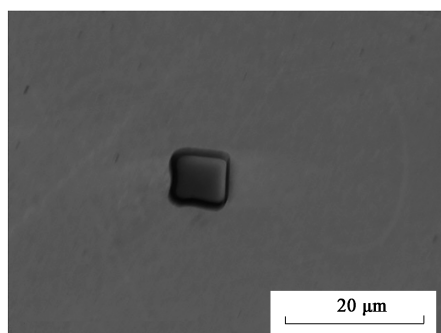
图 4 锻后 CoCrMo 合金的金相组织
Fig. 4 Metallography structure of CoCrMo alloy after forging

检测 CoCrMo 合金铸态及锻后的硬度，结果如表 4 所示，可以发现，铸态 CoCrMo 合金增加氮含量（表 1）后，其硬度明显增加，并且锻后含氮 CoCrMo 合金的硬度提高更明显，说明氮能明显提高 CoCrMo 合金的硬度。含氮 CoCrMo 合金硬度明显增加，其原因为氮元素与金属元素形成了细小的金属氮化物。图 5 为金属氮化物金相照片，金相显微镜

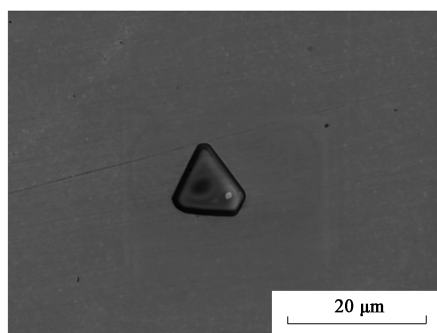
表 4 CoCrMo 合金的硬度
Table 4 Hardness of CoCrMo alloy

状态	硬度/HRC
铸态 (不含氮)	16.3
铸态 (含氮)	20.5
锻后 (含氮)	27.5

下可以观察到氮化物呈较均匀分布。图 6 为金属氮化物的扫描电镜图片, 图 6a 为方形形貌特征的氮化物, 图 6b 为三角形形貌特征的氮化物。氮化物具有高硬度、高耐磨性特征^[14-15], 因此, 金属氮化物在合金中起到硬质点的作用, 提高合金的硬度及力学性能, 同时, 细小的氮化物对晶粒细化有明显作用。



(a)



(b)

图 6 CoCrMo 合金中氮化物的扫描电镜照片

(a) 方形氮化物 (b) 三角形氮化物

Fig. 6 SEM photos of nitrides in CoCrMo alloy

(a) Square nitride (b) Triangular nitride

综上所述, 在始锻温度为 1150 ℃ 的锻造工艺能够锻造出合格的锻件产品。在后续的含氮 CoCrMo 合金的锻造试验中, 为了提高锻造效率, 可尝试提高开锻温度, 因为高温更利于氮化物在奥氏体组织中的溶解, 提高金属塑性变形能力, 降低因氮化物引起的加工硬化效应; 此外, 可尝试采用一次成形的径向锻机^[16]进行锻造, 避免分段锻造时坯料过渡部位出现径向裂纹; 最终产品尺寸不受过渡部位影响时也可采用分段锻造。合金的微观组织形貌需进一步试验研究, 以揭示微观组织与性能的关系, 尤其合金中氮含量对锻造性能、微观组织形貌及产品力学性能的影响, 是非常值得关注的。

3 结论

(1) 锻造保温温度为 1150 ℃ 时, 能够采用热包覆方法对含氮 CoCrMo 合金棒料进行分段锻造。

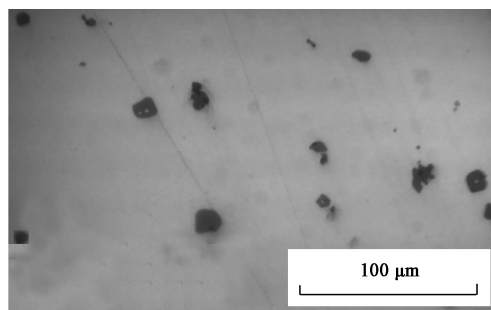


图 5 CoCrMo 合金中氮化物金相照片

Fig. 5 Metallographic photo of nitrides in CoCrMo alloy

可以推断, CoCrMo 合金中的金属氮化物对材料本身耐磨性和细化晶粒度起着非常重要的作用。

(2) 含氮 CoCrMo 合金锻后各项力学性能及晶粒度均满足要求。

(3) 合金中的金属氮化物有益于提高合金的强度、硬度及晶粒细化。

(4) 后续锻造时, 为了提高锻造效率, 可提高锻坯保温温度, 选择精锻机进行一次成形。

(5) 合金的微观组织对锻造性能、力学性能的影响需进行后续研究。

参考文献:

- [1] 日本钛协会. 钛材料及其应用 [M]. 周连在, 译. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
Japan Titanium Association. Titanium Material and Its Application [M]. Translated by Zhou L Z. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [2] Kassab M M, Cohen R E. The etiology and prevalence of gingival recession [J]. Journal of the American Dental Association, 2003, 134 (2): 220-225.

(下转第 37 页)