● 材料失效分析 Material Failure Analysis ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.028

圆锥破碎机用高锰钢圆锥的失效分析

黄 勇[1,2],龙 骏[1],郑志斌[1],王海艳[1],陈胜迁[1,3],王向明[1,2]

(1.广东省材料与加工研究所 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室,广东 广州 510650; 2.广州有色金属研究院 新丰耐磨合金材料有限公司,广东 韶关 511100; 3.张家界航空工业职业技术学院 航空维修工程系,湖南 张家界 427000)

摘 要:采用光谱仪、光学显微镜、扫描电镜等分析了圆锥破碎机服役后高锰钢圆锥的成分和组织形貌特征,结合对不同区域材料的冲击吸收功、加工硬化层显微硬度测试及失效圆锥的磨损曲线测定,对耐磨圆锥的失效机理进行了综合分析。结果表明:冲击作用下高硬度的花岗岩对圆锥表层的凿削是耐磨圆锥失效的主要原因;冒口部位的局部显微疏松及晶界处局部未溶碳化物的存在是造成宏观裂纹的原因,加速了耐磨圆锥的失效。

关键词:耐磨圆锥;冲击磨损;失效分析;高锰钢

中图分类号:TD451;TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)07-0744-05

Failure Analysis of High Manganese Steel Cone for Cone Crusher

HUANG Yong[1,2], LONG Jun[1], ZHENG Zhibin[1], WANG Haiyan[1], CHEN Shengqian[1,3], WANG Xiangming[1,2]

(1. Guandong Institute of Materials and Processing, Guangdong Provincial Key Laboratory for Technology and Application of Metal Toughening, Guangzhou 510650, China; 2. Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals Xinfeng Wear-resistant Alloy Material Co., Ltd., Shaoguan 511100, China; 3. Aviation Maintenance Engineering Department, Zhangjiajie Institute of Aeronautical Engineering, Zhangjiajie 427000, China)

Abstract: The failure behavior of the high manganese steel cone of the cone crusher was studied in the current work. Spectrometer, optical microscope and scanning electron microscopy were used to analyze the composition and microstructure of high-manganese steel after service. Regions with the damages under different degrees of impact energies were also observed. Microhardness of work hardened layer and wear curve of the failure cone were measured and the failure mechanism of the wear cone was comprehensively analyzed. The results showed that the drilling and cutting from the hard grinding material which consists of granite is the main reason for the failure of the cone. The local microscopic porosity of the riser and the presence of local undissolved carbide at the grain boundary accelerated the macroscopic cracks of the steel, resulting in the failure of the cone.

Key words: wear cone; impact wear; failure analysis; high manganese steel

圆锥破碎机破碎比大、效率高、能耗低,破碎后物料粒度均匀,适合中碎和细碎各种矿石、岩石,是矿山、冶金、建筑等工业中应用最为广泛的破碎设备之一[1]。在其工作过程中,电动机通过传动装置驱动偏心套旋转,动锥在偏心轴套的带动下做旋转摆动,物料受到动锥和静锥的多次挤压和撞击而破碎,工况十分恶劣,导致耐磨圆锥使用寿命短,耐磨部件需频繁更换,降低生产效率的同时也增加了生产成本[2]。近年来,随着耐磨材料受到国内外科研工作者的广泛重视,出现了众多新的耐磨材料,各具优劣。如高铬铸铁[3](硬度高、耐磨性好,但韧性差,不适用于强冲击工况)、耐磨合金钢[4](综合性能较好,但稳定性较差)、陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料[5](结合了钢铁基体高韧性与陶瓷高耐磨性的优点,综合性能好,但不便于生产薄壁复杂件)等,而高锰钢由于具有高韧性和良好的加工硬化能力,且生产成本较低,成为强冲击工况下耐磨圆锥的首选材料[6]。

本文针对特定工况,开展高锰钢耐磨圆锥的冲击磨损失效分析,探究耐磨圆锥的失效机理,对耐磨圆锥的合理选材、熔炼铸造、适用工况以及寿命提高具有重要的指导意义。

收稿日期:2019-04-24

基金项目:广东省科技计划项目(2017A090905018,2017A070701029,2017A070702019,2014B070705007),广州市科技计划项目(201604046009),清远市科技计划项目(2018D013),湖南省自然科学基金项目(2017JJ5051)

作者简介:黄 勇(1974-),广西百色人,硕士,高级工程师.主要从事耐磨产品生产管理与材料开发方面的工作.
电话:13926030185,E-mail:hylink@163.com

通讯作者:龙 骏(1990-),湖南娄底人,硕士,工程师.主要从事钢铁强韧化及耐磨材料开发方面的工作.
电话:020-61086187,E-mail:longjun0929@163.com

1　实验材料及方法

1.1　使用工况

某矿山使用美卓公司(Metso)生产的 GP300 单缸液压圆锥破碎机进行物料破碎。电机功率:250 kW，处理量为 180 t/h。破碎原料为花岗岩，其主要成分为石英，莫氏硬度可达 7。工作时，粒度约为 40 mm 的花岗岩石料从顶端进料斗持续加入，电动机通过传动装置带动偏心套旋转，动锥在偏心轴套的带动下做旋转摆动，物料由于重力作用进入动锥与定锥间，受动锥与定锥的多次挤压和撞击而破碎。总体来说，工作过程中圆锥的服役环境具有高磨损与强冲击的特点。

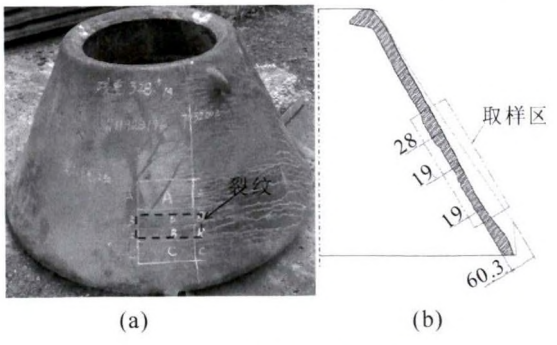
1.2　试验方法

将服役失效后的圆锥拆卸下来清洗干净，首先用足够精度的称量工具测得其余重，并对该圆锥的磨损曲线进行测绘。再用氧-乙炔焰分别在裂纹区域以及同圈远离裂纹区域切割出大块试样，火焰切割时要保证实验取样部位不受热影响。之后通过线切割等工序加工成 15 mm×15 mm×20 mm 的分析试样，以及尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm 的 U 型冲击试样。将试样在超声清洗机中先后用丙酮和酒精溶液清洗，干燥后再分别用直读光谱仪、维氏硬度计、DMI 3000M 金相显微镜和 Nova NanoSEM 430 型扫描电镜等对试样分别进行成分分析、硬度测试、组织分析和表面形貌分析等。金相制作时将试样经水磨砂纸逐级打磨，用金刚石抛光膏抛光后，用 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀。

2　结果与分析

2.1　磨损量分析

该矿山所使用的高锰钢圆锥初始重量为 629 kg，使用 31 天后，圆锥失效。拆下经洗净后的失效耐磨圆锥余重为 319 kg，计算可知该圆锥服役过程中的磨损量为 49.3%。图 1(a)为该耐磨圆锥的实物图，可以看到离圆锥下圈约 1/3 的位置有一道长约 25 cm 的横向裂纹。由图 1(b)为该圆锥的磨损曲线测绘结果可知，服役失效后，该圆锥的最薄壁厚仅剩 19 mm，且服役过程中圆锥的中下部位磨损最为严重，横向裂纹出现在该圆锥的磨损最严重区域。



(a)　　(b)

图 1 失效高锰钢耐磨圆锥

Fig.1 The high manganese steel cone of the cone crusher

2.2　组织及力学性能分析

采用直读光谱仪测试得到的耐磨圆锥成分如表 1 所示，同时给出了厂家提供的高锰钢耐磨圆锥的设计成分以供对比。由表 1 可知，该耐磨圆锥所使用的材料是超高锰钢(Mn18Cr2)。失效件成分与其设计成分相近，说明成分无明显问题。

表1 失效件合金成分 w(%)

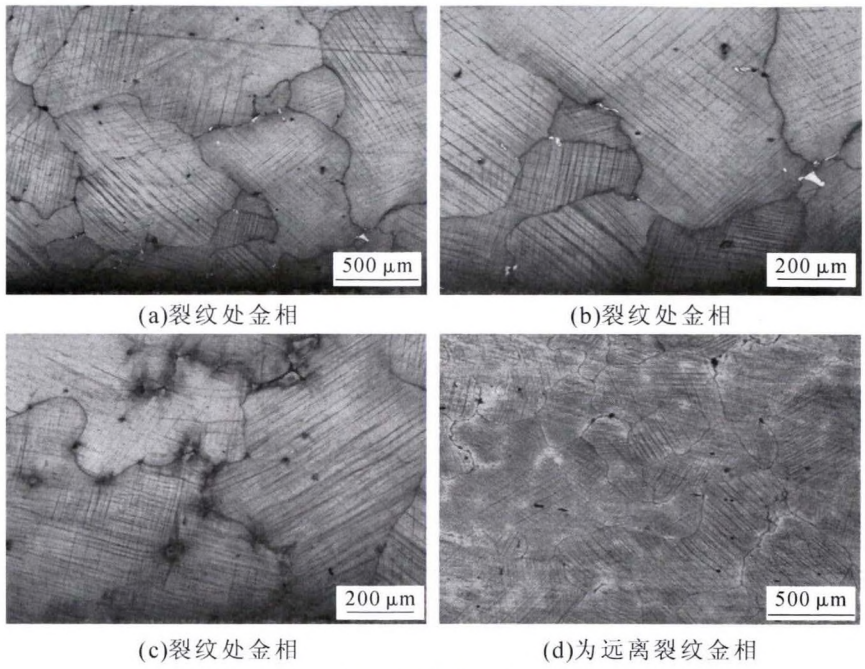
Tab.1 Chemical composition of the failure steel

	C	Si	Mn	Cr	P	S	Fe
失效件	1.32	0.59	18.17	1.93	0.038	0.01	余量
设计成分	1.3~1.4	0.5~1.0	17.5~18.5	1.8~2.3	<0.05	<0.04	余量

金相试样分别取自图 1(a)中的裂纹区与远离裂纹区，对截面进行金相观察，结果见图 2，其中图 2(a)～(c)为裂纹处金相，图 2(d)为与裂纹同圈的远离裂纹区所取试样的金相。由图 2 可知，整个近磨损面纵截面的高锰钢组织都存在大量滑移带，说明在使用过程的冲击作用下，材料表层出现了明显的加工硬化。从靠近裂纹处的图 2(a)～(b)可以看出在材料的晶界处存在少量不连续的未溶碳化物，图 2(c)中存在较多的显微疏松，这对材料的强度与韧性造成较大的影响。而在远离裂纹区的金相组织 2(d)中并没有看到明显的碳化物与显微疏松。

材料的组织决定了材料的性能。分别在近裂纹区及与该裂纹同圈的远离裂纹区域切取试样进行维氏硬度测试与冲击韧度测试，取样时冲击试样离磨损表面有足够深的距离，以避免因加工硬化对材料韧性下降导致实验结果出现偏差。冲击吸收功测试试样为标准 U 型夏比冲击试样，每组测试 3 个试样，取其平均值。经 JB300 冲击试样机测得近裂纹区冲击吸收功的均值为 25 J，远离裂纹区冲击吸收功均值为 61 J。由此可知，裂纹区材料的冲击吸收功下降明显。

维氏硬度测试是在加载力为 500 gf，保载时间为 5 s 的条件下从材料磨损表层每隔一定距离沿纵截面往里测试。该超高锰钢的初始维氏硬度约为 240 HV。由图 3 可知，圆锥的近裂纹区与远裂纹区都表现出明显的加工硬化现象，硬化层厚度约为 4.5 mm。对比两区域，圆锥经冲击作用后，近裂纹区的表层最高维氏硬度值为 486 HV；而远离裂纹区的同圈材料表现出更好的加工硬化效果，其表层最高



(a)裂纹处金相　(b)裂纹处金相

(c)裂纹处金相　(d)为远离裂纹金相

图 2 耐磨圆锥纵截面金相分析

Fig.2 Microstructure of the longitudinal cone of the failure part

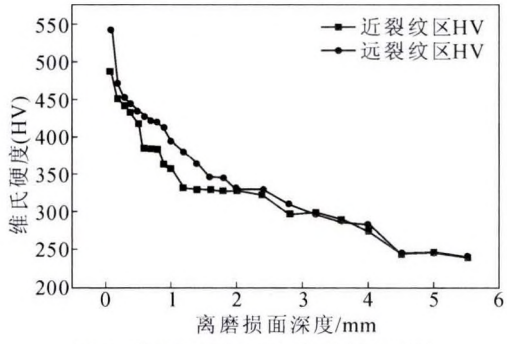


图 3 耐磨圆锥厚度方向的硬度曲线

Fig.3 The Vickers hardness of the cone through the thickness direction

维氏硬度值可达 541 HV,由此可知裂纹区材料由于缺陷的存在对材料加工硬化性能造成一定的影响。

2.3 形貌分析

在实际生产过程中,物料受动锥与定锥的多次挤压和撞击,达到破碎的目的。耐磨圆锥在使用过程时主要受到动锥与定锥互相冲击、物料的挤压和切削综合作用。

图 4 是失效圆锥表面的损伤形貌。从图 4(a)可以观察到材料磨损表面发生了明显的塑性流动并犁出一条条沟槽,沟槽两侧有凸起的塑性变形金属,这是典型的金属在高应力磨料磨损下的微观形貌。分析其原因认为，多尖锐棱角的高硬度花岗岩在正向冲击载荷的作用下局部尖角被压入金属表面，切向力使磨粒向前推进，材料被推移到磨料运动路径的两侧或前方,从而形成犁沟和犁皱[7]。这些变形堆积的材料在受到随后的冲击磨损时,被重新压平,或者受到再一次的损伤形成犁沟和犁皱。如此反复的塑性变形,使材料受到剧烈的塑性损伤,不足以承受外力,很易在其他磨料的作用下被磨掉剥落。表现为多次塑变导致断裂的磨损机理[8]。从图 4(b)可以看到,材料表面有一条约为 80 μm 的显微裂纹,这将对材料的性能造成显著的影响。

为了进一步探究材料表层裂纹向内部的扩展情况,切取裂纹区纵截面试样,用扫描电镜观察,结果见图 5。从图 5(a)可以看出,有网状裂纹沿着材料晶界向深处扩展,在裂纹周边存在显微疏松。图 5(b)可看到材料有显微裂纹平行于材料表面扩展，这种

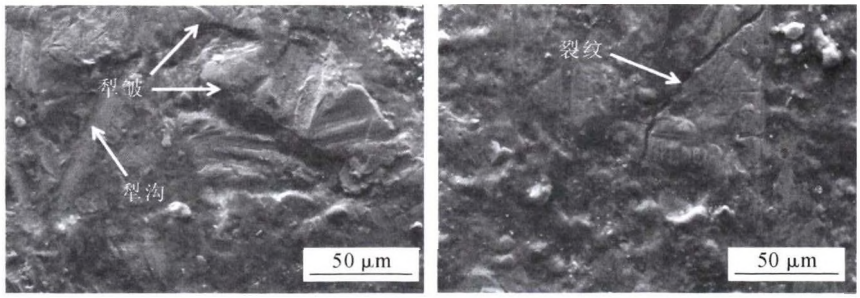


图 4 圆锥表面的微观形貌 SEM 图

Fig.4 SEM micrographs of the cone surface

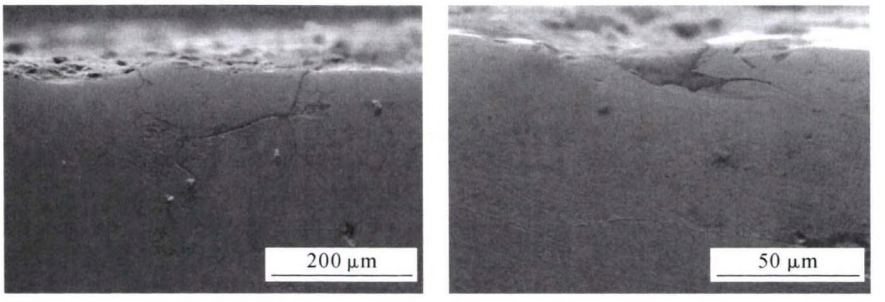


图 5 耐磨圆锥截面裂纹 SEM 图

Fig.5 SEM micrographs showing the cracks in the cone after service

横向损伤引起的分离材料将在之后的磨损过程中极易被磨去，从而造成材料的流失。

3 讨论

综合以上结果，圆锥的失效主要是在破碎质地较硬的花岗岩过程中，动锥、定锥的互相冲击作用引起圆锥损伤；同时，在冲击作用下，尖锐的花岗岩压入圆锥表层的冲击凿削造成大量犁沟、犁皱损伤。在如此反复的作用下，使材料不断流失，这是耐磨圆锥失效的主要原因。其次，圆锥本身的铸造及工艺缺陷也加速了耐磨圆锥的失效。由图 2 可见，裂纹区存在较多的显微疏松，同时在其晶界上存在一定量的未溶碳化物。

在强冲击作用下，圆锥表层材料产生强烈的加工硬化，加工硬化提升耐磨性的同时也极大降低了材料的韧性。在反复的冲击作用下，也使材料产生一定的疲劳损伤。当材料的表层强度不足以抵抗冲击时，在材料的表层将产生显微裂纹，并逐步沿着材料的显微缺陷及晶界处向深处扩展，晶界处未溶碳化物的存在也加速了裂纹的扩展。

水韧处理后的高锰钢本身具有极好的韧性与较高的强度，但本文所研究的高锰钢由于热处理工艺控制存在一定偏差，有局部未溶碳化物存在于晶界位置；且随着磨损的进行，耐磨圆锥变得越来越薄。由图 1 磨损曲线的测绘结果可知，最薄处仅 19 mm。同时由冲击吸收功数据可知，裂纹区由于铸造显微疏松的存在，使得其冲击吸收功仅为 25 J，不足远离裂纹区的正常区域的一半。因此，裂纹区各种因素的综合作用使之难以抵抗强冲击工况，造成宏观裂纹的产生。

对比裂纹区与正常区域纵截面加工硬化数据可知，圆锥经冲击作用后，与宏观裂纹同圈的正常材料表现出更好的加工硬化效果，其表层最高 HV 值比裂纹区试样的最高 HV 值高出 11.3%，可推测裂纹区由于加工硬化效果相对较低，耐磨性不如正常区域，从而导致材料的加速流失。由上述分析可知显微疏松的存在是造成材料宏观裂纹的主要原因，对耐磨圆锥的使用效果造成了显著影响。

4 结束语

经后续进一步对耐磨圆锥铸造工艺研究发现，裂纹出现的位置是耐磨圆锥铸造时的冒口位置，在冒口根部存在一定的显微疏松。对铸造工艺的探究可知，显微疏松是由于冒口对铸件补缩不充分造成的，可以从改善铸造工艺来避免此种问题的出现，通常有以下几种途径：①增大冒口尺寸，增大钢液补缩能力；②使用质量较好的保温冒口或发热冒口，保持冒口处钢液温度，延长其补缩时间。同时，经磨损曲线测绘可知，耐磨圆锥的磨损主要发生在其中部偏下的位置，可通过在磨损严重区域进行陶瓷复合的方式，结合锰钢基体高韧性与陶瓷高耐磨性的优点，提高材料使用寿命。

参考文献：

[1] 彭祖欢，姜俊雄，付凯，等. CC400 单缸圆锥破碎机液压系统分析[J]. 世界有色金属，2018(20): 47-48.

[2] 孙德明，樊立志，姚耿. 液压圆锥破碎机优化设计及应用探讨[J]. 科学技术创新，2018(18): 164-165.

[3] 王海艳，笪秋攀，郑开宏，等. Nb/Ti 对过共晶高铬铸铁组织及性能影响[J]. 铸造技术，2018，39(2): 267-270.

[4] 龙骏，郑志斌，郑开宏，等. Si 含量对 Fe-Cr 耐磨合金钢组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2018，39(3): 517-520.

[5] 王娟，郑开宏. ZTA 颗粒增强铁基复合材料的高温磨料磨损性能研究[J]. 热加工工艺，2018，47(10): 101-105.

[6] 刘越，魏顺华，臧勐超. 轻质高锰钢微观组织及耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报，2018，38(3): 291-298.

[7] 龙骏，郑开宏，郑志斌，等. 铜矿湿磨用球磨机合金钢衬板的腐蚀磨损失效分析[J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(7): 759-762.

[8] 张维果，王学成. 浅谈煤矿机械磨料磨损机理 [J]. 煤炭工程，2010(6):76-78.