

Ti 和正火工艺对 Nb-V-Ti 微合金电机轴用钢 16MnT 低温冲击韧性的影响

郭中华 陈金虎 乔晓梅 楚宝帅

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 试验 16MnT 钢(/% : 0.14 ~ 0.15C, 0.27 ~ 0.30Si, 1.40Mn, 0.008 ~ 0.010P, 0.003 ~ 0.004S, 0.020 ~ 0.025Nb, 0.10V, 0.002 ~ 0.08Ti, 0.025 ~ 0.027Al, 0.0043 ~ 0.0053N) 的生产工艺流程为 60 t EAF-LF-VD-5.8 t 铸锭-锻造 Φ190 ~ 250 mm 棒材-920 °C 正火。检验结果表明, 0.08% Ti 16MnT 钢锻造正火后 -20 °C 冲击功为 6 ~ 16 J, 低于标准值 34 J。分析结果得出, 0.08% Ti 钢中存在大量 TiN 和延晶 Nb-Ti(C, N) 析出相, -20 °C 钢的断口为典型沿晶脆性断裂, 且锻材断面的组织不均匀, 表面为索氏体, 心部为铁素体 + 珠光体。通过将钢中 Ti 含量降至 0.002%, 正火风雾冷却时锻材间距离为 1.5 m, 使 16MnT 钢锻材的 -20 °C 冲击功提高至 132 ~ 288 J。

关键词 Ti 微合金电机轴用钢 16MnT 锻材 正火工艺 低温冲击性能

Effect of Ti and Normalizing Process on Low Temperature Impact Toughness of Nb-V-Ti Microalloying Steel 16MnT for Motor Shaft

Wu Zhonghua, Chen Jinhu, Qiao Xiaomei and Chu Baoshuai

(Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The production process flowsheet of tested steel 16MnT (/% : 0.14 ~ 0.15C, 0.27 ~ 0.30Si, 1.40Mn, 0.008 ~ 0.010P, 0.003 ~ 0.004S, 0.020 ~ 0.025Nb, 0.10V, 0.002 ~ 0.08Ti, 0.025 ~ 0.027Al, 0.0043 ~ 0.0053N) is 60 t EAF-LF-VD-5.8 t ingot casting- Φ190 ~ 250 mm forging- normalizing at 920 °C. Examination results show that the impact energy of forged-normalized 0.08% Ti steel 16MnT at -20 °C is 6 ~ 16 J, it is lower than the value of standard requirement- 34 J. The analysis results obtain that large amount TiN and along grain boundary precipitated phase Nb-Ti(C, N) exist in 0.08% Ti steel and the fracture of steel at -20 °C is typical brittle fracture along grain boundary, and the structure of forged product section is non-homogeneous, at surface it is sorbite while at centre of section it is ferrite + pearlite. With decreasing the Ti content in steel to 0.002% and controlling the 1.5 m distance between forgings during normalizing wind-fog cooling process, the impact energy of forged product of steel 16MnT at -20 °C increases to 132 ~ 288 J.

Material Index Ti, Microalloying Steel 16MnT for Motor Shaft, Forgings, Normalizing Process, Low Temperature Impact Toughness

作为制造电机轴的 16MnT 钢, 锻材规格为 Φ160 ~ 250 mm, 除要求具有很高的强度和塑性外, 低温冲击韧性也有较高要求。因此, 设计采用了 Nb、V、Ti 复合微合金化工艺, 锻造加工后采用正火处理。

1 16MnT 锻材生产和检验

16MnT 锻材的生产工艺为: 60 t 电弧炉冶炼 → LF 精炼 → VD 真空处理 → 模注 → 锻造加工 → 热处理。为了满足 16MnT 钢对高强韧性的要求, 采用了 Nb、V、Ti 复合微合金化, 化学成分如表 1。

浇铸采用 5.8 t 的钢锭模, 其大头尺寸 (mm) 为 710 × 570, 小头尺寸 (mm) 为 660 × 510。钢锭经加热

后在径锻机上可按设定的程度直接锻造成台阶电机轴, 锻造规格 Φ190 ~ 250 mm。锻机设备为进口奥地利 GFM 公司 1 800 t 径锻机, 生产自动化程度高, 锻材表面质量良好。16MnT 钢锭始锻温度为 1 220 °C, 开始锻造采用低频大压下量工艺, 末期采用高频小变形量工艺, 两火成材, 终锻温度要求大于 800 °C。锻造完毕后, 吊入台车式热处理炉进行正火处理, 正火处理工艺见图 1。

从热处理后的锻材上取样进行性能分析, 取样

表 1 优化前 16MnT 钢的化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of steel 16MnT before optimization /%

项目	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	N
试验钢	0.14	0.30	1.40	0.010	0.004	0.025	0.10	0.08	0.027	0.0053
标准	0.10 ~ 0.18	0.17 ~ 0.37	1.25 ~ 1.45	≤ 0.025	≤ 0.025	0.015 ~ 0.060	0.02 ~ 0.15	0.02 ~ 0.20	≥ 0.015	-

位置在锻材截面半径1/2处。拉伸检测在常温条件下进行,冲击检测在-20℃条件下,3组试样的冲击值均很低,甚至低于10J,未能达到标准要求。其检验结果表2。

从检验结果来看,除低温冲击韧性外,其它指标均达到了技术要求。为了改善16MnT钢的低温冲击韧性,进行了两次正火处理及正火+600℃回火试验,但检测的低温冲击性能仍不能得到提升。

对此批试料进行金相观察,发现轴件整体热处理后存在组织不均匀现象,锻材边部与心部组织差异大,如图2所示。在锻材边部表现为索氏体组织,在锻材心部表面为铁素体+珠光体组织,锻材截面1/2处为过渡段。这主要是由于锻材在920℃正火后采用风雾冷却,边部与心部冷却速度不同造成的。另外,在显微组织中发现有大量的TiN夹杂物析出。

扫描电镜对试样的析出相进行分析,发现晶界处有Nb、Ti的碳氮析出相,如图3所示。

-20℃的冲击断口试样在扫描电镜下进行形貌观察,如图3(b)。可以看出,断口为典型的沿晶脆性断口,几乎未见有纤维区,断口方向与锻造方向接近垂直。

2 结果分析与讨论

2.1 Nb、V、Ti 强化机理

Nb、V、Ti为常用的微合金化元素,均可与钢中C、N结合形成碳化物和氮化物或碳氮化物,起到细化晶粒、显著提高钢材综合作用的作用^[1]。

研究表明^[2],钢中Nb加入量在0.05%以下可显著改善钢材的强韧性能,高于0.05%水平Nb的强韧化效果不再明显。V为强烈形成碳化物元素,能够显著提高珠光体钢的强度。钢中钒的碳、氮化物在热加工冷却时析出,从而起到强化钢材的作用^[3]。Ti与钢中C、N结合力较强,形成的碳、氮化合物也可抑制晶粒长大,提高钢材的综合性能。

2.2 钢中TiN对冲击性能的影响

根据钢中Ti与N的反应热力学公式计算,钢中TiN的析出

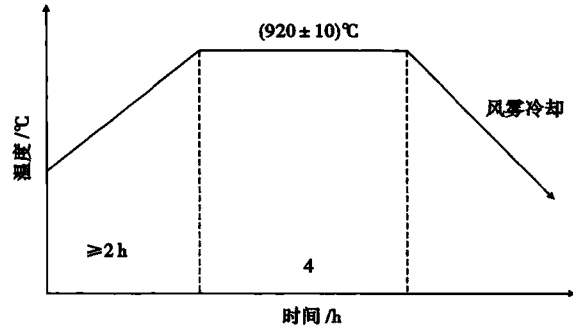


图1 16MnT钢锻材正火工艺

Fig. 1 Normalizing process for forged products of steel 16MnT

表2 优化前0.08%Ti 16MnT钢锻材正火后力学性能
Table 2 Mechanical properties of normalized forged products of 0.08%Ti steel 16MnT before optimization

试样	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A/%	Z/%	A _{KV} (-20℃)/J
1	330	556	31	65	6/7/8
2	332	542	32	58	11/13/15
3	382	558	30.5	62	15/16/15
标准	≥325	≥470	≥21	≥45	≥34

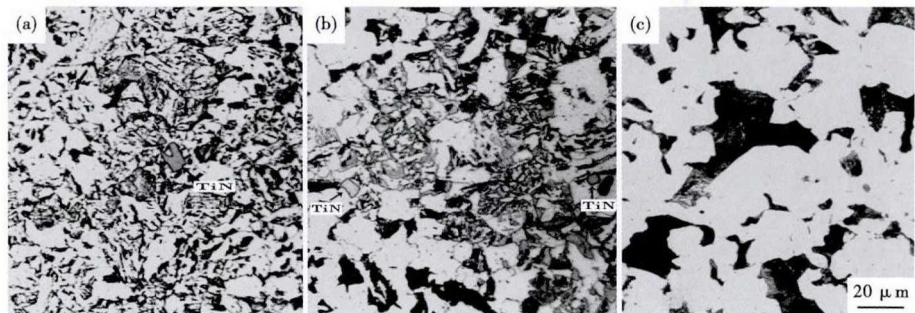


图2 0.08%Ti 16MnT钢正火工艺优化前锻材边部(a),1/2半径(b)和心部(c)的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure at edge (a), 1/2 radius (b) and center (c) of normalized forged products of 0.08Ti steel 16MnT before optimization of normalizing process

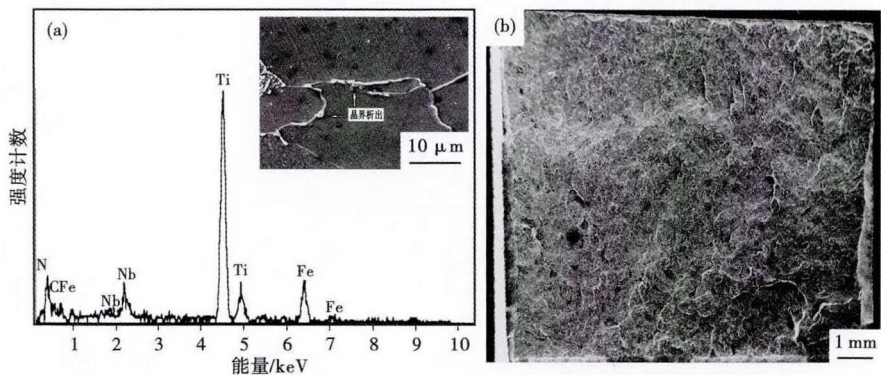


图3 优化前0.08%Ti 16MnT钢正火锻材晶界析出相形貌及能谱分析(a)和-20℃冲击断口形貌(b)

Fig. 3 Morphology of precipitated phase at grain boundary and energy spectrum analysis (a) and morphology of -20℃ impact fracture (b) of normalized forged products of 0.08Ti steel 16MnT before optimization of normalizing process

温度在 1472 ℃ 左右,属于两相区^[4]。在液相区形成的 TiN 颗粒,一般尺寸较大,约为 3 μm。固相中形成的 TiN 颗粒为第二相析出,尺寸细小,抵制晶粒长大。钢中存在的 TiN 颗粒一方面起到了细化晶粒作用,但另一方面也是导致脆性断裂的主因。

研究表明^[5],钢中 Ti 含量 0.01% ~ 0.03% 可以改善钢的强韧性能,但当钢中 Ti 含量超过 0.03% 时,过剩的 Ti 以 TiN 的形式析出,割裂了基体的连续性,导致低温冲击性能降低。试制的 16MnT 锻材中 Ti 含量达到 0.08%,在凝固中形成了大量的 TiN 夹杂,如图 2(a,b) 和图 3 中,正是这些 TiN 夹杂存在造成了 16MnT 锻材低温冲击韧性降低。

2.3 金相组织的影响

16MnT 锻材在正火处理时,采取两层堆放处理方式,风雾冷却时由于冷却速度关系,导致锻材边部、1/2 半径及中心部位组织不均,如图 2 所示,这也影响了热处理后 16MnT 锻材的强韧性能。

3 工艺优化及效果

微合金化优化方案见表 3,由于钢中 N 实际含量一般在 50×10^{-6} 左右,极易与 Ti 形成 TiN 大颗粒夹杂,故采用 Nb、V 微合金化,不加入 Ti 元素,以控制钢中大颗粒夹杂。另外,对锻材中组织不均匀现象采取优化热处理工艺措施,要求锻材在台车上不允许堆放,风雾冷却时风机与锻材保持等距(1.5 m 位置),以确保锻材冷却速度基本保持一致。

工艺优化后热处理后的 16MnT 锻材组织均匀,如图 4(a)。对其低温冲击试样断口在扫描电镜下进行观察,断口区大部分表现为纤维韧窝状组织,如图 4(b)。检测了 3 组试样的力学性能(表 4),其低温冲击性能得到了大幅度提高,甚至在 -50 ℃ 下的冲击性能也达到了 150 J,工艺优化后效果明显。

4 结论

(1) 钢中 Ti 与 N 形成脆硬粒子 TiN,影响了 16MnT 钢的低温冲击性能,冲击断口表现为解理性脆断形貌。

(2) 优化热处理工艺后,锻材整体热处理后的组织均匀性得到了显著改善。

表 3 优化后 16MnT 钢的化学成分 / %

Table 3 Chemical composition of steel 16MnT after optimization / %

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	N
0.15	0.27	1.40	0.008	0.003	0.020	0.10	0.002	0.025	0.004 3

表 4 优化后 0.02% Ti 16MnT 钢正火锻材的力学性能

Table 4 Mechanical properties of normalized forged products of 0.002% Ti steel 16MnT after optimization

试样	$R_{p0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A / %	Z / %	A_{KV} (-20 ℃)/J	A_{KV} (-50 ℃)/J
1	369	560	33.5	70	196/184/288	117/148/151
2	352	551	32.5	68	132/165/173	156/121/139
3	330	540	33	72	182/179/200	165/152/148

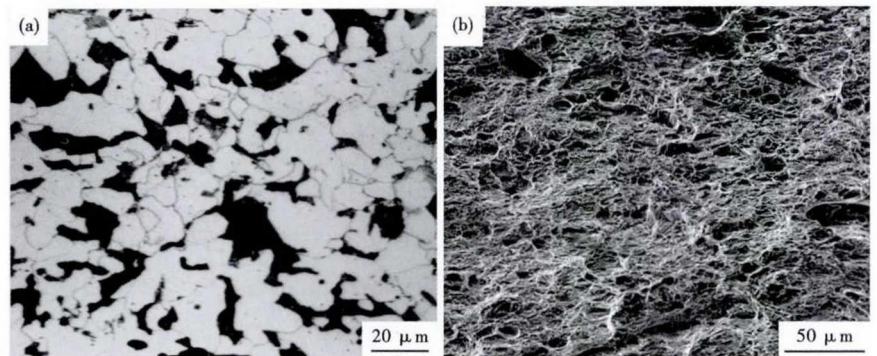


图 4 优化后 0.002% Ti 16MnT 钢正火锻材的组织(a)和 -20 ℃ 冲击断口(b)形貌
Fig.4 Morphology of structure (a) and -20 ℃ impact fracture (b) of normalized forged products of 0.002% Ti steel 16MnT after optimization of normalizing process

(3) 优化成分,不加 Ti 只采用 Nb、V 微合金化,16MnT 钢低温冲击韧性大幅度提升,-20 ℃ 冲击值达到 150 J 左右,冲击断口表现为纤维韧窝状。

参考文献

- [1] Campbell K, Honeycombe R. Isothermal Decomposition of Austenite in Simple Chromium Steels [J]. Metal Science, 1974, 8 (7): 197-203.
- [2] 邓 深. 柳钢铌钒钛微合金钢的开发与应用 [J]. 柳钢科技, 2010, 38(4): 19-24.
- [3] 解万里. 钒对低合金钢的强化机理分析 [J]. 河北冶金, 2006, 26 (3): 41-46.
- [4] 岳尔斌, 仇圣桃, 干 勇. 低合金高强度钢中氮化物和碳化物析出热力学 [J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(1): 35-38.
- [5] 李国忠, 曹红福, 惠 荣, 等. 钛铝含量对低合金高强度钢 Q345D 低温韧性的影响 [J]. 特殊钢, 2002, 23(1): 53-54.

邬中华(1978-),男,硕士(2008年北京科技大学),工程师,2001年武汉科技大学(本科)毕业,碳钢型线材新产品开发工作。E-mail:wuzh01@tisco.com.cn

收稿日期:2017-06-08