DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3013

国内外耐磨钢夹杂物控制水平分析

张　浩[1,2,3]，王　冬[4]，伦明睿[1,2,3]，付建勋[1,2,3]，沈　平[1,2,3]

(1. 上海大学 材料科学与工程学院，上海 200444；2. 上海大学 先进凝固技术中心，上海 200444；3. 上海大学 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室，上海 200444；4. 鞍钢股份有限公司，辽宁 鞍山 114033)

摘　要：耐磨钢中夹杂物是影响耐磨钢强度、韧性的重要因素，为了分析国内外耐磨钢中夹杂物的控制水平，对日本和国内两厂的耐磨钢进行夹杂物大小、分布、成分，以及钢基体的硬度进行分析。结果表明，国内 A 厂通过 Ca 处理后与日本耐磨钢的夹杂物尺寸接近，但数量密度较大，洁净度略低于日本耐磨钢。对钢中夹杂物成分进行检测：日本耐磨钢中的夹杂物类型主要为 CaO、CaO-Al_2O_3、MgO-Al_2O_3、MgO-Al_2O_3-CaO 和 TiN、Ti(C,N)夹杂；国内 A 厂通过 Ca 处理技术，降低了钢中 MnS 析出量，夹杂物中 CaS、CaO 含量增加；未经过 Ca 处理的国内 B 厂耐磨钢中发现 MnS 析出，经过轧制后呈长条状。对各厂的硬度进行分析，日本耐磨钢基体平均硬度为 447 HV，且钢基体组织硬度分布均匀，国内 A 厂和 B 厂略低于日本耐磨钢，硬度均匀性波动较大，组织控制水平与日本产品尚有差距。

关键词：耐磨钢；夹杂物；Ca 处理；洁净度

中图分类号：TG142.72　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)04-0351-07

Comparison of Cleanliness Wear-resistant Steel at Home and Abroad

ZHANG Hao[1,2,3], WANG Dong[4], LUN Mingrui[1,2,3], FU Jianxun[1,2,3], SHEN Ping[1,2,3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Center for Advanced Solidification Technology, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114033, China)

Abstract: Inclusions in wear-resistant steel are important factors that affect the strength, toughness and other properties of wear-resistant steel. To analyse the control level of inclusions in wear-resistant steel at home and abroad, the size, distribution and composition of inclusions and the steel matrix hardness of wear-resistant steel from Japan and China were analysed. The results show that the size of inclusions in factory A is similar to that of the Japanese wear-resistant steel, but the density of inclusions is higher, which leads to the cleanliness being slightly lower than that of japanese wear-resistant steel. The inclusions in Japanese steel are mainly CaO, CaO-Al_2O_3, MgO-Al_2O_3, MgO-Al_2O_3-CaO and TiN, Ti(C,N). The precipitation of MnS in steel decreases and the contents of CaS and CaO in inclusions increase by Ca-treatment in the factory A. However, MnS is found to precipitate in the wear-resistant steel of factory B domestically. According to the hardness analysis of each factory, the average hardness of the Japanese wear-resisting steel matrix is 447 HV, and the hardness distribution is uniform. The hardness of domestic factories A and B is slightly lower than that of Japanese wear-resistant steel, and both have uneven hardness distributions. There is still a gap between the domestic products and Japanese products in terms of microstructure control level.

Key words: wear-resistant steel; inclusions; Ca-treatment; cleanliness

耐磨钢是一种常用于大型重工业生产的钢种，具有较好的耐磨性及强韧性，通常用于工程机械，如铁路运输、矿山机械、煤炭开采等[1-2]。随着中国重工机械的发展，各种因恶劣的工况导致材料磨损的问题频发，如何提高耐磨钢的性能来提高设备的使用寿命，降低因材料磨损造成的经济损失对社会经

收稿日期：2023-01-17

基金项目：国家自然科学基金(52104334, 52074179)

作者简介：张　浩，1997 年生，硕士生．研究方向：钢中夹杂物的改质与调控．电话：15195957622, Email: 1126158030@qq.com

通讯作者：付建勋，1969 年生，博士，教授．研究方向：高品质特殊钢的开发．电话：13701837760, Email: fujianxun@shu.edu.cn

沈　平，1987 年生，博士，副研究员．研究方向：高品质铝镇静钢及含硫特殊钢的开发与品质提升．电话：18621065227, Email: koulvpinlei@126.com

引用格式：张浩，王冬，伦明睿，等．国内外耐磨钢夹杂物控制水平分析[J]．铸造技术，2023,44(4):351-357.

ZHANG H, WANG D, LUN M R, et al. Comparison of cleanliness wear-resistant steel at home and abroad[J]. Foundry Technology, 2023,44(4):351-357.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

济发展有重大意义[3]。国内的耐磨钢研究起步较晚，随着中厚板制造装备和洁净钢冶炼技术水平快速提高，经济型和高性能系列耐磨钢被不断开发生产出来。我国的耐磨钢主要以低合金马氏体耐磨钢的研究为主，如何在提高耐磨性的同时保证钢的机械加工性能是各个企业面临的核心难题。

耐磨钢非金属夹杂物的控制是提高耐磨钢强度、韧性，并降低耐磨钢磨损失效的关键。李灿明[4]分析了淬火工艺对耐磨钢组织性能的影响，发现钢中弥散分布的碳化物可以与位错相互纠缠、钉扎，从而阻止裂纹扩展，提高耐磨钢的耐磨性和韧性。通过向钢中加入合金化元素 Ti 的方法已广泛应用于耐磨钢中，含 Ti 夹杂物在钢中起到细晶强化和析出强化的作用[5-7]。Wang 等[8]对含 Cr 铁素体不锈钢中夹杂物的析出过程进行热力学计算，分析了不同 Ti 含量对钢中夹杂物的影响，当 Ti 含量小于 0.1% 时，钢中夹杂物以 Al_2O_3 为主，当 Ti 含量达到 0.3% 后，钢液在凝固末期析出 TiN 夹杂。但是过量的 Ti 元素会形成大尺寸的 Ti 夹杂物，危害钢的韧性[9-10]。王帅等[6]研究分析了 TiN 对耐磨钢韧性的影响，发现 Ti 含量为 0.03%时，钢的冲击韧性最好；随着 Ti 含量的增加，断口夹杂物的形态从完整到破碎，导致钢的韧性较差。此外，耐磨钢一般还需进行涂装应用，其耐腐蚀性能也是耐磨钢的发展方向。耐磨钢中氧化物、硫化物夹杂的洁净度变差，导致耐磨钢耐腐蚀性能下降[11-13]。李德发等[14]研究了钢中夹杂物属性对 NM500 耐磨钢腐蚀性能的影响，发现含 Al 夹杂物电极电位低，容易成为腐蚀源，导致钢的腐蚀。由此可见，在增加钢韧性的同时，控制钢中夹杂物的形态和大小，提高钢液洁净度是提高耐磨钢性能的关键。目前，通过引入第二相粒子来增加耐磨性的方法是研究的重点[15]，同时采用 Ca 处理对钢中夹杂物的成分、形貌、尺寸进行调控，以降低钢中大尺寸氧化铝夹杂、MnS 夹杂的析出[16-19]。但是 Ca 处理不当会引入大尺寸钙铝酸盐或是 CaS 夹杂[20-21]。

相较于国外高端产品，国内耐磨钢尚存在钢液纯净度、工艺稳定性较低、碳当量高、焊接性能差等问题[22]。本文通过国内两厂的耐磨钢轧材与日本某厂的耐磨钢轧材进行对比，分析钢的洁净度，以及钢中夹杂物的形态、大小、成分，探究了钢中第二相粒子的形成及析出规律，为国产高品级耐磨钢的开发提供参考。

1 钢样及处理方法

本文研究的对象为国内 A 厂、B 厂、日本的耐磨钢，冶炼工艺为转炉→LF 精炼→RH 真空脱气→软吹氩→连铸→轧制。国内 A 厂在 RH 真空脱气后喂入 Ca 线对夹杂物进行变质处理。钢样成分如表 1 所示。国内 A 厂的成分与日本类似，但是钢中 Al 略高于日本，目的是通过 Al 来降低钢中的 O 含量，还能避免生成含 Ti 的氧化物。国内的 Ca 含量也较多，主要目的是通过 Ca 处理变质钢中 Al_2O_3 夹杂，形成低熔点的钙铝酸盐夹杂物，在高温下呈液态，从而避免水口结瘤。此外 Ca 处理还可以降低钢中的 S 含量，避免生成 MnS 夹杂，降低 MnS 对钢材力学性能的影响。试样如图 1 所示，板材厚 60 mm，在距边部 1/4 处取样，试样观察面为平行轧制方向，平行上下表面。

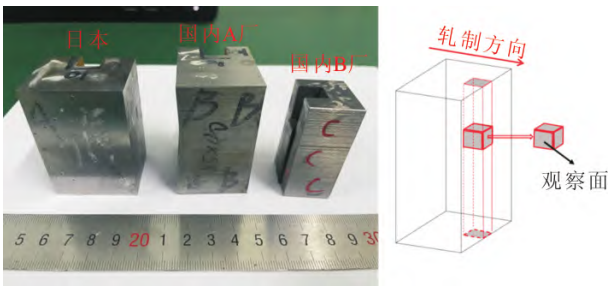


图 1 样品及取样示意图
Fig.1 Sample and sampling diagram

依次用粒度为 38、18、13、7.6、6.5 um 的砂纸预磨，之后用 W1.5、W2.5 的抛光膏抛光，然后清洗吹干。使用蔡司金相显微镜(AVxo)观察夹杂物的形态和分布，在 100 倍和 200 倍视野下记录 30 个视场。然后使用扫描电子显微镜(Phenom-Pro)观察硫化物形貌，采用能谱分析仪分析夹杂物成分。利用图像处理软件(Image-Pro Plus)对视场中的夹杂物进行分析。通过小样电解和扫描电镜观察夹杂物的三维形貌，三维腐刻装置的示意图如图 2 所示。

2 国内外耐磨钢中夹杂物对比

2.1 钢中夹杂物形貌及尺寸分析

采用金相显微镜观察钢中夹杂物的形貌与分布，金相图如图 3 所示。从图中可以看出，试样的洁

表1 各厂耐磨钢化学成分 *w*/%
Tab.1 Chemical composition of the wear-resistant steel

厂商	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	B	Al	Ca	Fe
日本	0.19	0.34	1.10	0.010	0.002	1.10	0.50	0.3	0.015	0.001 4	0.035	0.000 7	Bal.
国内 A	0.18	0.30	1.10	0.010	0.002	1.10	0.50	0.3	0.015	0.001 5	0.041	0.001 7	Bal.
国内 B	0.19	0.23	1.16	0.009	0.002	0.81	0.01	0.2	0.011	0.002 2	0.037	0.000 3	Bal.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

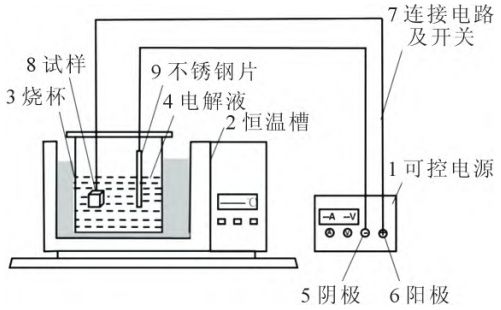


图 2　三维腐刻装置示意图

Fig.2　Schematic diagram of the three-dimensional etching device

净度较高，尺寸较小。利用 Image-Pro Plus 对钢样中夹杂物的等效直径、数量密度进行统计。

钢中夹杂物的统计结果如图 4(a)所示。日本耐磨钢中夹杂物的等效直径最小，为 1.85 μm，此时，钢中夹杂物的面积占比也最小，为 3.67 μm^2，在 Ca 含量较低情况下做到了对钢中夹杂物的良好控制。国内 A 厂与日本的钢成分类似，钢中夹杂物控制水平也相差不多，但是 A 厂夹杂物的等效直径偏大，洁净度低于日本，夹杂物面积占比为 0.028%。国内 B 厂的夹杂物平均面积最大，为 6.22 μm^2，夹杂物的平均等效直径最大，为 2.18 μm，钢中夹杂物数量密度最低，为 43 个 /mm^2。对钢中夹杂物的尺寸分布进行统计，如图 4(b)所示，B 厂中大尺寸夹杂占比高于其他两厂，钢中 4~6 μm 的夹杂占比为 6.5%，6~10 μm 占比 4%，大于 10 μm 的夹杂为 1.5%，相比之下，日本钢中几乎未发现 10 μm 以上的夹杂物，A 厂中大于 10 μm 的夹杂物也仅为 0.3%，可见 B 厂的夹杂物控制水平较差。

2.2　耐磨钢钢中夹杂物形貌及尺寸分析

从表 1 可知，国内 A 厂与日本耐磨钢中的成分类似，Al 和 Ca 含量偏高。为了分析钢中成分对夹杂物的影响，采用扫描电子显微镜对钢中夹杂物进行检测，通过非水溶液电解法对试样进行电解处理，随着电解的进行，钢基体逐渐溶解，而氧化物、氮化物、硫化物等不易溶于电解液，从而使得钢中夹杂物显露出来。

图 5 为日本耐磨钢中典型夹杂物成分及形貌。整体夹杂物尺寸较小，大部分在 1~5 μm 之间。钢中主要夹杂物为 TiN 夹杂，呈方形、多边形等形状，由于 Ti 含量较低，钢中 TiN 夹杂物析出尺寸较小，可以起到细化晶粒和析出强化作用。TiN 夹杂中还固溶有 TiC 夹杂，主要是由于 Ti 和 C 较低，在 TiN 形成后，只有少量 TiC 固溶析出，形成 Ti(C,N)夹杂，未发现单独存在的 TiC 夹杂。钢中的氧化物主要为 CaO、CaO-Al_2O_3、MgO-Al_2O_3、MgO-Al_2O_3-CaO，形态呈球形。由于氧化物的形成温度较高，其他夹杂的形核温度较低，钢中氧化物几乎不单独存在，尤其是 MgO-Al_2O_3 起到了很好的异质形核作用，作为氮化物的核心形成复合夹杂，尺寸较小(1~3 μm)。钙铝酸盐以及 MnS 的形成温度稍低，也会形成在MgO-Al_2O_3 的外围。日本耐磨钢中未见到单独存在的硫化物夹杂，以及大尺寸的钙铝酸盐夹杂，钢中夹杂物控制水

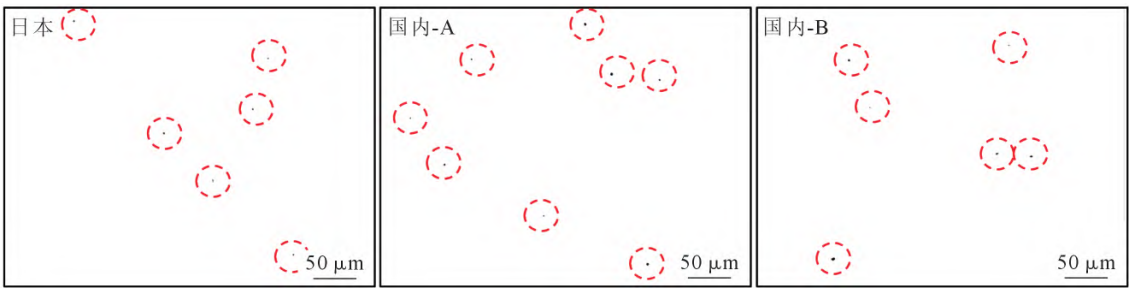


图 3　不同厂耐磨钢典型金相照片

Fig.3　Typical metallographic photos of wear-resistant steel from different factories

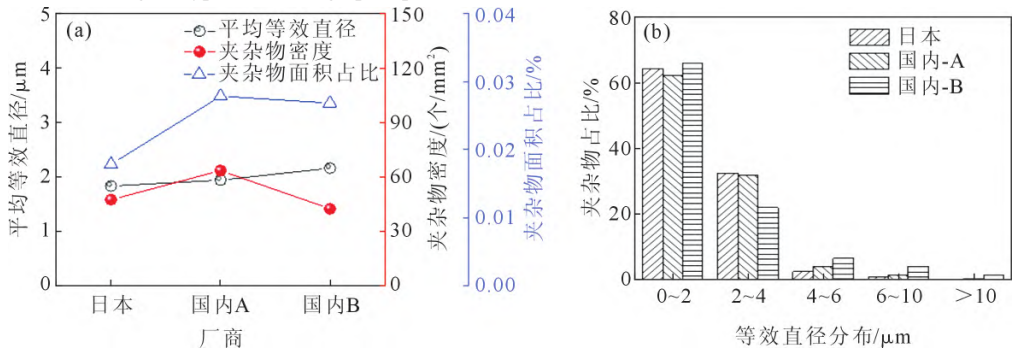


图 4　夹杂物统计结果：(a) 夹杂物等效直径、密度对比，(b) 夹杂物尺寸分布对比

Fig.4　Statistical results of inclusions: (a) comparison of equivalent diameter and density of inclusions, (b) comparison of size distribution of inclusions

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

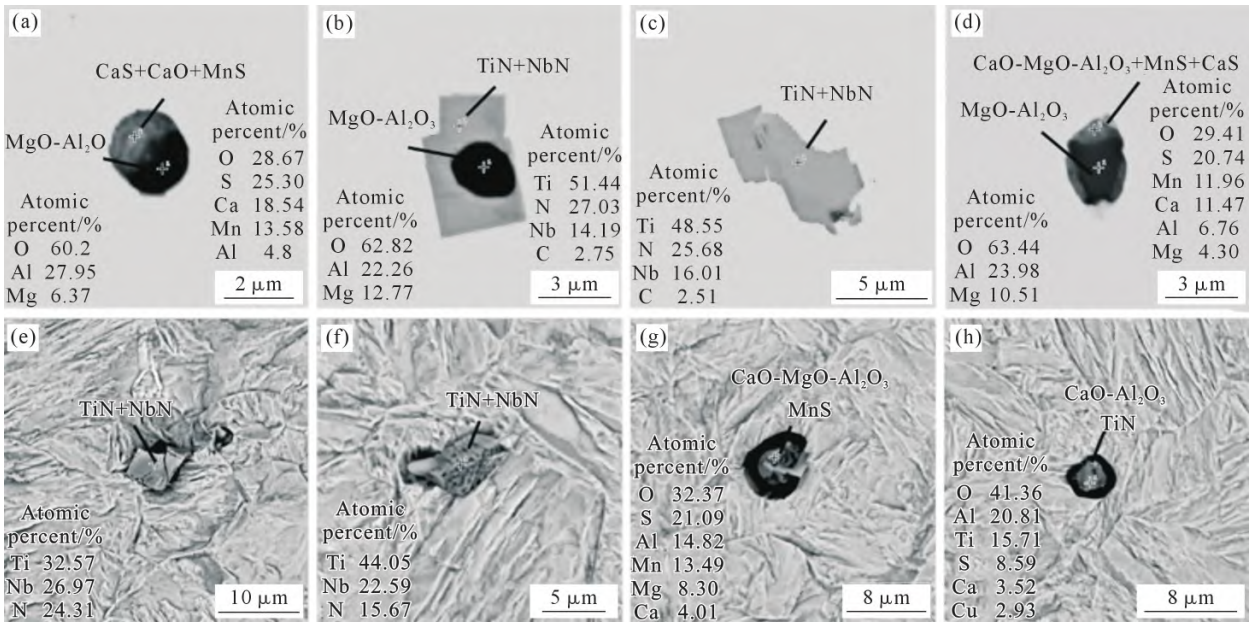


图 5 夹杂物成分及形态–日本：(a~d) 二维形貌，(e~f) 三维形貌

Fig.5 Composition and morphology of inclusions-Japan: (a~d) two-dimensional morphology, (e~f) three-dimensional morphology

平较高。

图 6 为国内 A 厂夹杂物的二维及三维图片。国内 A 厂与日本的耐磨钢成分类似，但是钢中 Ca含量较高。A 厂和日本耐磨钢中夹杂物的类型相同，但是夹杂物中 CaO 及 CaS 含量较高，这是 Ca 处理导致的结果。夹杂物的尺寸在 1~5 μm 之间，钢中未发现大尺寸的钙铝酸盐夹杂，可见钙处理的效果较好。TiN 在钢中可以起到细化晶粒的作用，增大基体的强度、韧性，A 厂 TiN 夹杂出现聚集效应，形成大尺寸 TiN 团状夹杂，在 8 μm 左右，容易导致裂纹等缺陷的产生，如图 6(f)所示，由于 Ca 处理，钢中 $MgO-Al_2O_3$ 转变为 $MgO-Al_2O_3$-CaO，氧化物为核心的复合夹杂较少。此外，从夹杂物的统计结果来看，Ca 处理使得钢液的整体洁净度变差，主要是由于 Ca(O,S)夹杂物的增多。

图 7 为国内 B 厂夹杂物的二维及三维图片。国内 B 厂未经过 Ca 处理，对其夹杂物成分进行分析。B 厂耐磨钢中夹杂物主要为 $MgO-Al_2O_3$、TiN、NbN、MnS。钢中 Ca 含量较低，发现极少数的 $CaO-Al_2O_3$ (图 7(c))，TiN 的尺寸较大，少量 MnS 在其表面析出。此外，也有单独存在的 MnS 夹杂，长宽比大，在轧制后呈长条形，对于耐磨钢来说，MnS 夹杂对钢的韧性、强度等有危害，在使用过程中容易导致裂纹萌生。Nb 含量也较多，固溶在 TiN 中形成 Ti(C,N)，Nb(C,N)固

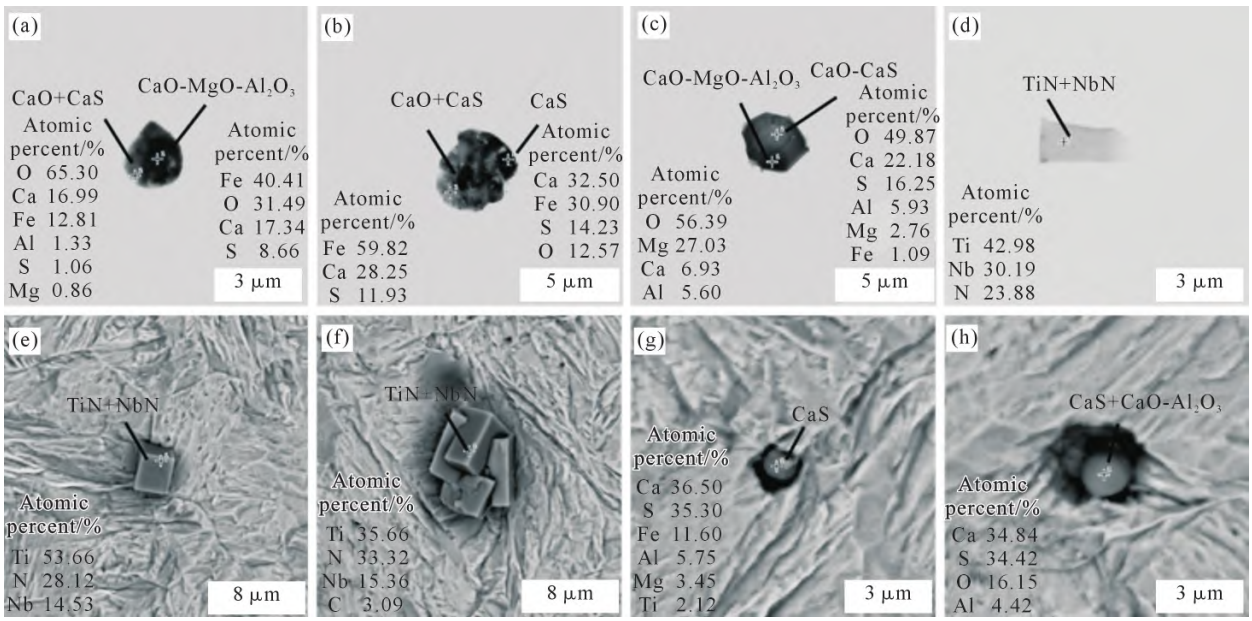


图 6 夹杂物成分及形态–A 厂：(a~d) 二维形貌，(e~f) 三维形貌

Fig.6 Composition and morphology of inclusions-A: (a~d) two-dimensional morphology, (e~f) three-dimensional morphology

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

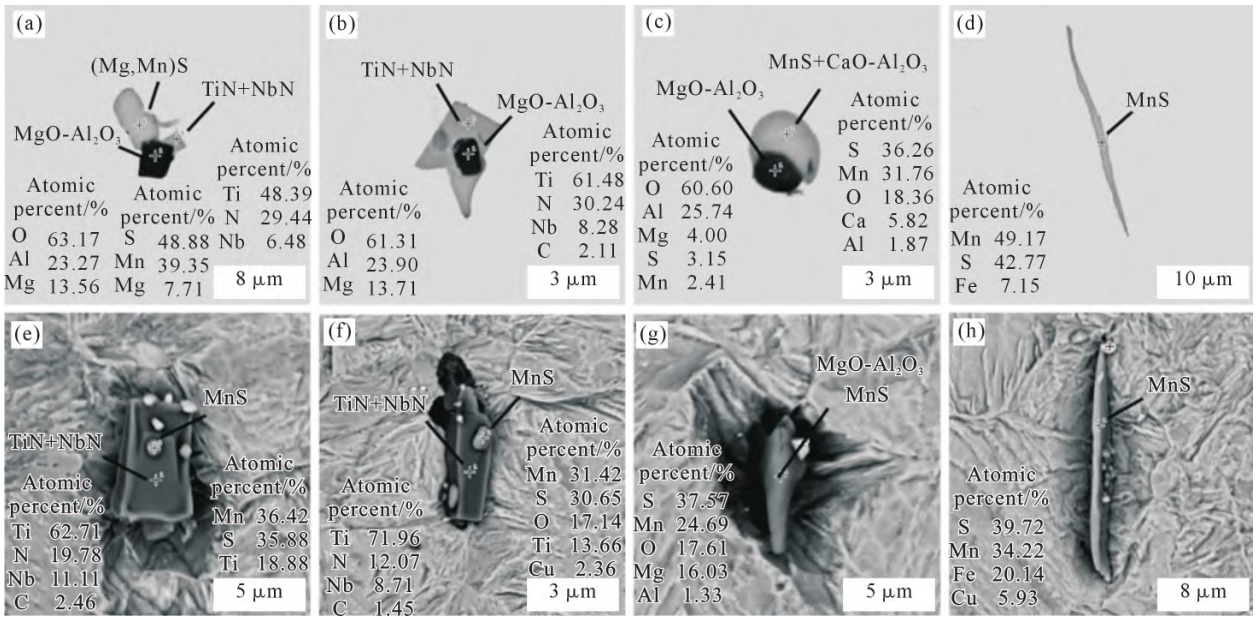


图 7　夹杂物成分及形态–B 厂：(a~d) 二维形貌，(e~f) 三维形貌

Fig.7　Composition and morphology of inclusions-B: (a~d) two-dimensional morphology, (e~f) three-dimensional morphology

溶体。由此可见，B 厂由于 Ca 含量较少，钢中夹杂物种类较少，夹杂物的数量密度也较低，但是 MnS 等夹杂物的析出，导致夹杂物尺寸增大，及长条状夹杂物的形成。

2.3　夹杂物凝固析出过程分析

钢液中未添加镁，但是由于耐火材料、顶渣反应等导致钢中存在少量的 Mg 元素。钢样送检后未能检测出 Mg 含量，即 Mg 含量小于 5×10^{-6}。这里取 Mg 含量为 3×10^{-6} 进行计算。日本、A 厂、B 厂耐磨钢中氧含量经检测，分别为 11×10^{-6}、8×10^{-6}、11×10^{-6}。利用 FactSage7.3 软件计算日本和 A 厂耐磨钢在 600~1 600 ℃时的平衡凝固过程，结果如图 8 所示。

从图 8(a)可知，日本耐磨钢的液相线温度为 1 507 ℃，随着温度的降低，钢中首先析出 $2CaO\cdot Ti_2O_3$，其在钢中不稳定。$2CaO\cdot Ti_2O_3$ 分解后在 1 450 ℃析出 TiN 夹杂，TiN 夹杂的析出量最大，超过 0.01%。随着钢液的凝固，钢中析出 CaS 以及 $CaO\cdot2MgO\cdot8Al_2O_3$ 夹杂。在 1 181 ℃时 MnS 析出，析出速度很快，最终含量在 0.003 9%。国内 A 厂与日本的成分类似，但是采用了 Ca 处理，钢中 Ca 元素增加，氧含量降低。从图 8(b)可以看出，Ca 含量增加后，钢中 CaS 大幅增加，为 0.003%，钢中 MnS 的析出量降低，仅为 0.001 6%，这与前文的实验观察一致。B 厂的成分与日本类似，但是钢中 Ca 含量较低。从图 8(c)可以看出，B 厂的 MnS 析出量最多，含量为 0.004 8%，钢中 CaS 最少。

从热力学计算和实验结合可知，Ca 处理降低了 MnS 析出量，CaS 的增多导致 B 厂耐磨钢的洁净度、韧性、疲劳性能下降。而 B 厂钢中 Ca 含量较低，产生了大量单独存在的 MnS 夹杂。

2.4　不同耐磨钢硬度分析

使用 MH-5L 自动台显微维氏硬度计对日本、国内 A 厂、B 厂的耐磨钢基体硬度进行测量，载荷为 1 000 N，加载与卸载时间均为 5 s，结果如图 9 所示。日本、A 厂和 B 厂厚度方向的平均硬度为447.0、440.5、441.0 HV，日本耐磨钢基体较大些。从硬度的分布来看，日本耐磨钢的硬度变化较小，硬度分布较为均匀。国内 A 厂边部硬度最大，1/4 处和中心的误差大，硬度分布不均，在使用过程中导致钢的韧性和疲劳性能下降。而 B 厂的硬度分布情况最差，中心

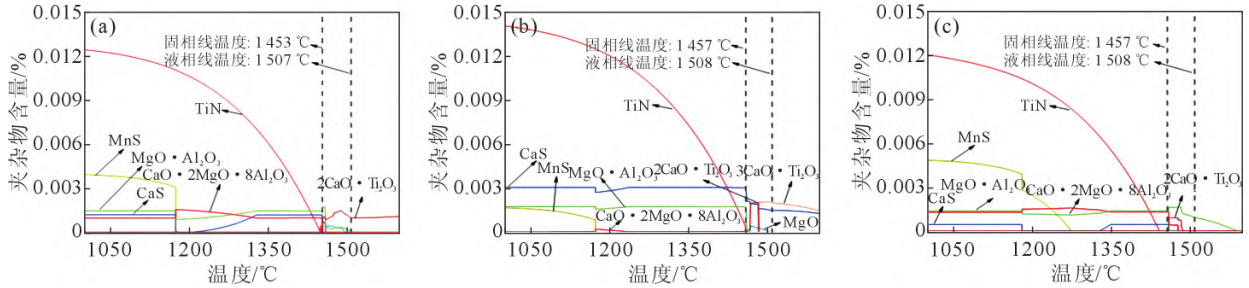


图 8　耐磨钢夹杂物凝固析出过程：(a) 日本，(b) A 厂，(c) B 厂

Fig.8　Solidification and precipitation process of inclusions in wear-resistant steel: (a) Japan, (b) factory A, (c) factory B

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

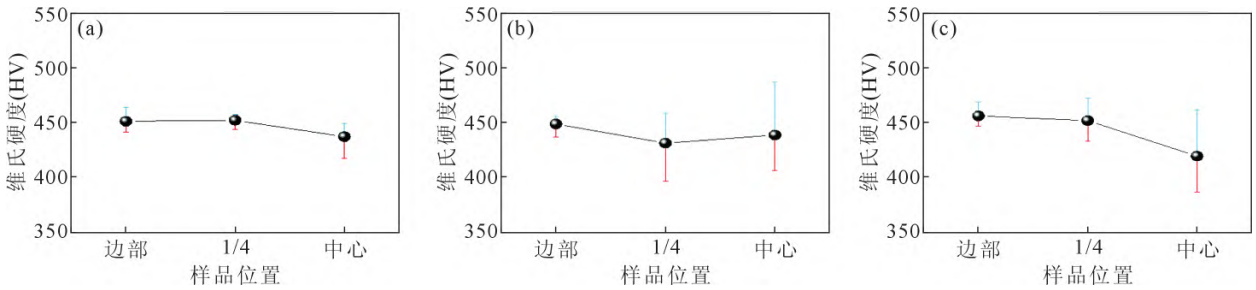


图 9 不同耐磨钢基体硬度：(a) 日本，(b) A 厂，(c) B 厂

Fig.9 Hardness of the matrix in wear-resistant steel: (a) Japan, (b) factory A, (c) factory B

硬度为 419.9 HV，远低于边部的 456.6 HV，并且随边部距离的增加，平均硬度逐渐降低，误差也越来越大，可能是由于热处理不当，回火温度过低，导致中心处的组织不均，从而使基体硬度分布不均匀[23]。

3 结论

(1)从耐磨钢的成分来看，国内 A 厂的耐磨钢中 Ca、Al 含量较日本高。A 厂通过 Ca 处理对钢中夹杂物进行变质，日本未进行 Ca 处理，对钢中元素及夹杂物的控制较好。而 B 厂未添加 Ca 元素，对夹杂物控制较差，导致大量 MnS 析出。3 厂均添加了 Ti 元素，产生大量的 TiN 夹杂。

(2)国内 A 厂与日本耐磨钢的夹杂物尺寸接近。A 厂由于 Ca 处理，导致钢中 MnS 析出量变少，夹杂物中 CaS、CaO 含量增加，夹杂物密度增加，洁净度变差。国内 B 厂耐磨钢中发现长条状 MnS，夹杂物平均尺寸较大。

(3)仅考虑硬度，日本耐磨钢平均硬度最大，边部与中心差别小，且分布均匀。国内 A 厂与 B 厂都存在中心硬度波动大，分布不均匀的情况。B 厂硬度分布最差，中心的平均硬度远低于边部。

参考文献：

[1] 唐春霞，曹文全. 耐磨钢的国内生产现状及发展前景[J]. 宽厚板，2018, 24(3): 37-41.
TANG C X, CAO W Q. Current production situation and development prospect of wear resistant steel at home[J]. Wide and Heavy Plate, 2018, 24(3): 37-41.

[2] 刘晓东. 高强韧低合金马氏体耐磨钢的研制[D]. 济南：山东大学，2016.
LIU X D. Development of low alloy martensite abrasion resistantsteel with high strength and toughness[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[3] 杨晓江，白敏，张大勇，等. 耐磨钢的研究现状[J]. 热加工工艺，2021, 50(21): 7-10.
YANG X J, BAI M, ZHANG D Y, et al. Research status of wear-resistant steel[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(21): 7-10.

[4] 李灿明. 淬火工艺对耐磨钢 NM400 组织性能的影响[J]. 金属热处理，2021, 46(6): 69-73.
LI C M. Effect of quenching on microstructure and properties of wear-resistant steel NM400[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (6): 69-73.

[5] SHI C B, LIU W J, LI J, et al. Effect of boron on the hot ductility of low-carbon Nb-Ti-microalloyed steel [J]. Materials Transactions, 2016, 57(5): 647-653.

[6] 王帅，胡锋，李德发，等. TiN 对高强度耐磨钢韧性的影响及其机制分析[J]. 中国冶金，2021, 31(7): 38-45.
WANG S, HU F, LI D F, et al. Effect of TiN on toughness of high-strength wear-resistant steel and its mechanism analysis [J]. China Metallurgy, 2021, 31(7): 38-45.

[7] 王亚琴，刘兴刚，刘红艳，等. 钛对双相耐磨钢力学性能的影响[J]. 材料与冶金学报，2020, 19(2): 119-126.
WANG Y Q, LIU X G, LIU H Y, et al. Effect of Ti on the microstructure and properties of dual-phase wear-resistant steel [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(2): 119-126.

[8] WANG H P, SUN L F, PENG B, et al. Inclusions for ultra-pure ferritic stainless steels containing 21% chromium[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2013, 20(10): 70-74.

[9] 王中洋. 微合金化超高强度钢力学性能和耐磨性能研究[D]. 郑州：郑州大学，2021.
WANG Z Y. Study on mechanical properties and wear resistance of microalloyed ultra-high strength steel [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

[10] 李德发. Ti 微合金化高强韧性马氏体耐磨钢开发及其应用性能研究[D]. 武汉：武汉科技大学，2020.
LI D F. Development of Ti microalloyed martensitic wear-resistant steel with high strength and toughness and study of its application performance[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.

[11] 刘兴刚，王学朋，牛建平，等. 精炼处理对低合金双相耐磨钢力学性能的影响[J]. 铸造，2013, 62(6): 483-487.
LIU X G, WANG X P, NIU J P, et al. Effect of refining treatment on mechanical properties of dual phase wear-resistant steel [J]. Foundry, 2013, 62(6): 483-487.

[12] SHEN P, ZHANG D, ZHANG H, et al. Study on the three-dimensional morphology of MnS inclusions in high sulphur steel [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(10): 1179-1186.

[13] 吴良平，孙晗，谢剑波，等. Y1Cr13 不锈钢轧材劈头开裂原因分析[J]. 钢铁钒钛，2021, 42(1): 176-183.
WU L P, SUN H, XIE J B, et al. Analysis on split-head cracking of Y1Cr13 stainless rolled bar[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(1): 176-183.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[14] 李德发，吴开明，官计生，等. 夹杂物属性对 NM500 耐磨钢腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理，2019, 44(11): 81-84.
LI D F, WU K M, GUAN J S, et al. Effect of inclusion types on corrosion resistance of NM500 wear-resistant steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(11): 81-84.

[15] 种晓宇，汪广驰，蒋业华，等. 耐磨钢铁材料中强化相设计与性质计算研究进展[J]. 中国材料进展，2019, 38(12): 1145-1158.
CHONG X Y, WANG G C, JIANG Y H, et al. Research progress in design and property calculation of strengthening phases in wear-resistant steels materials[J]. Materials China, 2019, 38(12): 1145-1158.

[16] 刘慧. 高强耐磨钢组织及夹杂物的演变研究[D]. 马鞍山：安徽工业大学，2018.
LIU H. Study on microstructure and inclusion evolution of high strength steel[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2018.

[17] SHEN P, FU J X. Morphology study on inclusion modifications using Mg-Ca treatment in resulfurized special steel[J]. Materials, 2019, 12(2): 197.

[18] 杨光，杨文，张立峰. 铝镇静钢中夹杂物钙处理改性及其影响因素[J]. 钢铁，2022, 57(12): 66-78.
YANG G, YANG W, ZHANG L F. Calcium treatment modification and influencing factors of inclusions in aluminum-killed steel [J]. Iron & Steel, 2022, 57(12): 66-78.

[19] 方宇荣. 钙处理工艺对 20CrMnTiH 齿轮钢夹杂物的影响研究[J]. 福建冶金，2022, 51(1): 15-21.
FANG Y R. Effect of calcium treatment process on inclusions in 20CrMnTiH gear steel[J]. Fujian Metallurgy, 2022, 51(1): 15-21.

[20] CAO C W, WANG G F, LI J, et al. Comparative analysis of the effect of Ca and Mg-Al modification on the composite inclusions in S50C die steel[J]. Metallurgical Research & Technology, 2021, 118(5): 512.

[21] 季莎，张立峰，罗艳，等. 钙处理对 20CrMnTiH 齿轮钢中非金属夹杂物的影响[J]. 工程科学学报，2021, 43(6): 825-834.
JI S, ZHANG L F, LUO Y, et al. Effect of calcium treatment on nonmetallic inclusions in 20CrMnTiH gear steel [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 825-834.

[22] 范治博，牛建平，黄中东. 洁净钢生产技术的国内外现状和发展[J]. 热加工工艺，2011, 40(8): 47-51.
FAN Z B, NIU J P, HUANG Z D. Situation and development of production technology for clean steel in china and abroad[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(8): 47-51.

[23] 李晓霞，胡水平，武会宾. 热处理工艺对 HB400 耐磨钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺，2009, 38(2): 116-117, 136.
LI X X, HU S P, WU H B. Influence of heat treatment process on microstructure and properties of HB400 wear resistant steel[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(2): 116-117, 136.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net