

耐火砖成形模具材质探讨和初步研制

李世祥 孙玉福 李亚涛

周济时

(郑州工学院)

(河南省科委干部管理学校)

摘要: 本文通过对耐火砖成形模具磨损机理和对现有耐火砖成形模具用材质的分析与比较,从“综合效益”原则出发,试制了一种适合于一般耐火材料厂实用的模具钢——空淬微变形低合金耐磨铸钢。该材质材料来源充足,成本低,耐磨性较好。与低碳钢渗碳模具相比,平均寿命可提高2倍以上。同时,返修工艺简单。

关键词: 耐磨铸钢, 空淬

中图分类号: TG76

目前,在我国耐火材料制砖行业中,90%左右的生产厂家仍在沿用A3钢、15钢、20钢等低碳钢种渗碳制作耐火砖成形模具。该类模具的侧板和堵板寿命低,消耗量大。据有关资料报导,仅河南省每年需消耗耐火砖成形模具用低碳钢板7000余吨。由于侧、堵板耐磨性差,制作的耐火砖坯质量低下,严重地影响了生产产量、产品质量,阻碍了生产技术的发展,影响企业上水平,创效益。模具寿命过低这个问题长期来一直困扰着各个生产厂家,为此,开发研制适合我国耐火材料制砖行业现有模具制造技术水平和消费水平的新的模具材质已是当务之急。

1 耐火砖成形模具磨损分析

1.1 磨损分析

以“直形砖”为例,其模具由六块模板组成。即底、盖(顶)板各一块,侧板两块和堵板两块。压制砖坯时,侧板、堵板始终固定,底板在下,盖板随摩擦压力机锤头向下运动,将按一定比例混合好的一定量的耐火材料(粘结剂、耐火骨料)锤击压紧(一般是多次锤击成形),出坯时,底板向上运动将砖坯顶出。整个运动过程其侧板、堵板受力情况如资料[1]所说:物料在压力机的正压力传递下,使模具承受近似均匀的侧压力作用。模具在侧压力作用下又要承受弯曲应力。当正应力去除后,弯曲应力以剩余侧压强方式作用在耐火砖坯上。

在制坯过程中,磨粒(耐火材料颗粒)与侧、堵板表面接触处的压应力,即法向应力

* 收稿日期: 1992-09-26

来自侧压力。侧压力的大小随摩擦压力机吨位大小而变化。法向应力（接触压应力）的大小除与侧压力成正比外，还与磨粒大小，几何形状有关。当磨粒与模具接触表面产生相对滑动时，作用于侧、堵板表面的切向应力来自压力机的正压力。切应力的大小除与压力机的正压力有关外，也与磨粒大小，几何形状有关。如图 1 所示。在出坯过程中，法向应力来自侧、堵板的弯曲应力的反作用力。作用于侧、堵板表面的切向应力来自底板向上的推力。

压制和出坯过程只是四周的耐火材料颗粒与侧、堵板表面二者间发生相互摩擦，导致侧、堵板摩擦表面产生磨损现象，是典型的“两体磨粒磨损”。这一两体摩擦主要是以滑动摩擦形式为主。磨损过程参见资料[2]。压制砖坯时，由滚动摩擦逐渐过渡为以滑动摩擦为主。出坯时基本上是纯滑动。另外侧板与堵板构成的内腔尺寸是上大、下小，越靠下部即趋近最后成形时，侧压力越大。因此，侧、堵板越靠近砖坯最后成形的部位磨损越严重。如图 2 所示。

根据磨料磨损的机理分析，当法向应力使磨粒尖角处的压强大于摩擦材料表面屈服强度时，磨粒尖角的部分将嵌入被摩擦金属材料的表面，在切向应力的作用下产生相对滑动，这样磨粒对被摩擦表面产生切削作用，塑性变形和疲劳破坏作用或脆性断裂。耐火砖成形模具就是基于这种机理而造成侧、堵板的摩擦表面形成微细沟槽而被磨损失效。

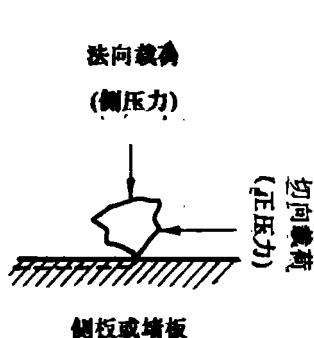


图 1 耐火材料颗粒对侧、堵板的磨损示意图

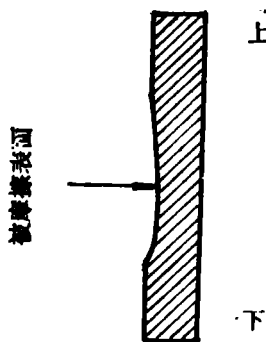


图 2 侧板磨损剖面图

1.2 影响模具磨损的因素

影响磨料磨损的因素是诸多方面的，也是综合性的。如：磨料的几何形状、大小和机械性能（硬度、强度等），以及磨粒与被摩擦表面的碰撞角度 α 大小等。磨料磨损在进行的时候，磨粒的几何形状、大小的改变和其化学性质都将对磨损过程产生影响；磨损材料的性能。金属材料在摩擦前的组织和性能，如基体组织的类型，是单相还是多相，多相组织中弥散相的体积百分数，弥散相和基体的结合性质，以及弥散相的类型、形状大小和分布情况。在摩擦进行中金属材料的组织与性能的变化等也都直接影响耐磨性。还有工况条件等。

1.2.1 磨粒硬度和材料的硬度间的关系

当磨粒硬度 (H_a) 远远大于材料硬度 (H_m) 时，磨损是严重的；磨粒硬度小于材料

硬度时, 磨损迅速减小。

资料^{(3)、(4)}指出, $H_a > (1.3-1.7) H_m$ 时, H_a 再增加, 则对磨损量已没什么影响。这时 H_m 是控制因素, 提高 H_m 可减少磨损体积。但是当 H_m 过高时, 虽然磨粒对其擦伤磨损会减弱, 而疲劳磨损则会构成主要磨损形式, 故金属材料的抗磨性提高就不那么明显了。

耐火材料中的石英 (SiO_2)、刚玉 (Al_2O_3)、碳化硅 (SiC) 等的硬度均大于一般钢铁材料制作的模具的宏观硬度, 为硬磨粒磨损, 金属材料磨损严重。

1.2.2 金属材料机械性能对磨粒磨损的影响

拉宾诺维茨和赫鲁绍夫早已提出磨损和硬度间的关系。见图 3。

拉宾诺维茨提出的经典磨料磨损模型:

$$Q = K \frac{P_N}{H}$$

式中 Q : 磨损体积;

P_N : 作用在磨粒上的法向载荷;

H : 材料硬度;

K : 不同条件下的磨损系数。

这说明了磨料磨损与法向载荷 (以及滑动距离) 的大小成正比, 与材料硬度成反比。

虽然材料表面的硬度对耐磨性影响极大, 但是硬度不能完全决定磨损量大小。因为它既不能代表塑性流变特征的大小, 也不能代表材料对裂纹的产生和扩展敏感程度。这可用邱格尔将断裂力学模型用来计算简单磨粒的临界载荷来加以说明。

裂纹开始形成的临界载荷 (P_c)

$$P_c \propto \frac{\lambda^{1/2} \cdot K_{IC}^2}{D^2 \cdot \mu^2 \cdot H} \quad (1)$$

与此相应的为临界压痕或临界犁沟深度 (t_c)

$$t_c \propto \frac{\lambda^{1/2} \cdot K_{IC}}{D \cdot \mu \cdot H} \quad (2)$$

①、②式中 K_{IC} ——断裂韧性;

H ——被磨表面硬度;

D ——磨粒间距离 (约等于磨粒直径);

μ ——摩擦系数;

λ ——有利于裂纹扩展的显微组织参数 (即碳化物、微裂纹、石墨层及原奥氏体晶界等) 间的平均自由程。

由以上两式可以看出, 一般地讲 H 增加, 则 K_{IC} 降低, 临界载荷 P_c 减小, P_c 减小则抵抗载荷的能力减少。一旦 $P > P_c$, 则发生断裂与大块材料的剥落。反之, 当 H 减小 K_{IC} 提高, 则 t_c 增加, 即犁沟深度加深, 引起塑变亦加速磨损。由此说明硬度与断裂韧性必须密切合理地匹配, 才能有利于材料耐磨性的提高。

金属的耐磨性是组织与一系列性能的恰当组合⁽⁵⁾。在一个整体材料中, 实际不可能

在单相的二元合金或多元合金中获得相互矛盾的物理-力学以及其它性能(例如高硬度+高塑性)。但是可以在多相合金中实现。在多相合金(显微的多相)中不但能得到各种性能的有利复合,而且由于各种类型点阵的相间作用和互相影响;使性能得到显著的改善。

含碳量较高的马氏体硬度高、强度高。如果固溶体中的含碳量控制得当,淬火可得到较多的板条状马氏体,其冲击韧性值也就较高。碳化物是改善钢铁材料耐磨性的重要因素,当马氏体基体中分布着大量弥散状态的碳化物,尤其是超硬碳化物时将显著提高材料的耐磨性。残余奥氏体对硬的碳化物有缠绕钉扎作用与抑制表面裂纹的产生和扩展作用,所以钢中含有适量的残余奥氏体对耐磨性也是十分有利的。这几种相的有机配合,能够使材料得到高硬度,同时又具有较高断裂韧性的相互矛盾的综合的机械性能。

2 耐火材料成形模具现用材质 分析与比较

2.1 低碳钢渗碳模具

低碳钢渗碳模具,一般渗碳层在 2mm 左右,淬硬层浅、磨损快,返修率高,反修费用高,返修工艺麻烦,且周期长。碳钢淬透性低,水淬易产生软点软面,变形量大。加之基体材料淬硬能力差,削弱了对渗碳层的支撑作用,在法向应力的作用下渗碳层易变形诱发裂纹产生和扩展而导致模具早期失效。在各种碳化物中 Fe_3C 的耐磨性最差,而且与马氏体硬度相近。资料^[6]中指出,碳化物的硬度和基体硬度差不多时,这时碳化物就象内缺口一样,对磨损非但无益反而有害。因此用低碳钢渗碳制作耐火砖成形模具的侧、堵是不适宜的。

2.2 45 钢、40Gr 钢

45 钢、40Gr 钢属于结构钢,一般在调质状态下使用,作轴类较多,虽经表面淬火处理硬度能达 HRC60-64,但由于基体含碳量不高,所以耐磨性差。同一硬度不同材料其耐磨性不一样。这类材质完全不适宜制作耐火砖成形模具。

2.3 高碳高合金钢

目前很多国家采用耐磨性能好的冷作模具钢制作耐火砖成形模具,如美国用 440 系的 A7 钢;西德、瑞士用 Cr12 系列模具钢。这些高碳高合金钢中有较多的合金碳化物,耐磨性好,是较理想的材质。但它们价格高,制作加工较困难,现成型材来源有限。

2.4 普通白口铁和合金白口铁

普通白口铁尤其是合金白口铁制作的侧、堵板其耐磨性也较好,缺点是机械加工困难,冲击韧性较低,抗弯曲疲劳性能差,易断裂。有待进一步地提高和完善。

2.5 硬质合金

将硬质合金镶嵌粘结在衬板上(衬板采用碳素钢),由于硬质合金的宏观硬度高,

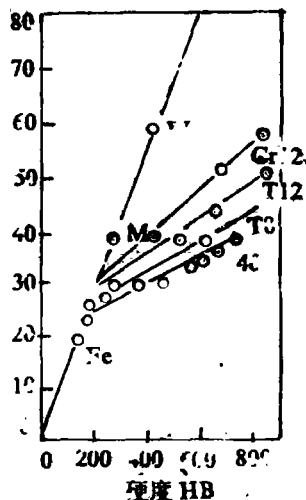


图 3 热处理硬度与相对耐磨性的关系

HRA90 左右, 抗压强度高达 6000 MPa, 改变了与磨料硬度的比值, 使 $H_a/H_m < 1.1$, 因此制作的侧、堵板寿命比低碳钢渗碳模具提高 30—100 倍。很适合用来生产大量的直形标准砖。现由于本身的生产制作工艺受到某些限制, 加之价格昂贵, 同时要求操作使用严格, 目前马上大量推广还有些困难。

3 空淬微变形低合金耐磨铸钢的研制方法

3.1 侧、堵性能指标的拟定

硬度 $HRC > 60$; 冲击韧性 $a_k > 20 J/cm^2$; 抗拉强度 $\sigma_b > 850 MPa$; 金相显微组织为 $M_{回火} + \text{粒状碳化物} + \text{适量 } A'$; 获得完全马氏体板状淬透尺寸 $> 50 mm$ 。

3.2 成分设计

在优先考虑提高模具寿命的同时, 也必须考虑材料来源, 冷热加工工艺性, 修复工艺, 成本, 以及中小型企业经济上和心理上的承受能力。亦即从“综合效益”的原则出发选择研制新的模具材质。作者试制了一种“空淬微变形低合金耐磨铸钢”(以下简称 KDM 铸钢)。

3.2.1 锰、硅的确定

锰和铁可形成固溶体, 同时又是碳化物的形成元素。锰显著降低过冷奥氏体的分解速度, 使钢的 C 曲线向右移, 临界淬火速度显著减小, 大大地提高了钢的淬透性。从而减小了淬火中的应力和变形, 为铸钢件的热处理带来了很大便利。

在中碳钢中当锰量由 0.57% 增加到 2.2% 时, 可使临界淬火速度由 $520^\circ C / \text{秒}$ 降低到 $8^\circ C / \text{秒}^{[7]}$ 。因此, 将锰含量选择为 1.6—2.0%。

硅在钢中不形成碳化物, 是以固溶体的形态存在于铁素体和奥氏体中。它对提高钢中固溶体的强度和冷加工变形硬化率的作用极强, 能提高钢的回火稳定性, 减轻低温回火脆性。硅含量小于 1% 时能使锰钢产生明显强化作用, 而塑性几乎不下降。适当的含硅量可在提高强度的同时, 还增强冲击断裂能力。硅含量为 0.60—0.90%。

硅和锰的共同作用使钢的淬透性进一步提高。硅与锰一起使用, 便于形成低熔点的易于排除的锰硅酸盐, 减少了钢中非金属夹杂物含量, 起到纯净钢液的作用。

3.2.2 铬、钼的确定

铬和铁形成连续固溶体, 与碳形成多种碳化物。含铬量小于 2% 时有提高钢的塑性作用。铬能有效地延长奥氏体转变的孕育期, 即减缓奥氏体的分解速度, 显著提高钢的淬透

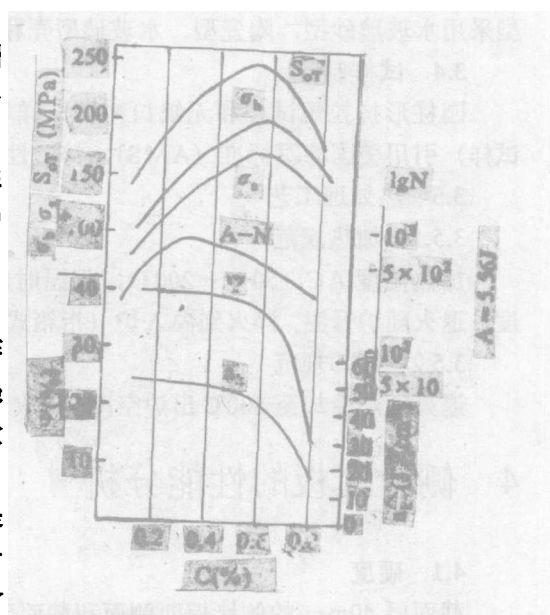


图4 低温回火态, 钢的含碳量

对综合力学性能的影响

性。同时还能提高钢的回火稳定性。当钢中碳量相同时,随含铬量的增加其淬火变形量逐渐减小。当铬量高于 1.65% 时会增加残余奥氏体量。故含铬量选为 0.9—1.3%。

钼在钢中既可固溶于铁素体或奥氏体中;又可形成碳化物。当钼含量在 0.2%—0.80% 时与导致回火脆性的元素 Cr、Mn 等配合使用,却可降低或抑制回火脆性。少量的钼溶于基体中可细化晶粒和提高基体的显微组织硬度,同时可弥补铬大量进入碳化物中而造成的基体铬含量不足。钼的加入量为 0.25—0.45%。

3.3.3 碳的确定

碳量决定碳化物的数量,形成碳化物的合金元素决定碳化物的类型。碳和合金元素的含量决定着基体和碳化物中的碳和合金元素的溶入量。

资料^[8]指出,碳的含量既要保证产生足够的碳化物;以使钢获得良好的耐磨性,还应使马氏体中有 0.45—0.60% 的固溶碳,使基体主要为板条马氏体;以期达到良好的综合力学性能。如图 4 所示。碳量选取为 0.6—1.10%。

KDM 铸钢成分见表 1。

表 1 KDM 铸钢化学成分

钢 号	成分(%)					
	C	Cr	Mn	Si	Mo	Re 残留
KDM 铸钢	0.60—1.10	0.90—1.30	1.60—2.00	0.60—0.90	0.25—0.45	0.06

3.3 熔铸工艺

炉前配料和熔化浇注工艺与一般低合金铸钢基本相同。中频感应炉熔炼 (60kg), 铸型采用水玻璃砂型, 陶瓷型、水玻璃型壳和金属型等。明冒口立浇顶注。

3.4 试样制备

圆柱形抗拉短试样和无缺口冲击试样均由 Y 型试块加工而成, 淬火变形试样 (C 形试样) 引用美国海军标准 (AMS); 淬透性试样自制实测; 金相试样采自侧板本体。

3.5 热处理工艺

3.5.1 加热规范

加热温度 $AC_1+50—200^{\circ}\text{C}$; 保温时间比相同含碳量的碳钢延长 25—40%; 加热速度: 退火随炉升温, 淬火到温入炉 (指箱式电阻炉)。

3.5.2 冷却规范

退火随炉冷却至 500°C 出炉空冷; 淬火出炉空淬, 急冷度 $H=0.02—0.05$ 。

4 侧、堵板的性能分析

4.1 硬度

截面厚 40mm 的侧堵板两侧面和截面硬度 $HRC>60$, 整个截面硬度差 $HRC<3$ 个单位。

4.2 侧、堵板的金相显微组织

退火状态显微组为: 球粒珠光体+粒状碳化物, 见图 5; 淬火、回火后的显微组织为:

回火马氏体+粒状碳化物+残余奥氏体, 见图 6, 断口形貌如图 7 所示。

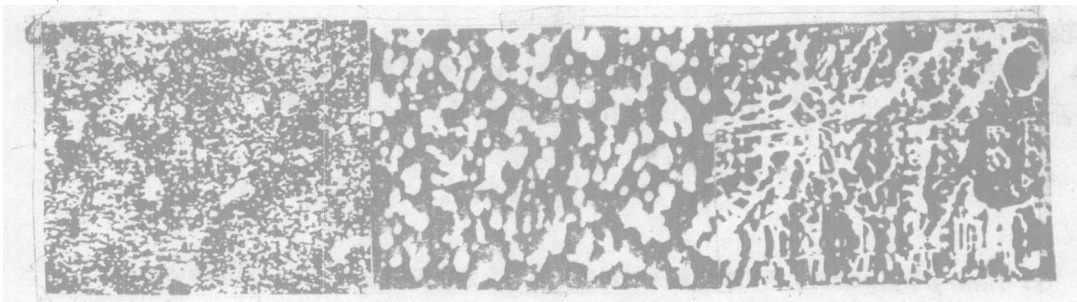


图 5 等温球化退火, C1.05% 图 6 淬火+低温回火 C1.05% 图 7 淬火+低温回火 C0.67%
500× 球粒状珠光体+粒状碳化物 SEM2500× 断口形貌 SEM2500×

4.3 性能分析

KDM 铸钢机械性能和热处理工艺性能见表 2

表 2 KDM 铸钢机械性能和热处理工艺性能					
硬度 >(HRC)	抗拉强度 σ_b (MPa)	冲击值 ak (J / cm ²)	板状淬透尺寸 (mm)	长度变形量 (%)	绝对弯曲变形量 (μ m)
>60	>1000	>25	>6.2	0.13	<100

4.4 工业性磨损试验

用实验磨损方法模拟实际生产中的侧堵板的磨损情况较为困难, 故以生产对比试验实测为主。表 3 为 KDM 铸钢、低碳钢渗碳模具试验统计平均结果。

表 3 KDM 铸钢、低碳钢碳渗碳模具试验结果

模具材质	砖 型	耐 火 砖 材 质	压 砖 机 型 号	单 砖 加 压 次 数	压制砖坯数			磨损量 (mm)	
					正面	反面	合计	正面	反面
低碳钢渗 C	T ₃	高铝	300T	4-5	1200	1200	2400	>0.5	>0.5
KDM 铸钢	T ₃	高铝	300T	4-5	4100	4100	8200	0.42	0.42
低碳钢渗 C	P30	磷酸盐	400T	7-8	1000	1000	2000	>0.5	>0.5
KDM 铸钢	P30	磷酸盐	400T	7-8	3800	3800	7600	0.45	0.45
备 注	压制砖坯数和磨损量均为统计平均数。								

5 结论

5.1 通过对侧、堵板的磨损机制的粗略分析, 以及对现用侧、堵板材质的分析比较, 初步拟定了主要机械性能指标。

5.2 KDM 铸钢耐磨性较好, 用其制作的侧、堵板使用寿命是低碳钢渗碳模具的 3 倍以上, 适合制作各种规格型号的耐火砖成形模具的侧、堵板。

5.3 KDM 铸钢模具制造工艺和返修工艺简单, 材料来源充足, 成本低, 节能, 节材, 有较好的综合效益。

5.4 为进一步提高 KDM 铸钢模具的使用寿命, 还有待更深入地研制, 如机械性能指标是否合理, 显微组织的相组成以及各相间的比例楞调等。

参 考 文 献

- (1) 洛阳工学院耐磨材料研究室. 耐火材料制砖模具失效分析与选材. 1989. 协会交流资料
- (2) 櫻井俊男, 中清一郎. トライ・ロミ——摩擦・潤滑・摩耗, 1983.10
- (3) 蔡泽高, 刘从宽, 王承忠, 郑文龙. 金属磨损与断裂, 1985.6
- (4) 高彩桥. 摩擦金属学 1988. 3
- (5) H.M. 柳巴爾斯基著, Л. С. 巴拉特尼克. 高彩桥译. 摩擦的金属物理 1984.12
- (6) 邹荷生. 电力机械 1982.[4]
- (7) 李隆盛. 铸钢及其熔炼, 1985
- (8) 冯晓曾, 李士玮, 武维扬, 何世禹. 模具用钢和热处理. 1982.11

The Material Investigation of the Refractory Model and Its Preliminary Manufacture

Li Shixiang Sun Yufu Li Yatao (Zhengzhou Institute of Technology,

Zhou Jishi (Management Academy of Henan Province Science and Technology Committee)

Abstract: This paper has briefly analysed the wear mechanism for the model which moulds the refractory bricks and has made a comparison among the generally being used refractory brick model materials. Based on the principle of the "maximum benefit", we have studied a kind of steel for the refractory brick model — "air quenching, a minute deformation and wear-resistant cast steel containing low alloying elements". This kind of steel has the following benefits: lower cost, rich in raw materials, better in wear-resistance. The model has a long life which lasts 3 times as long as carburized low carbon steel model and it is more easier to repair than the other model. The steel is just a material for general refractory brick factories.

Keywords: Wear-resistant Cast steel, Air Quenching