

文章编号: 1003-7837(2004)01-0015-05

中铬合金耐磨钢的研发与应用

李 卫^{1,2}, 林怀涛², 袁军平²

(1. 暨南大学化学系, 广东 广州 510632;
2. 广州有色金属研究院耐磨材料所, 广东 广州 510651)

摘 要: 综述了中铬钢研发与应用的进展. 中铬钢在使用中不断裂、不变形、耐磨损, 使用寿命是 Mn13 的 2 倍以上, 适用于冲击磨料磨损工况. 同时介绍了一种多元合金中铬耐磨钢, 该耐磨钢的强韧性和抗冲击磨料磨损性能均高于 ZG30Cr5Mo 中铬钢.

关键词: 多元合金钢; 冲击磨损; 铬合金
中图分类号: TG142.72 **文献标识码:** A

冶金、电力、建材、建筑、煤炭、化工和机械等行业普遍存在着冲击磨损和磨料磨损工况, 每年消耗大量的磨损件, 如球磨机衬板, 破碎机锤头、板锤和颚板等. 长期以来高锰钢是这类磨损件常用的耐磨材料, 但生产实践证明高锰钢在许多工况应用是不合理的. 以我国的球磨机衬板为例, 高锰钢衬板就没有充分发挥出潜力: 第一, 高锰钢没能得到很好的加工硬化. 电厂磨煤机的大多数高锰钢衬板使用后硬度仅为 250~360HB; 即使是铜选厂直径 5.03 m 球磨机, 其高锰钢衬板使用后硬度才为 460HB. 由于未能发挥出高锰钢的加工硬化作用, 因此衬板的耐磨性较低. 第二, 高锰钢的屈服强度低, 衬板易发生变形, 造成拆卸困难, 维修不便.

针对上述情况, 尤其是针对高锰钢不耐磨的技术难题, 国内外已研发和应用了多种新型的耐磨钢铁材料^[1~6], 特别是近年来开发的空淬马氏体中铬耐磨钢用作衬板和锤头等典型耐磨件, 较成功地替代了普通的 Mn13 耐磨钢, 表现出了较高的性能(使用寿命)价格比^[3~6].

1 中铬合金耐磨钢的研发和应用进展

1.1 中铬合金耐磨钢的化学成分

中铬合金耐磨钢是中碳马氏体(或含有一定量的贝氏体)铸钢. 中铬耐磨钢的牌号和化学成分见表 1. 合金中的主要元素是 C, Cr 和 Mo.

表 1 中铬耐磨钢的牌号和化学成分
Table 1 Brand name and chemical composition of medium Cr wear-resistant steels w/%

牌号	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	S	P
ZG30Cr5Mo	0.2~0.35	0.4~1.0	0.5~1.2	3.8~6.0	0.2~0.8	≤0.5	≤0.04	≤0.04
ZG40Cr5Mo	0.36~0.45	0.4~1.0	0.5~1.2	3.8~6.0	0.2~0.8	≤0.5	≤0.04	≤0.04
ZG50Cr5Mo	0.46~0.55	0.4~1.0	0.5~1.2	3.8~6.0	0.2~0.8	—	≤0.04	≤0.04
ZG60Cr5Mo	0.56~0.70	0.4~1.0	0.5~1.2	3.8~6.0	0.2~0.8	—	≤0.04	≤0.04

收稿日期: 2003-09-15
作者简介: 李卫(1963-), 男, 辽宁营口人, 教授, 博士.

碳是影响中铬铸钢强度、硬度、韧性及淬透性的主要元素。碳量过高,钢中的碳化物量过多,热处理后形成的是高碳片状马氏体,钢的硬度高、韧性低,而且热处理时容易产生裂纹;碳量过低,铸件淬透性不足,硬度过低,耐磨性差。因此常用的中铬钢含碳质量分数为0.2%~0.7%,具体的含碳量视不同的工况而定。

铬的主要作用是提高钢的淬透性,铬元素对中

碳钢奥氏体转变曲线有较大的影响(图1)。增加铬不仅可大幅度提高中碳钢的淬透性,适合于空淬,而且可使珠光体区和奥氏体区分离,淬火中得到马氏体基体的同时也可能得到一定量的贝氏体基体,提高了钢的强韧性。铬同时可固溶强化基体,提高钢的耐腐蚀性能。铬与碳结合,形成高硬度的颗粒状碳化物,有利于提高钢的硬度。回火过程中,铬可阻碍碳化物的析出与聚集,从而提高钢的回火稳定性。

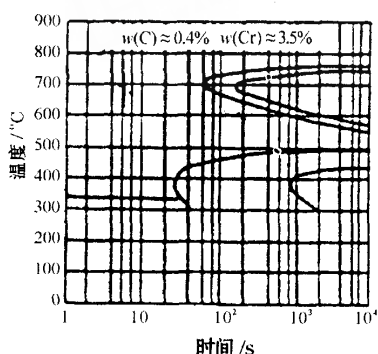
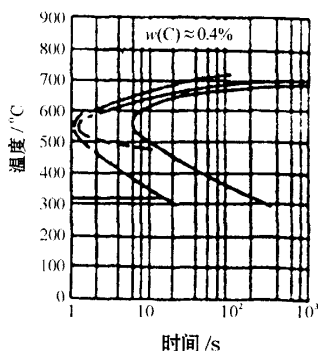


图1 铬对钢奥氏体转变曲线的影响

Fig.1 Effect of chromium on the transformation curve of austenitic steel

钼可明显提高钢的淬透性,固溶强化基体。钼与铬、锰等导致回火脆性的元素配合使用,能抑制和降低钢的回火脆性。

1.2 中铬钢的显微组织

衬板、锤头、板锤和颚板等耐磨件的使用工况是冲击载荷高应力磨料磨损。从宏观上讲,在这种条件下,首先,耐磨件必须具有一定的韧性、不破碎,保证运行安全;其次,耐磨件必须有较高的硬度和强度,保证运行中有较高的耐磨性。从微观上分析,在冲击载荷高应力磨料磨损工况下,耐磨件的磨损是疲劳剥落和显微切削(湿态磨料磨损条件下还有腐蚀磨损机制),这就要求此类耐磨件的材料既要具有抗疲劳剥落能力,又要具有抗显微切削的能力。

为了达到上述目的,中铬钢的显微组织设计以马氏体为主。对较大冲击的磨损工况应考虑钢的显微组织既有强化相和硬化相,又有韧性相。马氏体强度和硬度高,奥氏体韧性好,下贝氏体既有较高的强度和硬度,又有一定的韧性,因此可将中铬钢的显微组织设计成马氏体-贝氏体-奥氏体多相组织,其中奥氏体为淬回火后的残余奥氏体,以薄膜状均匀分布在马氏体或贝氏体之间最佳。

1.3 中铬钢的熔炼

中铬钢是采用电炉熔炼,炉前脱氧,最好是采用精炼措施,宜选用稀土硅铁等孕育变质处理。

适宜的孕育变质处理可净化钢液,脱硫、脱氧,减少夹杂物,改善硫化物夹杂的形状、大小和分布;提高钢液的流动性,减少铸件的铸造应力,减少成分偏析,提高铸钢件的抗热裂能力;细化晶粒,抑制柱状晶的发育生长;提高中碳合金钢中板条马氏体的数量,减少片状马氏体的比例,进而提高钢的综合性学性能和耐磨性能。

1.4 中铬钢的热处理

热处理基于两个方面考虑:其一,操作简便,而且尽可能降低因淬火而引起变形和开裂的可能性;其二,获得以马氏体为主的基体组织。因此,采用高温空淬+低温回火的热处理工艺比较适宜。

在相同的回火条件下,含碳量较低时,中铬铸钢的硬度和冲击韧度达到峰值所需的淬火温度较高,而含碳量较高时所需的淬火温度较低。

对含碳量较低的钢而言,较高的淬火温度,有利于铸态组织向奥氏体转变,有利于提高奥氏体的固溶度和均匀性,有利于提高其淬透性。在此条件下,钢的显微组织主要为板条马氏体和下贝氏体以及部

分残余奥氏体,其硬度和冲击韧度都较高。

含碳量较高的钢有一定的淬透性,因而淬火温度不宜太高。淬火温度过高,易导致晶粒粗大,降低合金铸钢的性能。

热处理淬透性试验表明,经高温空淬+低温回火热处理可使厚 100 mm 的耐磨件淬透,且淬后硬度

比较均匀。

1.5 中铬钢的力学性能

中铬钢常规的力学性能列于表 2。由表 2 可见,中铬钢的强韧性好,屈服强度高,不易变形,冲击韧度高不易断裂,而且有较高的初始硬度。

表 2 中铬耐磨钢的金相组织和力学性能

Table 2 Metallographic structure and mechanical properties of medium Cr wear-resistant steels

材料	金相组织 ¹⁾	σ_b /MPa	σ_s /MPa	$\alpha_{kt}/(J \cdot cm^{-2})$	HRC
ZG30Cr5Mo	M + B + A'	≥ 1200	≥ 800	≥ 100	≥ 40
ZG40Cr5Mo	M + A'	≥ 1500	≥ 900	≥ 25	≥ 44
ZG50Cr5Mo	M + A' + C	≥ 1300	—	≥ 20	≥ 45
ZG60Cr5Mo	M + A' + C	≥ 1200	—	≥ 15	≥ 50

注：1) M—马氏体,B—贝氏体,A'—残余奥氏体,C—碳化物。

1.6 中铬钢的工业应用

中铬钢的工业应用列于表 3。由表 3 可见,在大

多数冲击磨料磨损工况下,中铬钢耐磨件的使用寿命是 Mn13 钢的 2 倍以上。

表 3 中铬钢工业应用的试验结果

Table 3 Test result of medium Cr steel used in industry

应用	直径 3.2 m 磨煤机衬板	直径 1.83m 矿 山球磨机衬板	250mm×400mm 颚板	锤式破碎 机锤头	反击破板锤
中铬钢与 Mn13 钢 的使用寿命之比	2.5	2	2.2	3	2.5

2 多元合金化的中铬耐磨钢

耐磨钢的断裂、变形和磨损是生产应用中的三大问题,生产实践对中铬耐磨钢等各种耐磨材料的性能提出了更高的要求。为此,作者在中铬耐磨钢(ZG30Cr5Mo)前期研发工作的基础上,以多元合金

化和高温热处理这一技术路线,研究了多元合金化的中铬耐磨钢,进一步提高了中铬耐磨钢的力学性能和抗冲击磨损性能以及中铬钢衬板的使用性能。

2.1 试验条件与方法

本研究的多元合金中铬耐磨钢和对比试验用中铬钢(ZG30Cr5Mo)的化学成分列于表 4。

表 4 中铬耐磨钢的化学成分

Table 4 Chemical composition of medium Cr wear-resistant steels

w/%

材料	C	Cr	Mn	Si	Mo	Ni	W	Nb	Ti	P	S
多元合金	0.22~	3.8~	0.5~	0.4~	0.2~	0.2~	0.1~	≤ 0.30	≤ 0.20	≤ 0.04	≤ 0.04
中铬耐磨钢	0.38	6.0	1.2	1.0	0.8	0.8	0.8				
ZG30Cr5Mo	0.30	4.71	0.86	0.78	0.66						
									0.032	0.036	

将试验钢用中频感应炉熔炼,砂型铸造。从铸出的 Y 型试块上切取试样,采用高温箱式电阻炉进行热处理,高温均匀化和奥氏体化后在空气中淬火,并

及时在 280℃回火。

冲击磨料磨损试验在 MLD-10 型动载磨料磨损试验机上进行。试验冲击能量为 5 J,磨料为 0.4~

0.2 mm 的精制硅砂.下试样为待测的试验用钢,转速 200 r/min.上试样为配副的 Cr15 高铬铸铁(硬度 58HRC),上试样冲击频率 200 次/min.磨损试验耐磨性取失重值的倒数,采用感量为 0.0001 g 的天平称重.磨损试验数据的相对波动范围为 $\pm 5\%$.

2.2 试验结果分析

多元合金中铬耐磨钢的 X 射线衍射结果见图 2.分析表明该钢的组织是以马氏体为主的组织,残余奥氏体量为 1.6%.金相观察发现多元合金中铬耐磨钢的晶粒比 ZG30Cr5Mo 的细小.

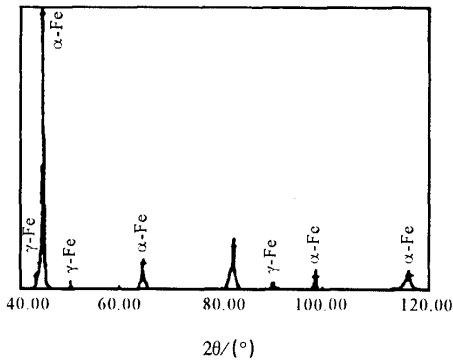


图 2 多元合金中铬耐磨钢的 X 射线衍射图

Fig.2 X-ray diffracted diagram of medium Cr wear-resistant steel

多元合金中铬耐磨铸钢和 ZG30Cr5Mo 的力学性能列于表 5.与 ZG30Cr5Mo 相比,多元合金中铬耐磨钢的强度提高很小,但其冲击韧度和塑性却大幅度提高,这就为该铸钢在大冲击载荷磨料磨损工况下安全使用和提高使用寿命创造了条件.

表 5 中铬耐磨钢的力学性能

Table 5 Mechanical properties of medium Cr wear-resistant steels

材料	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	延伸率 δ /%
多元合金 中铬耐磨钢	1595	1225	6.5
ZG30Cr5Mo	1535	1203	5.5

材料	断面收缩率 ψ /%	冲击韧度 $\alpha_{kn}/(J \cdot cm^{-2})$	硬度 HRC
多元合金 中铬耐磨钢	13	265	48
ZG30Cr5Mo	8	174	48

多元合金中铬耐磨铸钢和 ZG30Cr5Mo 相对于 Mn13 耐磨钢的耐磨性分别为 2.31 和 2.15.可见,两种中铬钢的耐磨性均明显高于 Mn13 钢,而多元合金中铬耐磨钢的耐磨性还高于 ZG30Cr5Mo,这一结果与力学性能试验结果是一致的.

在某电厂的 DTM320/580 球磨机(磨煤机)上进行耐磨钢衬板的工业应用试验.经 3.5 年运行后,多元合金中铬耐磨钢衬板的磨损量不大(图 3),形状比较完整(图 3 中双点划线为使用前衬板形状,实线为运行后衬板形状),仍然可以继续运行使用.而 Mn13 钢衬板在运行 1 年左右即严重变形且已基本磨平.相比之下,多元合金中铬耐磨钢衬板的使用寿命亦高于 ZG30Cr5Mo 衬板,表现出更优异的综合性能.

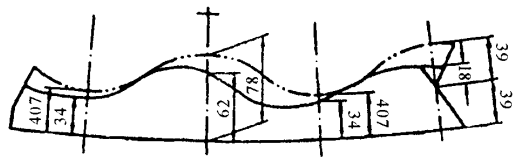


图 3 多元合金中铬耐磨钢衬板在 DTM320/580 磨煤机上运行 3.5 年后的形状

Fig.3 Shape of medium Cr wear-resistant steel liner used in the DTM320/580 coal mill after 3.5 years' operation

多元合金中铬耐磨钢的力学性能和耐磨性能高于 ZG30Cr5Mo 的主要原因是有效元素的多元合金化作用.本研究设计应用了 Cr, Mo, W, Si, Mn, Ni, Nb, Ti 多元素作用,特别是多元素的交互作用.其中 Cr 是主加元素之一, Cr 与 Mo 等元素结合,可提高钢的淬透性能,保证空淬获得以马氏体为主的基体.同时 Cr 与 Mo 配合可促使钢热处理冷却曲线中珠光体区和奥氏体区分离以及珠光体区的右移,有助于获得一定量的高强韧的贝氏体基体; Cr, Mo, W, Si, Mn, Ni, Nb, Ti 有很强的固溶强化作用,特别是发挥 Ni 对钢的强韧性的作用. Nb 和 Ti 有强的细化晶粒作用,细晶有利于强韧性的提高,特别是钢的塑韧性能.

提高钢的强韧性的首要目的是耐磨件在运行过程中不断裂和不变形,其次是材料抗疲劳和耐磨损.因为在冲击磨损中的冲击疲劳剥落和显微切削这两个磨损失效机制均与强韧性密切相关.多元合金中铬耐磨钢性能优异的另一个原因是热处理高温均匀化和奥氏体化,因为发挥多元合金固溶强化等优势须以成分的均匀化为基础.

工业试验中 Mn13 钢衬板的使用寿命较低,与实验室磨损试验结果一致,但相对值有些差异,这除

了与试验机模拟磨损的参数选择有关之外,不能忽视的一个原因是 Mn13 钢的屈服强度很低, Mn13 钢衬板在使用时的严重变形明显降低了衬板的使用寿命,这从另一方面证明本研究采用多元合金中铬耐磨钢,追求钢的高强韧性,这一思路是正确的。

3 结 论

(1) 用中铬合金耐磨钢制成的衬板、锤头、板锤和颧板等耐磨件,在使用运行中不变形、不断裂、耐磨损,使用寿命是 Mn13 钢的 2 倍以上,适用于冲击磨料磨损工况。

(2) 多元合金中铬耐磨钢具有良好的韧性和塑性,其强韧性优于 ZG30Cr5Mo。多元合金中铬耐磨钢的抗冲击磨料磨损性能不但明显高于 Mn13 耐磨钢,而且高于 ZG30Cr5Mo。

参考文献:

- [1] Gias W W, Doane D V. Martensitic air-hardenable Si-Mn-Cr-Mo and Si-Mn-Cr-Ni-Mo abrasion-resistant steels [J]. AFS Trans, 1976, 88: 603 - 614.
- [2] 李卫. 耐磨铸钢铸铁的技术进步 [A]. 2001 中国铸造活动周论文集 [C]. 沈阳: 中国机械工程学会铸造分会, 2001. 102 - 110.
- [3] 李茂林, 向启琦. 中碳多元合金钢在大中型水泥磨机衬板上的应用 [J]. 铸造, 1993, (2): 27 - 29.
- [4] 邓月声, 饶启昌, 蔡志刚. 中铬铸钢衬板及其在电厂球磨机上的应用 [A]. 第七届全国耐磨材料学术会议论文集 [C]. 北京: 中国金属学会耐磨材料学术委员会, 1994. 37 - 41.
- [5] 戴敦才, 林怀涛, 赵四勇, 等. 铬钼钨合金耐磨铸钢的研制 [J]. 铸造, 1996, (11): 11 - 15.
- [6] 戴敦才, 曾耀东, 赵四勇, 等. 铬钼钨合金铸钢组织与耐磨性的探讨 [J]. 机械工程材料, 1997, 21(2): 36 - 38.

Research and application of medium Cr wear-resistant alloy steels

LI Wei^{1,2}, LIN Huai-tao², YUAN Jun-ping²

(1. Department of Chemistry, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. WRMC, Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510651, China)

Abstract: Application and research of medium Cr steels are introduced in the paper. Medium Cr alloy steels are wear resistant materials. They are characterized by good wear resistance, non-fracture and non-deformation in use. As compared with 13% Mn steel parts, the service life of medium Cr steels parts is two times over of it. The steel is applicable to impact attrition wear. And a new type of medium Cr wear resistant steel with other alloy elements, which has higher strength, toughness and impact abrasive wear resistance than ZG30Cr5Mo steel, is introduced.

Key words: multicomponent alloy steel; impact wear; chromium alloy