

高锰钢锤头失效分析与优化研究

王雷¹, 李光强², 刘昱²

¹安徽海螺川崎装备制造有限公司, 安徽 芜湖

²武汉科技大学钢铁冶金及资源利用教育部重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月31日

摘要

结合对Mn18锤头断裂界面特征、形貌以及金相组织等的分析, 确定了沿晶界开裂、Ti含量过多以及生产工艺不合理等是造成失效的原因。通过减少Ti含量, 增加Mo元素, 改变生产工艺等措施, 使Mn18锤头的组织特征以及析出物总量和形态得到优化, 锤头的服役周期及稳定性均有效提升。

关键词

Mn18, 锤头, 碳化物, 合金元素

Failure Analysis and Optimization Research on High Manganese Steel Hammer Head

Lei Wang¹, Guangqiang Li², Yu Liu²

¹Anhui Conch Kawasaki Equipment Manufacturing Co., Ltd., Wuhu Anhui

²Key Laboratory for Ferros Metallurgy and Resource Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Jun. 14th, 2023; accepted: Jul. 19th, 2023; published: Jul. 31st, 2023

Abstract

Based on the analysis of the fracture interface characteristics, morphology, and metallographic structure of Mn18 hammer heads, it has been determined that cracking along grain boundaries, excessive Ti content, and unreasonable production processes are the reasons for the failure. By reducing Ti content, increasing Mo element, changing production process, and other measures, the microstructure characteristics, total amount and morphology of precipitates of Mn18 hammer head are optimized, and the service cycle and stability of the hammer head are effectively improved.

Keywords

Mn18, Hammer Head, Carbide, Alloying Element

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锤头是锤式破碎机的核心部件,基于破碎机中高冲击工况条件,高锰钢是最适用于锤头的金属材料。水泥熟料破碎机内锤头即以 Mn18 高锰钢为主。高锰钢锤头在凝固过程中,冷却收缩产生的内应力和铸件内外温差产生的热应力二者之和超过应力作用部位的强度时,铸件将会产生微细裂纹,这些微细裂纹中一方面可能被溶质元素填充,另一方面可能引起夹杂物的聚集,均会形成钢基不连续带,这些裂纹及其内部填充物在水韧处理过程中也不能完全消除,而破碎机内工况恶劣、复杂,锤头工作时受到冲击的方向、力度等具有一定的随机性,造成锤头各部位的表面加工硬化特性及组织特征的差异不断扩大,加上已经存在的微细裂纹在疲劳冲击过程中不断扩展,最终将造成锤头破碎或者断裂等失效事故,影响总体服役周期[1] [2] [3] [4] [5]。

本文以 Mn18 锤头的失效分析为基础,研究合金成分及生产工艺对锤头内部质量、组织和服役周期的影响,提出针对性的优化措施并在生产中验证实施。

2. 失效高锰钢锤头检验分析

2.1. 成分检验

取铸件不同部位进行成分检验,结果如表 1 所示。

Table 1. Chemical composition of Mn18 hammer head (wt %)

表1. Mn18锤头化学成分(wt %)

部位	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ti
表层	1.42	0.36	17.62	0.019	0.014	1.02	0.07	0.09	0.48
心部	1.45	0.38	18.21	0.019	0.016	1.02	0.03	0.09	0.51

在表 1 中,可以看出,中心部位与表层成分略有差距,是凝固过程中的偏析所致。铬是高锰钢中添加较多的元素在,其作用也较为明确。经水韧处理后,铬会大部分都溶入到高锰钢奥氏体中,提高钢的屈服强度,同时也加快了碳化物在冷却时的析出,通常会在晶界上进行连续网状碳化物分布。加铬的高锰钢在面临强冲击磨损时其耐磨性得到了提高,因而适用于锤头铸件。

钛在钢液中属于强还原性元素,在高碳、高氮的 Mn18 钢液中,有极强的与 C、N 结合生成析出物的能力,如果在凝固之前形成 TiN、Ti(C,N)等高熔点微粒,可以作为奥氏体的非自发异质晶核,增加单位体积内的晶粒数,从而细化晶粒[6] [7] [8]。因此,在高锰钢中进行钛的微合金化,已经有较多的研究和实践,本文中所述 Mn18 在设计初期加入了 0.5%左右的钛。

2.2. 锤头断裂界面分析

Mn18 锤头经相关检验出厂后应用于水泥立式破碎机, 在 6 个月服役周期后, 部分出现了断裂失效, 取断裂试样进行分析, 相关结果如图 1~5 所示。



Figure 1. Macroscopic morphology of the fracture interface of Mn18
图 1. Mn18 锤头断裂界面宏观形貌

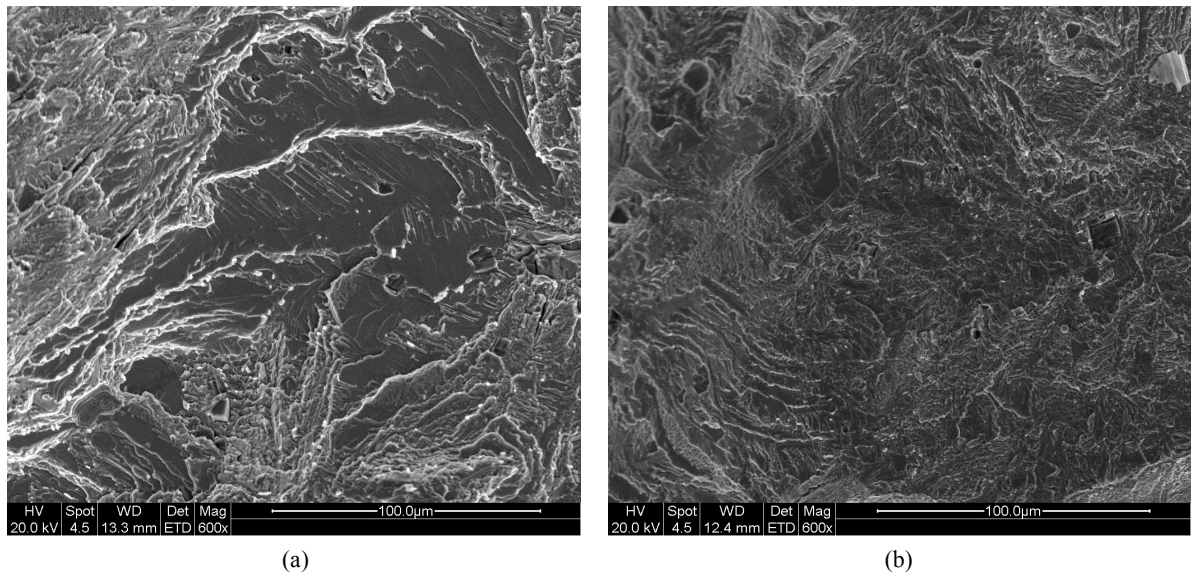


Figure 2. Different metallographic characteristics and inclusion distribution of fracture interface. (a) Interface layer; (b) Near interface

图 2. 断裂界面不同部位金相特征及其夹杂物分布。(a) 界面层; (b) 界面附近

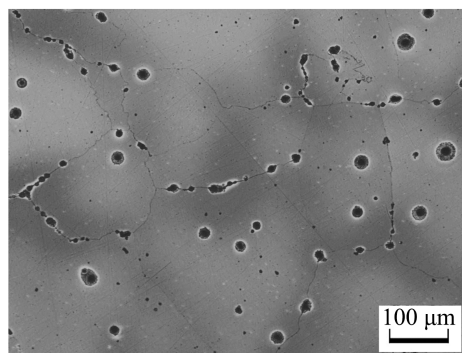


Figure 3. The normal structure between the interface and the steel base of the hammer head
图 3. 锤头界面与钢基之间正常部位的组织

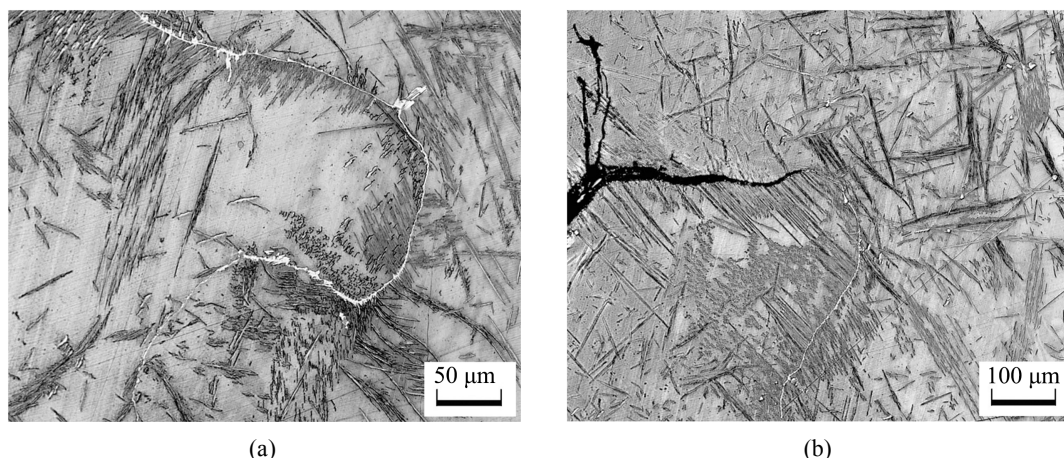


Figure 4. Metallographic structure of the fracture interface. (a) Grid like carbides and needle shape carbides at grain boundaries in uncracked areas; (b) Characteristics of grain boundary cracking and needle like carbides

图 4. 断裂界面部位的金相组织。(a) 未开裂部位的晶界网状碳化物和针状碳化物；(b) 晶界开裂特征及针状碳化物

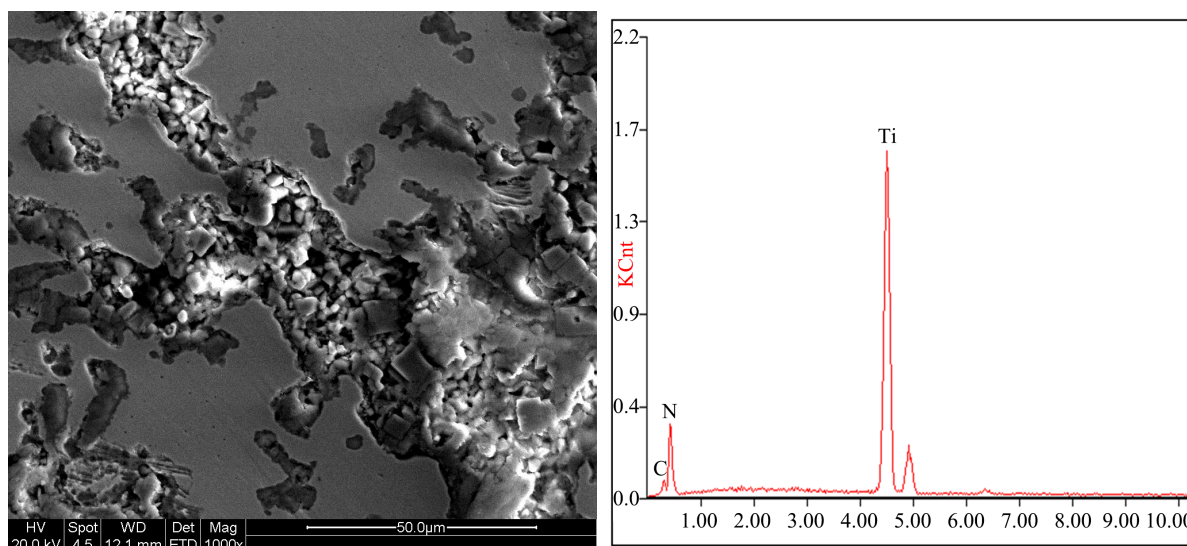


Figure 5. Massive aggregation of TiN within local cracks

图 5. 局部区域裂纹内大范围聚集的块状氮化钛

从图 1 看出，锤头研连接圆孔处周围断裂，属于切向脆断。图 2 可以看出，断裂界面不同部位均呈较为典型的解理断口特征，说明锤头的韧性水平较差，同时不同部位的断面均较多的分布有不规则方块状夹杂物，说明该类型夹杂物总量较多。

如图 3，正常部位组织中，晶粒较为粗大，晶界有块状的碳化物析出，但是奥氏体晶界总体正常。

由图 3 和图 4，锤头正常部位晶粒约为 0.5 级别，近断裂断面部位的晶粒相对更为粗大，晶粒直径平均在 400 μm 以上，晶界形成了连续网状碳化物，大量的针状碳化物沿晶界向晶内生长，开裂部位有明显的沿晶开裂特征。针状碳化物与球状碳化物晶体结构不同，球状析出相为面心立方结构，而针状析出相为体心立方结构，结构特征不同导致二者的物理性质有明显差异[9][10][11]。细小的针状碳化物(长度 ≤ 20 μm)有利于晶界稳定，可优化高锰钢的力学性能特别是冲击韧性，但是图 4 中超长尺寸深灰贯穿晶粒的碳化物，其内部将发生珠光体转变，其原因是在过冷度达到一定条件时，碳化物析出集中的区域，会形成片层状的 Fe₃C 和少量铁素体(由局部碳化物析出形成低碳区)共同组成的混合型组织，即珠光体，

这种混合结构的结合力不强,因此冲击吸收能量较低,远不如均匀的奥氏体基体,在受到强大外力作用时,针状铁素体自身及所在的晶界均成为应力集中区域,首先发生断裂、撕裂等缺陷,导致锤头在服役一定时间后断裂失效。

从图5可以看出,TiN和Ti(C,N)在一定区域内连续性地、超大范围地聚集,形成钢基的不连续区域,该区域的强度和韧性断崖式下降,在锤头工作过程中,该类夹杂物聚集处成为明显的应力集中区域,直接作为裂纹起源并逐步扩展和延伸最终形成广发性裂纹,引起锤头断裂失效。

3. 分析与讨论

3.1. 成分的影响

碳元素在高锰钢中是最主要的元素之一。碳的存在有利于形成单相奥氏体组织。大量的碳固溶于奥氏体内,也有利于提高高锰钢的强度。同时,碳与Cr等合金元素形成的碳化物有利于提高高锰钢的耐磨性[1][9][10][11]。但是过高的碳含量将增加晶界碳化物析出的趋势,在同等条件下,不利于稳定晶界,因此,可在表1的基础上,适当降低碳含量。

高锰钢中加Mo,可使铸态组织中碳化物的析出量将减少,奥氏体的晶界上形成网状碳化物趋势减小。钼还可以减慢钢中针状碳化物的析出速度,降低其析出温度,这些对高锰钢在铸态下的塑性及强度提高都有利,可弥补因铬元素加入带来的不足,因此,应适当加入Mo,与Cr联合作用,发挥二者的有益效果。

本文所述高锰钢进行了Ti的微合金化,其有益效果是确定的,但是,如果Ti含量过高,而N含量保持在相对稳定水平的情况下,TiN和Ti(C,N)在1400℃即开始析出,在金属熔体内或者固液两相区内连续性地、超大范围地生成合并长大,随着凝固过程的持续,会不断向溶质元素多、熔点相对较低的晶界聚集,超过了其钉扎作用需要的聚集量,造成初生晶界结合力下降,甚至是钢基和晶界的严重脱离,在锤头工作过程中,夹杂物聚集处成为明显的应力集中区域,直接作为裂纹起源并逐步扩展和延伸最终形成广发性裂纹,引起锤头断裂失效。

因此,从成分方面来讲,一方面要充分发挥TiN和Ti(C,N)在Mn18铸件中的有益作用,另一方面也要控制其大量、集中析出的危害性,结合低合金钢、中合金钢等的成熟应用实践,可将Ti含量适当降低。

3.2. 过程工艺的影响

为了生产性能良好、服役周期稳定的高锰钢,奥氏体晶粒细化与碳化物形态的控制是两个核心控制要点。高锰钢在冷却结晶时,晶界一般同时析出网状碳化物和针状碳化物,且针状碳化物将向晶内生长,但是,如果铸件过大,加热后到水韧处理的时间过长,且水韧处理的冷却穿透性不足,内部长时间停留在高温区域($\geq 500^\circ\text{C}$),将会出现奥氏体晶粒继续长大、晶界碳化物持续析出、针状碳化物不断长大的情况,最终导致内外部应力状态差异过大,在强大外力作用下,锤头外部首先出现高密度位错和形变孪晶,强度、硬度迅速增加,内外部应力差进一步增大,内部脆化的晶界即发生撕裂和断裂,宏观表现为锤头断裂失效。

因此,从工艺上讲,首先要保证锤头水韧处理前的加热温度合理、时间充分,从而保证碳化物完全或大部分回溶入奥氏体中,在锤头从加热炉中取出后,是碳化物析出高峰期,如果出炉到入水时间长,碳化物将大量析出,针状碳化物极速生产,再加上冷却强度不足,冷却过程向内部的传输速度不足,则内部产生时效效应,会出现严重的晶粒长大、碳化物过量析出,从而造成使用过程中的晶界开裂和锤头失效。因此应极大缩小铸件入水时间,以尽量快速形成稳定奥氏体、减少碳化物析出量,避免网状碳化物的出现,同时要加大水量,保持过冷度,加速内部冷却,避免出头内部在时效效应下出现大量的碳化

物析出以及超大尺寸针状碳化物的存在，从而提高锤头内外部组织、晶界特征以及性能的一致性，延长其服役周期。

3.3. 优化措施

结合上述分析与讨论，形成以下优化措施：

- 1) 将高锰钢锤头的 C 含量目标降至 1.25%，Ti 含量目标降至 0.15%。
- 2) 加入目标值 0.5%的钼元素。
- 3) 将锤头水韧处理加热温度提升至 1060℃，优化操作，将锤头出炉到入水时间缩减至 40 s 以内。
- 4) 优化水淬条件，加大水箱容积或者使用大流量控温循环水，保证冷却强度。

4. 实施效果

金相组织

采用优化后的工艺生产 Mn18 锤头，钢水实际成分如表 2 所示。

Table 2. Optimized Mn18 hammer head chemical composition (wt %)

表2. 优化后的Mn18锤头成分(wt %)

部位	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ti
Y型小样	1.18	0.36	17.87	0.018	0.012	1.04	0.51	0.11	0.14

由表 2，成分达到了优化目标范围。

浇注完成后，对锤头进行解剖，组织如图 6 所示。

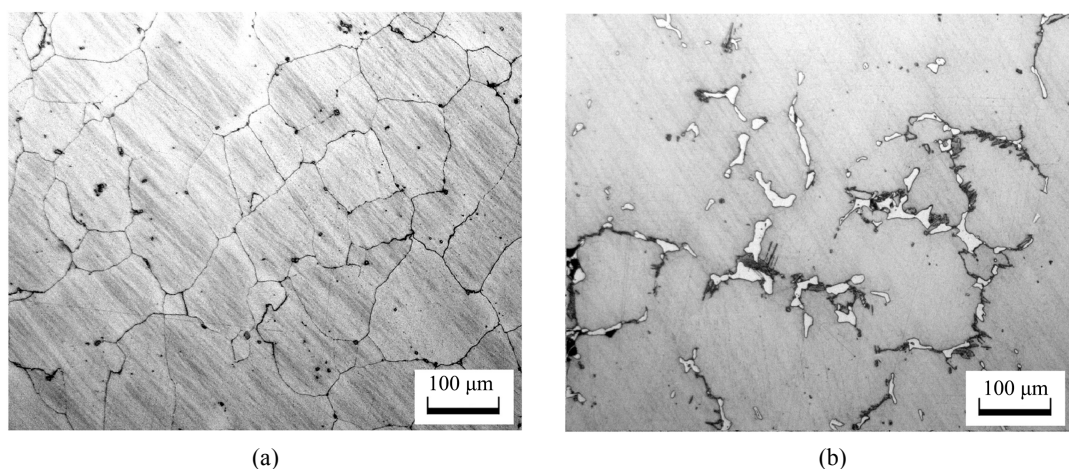


Figure 6. Metallographic structure of different parts of Mn18 hammer head after optimization. (a) Near surface; (b) Central area

图 6. 优化后的 Mn18 锤头不同部位金相组织。(a) 近表面；(b) 心部

从图 6 可以看出，成分与工艺优化后，锤头近表面部位组织均匀，晶粒度为 2 级，心部晶粒约为 1 级，有较明显的晶界析出，但是析出物以块状碳化物为主，针状碳化长度基本在 10 μm 以内，说明适当减少碳含量，加入 Mo 与 Cr 联合作用，减少了析出物总量，优化了析出物形态，利于晶界的稳定，且析出物中未见成片聚集的 TiN 类方块状夹杂物，该类夹杂物的不利影响处于可控范围。

该批锤头投入使用 18 月后，除表面端部正常磨损外，未出现断裂失效的情况，说明锤头的内外部质

量提升明显,在此基础上的服役周期稳定延长。

5. 结论

1) Mn18 锤头断裂的直接原因是断面部位的沿晶界开裂,根本原因是冷却速度不足引起的晶界网状碳化物析出。

2) Ti 含量过高,会析出大量的方块状 TiN 并在晶界聚集,也造成晶界结合力下降,促进外力作用下的晶界开裂。

3) 采用 Cr、Mo 复合合金化,可以减少晶界碳化物析出量,优化碳化物的形态,明显减少超大尺寸针状碳化物的析出。

4) 采用成分优化基础上的水韧处理过程优化等措施,使 Mn18 锤头的晶粒细化、析出物总量和形态得到控制,最终延长服役时间。

参考文献

- [1] 张增志. 耐磨高锰钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [2] 王宏霞, 费姝霞. 压铸件常见缺陷及防止措施[J]. 内燃机与配件, 2020(5): 106-107.
- [3] 姜启川, 李章, 王守实, 何镇明. Ti 在铸态奥氏体锰钢中的作用[J]. 金属学报, 1990, 26(4): B272-B276.
- [4] 陈席国, 杨胡坤, 陈宇, 等. 复杂高锰钢件铸造工艺优化[J]. 铸造, 2018, 67(11): 1034-1041.
- [5] 吴海平. 钒钛微合金化对铸态中锰钢组织和性能的影响[J]. 铸造设备与工艺, 2011(6): 12-13.
- [6] Su, R.X. (1993) Study on Ti-Bearing High Mn Steel. *Research on Iron and Steel*, **11**, 26-32.
- [7] 王文焱, 元亚莎, 喻惠武, 等. TiN 纳米颗粒在 ZGMn13 中存在形式及对基体微观形貌的影响[J]. 钢铁, 2004, 49(11): 64-67.
- [8] 傅杰, 朱剑, 迪林, 等. 微合金钢中 TiN 的析出规律研究[J]. 金属学报, 2000, 36(8): 801-804.
- [9] 傅排先, 康秀红, 夏立军, 等. 微合金化对厚断面高锰钢铸件中夹杂物形成的影响[J]. 铸造, 2010, 59(12): 1337-1339.
- [10] 李良, 许晓嫦, 张奇, 等. 变质高锰钢析出相的演变及力学性能的研究[J]. 材料科学与工艺, 2014, 22(6): 10-16.
- [11] 丁志敏, 王树娟, 杨芳, 阎颖. 高锰钢低温时效处理时的组织结构[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(z1): 29-33.