DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.016

大型耐磨合金钢衬板的工艺优化

刁晓刚[1,2],李　卫[2],王春民[1],沈　闯[1],程艳艳[1],张志勇[1],姬建钢[1]
(1.中信重工机械股份有限公司,河南 洛阳 471039;2.暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院,广东 广州 510632)

摘　要:介绍了大型耐磨合金钢衬板的工艺优化实践。通过调整化学成分、合理设计热处理工艺,获得了各项指标优异的衬板铸件。结果表明,在整个寿命周期内,1# 材质衬板的平均磨损率 0.528 mm/ 万 t,4# 材质衬板的平均磨损率 0.496 mm/ 万 t。经估算,4# 材质衬板处理矿量可提高 6.38%。

关键词:耐磨;合金钢;衬板;工艺优化;力学性能
中图分类号: TG269　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)12-1298-05

Process Optimization of Large Wear-resistant Alloy Steel Liners

DIAO Xiaogang[1,2], LI Wei[2], WANG Chunmin[1], SHEN Chuang[1], CHENG Yanyan[1], ZHANG Zhiyong[1], JI Jiangang[1]
(1.CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China; 2.Institute of Advanced Wear and Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The process optimization practice of large wear-resistant alloy steel liners was introduced. By adjusting the chemical composition and designing the heat treatment process, the liner castings with excellent indexes were obtained. The results show that the average wear rate of 1# liner is 0.528 mm/10,000t, and that of 4# liner is 0.496 mm/10,000t. It is estimated that the ore amount of 4# liner can be increased by 6.38%.

Key words: wear-resistant; alloy steel; liners; process optimization; mechanical properties

磨机广泛应用于矿山、冶金、水泥、建材等多个行业。磨矿效果直接影响矿山收益,因此合理选择磨机对磨矿作业具有重要意义[1]。作为其基础部件、易损件,衬板材料主要有高锰钢、高铬铸铁、合金耐磨铸钢等。高锰钢只有在冲击应力足够高、磨料硬时,才能展现其耐磨优势。高铬铸铁由于韧性较低,其推广应用有一定局限性。而合金耐磨钢兼具较高的硬度和较好的韧性,引起了耐磨工作者的广泛关注[2]。

随着选矿工艺的进步,磨机发展趋于大型化,对衬板的使用寿命和磨矿效率提出了更高的要求。开发耐磨性强、强韧性好、淬透性与淬硬性优异的大型磨机衬板,是当前耐磨材料工作者面临的重要课题。

1　大型耐磨合金钢衬板的研究背景

目前笔者公司磨机衬板主要有 1# 和 2# 两种低合金钢材质。1# 材质在使用过程中,衬板稳定性好、安全可靠性高,但其耐磨性与客户期望值存在一定差距;2# 材质使用中存在一定安全风险,其耐磨性稍强于 1# 材质。因此,有必要开发性能更为优良的衬板材料,提高整机的服役时间,以满足用户的需求已成为笔者公司亟需解决的问题。

2　大型耐磨合金钢衬板的化学成分设计

2.1　碳

碳是钢中的主要成分,主要以固溶相和碳化物的形式存在。碳含量高,钢的韧性下降;碳含量过低,钢的淬硬性恶化,耐磨性降低[3]。故在满足强度、硬度的前提下,碳含量通常应控制在下限值。

碳可与锰、铬、钼及钒等元素形成弥散分布的碳化物,提高低合金钢的耐磨性能。选择适宜的碳含量,低合金耐磨钢可获得的良好的淬透性和淬硬性。

2.2　硅

硅在钢中以固溶体形式存在,强度及硬度增加、塑性下降。贝氏体转变过程中,硅强烈阻碍碳化物的析出。硅含量通常控制在 0.3%～0.8%。

2.3　锰

锰含量高,铸钢有晶粒粗化的倾向且回火脆性增加。故锰含量不宜过高。锰含量通常控制在 0.4%～1.0%。

收稿日期:2019-09-09
作者简介:刁晓刚(1982-),黑龙江海伦人,博士,高级工程师.主要从事耐磨材料方面的工作.
E-mail: xgdiao@126.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2.4　硫

硫以 FeS 或 FeS-Fe 共晶体存在于晶粒周围，降低钢的力学性能[4]。硫是从炉料中带入钢液。硫含量通常控制在 0.035%以下。

2.5　磷

磷微溶于钢。磷含量大于 0.1%时，晶粒周围形成 Fe_2P，降低钢的塑韧性[4]。磷是从炉料中带入钢液。磷含量通常控制在 0.035%以下。

2.6　铬

铬是低合金耐磨钢中应用最广泛的合金元素。铬既可固溶于铁素体，起固溶强化作用；又可生成多种弥散析出的碳化物，起沉淀强化作用。固溶的铬能有效延长奥氏体转变的孕育期，显著改善钢的淬透性。此外，铬可提高钢的耐腐蚀性。铬含量偏高，韧性下降。铬含量选择要统筹考虑与碳含量匹配度、成本控制等因素。

2.7　钼

钼是强碳化物形成元素，有利于增强低合金钢的耐磨性能。钼在钢中以固溶体和碳化物形式存在。固溶于奥氏体中的钼可显著改善钢的淬透性。钼可改善钢的回火组织稳定性，提高大型复杂耐磨件的回火温度，有效降低铸件的残余应力、改善其塑韧性。与锰、铬等导致回火脆性的元素配合使用，钼能减轻或消除钢的回火脆性。钼是铬系合金耐磨钢不可或缺的合金元素。考虑成本因素，钼含量一般控制在 0.3%～1.0%。

2.8　镍

镍是典型的奥氏体形成元素。固溶的镍能有效地稳定奥氏体和削弱钢中合金元素的扩散速度，明显改善钢的淬透性；尤其与铬、钼等元素复合添加时，其作用更加明显。铬系低合金耐磨钢加入适量镍，可提高韧性。考虑成本因素，镍含量一般不超过2%。

2.9　钒

钒是强碳化物形成元素。钒可固溶于铁素体，细化晶粒。

在 1# 材质基础上设计 3#、4# 两种材质，成分设计如表 1。

3　大型耐磨合金钢衬板的热处理工艺

热处理工艺直接影响合金钢的组织，进而改变其力学性能。为了获得强度和韧性匹配良好、综合力学性能优异的衬板材料，设计不同的热处理工艺方案。通过对比 3#、4# 两种材质热处理后的性能，选出较优材质和 1# 材质进行生产验证对比。

3.1　热处理工艺

根据笔者公司实际生产经验，3#、4# 两种材质的热处理工艺设计如下：正火工艺设定 910±10 ℃保温至适当时间，回火工艺分别选定 590±10、610±10、630±10、650±10 ℃等不同回火温度下保温至适当时间。热处理工艺曲线如图 1。

3.2　试样选取

按照图 2 所示试块位置线切割拉伸试样、冲击试样。每块试块选取 2 组拉伸试样，每组 1 根；每块试块选取 2 组无缺口冲击试样，每组 3 根。

3.3　试样检验

热处理后 3# 材质试样的抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率、硬度、无缺口冲击功如图 3。

从图 3 的检验结果可看出，铸态时，3# 材质试样抗拉强度为 785 MPa、断后伸长率 4%、断面收缩

表1　衬板的化学成分 w(%)

Tab.1　Chemical composition of liners

材质	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	Ni	V
3#	0.55～0.85	0.3～0.8	0.4～1.0	≤0.025	≤0.025	1.5～3.0	0.15～0.45	0	0
4#	0.55～0.85	0.3～0.8	0.4～1.0	≤0.025	≤0.025	1.5～3.0	0.30～0.80	0.5～1.3	0.05～0.15

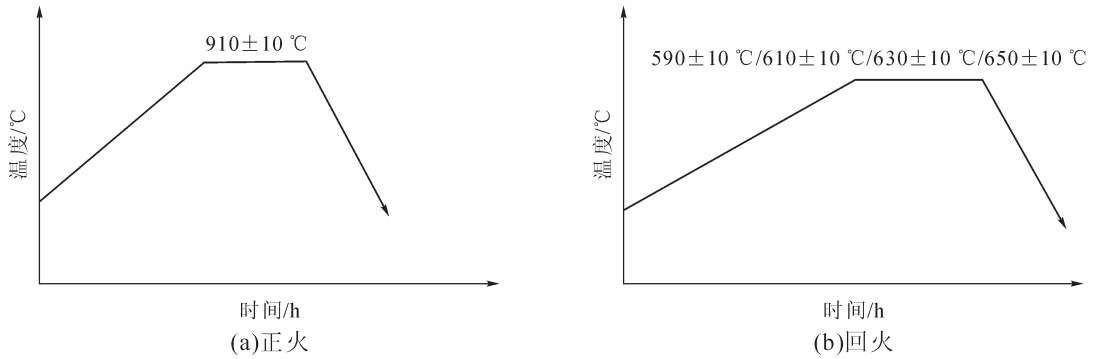


图 1　热处理工艺曲线

Fig.1　The process curve of heat treatment

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

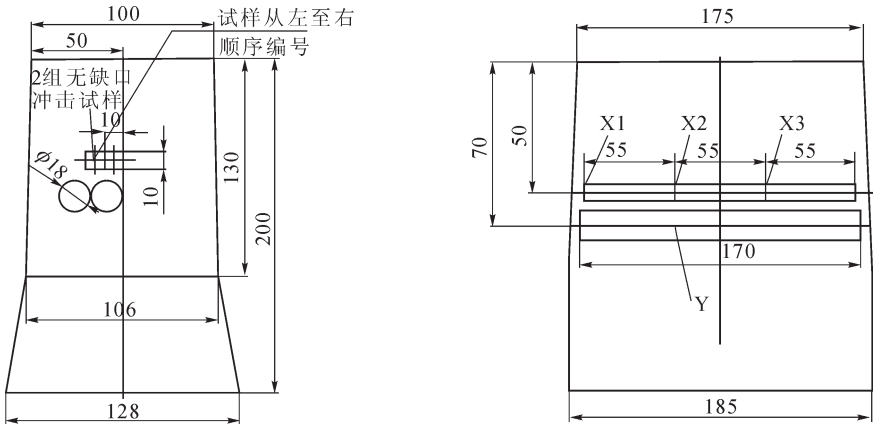


图 2 试块取样位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling positions in test blocks

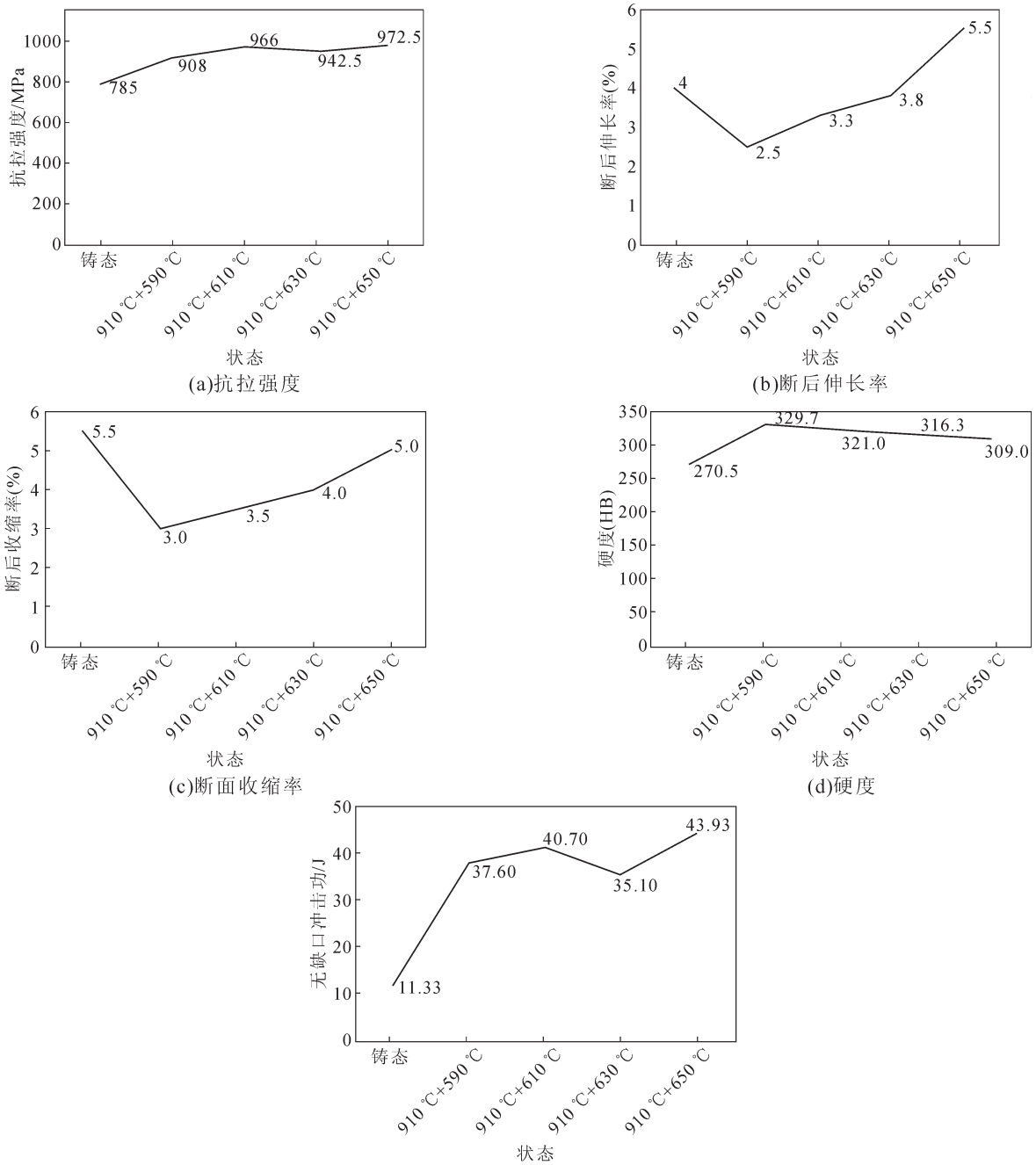


图 3 3# 材质试样热处理后的性能

Fig.3 Properties of 3# samples after heat treatment

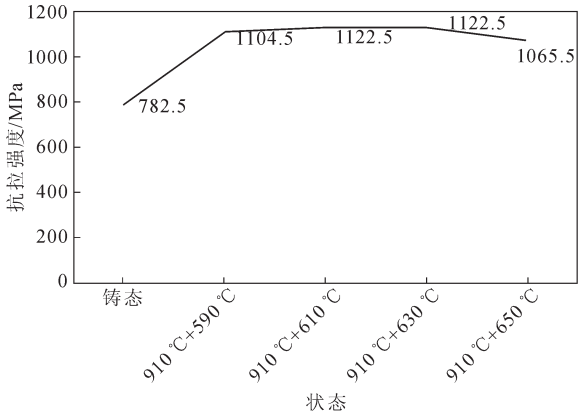
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率 5.5%，硬度 270.5 HB、无缺口冲击功 11.33 J。3# 材质试样正火温度相同时，随回火温度的升高：抗拉强度呈现波动增长，且均保持在 900 MPa 以上，在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃时出现极大值 966 MPa；断后伸长率及断面收缩率均先减小后增大，在正火温度 910 ℃+回火温度 590 ℃时均出现极小值分别为 2.5%、3.0%；硬度先增大后减小，且均保持在 309 HB 以上，在正火温度 910 ℃+回火温度 590 ℃时出现极大值 329.7 HB；无缺口冲击功呈现波动增长，且均保持在 35 J 以上，在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃时出现极大值 40.7 J。

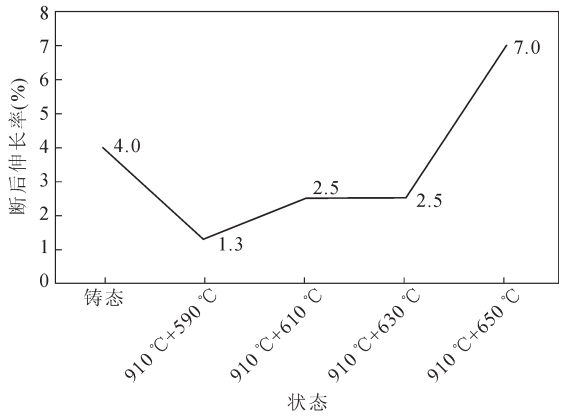
综合考虑，在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃时，3# 材质试样抗拉强度、无缺口冲击功均出现极大值，综合性能最优。

热处理后 4# 材质试样的抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率、硬度、无缺口冲击功如图 4。

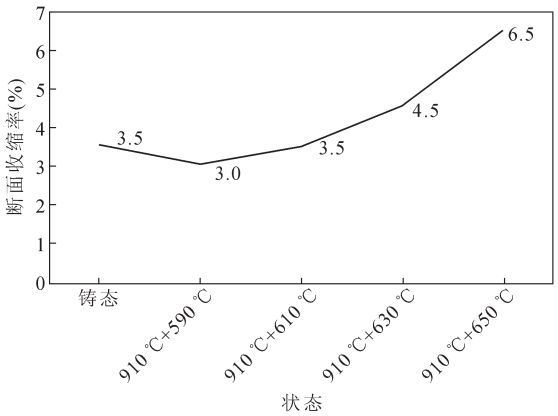
从图 4 的检验结果可看出，铸态时，4# 材质试样抗拉强度为 782.5 MPa、断后伸长率 4%、断面收缩率 3.5%，硬度 282.5 HB、无缺口冲击功 17.92 J。4# 材质试样正火温度相同时，随回火温度的升高：抗拉强度呈先增大后减小，且均保持在 1 000 MPa 以上，在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃/630 ℃时



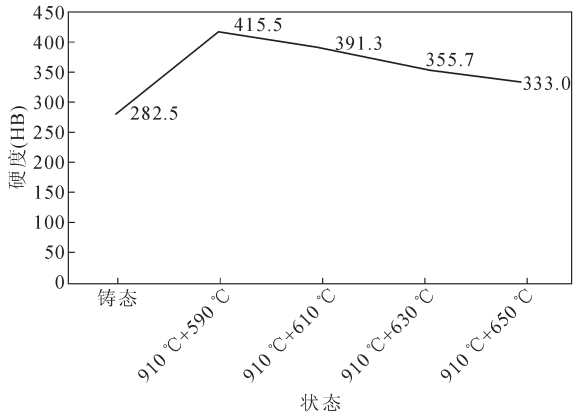
(a)抗拉强度



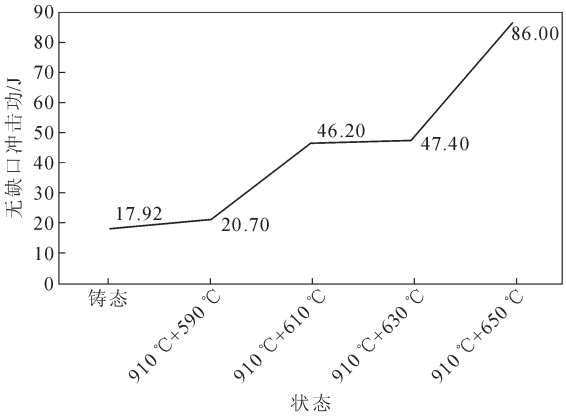
(b)断后伸长率



(c)断面收缩率



(d)硬度



(e)无缺口冲击功

图 4　4# 材质试样热处理后的性能

Fig.4　Properties of 4# samples after heat treatment

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

出现极大值 1 122.5 MPa；断后伸长率先减小后增大，在正火温度 910 ℃+回火温度 590 ℃时出现极小值 1.3%；断面收缩率先减小后增大，在正火温度 910 ℃+回火温度 590 ℃时出现极小值 3%；硬度先增大后减小，且均保持在 330 HB 以上，在正火温度 910℃+回火温度 590℃时出现极大值 415.5 HB；无缺口冲击功呈现波动增长，且均保持在 20 J 以上，在正火温度 910 ℃+回火温度 650 ℃时出现最大值 86 J。

综合考虑，在正火温度 910 ℃+回火温度 590 ℃/610 ℃/630 ℃时，4# 材质试样抗拉强度较高、数值接近；在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃/630 ℃时，4# 材质试样无缺口冲击功较高，数值接近。

纵观热处理后 3#、4# 材质试样的性能变化，4# 材质优于 3# 材质。4# 材质在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃时，4# 材质试样综合性能最优。因此选用 4# 材质和 1# 材质进行生产验证对比。

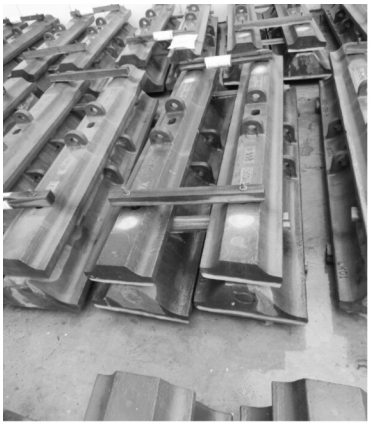
4 生产验证

笔者公司选择某矿半自磨机筒体衬板为生产验证对象，试用 12 件 4# 材质衬板、其余使用 1# 材质衬板。衬板提升条高度均为 300 mm；当衬板提升条高度低于 100 mm 时，停机拆卸衬板。为了便于对比，试制的 4# 材质衬板与同机运行的 1# 材质衬板选用同位置同结构。4# 材质衬板热处理工艺选用正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃。

热处理后，4# 材质衬板布氏硬度 310～380 HB。1# 材质衬板和 4# 材质试制衬板在同台磨机装机运行。

本台磨机从开始运行到停机拆卸衬板，共处理矿量 3 788 650 t、累计运转时间 1 750 h。运行周期内，1# 材质衬板提升条剩余厚度约 100 mm，达到了失效拆卸标准；4# 材质衬板未出现断裂、碎裂现象，衬板提升条剩余厚度约 112 mm。

在整个寿命周期内，1# 材质衬板的平均磨损率 0.528 mm/ 万 t、4# 材质衬板的平均磨损率 0.496 mm/ 万 t。经测算，当 4# 材质衬板厚度达到失效标准 100 mm 时，仍可处理矿量 24.19 万 t，处理矿量可提高 6.38%。结果表明，4# 材质的工艺优化方案是合理、有效的。



(a)安装前

(b)检修时

图 5 用户现场

Fig.5 The customer site

5 结论

(1)适度调整合金元素含量、合理设计热处理工艺，耐磨合金钢衬板铸件性能变化明显。

(2)综合热处理工艺试验的结果，纵观 3#、4# 材质的性能变化，4# 材质优于 3# 材质。4# 材质在正火温度 910 ℃+回火温度 610 ℃时，4# 材质综合性能最优。

(3)在整个寿命周期内，1# 材质衬板的平均磨损率 0.528 mm/ 万 t、4# 材质衬板的平均磨损率 0.496 mm/ 万 t。4# 材质衬板处理矿量可提高6.38%。

参考文献：

[1] 肖贤煌. 基于统计力学原理的半自磨机衬板结构优化设计[D]. 赣州：江西理工大学. 2017.

[2] 张锦志，米国发，关西周. 低合金耐磨钢的研究与应用进展[J].金属加工（热加工），2009(15)：29-31.

[3] 程瑞国，曾建辉，李子海，等. 钒钛耐磨铸钢生产工艺与性能研究[J]. 现代铸铁，2012(2):90-92.

[4] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第二卷《铸钢》[M]. 北京:机械工业出版社，2010.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net