

均匀化退火和锻造对双相耐磨钢强韧性的影响

刘兴刚, 韩明博, 王学鹏, 张国志

(东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 研究了一种低合金双相耐磨钢经均匀化退火和锻造处理后的微观组织和强韧性能。结果表明: 经 980 °C 均匀化退火 4, 8 h 和 1 150 °C 锻造处理后, 实验钢显微组织主要为板条状马氏体、针状贝氏体及少量残余奥氏体, 锻造处理后的晶粒度最小为 7.0 ~ 7.5 级, 均匀化退火处理后的晶粒度最大为 6.5 ~ 7.0 级。均匀化退火的保温时间是影响双相耐磨钢力学性能的主要因素, 实验钢保温 4 h 时的冲击韧性和延伸率值高于保温 8 h 的值。锻造比均匀化退火更适宜于提高低合金双相耐磨钢的强韧性, 优化工艺为始锻温度 1 150 °C、终锻温度 800 °C、锻造比 2。

关 键 词: 双相耐磨钢; 均匀化退火; 锻造; 强韧性; 微观组织

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)04-0496-04

Effects of Homogenizing Annealing and Forging on Strength and Toughness of Dual-Phase Wear Resistant Steels

LIU Xing-gang, HAN Ming-bo, WANG Xue-peng, ZHANG Guo-zhi

(School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HAN Ming-bo, E-mail: mbhan_neu@163.com)

Abstract: The effects of homogenizing annealing and forging on the microstructure, strength and toughness of the dual-phase wear-resistant steel were investigated. The results showed that the microstructure of the steel contained mainly lath martensite, acicular bainite and a little retained austenite under 980 °C homogenizing annealing for 4 and 8hrs respectively and 1 150 °C forging. The minimum grain size of the steel is No. 7.0 ~ 7.5 grade after forging while the maximum grain size of the steel homogenized is No. 6.5 ~ 7.0 grade. The holding time of the homogenizing annealing is the main factor that affects the mechanical properties of dual-phase wear resistant steels, and the impact toughness and elongation values of the test steels holding for 4hrs are higher than that of the test steels holding for 8hrs. Forging deformation improves the strength and toughness of dual-phase wear resistant steels more significantly than that under homogenizing annealing, and the optimized process parameters were as follow with initial forging temperature of 1 150 °C, final forging temperature of 800 °C and forging ratio of 2.

Key words: dual-phase wear-resistant steel; homogenizing annealing; forging; strength and toughness; microstructure

低合金高强度双相耐磨钢是近年来研制出的一种新型耐磨材料^[1-2], 用于替代传统的履带板材料高锰钢, 在该合金试验研究和制备过程中, 发现成分偏析和组织不均匀等缺陷是导致其硬度、强度和塑性等性能波动变化的主要因素^[3]。许多学者从不同的角度对此进行了研究: 刘自勇等^[4]研究了均匀化退火对耐磨衬板用钢

ZG80Cr2MnMoSi 的显微组织以及晶粒度的影响; 刘伟建等^[5]通过对 NM400 板坯显微组织的观察及对其性能的分析, 指出耐磨钢 NM400 的强化机制主要为位错强化、细晶强化和析出强化; 蒋汉祥等^[6]对高韧性耐磨钢 W2 的锻造生产工艺进行了研究, 得到了洛氏硬度 60.2, 冲击韧性 115 J/cm² 的 W2 钢。上述文献只是孤立地研究了

收稿日期: 2015-03-02

基金项目: 总装备部“十二五”预研项目(2011)。

作者简介: 刘兴刚(1967-), 男, 甘肃会宁人, 东北大学副教授; 张国志(1952-), 男, 辽宁阜新, 东北大学教授。

均匀化退火处理和锻造变形处理对合金组织和性能的影响,缺乏不同的热处理方法对合金组织、塑性和韧性影响的比较研究. 本文以低合金双相耐磨钢为实验钢,对比研究均匀化退火和锻造变形处理对实验钢微观组织、硬度和强韧性的影响,提出了消除低合金双相耐磨钢成分偏析和组织不均匀等缺陷及改善其综合性能的优化工艺参数.

1. 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验用钢是 Mn – Si – B 系贝氏体/马氏体双相低合金高强度耐磨铸钢,成分设计如表 1 所示.

表 1 实验钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of test steel %

C	Si	Mn	Cr	Ti	Al	P	S
0.27 ~ 0.30	1.10 ~ 1.30	2.10 ~ 2.30	0.60 ~ 0.70	0.025	0.02	<0.040	<0.045

1.2 实验方法

实验钢使用 500 kg 中频感应电炉熔炼,在 1 550 ℃左右浇注成 Y 型试块,切取试块底部加工试样. 为对比研究不同热处理工艺制度对材料性能的影响,设计 4 种方案进行实验.

- 1) 均匀化退火处理:980 ℃下保温 4 h,之后进行淬火及回火处理,对应的试样编号为 a.
- 2) 均匀化退火处理:980 ℃下保温 8 h,之后进行淬火及回火处理,对应的试样编号为 b.
- 3) 锻造变形处理:始锻温度 1 150 ℃,终锻温度 800 ℃,锻造比 $Y=2$,之后进行淬火及回火处理,对应的试样编号为 c.
- 4) 淬火及回火处理:950 ℃保温 2 h,水淬,然后在 300 ℃保温 2 h,空冷,对应的试样编号为 d.

注:方案 1), 2) 和 3) 的淬火及回火处理工艺与 4) 相同.

实验过程中,金相试样经磨制、抛光和 3% 的硝酸酒精腐蚀后,用 OLYMPUS – GX51 型金相显微镜和 SSX – 550 扫描电子显微镜观察显微组织;硬度使用 HD – 187.5 型布洛维硬度计测定,

载荷为 3 kN,加载时间为 10 s;冲击试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm, U 型缺口,冲击性能使用 JBW – 300 型摆锤式冲击实验机测试;拉伸性能在 WJ – 30 万能材料实验机上进行,依据 GB/T228.1—2010 制备试样,尺寸为 $\phi 8$,每组测 3 根试样,取平均值.

2 结果与讨论

2.1 显微组织

图 1 为不同工艺处理方案对实验钢显微组织的影响. 对比图 1a 和 1b 可知,均匀化退火保温 8 h 的显微组织比保温 4 h 的显微组织粗大,即随着保温时间的延长,组织发生了粗化. 比较图 1a, 1b 和 1d 可知,实验钢均匀化退火处理后,显微组织均比未均匀化退火处理的实验钢的显微组织均匀. 比较图 1a, 1b 和 1c 发现锻造变形处理后,实验钢的显微组织比均匀化退火处理后的组织更加均匀致密,而均匀、细密的组织将有助于提升实验钢的韧性和强度等力学性能^[7].

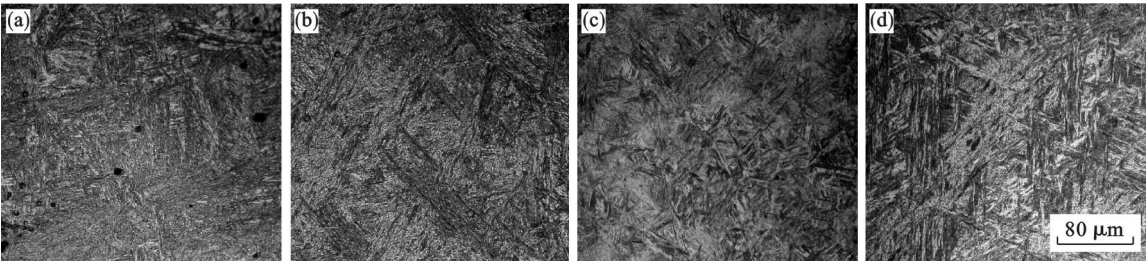


图 1 实验钢的显微组织
Fig. 1 Microstructure of test steels

(a)—试样 a; (b)—试样 b; (c)—试样 c; (d)—试样 d.

从图 1 可知,对实验钢无论是进行均匀化退火处理,还是锻造变形处理,其显微组织主要为板条状马氏体、针状贝氏体及少量残余奥氏体. 在普

通碳素钢中,水淬处理后的组织一般为马氏体,不能得到贝氏体,但由于在实验钢中加入了合金元素锰、硅、硼,使得淬火后的组织中含有贝氏体,而

残余奥氏体的形成是由于马氏体相变和贝氏体相变转变不彻底. 组织中的马氏体可以提高实验钢的耐磨性, 贝氏体可以使实验钢具有较好的韧性, 马/贝双相组织则可以使实验钢有较高的强韧性.

2.2 奥氏体晶粒度

利用热化学浸蚀法显示出实验钢的奥氏体晶界, 分析不同工艺处理方案对奥氏体晶粒度的影

响. 浸蚀剂为自来水 30 mL + 苦味酸适量(应保证高温加热后器皿底部仍有少量未溶苦味酸) + 1 滴盐酸 + 1 ~ 2 滴氢氟酸(以控制腐蚀速度) + 少量海鸥牌洗发膏 + 极少量 CuCl₂. 实验钢经 4 种工艺处理后的奥氏体晶界如图 2 所示, 对应的奥氏体晶粒的平均直径如表 2 所示.

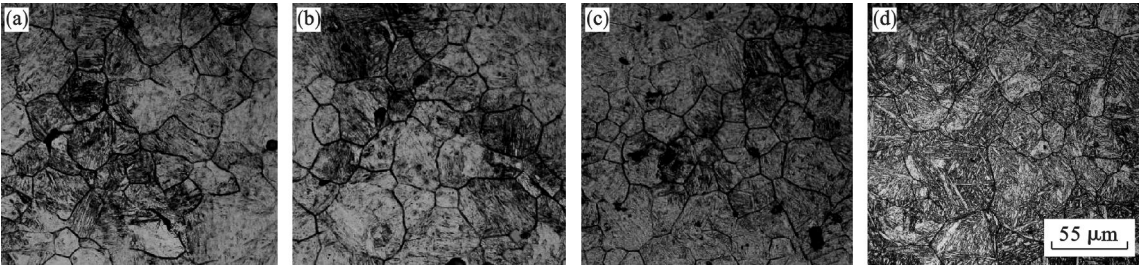


图 2 实验钢的奥氏体晶粒
Fig. 2 Austenite grains of test steels

(a)—试样 a; (b)—试样 b; (c)—试样 c; (d)—试样 d.

表 2 实验钢奥氏体晶粒的平均直径 Table 2 Average diameter of austenite grains of test steels					
试样	直径 1	直径 2	直径 3	平均直径	评级
a	32.5	30.7	31.5	30.5	7.0 ~ 7.5
b	35.4	35.8	35.2	35.1	6.5 ~ 7.0
c	26.5	29.3	30.2	28.6	7.0 ~ 7.5
d	30.2	28.9	29.1	29.4	7.0 ~ 7.5

由图 2 和表 2 可知, 锻造变形处理后的晶粒度最小, 均匀化退火处理后的晶粒度最大. 这是由于锻造过程中, 实验钢在变形力作用下, 铸态组织不断被破碎, 发生动态再结晶, 使奥氏体晶粒细化^[8], 平均直径小于直接淬火及回火处理的双相耐磨钢; 而随着加热温度的升高, 保温时间越长, 越容易引起奥氏体晶粒粗化长大. 显然, 均匀化退火处理后的晶粒平均直径最大.

2.3 力学性能

表 3 为均匀化退火、锻造和淬火及回火处理后实验钢的硬度、冲击韧性(U 型缺口)、抗拉强度、屈服强度和延伸率.

由表 3 可知, 与淬火及回火处理相比, 锻造变形处理后, 实验钢的硬度、冲击韧性、抗拉强度、屈服强度和延伸率均有较大幅度提高, 硬度由 466 MPa 提高至 481 MPa, 提高 3.2%; 冲击韧性(U 型口)由原来的 41.3 J/cm² 提高至 70.7 J/cm², 提高 71.2%, 抗拉强度由 1 560 MPa 提高到 1 639 MPa, 提高 5.1%, 屈服强度由 1 260 MPa 提高至 1 345 MPa, 提高 6.7%, 延伸率

从 6.40% 提高至 11.55%, 提高 80.47%. 均匀化退火处理后, 力学性能的变化各不相同, 硬度和抗拉强度增加, 屈服强度和延伸率则降低; 力学性能的变化与均匀化退火处理的保温时间长短有关, 硬度和延伸率在保温 4 h 后更大, 抗拉强度和屈服强度则在保温 8 h 后更高, 而冲击韧性则表现出另一种变化趋势, 均匀化退火保温 4 h 后的大于淬火及回火处理后的值, 保温 8 h 后的冲击韧性则小于淬火及回火处理后的值.

表 3 实验钢的力学性能 Table 3 Mechanical properties of test steels				
试样	a	b	c	d
硬度/MPa	479	471	481	466
冲击韧性/(J·cm ⁻²)	55.6	37.6	70.7	41.3
抗拉强度/MPa	1 605	1 625	1 639	1 560
屈服强度/MPa	1 174	1 184	1 345	1 260
延伸率/%	5.43	5.00	11.55	6.40

究其原因, 锻造变形处理能够“焊合”内部孔隙, 压实疏松, 使其组织致密, 减少了裂纹源^[9]. 另外, 锻造变形处理能破碎实验钢中粗大的结晶组织, 细化实验钢的组织, 产生细晶强化作用, 而细小的奥氏体晶粒有利于马氏体、贝氏体的细化^[10]. 两方面共同作用的结果使实验钢抗拉强度和屈服强度均有提高约 80 MPa, 延伸率由 6.40% 上升至 11.55%, 提高 80%.

实验钢经均匀化退火处理 4, 8 h 后的冲击韧性变化不一致, 这是因为, 增加均匀化退火的保温温度, 延长保温时间, 使得实验钢的成分和组织更

加趋于均匀,有助于提高实验钢的冲击韧性,而另一方面,较高的保温温度和较长的保温时间使马氏体板条束晶粒变粗变大,又会导致冲击韧性下降。均匀化退火保温4 h后冲击韧性值大于淬火加回火处理后的值,正是前一因素起了主导作用,而保温4 h后硬度下降则是后一因素起了主导作用。另外,均匀化退火处理使实验钢的化学成分和组织更加均匀,且均匀化退火温度越高,淬火过程中产生的马氏体越多,马氏体/贝氏体双相组织中马氏体所占比例也越大,使实验钢的抗拉强度上升。而延伸率与屈服强度的下降是由于淬火处理过程中产生了更多的马氏体,导致组织中贝氏体所占比例下降。因为贝氏体韧性优于马氏体,所以均匀化处理后实验钢的冲击韧性保温4 h时高于淬火及回火处理的值,而保温8 h时低于淬火及回火处理的值,但延伸率和屈服强度在均匀化处理后则呈现下降的趋势。

3 结 论

1) 锻造处理后,双相钢的强韧性得到显著增强,耐磨性能得到改善,硬度由466 MPa提高至481 MPa,提高3.2%;冲击韧性(U型口)由原来的41.3 J/cm²提高至70.7 J/cm²,提高71.2%;抗拉强度由1 560 MPa提高到1 639 MPa,提高5.1%;屈服强度由1 260 MPa提高至1 345 MPa,提高6.7%;延伸率从6.40%提高至11.55%,提高80.47%。

2) 均匀化退火的保温时间是影响双相耐磨钢力学性能的主要因素,保温4 h的冲击韧性和延伸率值优于保温8 h的值,而抗拉强度和屈服强度则相反。

3) 锻造处理比均匀化退火处理更适宜于全面提高低合金双相耐磨钢的综合力学性能,其优化工艺为始锻温度1 150 ℃、终锻温度800 ℃、锻造比2。

参考文献:

[1] 张国志,田学锋,刘兴刚,等. 化学成分对耐磨铸钢组织与性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2011,32

(1):89-93.

(Zhang Guo-zhi, Tian Xue-feng, Liu Xing-gang, et al. Effect of chemical compositions on microstructure and properties of wear-resistant casting steels [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(1): 89-93.

[2] Liu X G, Yu Y W, Pan X, et al. Research on the effects of the refining treatment to the properties of dual-phase wear-resistant steel[J]. *Advanced Materials Research*. 2013, 602/603/604:395-400.

[3] Seyedrezai H, Pilkey A K, Boyd J D. Effect of pre-IC annealing treatments on the final microstructure and work hardening behavior of a dual-phase steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 594(6): 178-188.

[4] 刘自勇, 杨涤心, 谢敬佩, 等. 均匀化退火对ZG80Cr2MnMoSi钢组织的影响[J]. 热处理, 2012, 27(5): 33-36.

(Liu Zi-yong, Yang Di-xin, Xie Jing-pei, et al. Effect of homogenizing annealing on microstructure of ZG80Cr2MnMoSi steel [J]. *Hot Treatment*, 2012, 27(5): 33-36.)

[5] 刘伟建, 李晶, 霍向东. 高强度低合金耐磨钢NM400的强化机制[J]. 钢铁研究学报, 2014, 25(7): 77-82.

(Liu Wei-jian, Li Jing, Huo Xiang-dong. Mechanism of strengthening and toughening for wear resistant steel NM400 with high strength and low alloy [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 25(7): 77-82.)

[6] 蒋汉祥, 孙善长, 余成龙, 等. 高韧性耐磨钢(W-2)的研制[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002(1): 44-46.

(Jiang Han-xiang, Sun Shan-chang, Yu Cheng-long, et al. Research on the steel of high toughness and wear resistance (W-2) [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science)*, 2002(1): 44-46.)

[7] Luo K S, Bai B Z. Microstructure mechanical properties and high stress abrasive wear behavior of air-cooled MnCrB cast steels[J]. *Materials and Design*, 2009, 31(5): 2510-2516.

[8] Dhua S K, Sarkar P P. Development of ultrafine grains in C-Mn steel plates through hot-rolling and air-cooling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 575(17): 177-188.

[9] Thomas A, Wahabi M, Cabrera J M, et al. High temperature deformation of Inconel 718 [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177(1): 469-472.

[10] Langdon T G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: achieving exceptional properties through grain refinement[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(19): 7035-7039.