

第3届

全国金属耐磨材料学术会议 论文选集



● 高铬铸铁是制造
泵轮、磨球、衬板、
煤粉弯管等耐磨
件的理想材料。

欢迎选用

GT15-2-1 高铬铸铁 国际流行的高级抗磨材料 荣获 1980 年国家发明四等奖

我厂与西安交通大学共同研究
的高铬铸铁新工艺。应用该工艺生
产的E70磨上下磨环、PZM1600/
1300平盘磨辊套和衬板，使用寿命
优于进口同类产品。获水电部和陕

西省1980年优质产品奖。四年为国
家节约外汇250万美元。

西安电力机械厂

厂址：陕西省西安市东郊半坡村
电报：2731 电话：39901
企业负责人：陈正华

中国金属学会耐磨材料学术委员会 编
《水利电力机械》编辑部

编 者 的 话

中国金属学会金属耐磨材料学术会议于1985年10月在西安市召开。会上交流了耐磨合金钢、合金铸铁、表面合金化和磨损机理等方面论文104篇。由金属耐磨材料学术委员会聘请10位同志组成论文评审委员会，对本届会议上交流的论文分别进行了评审。评审者认真地提出书面评审意见，为本选集选文提供了较全面的参考依据。但由于出版条件所限，选集不能刊载更多的论文，在此，特向没有列入本选集的论文作者表示歉意。

选集中刊载了特殊钢学会理事长刘嘉禾同志在金属耐磨材料和磨损讲座班上的“低合金钢和合金钢的技术进步对耐磨钢发展的影响”学术报告摘要。报告中介绍有关特殊钢领域里的新技术新工艺应用，对研究和发展金属耐磨材料将会有很好的借鉴作用。

本选集的审稿、编辑、校对、出版和发行工作，得到《钢铁》编辑部、《水利电力机械》编辑部大力协助，谨致以谢意。

张 清

1986年7月

(34554/34) 310554/110



目 录

编者的话	张 清
低合金钢和合金钢的技术进步对耐磨钢发展的影响	刘嘉禾 (1)
钢的力学性能参数对磨料磨损耐磨性影响的研究	赵会友等 (3)
合金钢的力学参数与耐磨性的关系	李 琦等 (8)
钒和基体硬度对通用高速钢耐磨性与磨削性的影响	赵 燕、王世章 (15)
低强度钢在振动磨粒磨损中的低周次疲劳磨损机理	刘佐民 (22)
低合金高强度钢的磨料磨损与材料的组织特性	张振洪、金毓洲等 (27)
中碳和高碳铬钼钢耐磨性的研究	李 琦、张 清 (30)
ZG28Mn2 MoVBCu耐磨钢的研制	李恩辙 (34)
中碳钢及中碳低合金钢动载磨料磨损性能的研究	郑有才等 (38)
通用高速钢磨损机理的初步研究	赵 燕、王世章 (40)
低碳马氏体在风铲零件上的应用	汪国正 (44)
轧钢导卫板材质试验	聂若新 (49)
提高斜轮重介选煤机排矸轮寿命的研究	丁庆如 (52)
奥氏体中锰钢中Nb的C、N化合物形成及其对耐磨性的影响	何镇明等 (57)
高锰钢加工硬化性问题初探	蒋伯诚 (62)
锤式破碎机高锰钢锤头的节能初化处理	毛志远、王达昌等 (65)
圆锥破碎机衬板钢ZGMn13CrTi的试验研究	管秀发等 (69)
耐磨损及腐蚀的28Cr白口铸铁	周庆德、贺 林 (73)
含硼高铬铸铁的组织与性能	周庆德、燕 平 (81)
我国白口铸铁的生产工艺及理论研究	王兆昌 (89)
高铬铸铁冲蚀磨损特性研究	黎志欣等 (94)
复合锤头试验研究	张庆安、黄 修 (103)
挖泥船泥浆泵高铬铸铁衬板的研制	王小同、丰桂莲等 (108)
高铬白口铸铁断裂韧性与常规力学性能之间关系的探讨	饶启昌、周庆德 (112)
高铬白口铸铁中的奥氏体在反复冲击工况下对裂纹形成和扩展的影响	刘鸿祺、谷淑媛 (117)
碳化物的位向及尺寸对高铬铸铁耐磨性的影响	贾育丁、苏俊义 (120)
铬系白口铸铁的干式和腐蚀磨料磨损特性及热处理的影响	金远智 (129)
凸轮泵材料摩擦磨损特性的研究	冯以盛、黄水兴 (133)
高硫磷抗磨白口铸铁的性能及生产	崔庆喜 (140)
加铈冷硬抗磨铸铁	汪大经等 (144)
灰口铸铁汽缸套激光热处理后显微组织及耐磨性的研究	沈 莲、周家瑾等 (147)
三种白口铸铁材料的抗磨料磨损对比试验与分析	王 铁、孙蓉珠 (151)
水泥磨机衬板磨损失效分析	李茂林等 (159)

CrWMn钢渗钒层磨损特性研究.....	张梦熊等 (164)
离子氮化、复合处理残余应力及残留奥氏体对力学性能的影响	林化春、李凤照 (168)
碳化钨硬质合金颗粒堆焊材料耐磨性的研究.....	李力军、杨瑞林 (174)
煤的混合磨料磨损特性.....	邵荷生等 (179)
渗碳层中残余奥氏体的滑动磨损特性.....	高彩桥、武高辉 (183)
煤的磨料磨损特性的进一步研究.....	邵荷生等 (185)
大型开坯轧辊弥散硬化钢堆焊工艺研究.....	陈学成 (189)
磨球磨损中的疲劳机制研究.....	全健民等 (192)
纯煤的软磨料磨损特性.....	汪 宁 (196)
铸铁件表面合金化的研究与应用.....	袁绪华等 (200)
球磨机高铬铸钢衬板失效分析.....	唐山水泥机械厂、农机化研究院工艺所 (206)
附 录	
论文评选.....	(210)
中国金属学会特殊钢学会金属耐磨材料学术委员会成员名单.....	(212)
中国金属学会金属耐磨材料学术委员会征文通知.....	(213)

低合金钢和合金钢的技术进步

对耐磨钢发展的影响

特殊钢学会理事长 刘嘉禾

由于石油和合金资源的日益短缺,使用要求逐步提高,近一二十年来低合金钢和合金钢的生产技术发生了很大变革,主要表现在利用微合金化代替传统的合金化,大大节约了资源;把热处理并入了热变形过程之中,降低了能耗;采用喷吹技术和炉外精炼把钢中有害气体和杂质降低到很低水平,使性能显著提高;通过技术杂交互相渗透,创造了许多新型材料。下面分别介绍一下这些方面的进展,并探讨它对耐磨钢的推动和影响。

(一)、微合金钢的兴起

微合金钢较之传统低合金钢使用的合金元素少1/10到1/100,而性能特别是焊接性和低温韧性却大幅度提高,利用晶粒细化和析出强化解决了强度与韧性的矛盾,这就为降低碳当量以改善焊接性能,提高强度而又不恶化塑性和韧性创造了条件,常用的微合金化元素钒、铌、钛等,世界储量丰富,可供使用上万年到千年,现在世界微合金钢产量已超过六百万吨,使用领域扩大到建筑用钢筋、钢轨、桥梁、造船、采油平台、油气输送管线、工程结构等各个方面,大有取代传统低合金钢甚至专用碳素钢之势。它不仅仅是一般的新型材料,由于其经济效益显著,已成为重要的更新换代材料。近年来它又跨出了低碳轧材范围向中碳锻材和铸件扩展,也显示了光辉前景。传统的高强度低合金钢早已在耐磨部件上使用,如锰钢和锰硅钢用于采煤机械的刮板、槽帮和园环链;锰钢、硅钢、铬钢等用于耐磨钢轨;可焊接高强度钢用于重载汽车的箱体;多元低合金调质钢用于球磨机衬板等。近些年来在原有钢基础上也加入了微合金元素,如在高碳铬钢基础上加入0.1%左右的钒,使组织仍保持全珠光体,但通过VC的析出,把强度和耐磨性又提高一步,但总的来说,使用微合金化元素仅是锦上添花,以析出强化为主的新型耐磨钢发展不快,充分利用晶粒细化作用以提高耐磨性和韧性的材料也不多,我相信把微合金钢在工程结构方面的成就,嫁接和移植到耐磨部件,对改善磨料磨损和冲蚀磨损将大有前途。

(二)、控制轧制和控制冷却技术的发展

过去轧钢主要是保证尺寸外型,钢材的性能主要取决于化学成份和后步的热处理,由于控轧控冷新技术的发展,把热处理纳入了成型过程之中,使轧钢技术从带有经验的工艺性质进入到更加科学化阶段,通过形变与温度的结合,通过冷却速度的控制,使用很少的合金元素便可达到甚至超过过去较多合金元素的性能,冷却水起到了合金元素的作用,钢中的有害元素(如氮)变成了有利元素,不仅改善了焊接性,提高了低温韧性,还省去了耗能的热处理工序,这项新技术不仅低合金高强度钢在大量采用,现在已推广到其它钢类,如轴承钢经过控轧控冷改善了球化退火组织,缩短了退火时间;汽车用曲轴连杆,用微合金钢加控冷代替了传统的中碳结构钢,省去了调质处理,我想在耐磨钢领域也有用武之地,至少可以简化热处理工序,降低合金用量。

• 1 •

(三)、炼钢技术的进步

喷射冶金和炉外精炼最近有了很大发展。通过喷吹碳化钙、带涂层镁粒、合成渣、硅钙、石灰、苏打等不仅可降低铁水中的磷、硫含量还可以同时脱硫脱磷，为下一步炼钢或铸铁、铸钢创造了优质铁水条件。在钢包中喷吹硅钙、稀土，不仅减少了夹杂数量，改变了夹杂物形态还可以把硫含量降至0.005%以下，使钢材的纵横向性能差减少，冲击韧性大大提高。通过喷吹加入铁合金，可使回收率显著提高，成份控制更加准确。根据不同需要，发展了许多型式的炉外精炼设备，如氩氧炉、钢包炉、真空处理装置、真空加热脱气炉、真空吹氧脱气炉等使钢中的有害气体和杂质大大减少，质量性能显著提高，现在已成为生产优质高性能钢材不可缺少的手段。其他如顶底吹复合吹炼、超高功率电炉、特种冶炼等新技术还有很多，这里就不一一列举。为了与耐磨钢的生产更直接结合，下面简要地介绍一点返元脱磷技术的进展。高合金钢常用返回法冶炼，增磷和回磷问题日益突出，在不锈钢方面采用 $\text{CaF}_2 + \text{CaO}$ 渣重熔脱磷，已取得很好效果。在钢包喷吹脱磷方面国内也有进展，高锰钢还原脱磷，云南吕合煤矿王承尧同志等开发了钡系渣脱磷新工艺，在造渣材料中加入2~3%的碳酸钡，无论装料时加入，还是在炭粉还原渣变黄后加入，均取得了好效果。为了发挥含钡渣的脱磷作用，要加强搅拌，钢渣混冲，他们得到磷从0.05~0.058%降到0.03~0.04%的结果，挽救了大批不合格炉次，取得显著经济效益。我认为喷吹技术，炉外精炼技术在耐磨钢的生产上也会发挥作用。

(四)、技术杂交渗透促进新钢种的开发

这方面的例子很多：如高速钢由高碳降为中碳用于模具钢，不锈钢利用沉淀强化作用发展为高强度钢，充分发挥晶粒细化作用以微合金钢代替含镍的低温钢，低碳板条马氏体钢代替传统的中碳含硅弹簧钢等等。这里我介绍一些双相钢的情况。为了减轻车身自重的需要，提高强度而又不损害冲压成型性，开发了在铁素体基体上分布着5~20%岛状硬马氏体的双相钢，这种钢无物理屈服现象，具有高塑性和高的加工硬化能力，钢板原始状态强度较低，塑性很好但经过冷加工或成型后，强度提高。我们耐磨钢中用量最多的高锰钢也是靠加工硬化才提高强度增加耐磨性的。为什么不可以利用这个原理发展新型耐磨钢，这样岂不大大减少了合金消耗？双相钢还借用了纤维复合材料的原理，进而推出了非冲压用途双相钢，成分十分简单， $\text{C} < 0.1\%$ ，加入1.5%左右的硅或铝，利用硅、铝能使马氏体变成纤维状的特点，形成了以软的铁素体为基体中间含有不同比例纤维状马氏体的复合材料，强度随马氏体比例而变化，生产工艺较冲压型双相钢更为简化，已用于钢筋、链条等许多方面。此外还有一种双相钢叫“强壮”钢，其组织特点是：残留奥氏体形成连续的膜将板条马氏体包围，利用马氏体的高强度承受负荷，利用奥氏体的高韧性来阻止裂纹扩展，使钢的强度、硬度、裂纹扩展阻力、冲击韧性以及耐磨性能得到了良好的配合，可用于装甲、防弹以及耐磨部件。通过这些例子可以看出，只要我们善于利用其他领域的思路，借鉴其他材料成就，取长补短，我们可以开发出一些新型的耐磨材料。

我国耐磨钢近期有了很大发展，许多新的铸铁、铸钢和耐磨钢材已经开发出来，一些新的思路正在探索，但传统的高锰钢、高铬铸铁仍占绝大比重。希望我们博采众家之长，充分利用已经取得的技术成就，发展更多更好的新型耐磨钢，为四化建设作出新的贡献。

钢的力学性能参数对磨料磨损 耐磨性影响的研究

中国矿业学院北京研究生部 赵会友 许小棣 陈华辉 邵荷生

一、引言

磨料磨损是一个复杂的系统过程,其影响因素主要有两类^[1],一类是外部因素,如载荷、摩擦速度、摩擦行程、磨粒形状和大小、磨料的硬度及环境、温度等。另一类是材料本身的内部因素,包括材料的力学性能、成份和显微组织等。在一定的条件下,决定材料磨损的是材料的内部因素。

在过去的磨损研究中,人们大都只考虑了材料的硬度对磨损的影响,实际上,磨损应与更多的力学性能参数有关。本工作主要是以磨料磨损为主要研究对象,用一系列中低碳热处理锰钢进行销盘两体磨料磨损实验,对钢的力学性能参数如硬度HV30、真实剪切断裂强度 τ_k 、抗拉强度 σ_b 、屈服强度 σ_s 、 τ_s 、加工硬化指数 n 和系数 K 、断裂应变 ϵ_f 、形变功 $\bar{W}$ 等对磨料磨损耐磨性的影响进行研究,同时讨论成份和显微组织的影响。

二、实验方法与结果

实验采用ML-10型销盘磨损试验机,销试样直径4mm,磨盘直径250mm,使用280 μ m(平均粒径为50 μ m)SiC金相砂纸固定在盘上作磨料,磨盘转速60r/min,磨擦行程为9m,载荷为9.8N,实验中使销试样总是与新鲜磨料接触。实验用钢化学成份见表1。

表1 实验用钢的化学成份

编号	化学成份(%)					钢 种
	C	Mn	Si	S	P	
A	0.18	1.37	0.29	0.041	0.010	24Mn2K
B	0.20	1.40	0.38	0.014	0.047	16Mn
C	0.22	1.65	0.29	0.008	0.020	20Mn2
D	0.30	1.36	0.25	0.025	0.020	30Mn2
E	0.35	1.60	0.29	0.009	0.020	40Mn2
F	0.46	1.53	0.26	0.01	0.018	45Mn2
G	0.62	1.11	0.26	0.016	0.032	65Mn
H	0.76	0.33	0.20	0.012	0.014	T8

各钢的热处理工艺及得到的显微组织如表2所示。

表2 钢的热处理工艺、显微组织和力学性能

材料 编号	热处理 工 艺	显微 组织	t_k 9.8N/mm ²	σ_s 9.8N/mm ²	σ_b 9.8N/mm ²	$\sigma_{b0.01}$ 9.8N/mm ²	n 9.8N/mm ²	K 9.8N/mm ²	ϵ_f 9.8N/mm ²	$\bar{W}$ 9.8J	HV ₃₀ 9.8N/mm ²	$\dot{W}^{-1}$ 10 ³ ·mm ⁻²
A-1	N880	F+P	43.10	37.44	18.19	52.30*	0.228	97.5	1.22		159	7.81
B-1	N880	F+P	48.96	40.34	22.83	65.01*	0.194	109.5	1.17		197	8.99
C-1	N880	F+P	49.56	42.67	23.27		0.190	126.8		62.53	186	9.27
D-1	N860	F+P		46.87	24.47	70.40	0.221	129.5	1.10	74.03	212	10.04
E-1	N830	F+P	56.05		27.54	67.71	0.252	132.0	0.78	60.92	208	9.75
F-1	N840	F+P									247	11.06
G-1	N840	F+P	62.84	49.95	47.16	91.93	0.235	179.3	0.72	59.46	259	11.49
A-2	Q870+T200	M	72.91	113.58	48.89	136.43	0.1105	210.0	0.58	34.0	433	10.04
B-2	Q880+T200	M	90.86	124.95	60.03	156.85	0.1337	255.0	0.93	40.75	461	11.34
C-2	Q840+T200	M	97.94	133.45	73.06	165.04	0.1255	268.0	0.58	36.43	465	11.12
D-2	Q860+T200	M	109.05	135.65	81.36	182.34	0.1155	284.0	0.73	39.98	515	12.74
E-2	Q830+T200	M	117.58	148.88	87.61	200.37	0.1495	326.0	0.52	20.89	528	12.83
F-2	Q840+T200	M									617	13.42
G-2	Q820+T275	M	120.65		101.63						603	13.35
H-2	Q800+T200	M	139.48		114.48		0.5835	1429.0	0.02		737	14.95
E-3	Q830+T400	T	68.68	125.43	58.20		0.0163	139.0	0.55	30.2	379	10.39
E-4	Q830+T600	S	54.04	68.48	36.40	20.03	0.1290	114.0	0.84	54.91	236	9.22
E-5	H830+1Q400	B	63.60	65.21	43.55	17.25	0.1525	144.5	0.70	56.14	275	11.2

注: N×××—正火温度, C; Q×××—水淬温度, C;

T×××—回火温度, C; H×××—加热温度, C; 1Q×××—等温淬火温度, C;

F—铁素体; P—珠光体; M—回火马氏体; T—回火屈氏体; S—回火索氏体; B—粒状贝氏体;

*标长 $l_0=100\text{mm}$, 其余标长 $l_0=50\text{mm}$; ϵ_f 定义为发生断裂时的真应变; $\bar{W}$ 定义为塑性变形阶段拉伸P—

ΔL 曲线下的面积。

常温拉伸、扭转试样分别按GB228—76和YB36—64制备; 拉伸和扭转实验分别在DSS—25型电子拉伸试验机和K—50扭转试验机上完成, 实验求得的力学性能参数如表2所示。

磨损实验后, 计算了耐磨性, 对耐磨性 $\dot{W}^{-1}$ 与各力学性能参数的关系进行了拟合, 如图1~6, γ 是线性相关系数。在图1及图2上同时画上了三体磨料磨损的相对耐磨性 ϵ 与HV₃₀及 t_k 的关系^[2]。图7是钢的含碳量 $c\%$ 与 $\dot{W}^{-1}$ 的关系。

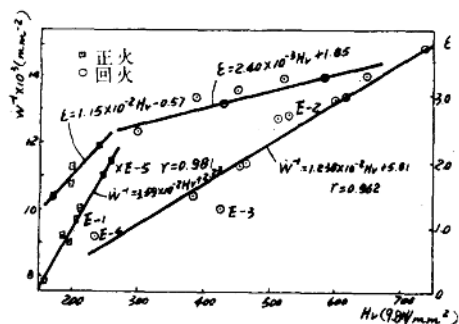


图1 硬度与耐磨性的关系

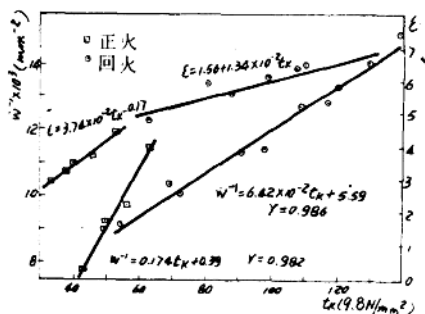


图2 真实剪切断裂强度与耐磨性的关系

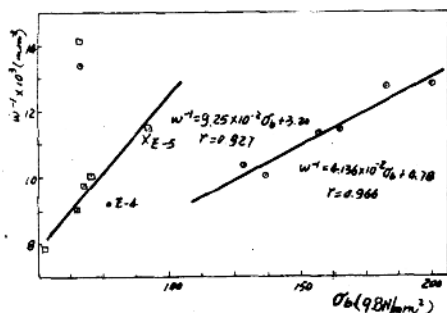


图3 抗拉强度与耐磨性的关系

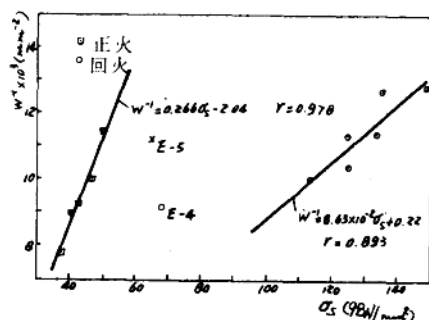


图4 拉伸屈服强度与耐磨性的关系

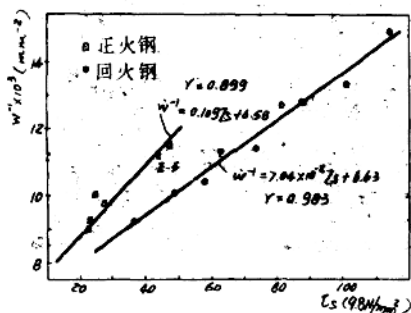


图5 剪切屈服强度与耐磨性的关系

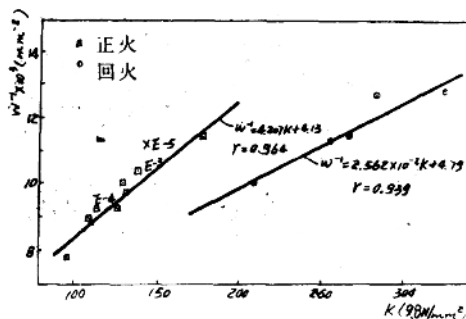


图6 加工硬化系数与耐磨性的关系

三、讨论

当外部条件一定时,材料的力学性能是影响材料的耐磨性的重要因素,但并非决定性的因素。从图1~6可以看出各力学性能参数与耐磨性的关系都很相似,各个关系都不能用一条连续的曲线表示。这是因为除了力学性能外,材料的显微组织、成分等也是影响材料的耐磨性的重要因素。如果消除显微组织的影响,也就是说在相同的组织状态下,材料的力学性能参数便与耐磨性有比较密切的关系。如图1~6所示,组织相同的正火钢(珠光体钢)和

回火钢（马氏体钢）的耐磨性与各力学性能参数的关系都可以分别拟合成两条斜率不同的直线，正火钢的直线斜率比回火钢的大。

尽管有些力学性能参数之间在一定条件下存在一些近似的换算关系，且随C %的增加，各参数有相似增加的趋势，但它们之间基本上是相互独立的，它们所代表的物理意义是

不同的。在有些条件下，某些参数与耐磨性的关系较密切，而在另一些条件下，则其它参数可能与耐磨性有更密切的关系。

对磨损实验后的试样表面进行S E M观察表明，尽管较软的材料表面上有一些犁沟变形，但微切削是这些材料磨损的主要原因。图8、图9分别是正火钢(C - 1)和回火钢(C - 2)的磨损表面的S E M照片，图10和图11分别是正火钢(G - 1)和回火钢(G - 2)的磨屑照片。

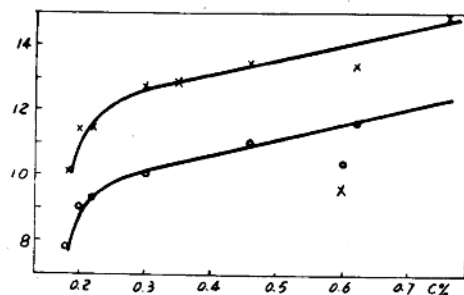


图7 钢中含碳量与耐磨性的关系

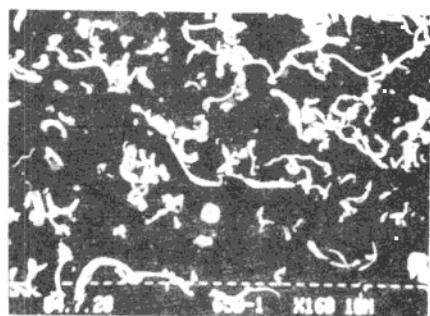


图8 C - 1 钢磨损表面的S E M照片



图9 C - 2 钢磨损表面的S E M照片

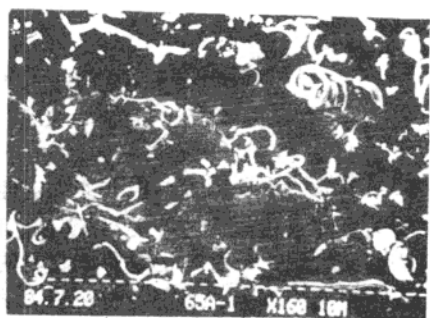


图10 G - 1 钢磨屑的S E M照片

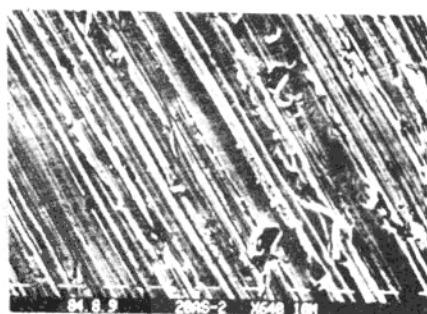


图11 G - 2 钢磨屑的S E M照片

真实剪切断裂强度 t_k 是一个韧性断裂强度指标，它代表实际晶体从抵抗滑移开始直到最后剪切断裂为止的整个过程的抗力。磨损中的微切削和犁沟都是剪切断裂的过程，因此在以微切削和犁沟为主的磨损条件下， t_k 的影响是主要的。

压入硬度表示塑性变形不大时的材料塑变抗力，耐磨性一般表示材料在极高塑性变形和强化程度下的极限强度^[3]，两者之间有一定的联系，但在本实验条件下， t_k 比起HV来说能更好地反映 $\dot{W}^{-1}$ 的大小，因为 t_k 表示的变形程度和方式更接近磨损的实际情况。用同样材料进行三体磨损实验研究的结果^[2]表明，正火钢的三体磨料磨损以反复碾压为主，而回火钢的磨损以微切削和犁沟为主，因此相对耐磨性与 t_k 关系直线的斜率与相对耐磨性与HV关系直线的斜率之比明显大于正火钢的斜率比，这表明在反复碾压磨损为主的情况下HV的作用比较

τ_s 和 σ_s 都表示材料在开始塑变时抗力的大小， τ_s 和 σ_s 的增加能提高材料的抗磨能力，但 τ_s 和 σ_s 较高的材料并不一定就较耐磨。如图12所示，当应力大于 σ_{b1} 而小于 σ_{b2} 时，虽然材料1的 σ_{s1} 较高，但因其 σ_{b1} 较低还是会发生断裂，就磨损而言，材料1的耐磨性就会比材料2低。由此也可看出 σ_b 是个较重要的参数。 σ_b 表示材料的最大均匀变形抗力，虽然作为工程应力它不直接表示材料的断裂抗力，但在一定条件下，它与断裂抗力 S_k 有一定的近似关系^[4]，在一定程度上它表示了断裂抗力的大小，因此

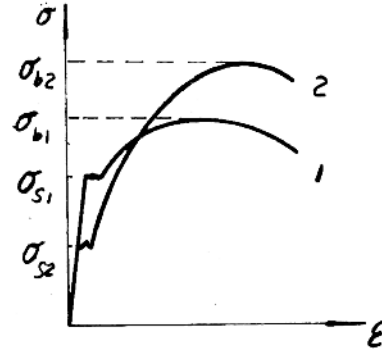


图12 $\sigma - \epsilon$ 曲线

$\dot{W}^{-1}$ 与 σ_b 的关系比较密切。从线性相关系数的比较中可知 $\dot{W}^{-1}$ 与 σ_b 关系的相关性确实是比较好的。

试验钢的均匀变形阶段都能较好地用Hollomon公式 $\sigma = K \epsilon^n$ 拟合，式中 σ 和 ϵ 分别是真应力和真应变， K 和 n 分别称为加工硬化系数和加工硬化指数， K 和 n 都是表示材料均匀变形过程的参量。由于 n 主要取决于材料的基体组织^[5]，同一组织状态的钢的 n 均处于一个变化不大的范围内，因此基体相同时 n 对耐磨性影响不大，实验结果正是如此。 K 是表示均匀变形阶段材料强化能力的指标，因此 K 与 $\dot{W}^{-1}$ 有较好的关系，图6表明 $\dot{W}^{-1} - K$ 关系也近似为直线，相关性较好。这说明 K 也是一个可用以近似表征材料的耐磨性的重要参数，粒状贝氏体钢的耐磨性较高的原因之一可能就是其 K 值较大。

实验结果表明断裂应变 ϵ_f 对 $\dot{W}^{-1}$ 的影响不大，从图13可以看出，假设材料1、材料2的抗拉强度相等，而 ϵ_f 相差很大，当外加应力大于 σ_b 时，两种材料会一样地发生断裂，在磨损工况下两种材料会一样地发生磨损。另外由于当材料的强度增加时耐磨性增加，而 ϵ_f 往往下降，因此 $\dot{W}$ 变化不大且无规则，故 $\dot{W}$ 对 $\dot{W}^{-1}$ 的影响不大。

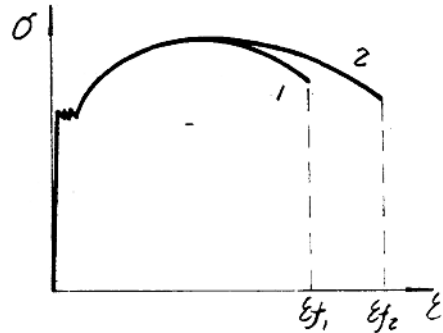


图13 应力—断裂应变曲线

钢的成份也是影响 $\dot{W}^{-1}$ 的因素，图7是 $\dot{W}^{-1} - c\%$ 关系，正火钢和回火钢的 $c\%$ 对 $\dot{W}^{-1}$ 的影响也是相似的，随 $c\%$ 增加， $\dot{W}^{-1}$ 增加，但并非线性关系。

合金钢的力学参数与耐磨性的关系

冶金部钢铁研究总院 李琦 田蕃 张清

前言

金属材料的磨料磨损机理和影响材料耐磨性的因素等问题愈来愈引起冶金工作者的关注。

在磨料磨损过程中,磨痕下材料内部的应力状态为非轴对称的三维压缩应力^(1,2),这种复杂的应力状态具有局部、表面和随时而变等特征。在被磨损材料表面,材料的力学性能与常规力学试验,如拉伸、剪切和硬度测试等所获得的材料整体力学性能有一定的差距。此外,常规力学试验难以完整地反映出磨料磨损试验过程的全部特征。因此,金属材料的常规力学性能指标与耐磨性之间的关系难以用一种简单的形式来表述。⁽³⁾

近些年来,有些研究者^(4~6)试图从磨损过程中的能量消耗来探讨金属材料耐磨性的变化趋势。这种研究方法已经取得了一定的进展。但是,由于磨料磨损实际过程中,多颗粒的相互干扰,导致试验过程中试验条件发生变化,进而使所获得的能量消耗结果的物理意义不十分清晰。在一定的摩擦系统中,材料的力学参数与耐磨性之间存在着密切的联系,但这些力学参

四、结论

1、材料的力学性能是影响其耐磨性的重要因素,但不是决定性的因素,在相似的显微组织状态下,材料的一些力学性能参数如 HV 、 t_k 、 σ_b 、 K 、 σ_s 、 τ_s 等与 $\dot{W}^{-1}$ 近似成线性关系,随着力学性能的增加,正火钢的 $\dot{W}^{-1}$ 增加得比回火钢快。

2、力学性能各参数对 $\dot{W}^{-1}$ 的影响有相似之处,但在以微切削和犁沟磨损为主时 t_k 的影响较重要,而在以反复碾压塑变为主时, HV 的作用较大。

3、作为工程应力 σ_s 、 τ_s 和 σ_b 对耐磨性的影响与 HV 和 t_k 对 $\dot{W}^{-1}$ 的影响相似,在工程材料的选择上,用常用参数 σ_b 来近似地表征耐磨性似具有更大的实际意义。

4、材料的显微组织是影响耐磨性的重要因素,不同组织的材料的耐磨性——力学性能参数关系是不能用同一条直线表示的。

5、钢的加工硬化指数,断裂应变及形变功对耐磨性的影响都不明显,但加工硬化系数对耐磨性的影响与 t_k 等参数的影响相似。

参考文献

- [1] 邵荷生:《电力机械》,1982, No 3 PP 1-8
- [2] 陈华辉等:中国矿院北京研究生部毕业论文, 1983
- [3] M. M. Khrushchov:《金属的磨损》,机械工业出版社, 1960
- [4] 北京钢铁学院:《金属性能学》, 1975
- [5] 黄明志等:《金属学报》, Vol 19, No. 4 1983, PP 291-299

数的测量,应是在尽可能模拟磨损实况的试验条件下进行。据此设想,作者设计了一种模拟磨料磨损犁削模型的单颗粒犁削试验方法。这种试验方法既能模拟磨损时材料所处的应力状态和磨料的运动方式,又能直观地记录试验过程所发生的力学行为。由此,结合两体磨料磨损试验,来探讨金属材料的耐磨性与力学参数及能量消耗之间的关系。

1、试验方法与结果

试验用钢为40GrNiMo和40Cr5Mo两种中碳合金钢。热处理工艺如表1。

表1

试样的热处理工艺*

编 号	退 火	淬火、回火	等温处理
1 (40CrNiMo)	850℃, 2 h炉冷	850℃油淬, 150, 200, 300, 400和500℃回火, 2 h空冷	850℃奥氏体化, 300℃和250℃盐浴等温, 2 h
2 (40Cr5Mo)	950℃, 2 h炉冷	950℃油淬, 200, 300, 400, 500和550℃回火, 2 h	950℃奥氏体化, 350℃和250℃盐浴等温, 2 h

* 为论述方便,试样编号如下: 用三位数字作为一个试样代号,第一位数字取1, 2表示钢种,第二位数字取0表示退火, 1表示淬火, 2和3表示在 M_s 点上、等温处理,第三位数字取1-6分别表示不同温度回火。

按GB228-76制样并测定试验钢的拉伸性能,进行双剪切试验和维氏硬度测量。

两体磨料磨损试验在ML-10销盘式磨损试验机上进行,由称重法获得试验用钢的耐磨性($\dot{W}^{-1}$)。

犁削试验在MTS-5系列试验机上进行,试验原理如图1。

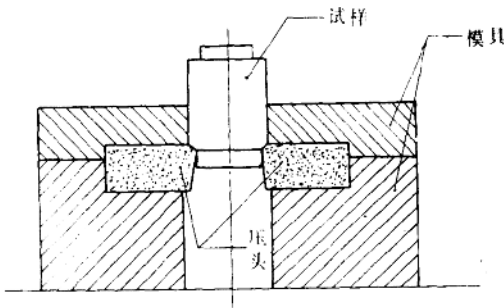
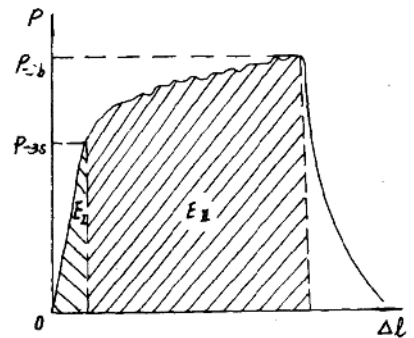


图1 a) 犁削试验原理图



b) $P-\Delta l$ 曲线示意图

这种试验方法有如下特点:

1.1 在模拟磨料磨损条件下,记录试验过程中的广义载荷——压头位移曲线($P-\Delta l$),如图1,从曲线上求得处于三维不等压缩应力状态下试验用钢的屈服载荷 P_{3S} 和极限载 P_{3b} ,由此分别除以压头与试样的初始接触面积得出屈服应力 σ_{3S} 和极限应力 σ_{3b} 。

1.2 试验用钢的 $P - \Delta l$ 曲线可分为初压区和犁削区。利用微处理机直接运算求得两区域的能量消耗和总能量消耗 (E_I 、 E_{II} 、 E_D)。

1.3 由称重法获得犁削试验条件下, 试验用钢的耐磨性 g^{-1} 。试验的全部结果见表 2。

表 2 试验用钢的试验常数数据总表

试样 编号	σ_b 9.8N/mm ²	$\sigma_{0.2}$ 9.8N/mm ²	τ_b 9.8N/mm ²	HV 9.8N/mm ²	$\dot{W}^{-1}$ m/mm ³	σ_{-3b} 9.8N/mm ²	σ_{-3s} 9.8N/mm ²	E_{II} J	E_I J	$\dot{g}^{-1} \times 10^2$ m/mm ³
100	102	68.5	54	260	2.02	472	168	176.0	76.3	1.48
115	125	115	82	377	2.19	637	256	107.0	107.6	1.65
114	186	148	101	480	2.26	695	309	122.0	123.2	1.94
113	172	150	108	490	2.27	/	/	/	/	/
112	206	172	128	580	2.64	811	379	151.0	153.0	2.20
120	178	148	98.4	480	2.60	777	307	141.0	142.3	2.10
130	/	/	/	393	2.35	/	/	/	/	/
200	80.5	53.5	48	195	1.90	306	124	48.9	49.1	1.38
216	120	102	82.4	280	2.24	667	276	120.0	120.5	1.67
215	144	125	89.5	415	2.33	/	/	/	/	/
214	160	147	113	530	2.33	766	343	135.0	136.7	1.96
213	182	152	108	538	2.34	/	/	/	/	/
212	202	159	126	600	2.66	821	399	158.0	159.4	2.22
220	208	161	136	609	2.99	855	400	169.0	170.6	2.56
230	/	/	/	578	2.67	/	/	/	/	/

2、分析与讨论

2.1 犁削试验的力学特征

将犁削试验和单轴拉伸试验所获得的试验钢的力学参数进行比较, 即 $\sigma_{-3b}/\sigma_b = 4 \sim 5$, $\sigma_{-3s}/\sigma_{0.2} = 2 \sim 3$ 。可见, 在三维不等压缩应力状态下, 钢的屈服应力和极限应力显著增加^[7~8]。

从沿犁削方向 L 和试样径向 R 测定犁沟次表面显微硬度的分布如图 2。可以看出, 硬度的最大值明显高于原始值。拉伸试样缩颈最严重部位截面的硬度与其原始值相近, 这表明, 在三维不等压缩应力状态下, 材料表现出较高的加工硬化能力。

在犁削试验条件下, $\sigma_{-3s}/\sigma_{-3b} = 0.3 \sim 0.5$, 而单轴拉伸时 $\sigma_{0.2}/\sigma_b = 0.6 \sim 0.9$ 。

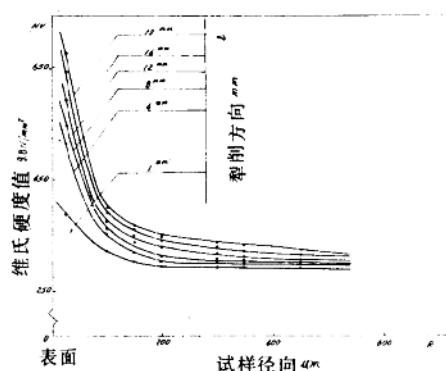


图 2 216号犁削试样次表面显微硬度的分布

可见,在三维不等压缩应力状态下,钢的塑性变形能力,在加工硬化能力增大的同时,也有提高的倾向。

2.2 试验用钢的力学参数与耐磨性的关系

图3表示试验用钢的常规力学参数(HV、 $\sigma_{0.2}$)与耐磨性($\bar{W}^{-1}$)的关系。

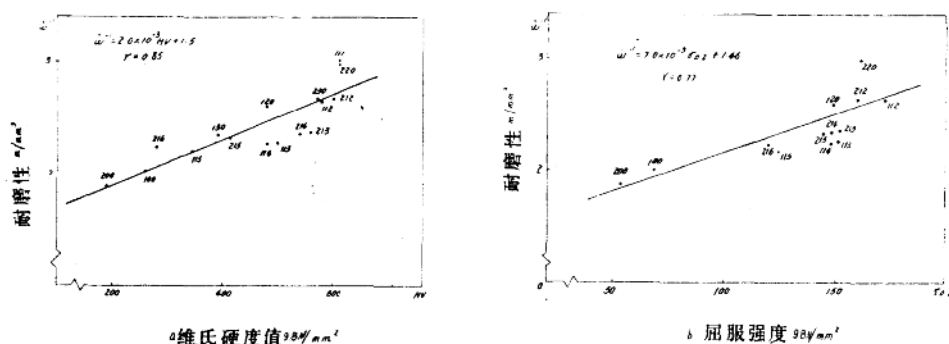


图3 常规力学参数与耐磨性的关系

犁削试验所得试验钢的力学参数(σ_{-3s} 、 σ_{-3b})与耐磨性($\bar{g}^{-1}$)的关系如图4。

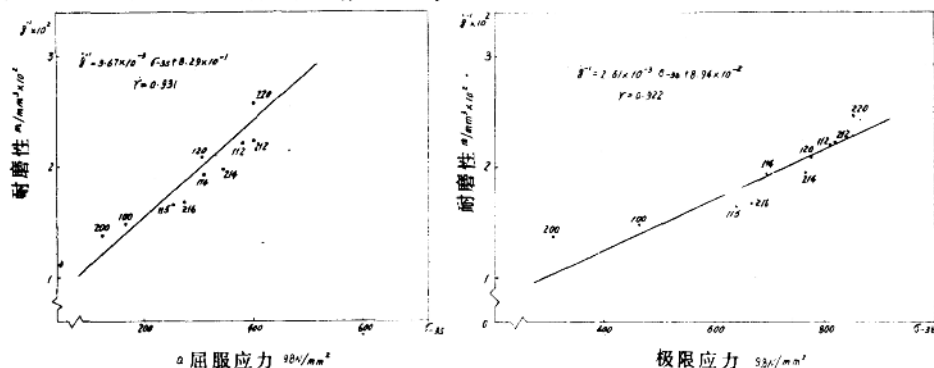


图4 犁削试验力学参数与耐磨性($\bar{g}^{-1}$)的关系

考虑犁削试验所得的力学参数与两体磨料磨损试验中材料所受应力状态相近,因此,分别将 σ_{-3s} 、 σ_{-3b} 与在ML-10试验机上进行磨损试验所得钢的耐磨性 $\bar{W}^{-1}$ 作相应联系,绘于图5。

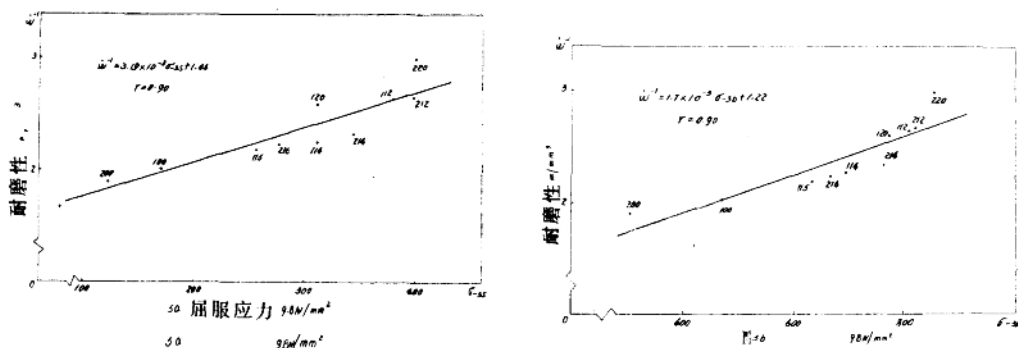


图5 犁削试验力学参数与耐磨性 $\bar{W}^{-1}$ 的关系

比较图 3 与图 5 可以发现, 其变化趋势相似, 但后者的线性相关关系较好。 σ_{-3s} 和 σ_{-3b} 与钢的耐磨性的关系说明, 在形成磨屑的特定应变下, 钢的流变应力与其耐磨性密切相关^[9]。

应该指出, 磨损是一个动态过程, 钢的耐磨性是一种累积效果。然而, 无论是从常规力学试验还是从犁削试验所获得的力学参数都仅代表试验过程中应力——应变或载荷——位移关系中某一点的特征, 即力学状态参量。这些参数不能反映磨损的全过程。

2.3 犁削试验的能量消耗与耐磨性的关系

对磨料磨损、粘着磨损来说, 磨损过程中的能量消耗等于外力所做的功^[5, 10], 即输入能量 = 切向力 × 滑动距离。

在任一磨损条件下, 由于表面的相互作用而消耗一定的能量。可以认为, 这样的能量消耗直接或间接地用于磨屑的形成。犁削试验所消耗的能量 E_t 由初压区能量消耗 E_I 和犁削区能量消耗 E_{II} 两部分组成。

E_I 是表征初始压入时材料的弹性特征。由 $P - \Delta l$ 曲线计算得知, 这部分能量约占总能量消耗的 1%。因此, 不足以用来评价试验用钢的耐磨性。

当外加载荷超过材料的屈服应力时, 材料向磨料颗粒 (犁头) 两侧和磨料前端流动而形成犁沟。在犁沟形成过程中所消耗的能量用 E_{II} 表示。它反映了材料的变形、加工硬化和磨屑断裂等力学特征。 E_{II} 占犁削总能量消耗 E_t 的绝大部分。因此, E_{II} 对评价钢的耐磨性是至关重要的。

由于在试验过程中测定总能量消耗较为方便, 因此根据上述分析将总能量消耗 E_t 与耐磨性 $\dot{g}^{-1}$ 的关系示于图 6。

可见, 线性相关显著, 能量消耗愈大, 耐磨性愈佳。即犁削能量消耗与耐磨性成正比, 由其动态变化可以直接且即时判别钢的耐磨性差异。

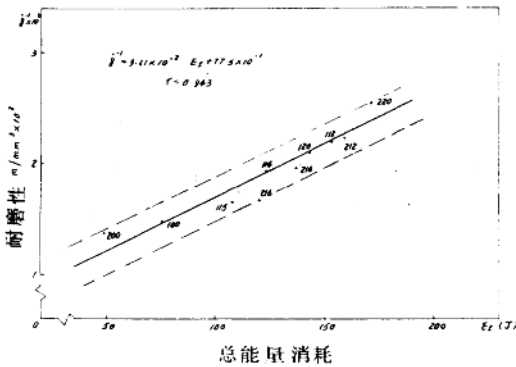


图 6 犁削能量消耗 E_t 与耐磨性 $\dot{g}^{-1}$ 的关系

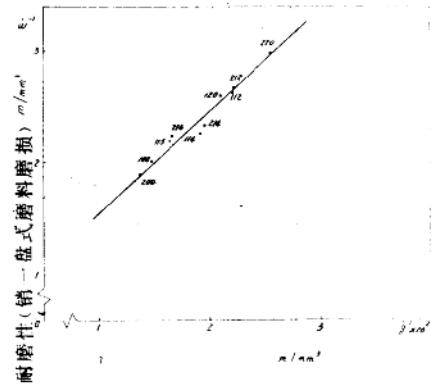


图 7 两种试验方法所得钢的耐磨性关系

2.4 两种试验方法所得钢的耐磨性的比较

在 ML-10 磨料磨损试验机和犁削试验所得钢的耐磨性, 从磨料的作用形式来看, 两者既有差别又有共同之处。 $\dot{W}^{-1}$ 是多颗粒磨料多次犁削作用的累积效果, 而 $\dot{g}^{-1}$ 是单颗粒一次犁削作用的结果。 $\dot{g}^{-1}$ 与 $\dot{W}^{-1}$ 的关系 (图 7) 表明: 两者的变化趋势相似。也就是说, $\dot{g}^{-1}$ 和 $\dot{W}^{-1}$ 存在着密切的内在联系。因此, 利用 $\dot{g}^{-1}$ 和 $\dot{W}^{-1}$ 来衡量钢的耐磨性仅是由不同的试验方法获得的相同结论。

综合上述分析, 这种单颗粒犁削试验方法不仅可以获得在特定磨损条件下材料的某些力学参数, 而且还能得到与ML-10试验机相一致的材料耐磨性指标。因此, 犁削试验方法是磨料磨损试验与力学试验的结合。

2.5 犁削过程的形貌观察与分析

扫描电镜观察表明, 犁沟表面除压头前材料堆积而产生块状屑外, 犁沟两侧也出现与基体呈半分离状态的锯齿型片状屑。图8表示试验钢经淬火、550℃回火和220℃回火的犁沟全貌。可见, 高温回火钢的犁削影响区和堆积物明显大于低温回火钢。这是由于在高温回火时, 钢的硬度和强度降低, 塑性升高, 从而导致钢的塑性变形抗力降低的缘故。

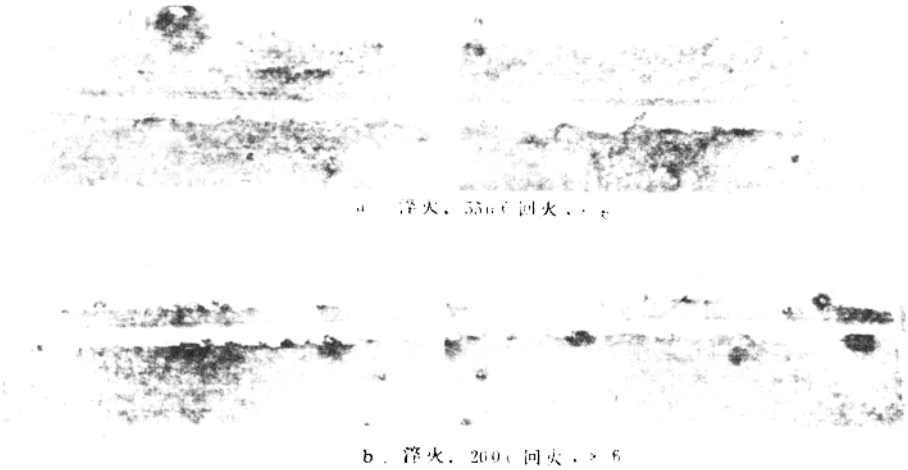


图8 2¹钢犁削沟全貌

在犁削条件下, 对不同显微组织的试验用钢, 其犁削次表面材料表现出不同的抵抗变形能力如图9。塑性较好的钢变形层较深, 次表面显微组织严重纤维化, 其方向与犁头滑动方向一致。

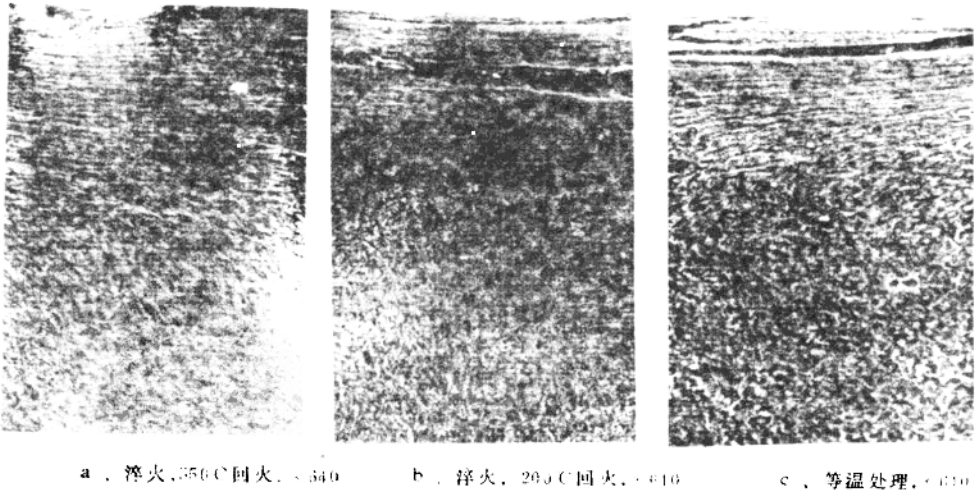


图9 2¹钢犁削次表面变形形貌