

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3318

液压支架缸筒材料的耐蚀性研究

杨佳伟¹, 田雷¹, 杨磊¹, 李小琳¹, 兰志宇², 王海丰¹, 邓想涛³

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西西安 710072; 2. 郑州煤矿机械集团股份有限公司, 河南 郑州 450000; 3. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 随着煤炭综采技术的发展, 对高耐蚀性材料的开发提出了迫切要求。为了明晰影响缸筒材料耐蚀性的主要因素, 采用电化学腐蚀方法研究了液压支架缸筒材料 A 和材料 B 的耐蚀性能, 结合合金成分、夹杂物组成、微观组织和腐蚀后形貌, 分析了影响材料 B 耐蚀性能的关键因素。结果表明, 材料 A 的电化学性能优于材料 B, 电化学腐蚀后材料 B 表面出现了大量的“麻点”, 是点蚀形成的主要位置。且材料 B 中 C、Cr、Nb 等元素的添加起到了固溶强化和细晶强化的作用, 共同提高了材料 B 的力学性能, 冶炼过程中引入的 Ca、S 等元素在基体中形成了高密度的 CaS-Aloxide-MnS 复合夹杂, 恶化了材料的耐蚀性能。

关键词: 缸筒材料; 微观组织; 夹杂物; 电化学腐蚀

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)04-0342-07

Research on the Corrosion Resistance of Hydraulic Bracket Cylinder Barrel Materials

YANG Jiawei¹, TIAN Lei¹, YANG Lei¹, LI Xiaolin¹, LAN Zhiyu², WANG Haifeng¹, DENG Xiangtao³

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Zhengzhou Coal Mine Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: With the development of comprehensive coal mining technology, the development and research of high corrosion-resistance materials are urgently needed. To clarify the main factors affecting the corrosion resistance of cylinder barrel materials, an electrochemical corrosion method was used to study the corrosion resistance of hydraulic bracket cylinder barrel material A and B, combined with the alloy composition, inclusion composition, microstructure and postcorrosion morphology to analyse the key factors affecting the corrosion resistance of material B. The results show that the electrochemical performance of material A is better than that of domestic material B, and a large number of “pockmarks” appear on the surface of material B after electrochemical corrosion. The mechanical properties of the material are improved as a result of the addition of C, Cr and Nb in material B together with grain refinement. However, high-density CaS-Aloxide-MnS composite inclusions are formed in the matrix due to the introduction of Ca and S during the smelting process, which deteriorates the corrosion resistance of the material.

Key words: cylinder barrel materials; microstructure; inclusions; electrochemical corrosion

我国是目前世界上最大的发展中国家, 能源需求较大。在众多能源类型中, 煤炭一直是基本能源, 也是重要的工业生产原材料之一^[1-3]。我国的大

部分煤矿开采都是采用井下开采模式, 液压支架是综采工作面的重要组成设备, 主要用于承担回采工作面的巨大载荷, 保障采煤设备与采矿人员的安全,

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3705300); 国家自然科学基金(52374403, U23A20613, 52004224); 凝固技术国家重点实验室自主课题(2021-TS-10); 西北工业大学测试中心基础研究开放测试基金(2022T009)

作者简介: 杨佳伟, 2001 年生, 硕士生。研究方向为钢铁材料的强塑性与耐蚀性匹配研究。Email: 2019301036@nwpu.edu.cn

通讯作者: 李小琳, 1990 年生, 博士, 副教授。研究方向为极端复杂服役工况下金属材料设计及其损伤失效机理研究。

Email: xiaolinli@nwpu.edu.cn

兰志宇, 1987 年生, 硕士, 高级工程师。主要从事高强钢焊接工艺和自动化焊接技术研究方面的工作。

Email: lanzhiyu2000@163.com

引用格式: 杨佳伟, 田雷, 杨磊, 等. 液压支架缸筒材料的耐蚀性研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 342-348.

YANG J W, TIAN L, YANG L, et al. Research on the corrosion resistance of hydraulic bracket cylinder barrel materials[J].

Foundry Technology, 2024, 45(4): 342-348.

在煤矿井下综合机械化采煤过程中发挥了不可替代的作用^[4-5]。

煤矿井下环境恶劣,采煤工作面和巷道相对湿度大,液压支架油缸长期处于潮湿、易腐蚀环境中,根据支架的维修统计分析发现,油缸在维修过程中镀层的损坏占比较大,尽管已经采用镀双铬、镀铜+铬工艺对材料进行保护,但仍不能满足所有用户的要求^[6-7]。目前,德国DBT公司研发的DBT系列缸筒材料在井下采矿作业时表现出良好的耐腐蚀性能,而国内所用的30CrMnSi、30CrMo等缸筒材料在井下服役后表面出现严重的点蚀现象^[8-9],这与矿井环境中Cl⁻和SO₄²⁻离子对材料的侵蚀及材料组织状态等相关。近年来,郑州煤矿机械研发的高强度、高耐蚀性油缸新材料B的强度、塑性、韧性可以满足大工作阻力立柱使用要求^[10],耐腐蚀性较现有缸筒材料有极大改善,接近进口立柱缸筒^[11];焊接适应性满足工艺要求,可加工性优良,符合超高端支架高可靠性立柱的要求,但在检测时发现油缸缸筒内孔出现麻坑、点蚀现象,极大地降低了生产效率,也存在严重的工业安全隐患^[12-13]。因此,为改善现有缸筒材料的耐蚀性能,亟需对国内外材料的耐蚀机理进行研究。

1 实验材料与方法

实验材料为商用材料A和材料B,相应的化学成分如表1所示。使用型号为D8DISCOVER A25的X射线衍射仪进行物相鉴定,经体积分数为3%的苦味酸溶液腐蚀后在日本奥林巴斯公司生产的型号为BX53金相显微镜下获得试样的初始微观组织。利用Struers电解抛光仪去除材料表面的应力层,电解抛光液为12.5%高氯酸(体积分数),腐蚀电压、电流和时间分别为30 V、1.20 mA、30 s。使用FEI金属全自动夹杂物分析系统进行夹杂物分析,将狗骨试样打磨至400#后,采用GB/T 228.1在型号为CMT5105带有激光引伸计的微机控制电子万能试验机上进

行拉伸性能测试。切取 $\phi 15\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的试样打磨至2 000#后进行超声清洗除去表面的油污,使用型号为IVIUM.C.EIS的艾维电化学三电极体系电化学工作站获得不同材料的动电位极化曲线(开始电位区间-0.3 V vs,扫描速率0.333 mV/s),其中腐蚀液为商用5%福斯乳化液(体积分数)+人工硬水,电极支撑体为工作电极(有效工作面积为1 cm²),Ag/AgCl电极为参比电极,铂片电极为对电极,每组实验至少两个平行实验以保证数据的准确性。电化学腐蚀后的微观形貌使用配有EDS的美国FEI生产的型号为FEI Helios G4 CX扫描电镜进行分析,加速电压15 kV,电流1.4 nA。

2 实验结果及讨论

2.1 材料A与材料B的力学性能与电化学性能

试样的力学性能如表2所示,材料B的综合性能优于材料A,伸长率在相同水平下(~20%),屈服强度提升了~200 MPa。材料强度的提升可主要归因于固溶强化、细晶强化和析出强化等,材料B中C、Cr、Nb元素的含量显著高于材料A,Cr的加入一方面起到固溶强化的作用,又可与C元素形成M₂₃C₆析出相^[14-15],同时Nb也易与C形成NbC起到析出强化的作用。同时根据后文的晶界分析可知,材料B的晶粒尺寸远小于材料A,根据公式(1)可知晶粒细化有利于强度的提升,也增加了裂纹传播的路径,提高了材料的韧性。

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

式中, σ 为材料的屈服强度; σ_0 为与材料本身相关的常数; k 为Hall-Petch系数; d 为晶粒的尺寸。

图1为试样的动极化曲线,动极化曲线描述了腐蚀原电池反应的推动力电位与反应速度电流之间的函数关系,分析发现两种材料都出现了明显的钝化现象。对于能发生钝化的材料,主要关注材料的点蚀电位、自腐蚀电位或开路电位和受阳极控制的极化

表 1 材料 A 与材料 B 的化学成分
Tab.1 Chemical composition of material A and material B

Materials	Element										
	C	Cr	Mo	Ni	Nb	Mn	V	N	S	P	Ca
A	0.127	0.44	0.39	1.24	0.002	1.30	0.086	0.013 3	0.001 5	0.006	0.000 3
B	0.172	0.71	0.46	1.23	0.020	0.98	0.036	0.004 0	0.002 6	0.012	0.001 2

表 2 材料 A 与材料 B 力学性能对比
Tab.2 Mechanical properties of foreign material A and domestic material B

Materials	Hardness(HV)	YS/MPa	TS/MPa	Elongation/%	Impact energy(-20 °C KV2)
A	240	649	733	22	204
B	297	855	905	20	195

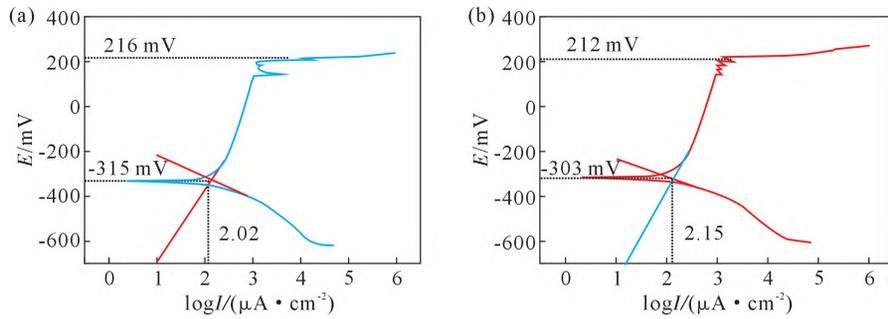


图1 材料A与材料B的动极化曲线及相应的电化学参数:(a)材料A;(b)材料B

Fig.1 Dynamic polarization curves and corresponding electrochemical parameters of foreign material A with domestic material B: (a) material A; (b) material B

电流密度,相应的拟合参数已在图1中表示,材料A的点蚀电位和自腐蚀电位高于材料B,极化电流密度小于材料B,因此材料A的电化学性能优于材料B。

2.2 材料A和材料B的电化学腐蚀形貌

试样在乳化液中电化学腐蚀后的形貌如图2所示,从宏观形貌分析,材料并未发生全面腐蚀,只能在表面观察到明显的点蚀坑,材料A和材料B的点蚀坑数量分别为1、5。从微观形貌分析,材料A的基体中除较大的点蚀坑外并未发生腐蚀,而材料B中则分布着如图2e红框所示的细小“麻点”^[16],几乎占据了整个表面,这是两者电化学性能差异的主要来源。对点蚀区域放大分析发现材料表面的钝化膜破裂,新鲜金属裸露在表面,会加速腐蚀介质对内部材料的侵蚀,同时材料B点蚀区域的钝化膜不连续,腐蚀产物表面出现明显的裂纹,恶化了材料的耐腐蚀性能。

图3为选取的材料A点蚀坑及材料B“麻点”的

EDS能谱分析。材料A点蚀区域主要出现了C的富集,在材料B点蚀区域出现了Ca、S、Al、Si、O等元素的富集,Ca与S元素并非材料的设计成分,而是在冶炼过程中引入的杂质元素,容易在基体中结合Mn、Al、O等元素,形成不同类型的夹杂物,而夹杂物常是点蚀现象发生的根源,夹杂物的尺寸、大小、类型等都会影响腐蚀的速率,后续将通过夹杂物的鉴定进行分析。

2.3 材料A和材料B的耐蚀机理分析

低合金钢的耐腐蚀性能与材料的组织状态息息相关^[17-18]。试样的XRD图谱和相应的OM图像如图4所示,两种材料均由BCC单相组成。材料A的基体组织由板条马氏体和少量的铁素体组成,铁素体在图4c中呈现黑色,主要分布在原奥晶界。材料B的基体组织几乎全部被马氏体板条所覆盖,对比两种组织形态材料B的晶界“笔直”,材料A的晶界“弯曲”,故由此推测材料A在热处理过程中可能经过较长时间退火,而材料B可能为淬火状态或经短时间

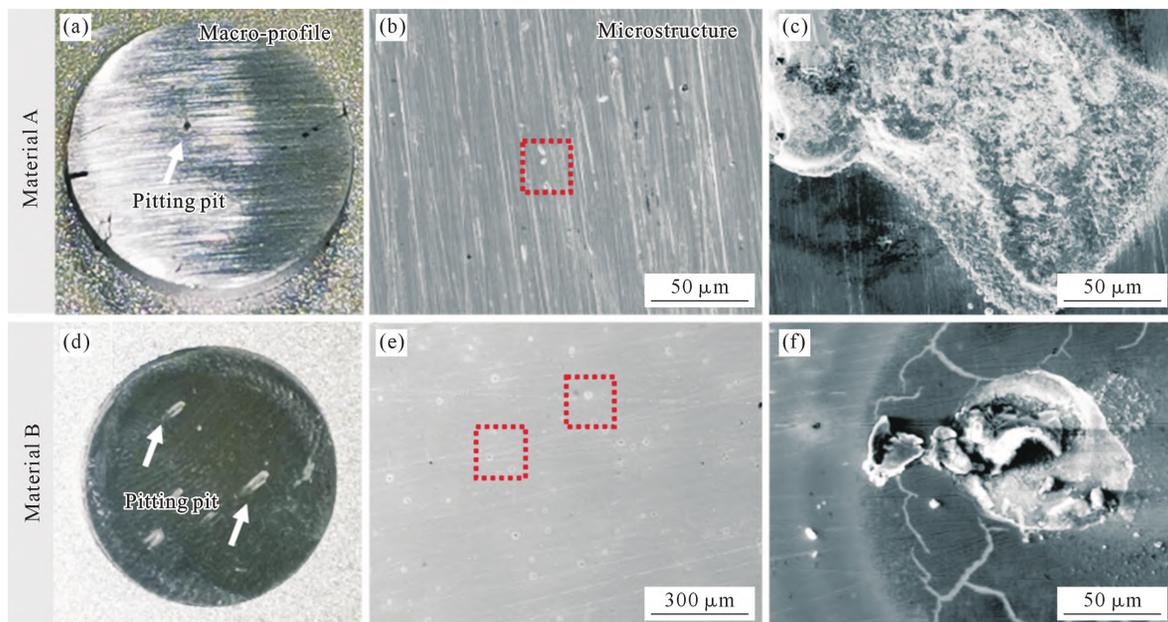


图2 材料A与材料B的电化学腐蚀后的宏观与微观形貌:(a, d)宏观形貌;(b, c, e, f)微观形貌

Fig.2 Macroscopic and microscopic morphologies after electrochemical corrosion: (a, d) macroscopic morphology; (b, c, e, f) microscopic morphology

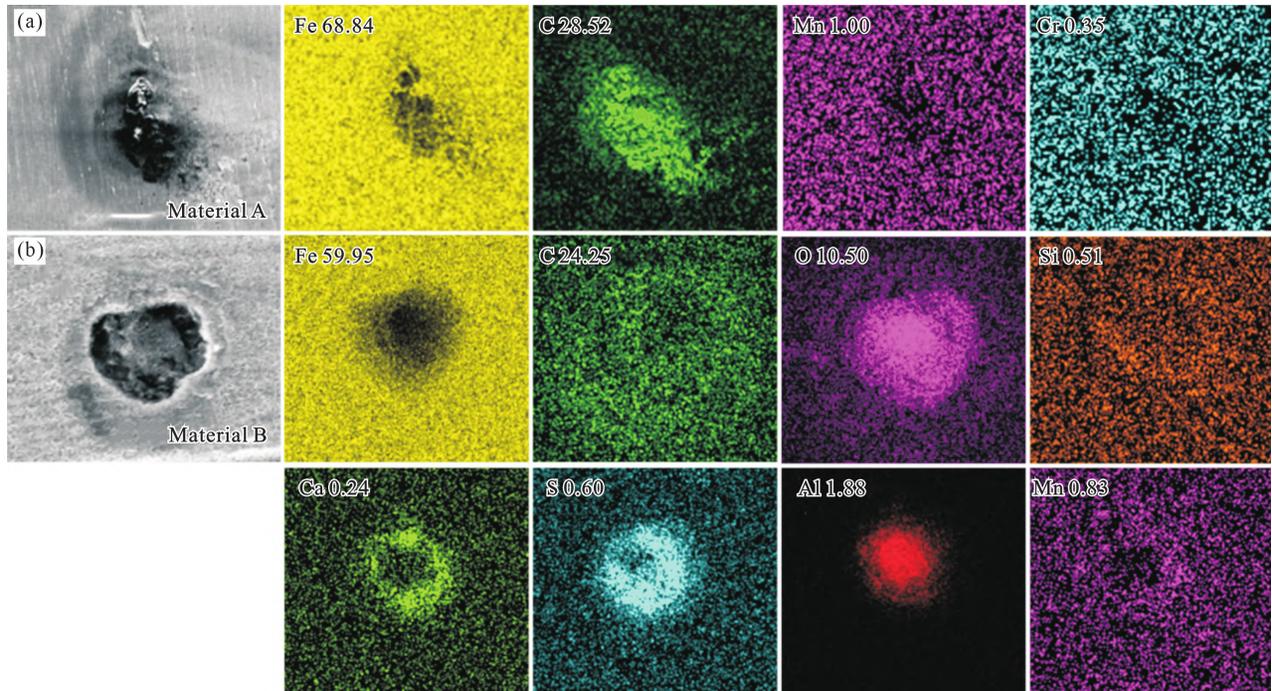


图3 夹杂物EDS能谱分析:(a)材料A;(b)材料B

Fig.3 EDS spectrum analysis of inclusions in foreign material A and domestic material B: (a) material A; (b) material B

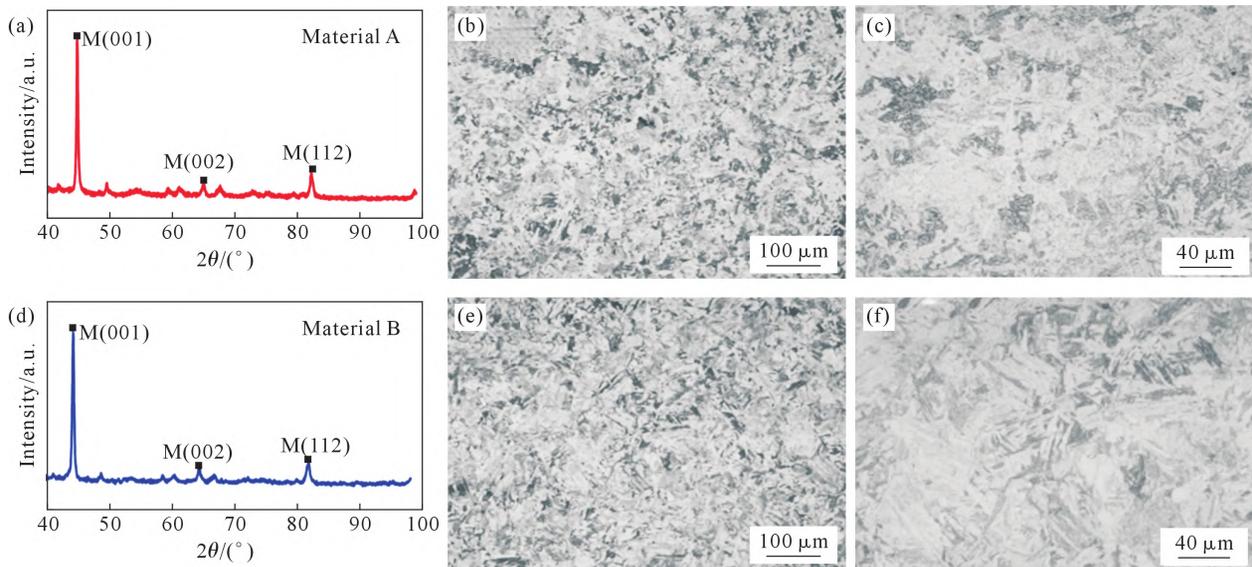


图4 材料A与材料B的XRD图谱与OM图像:(a)材料A的XRD图谱;(b,c)材料A的OM图像;(d)材料B的XRD图谱;(e,f)材料B的OM图像

Fig.4 XRD patterns and OM images of material A and material B: (a) XRD pattern of material A; (b, c) OM images of material A; (d) XRD pattern of material B; (e, f) OM images of material B

退火状态。

试样的EBSD表征结果如图5所示,根据BC图和IPF图,材料B的晶粒尺寸远小于材料A,马氏体板条宽度更加细密,晶界统计显示HAGB含量(68.4%)高于材料A(54.6%),HAGB含量的增加有助于增加裂纹扩展的途径,提升材料的力学性能,但同时晶界常常是腐蚀环节中的“薄弱区域”,晶界越多,整体腐蚀的速度越快。KAM描述的是组织内部的应力或应变的分布,颜色越绿代表应力或应变水平越高,图5c和f分别是材料A与材料B的KAM图,图5c₁和f₁

为相对应的KAM统计曲线,可以发现材料B组织内部的应变水平较高,且存在着严重的不均匀性。这种组织不均匀性可能是缸筒材料在焊接过程中产生的,导致构件中存在残余应力,当在实际工作在缸筒材料既受到腐蚀介质的影响,又受到外加应力的作用,很容易产生应力腐蚀。

钢铁材料中及杂物不仅会影响材料的质量、洁净度也会影响材料的耐蚀性^[19-20]。材料A与材料B的夹杂物种类、尺寸及数量分布分别如表3和图6所示,材料中夹杂物可以分为4类:金属间化合物夹杂、氧

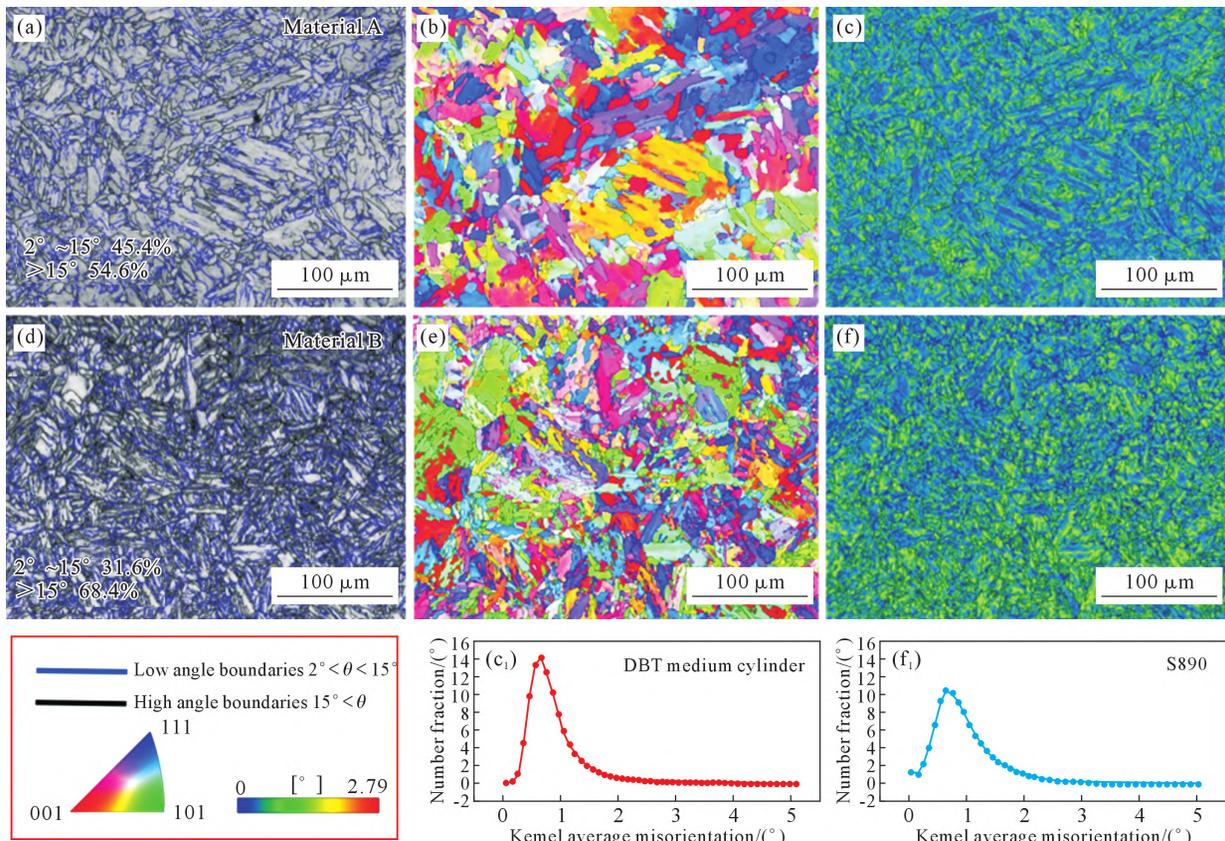


图5 材料A与材料B的EBSD表征:(a, d) BC图;(b, e) IPF图;(c, f) KAM图;(c1, f1) KAM分布图
Fig.5 EBSD characterization of material A and material B: (a, d) BC plots; (b, e) IPF plots; (c, f) KAM plots; (c1, f1) KAM distributions

表3 材料A与材料B的夹杂物类型及尺寸
Tab.3 Inclusion types and sizes of material A and material B

Material A	Number	Size/ μm	Material B	Number	Size/ μm
Al-Mg	162	2.5	CaS-oxide	30	5.5
CaS	20	2.7	CaS-oxide-MnS	63	2.2
CaS-oxide	306	3.0	CaS-Aloxiide-MnS	916	2.5
CaS oxide-MnS	60	2.9	CaS-MnS	56	2.2
Oxides	20	18.4	Oxides	43	4.1
Ti-Al	10	2.1	Mn-S	74	3.4

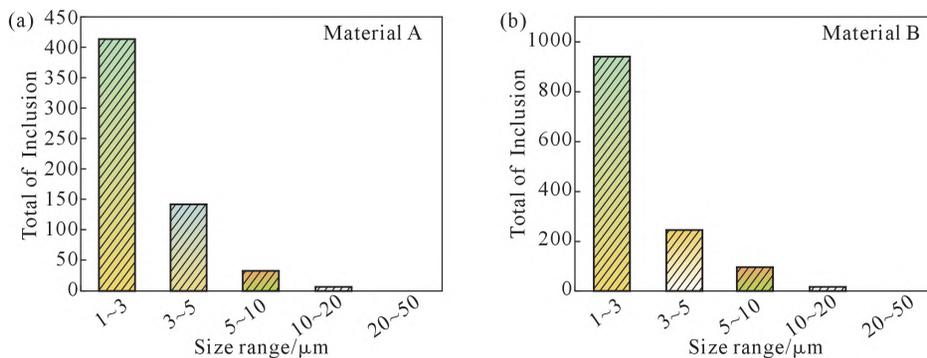


图6 夹杂物数量与尺寸分布:(a) 材料A;(b) 材料B
Fig.6 Quantity and size distribution of inclusions in foreign material A and domestic material B: (a) material A; (b) material B

化物夹杂、硫化物夹杂和硫化物-氧化物复合夹杂。不同夹杂物的腐蚀机理不同,对材料的影响也不同,氧化物夹杂具有较高的电位,与基体接触部分易形成高-低电位差造成腐蚀,当氧化物消耗完时

腐蚀现象结束^[21]。而硫化物夹杂主要是和腐蚀介质中的Cl作用促进Fe的水解使得材料局部酸化,溶解表面产生的氧化膜,不断的使正常部位发生电化学腐蚀^[22],故由大尺寸硫化物引起的腐蚀现象更加严重。

将夹杂物在空间中的形貌等效为球体,按照公式(2)计算相同区域内硫化物和氧化物复合夹杂的面积:

$$S=S_A+S_B+S_C\cdots \quad (2)$$

式中, S_A 、 S_B 、 S_C 分别表示不同氧化物-硫化物夹杂物的面积。

所得到的结果如下所示:

Material A:

$$S=20\times\pi(2.7/2)^2+306\times\pi(3.0/2)^2+50\times\pi(2.9/2)^2=2606.3$$

Material B:

$$S=30\times\pi(5.5/2)^2+63\times\pi(2.2/2)^2+916\times\pi(2.5/2)^2+56\times\pi(2.2/2)^2=5445.0$$

可见材料B中夹杂物的密度更高,CaS-Al-oxide-MnS复合夹杂的数量约占总夹杂物的78%,结合表1发现材料B中的Ca含量约是材料A的4倍,Ca元素在钢铁冶炼过程中主要是作为脱氧剂加入,在后期处理不当残留在基体内与O、S等元素结合形成复合夹杂物,极大的恶化了材料的耐蚀性能^[23-24]。同时材料B中N元素的含量低于材料A,N能够加强沉淀强化效果,N与Ti、Nb和V等元素有很强的亲和力,可以形成极其稳定的间隙相,氮化物也可以与碳化物相互溶解形成细小的析出相,产生弥散强化的作用,提高材料的强度。其次N是很强的形成和稳定奥氏体的元素,N与其他元素形成的析出相如AlN、TiN、VN等不仅可作为强化相^[25],还能有效抑制奥氏体晶界的迁移,细化奥氏体晶粒,既起到强化的作用,又起到韧化的作用,同时N元素的提升可以降低钝化区的击穿电位。因此在钢铁冶炼中应该综合考虑N元素的添加,同时应该提高冶炼的纯度,降低S、P等杂质元素的含量。

3 结论

(1)材料B的综合力学性能优于材料A,材料A的电化学耐蚀性能优于材料B。电化学腐蚀后材料主要发生点蚀,材料B表面弥散分布着大量的点蚀坑。

(2)材料B的晶粒尺寸细小和高密度的硫化物-氧化物复合夹杂是降低耐蚀性能的主要因素,可通过改善热处理工艺和控制冶炼的纯度,降低S、P等杂质元素的引入,改善冶炼过程中的脱氧流程,降低合金中含钙硫化物-氧化物复合夹杂的数量密度等提高材料的耐蚀性能。

参考文献:

- [1] 朱吉茂,孙宝东,张军,等.“双碳”目标下我国煤炭资源开发布局研究[J].中国煤炭,2023,49(1):44-50.
ZHU J M, SUN B D, ZHANG J, et al. Research on China's coal re-

- sources development layout under the goals of carbon neutrality[J]. China Coal, 2023, 49(1): 44-50.
- [2] 麻衡,徐凯,孙乾.我国煤机液压支架用高强钢的生产现状与发展趋势[J].轧钢,2020,37(6):71-76.
MA H, XU K, SUN Q. Production status and development trend of high strength steel for coal machine hydraulic support in China[J]. Steel Rolling, 2020, 37(6): 71-76.
- [3] 魏金丽.煤炭系统钢材需求预测[J].轧钢,1992,2:50-51.
WEI J L. Coal system steel demand forecasts[J]. Steel Rolling, 1992, 02: 50-51.
- [4] 谢恒立.冲击载荷下双伸缩立柱应力显现特征及缸筒腐蚀特性研究[D].焦作:河南理工大学,2023.
XIE H L. Study on stress behavior and cylinder corrosion characteristics of double expansion column under impact load[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [5] 姜珊,高秀华,王凡,等.矿用液压支架用耐蚀钢的研发[J].轧钢,2023,40(4):15-23.
JIANG S, GAO X H, WANG F, et al. Research and development of corrosion resistant steel for mine hydraulic support[J]. Steel Rolling, 2023, 40(4): 15-23.
- [6] KESHAVAMURTHY R, MADHUSUDHAN J, KUMAR A, et al. Wear behaviour of hard chrome and tungsten carbide-HVOF coatings[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(11): 24587-24594.
- [7] PICAS J A, FORN A, MATTHÄUS G. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves[J]. Wear, 2006, 261(5-6): 477-484.
- [8] 程相榜,孟贺超,张自强.液压支架油缸内表面的腐蚀原因[J].腐蚀与防护,2017,38(5):407-409.
CHENG X B, MENG H C, ZHANG Z Q. Internal surface corrosion reason for hydraulic cylinder of a hydraulic powered roof support[J]. Corrosion & Protection, 2017, 38(5): 407-409.
- [9] 刘洋.QPQ工艺在液压缸活塞杆材料处理中的研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2018.
LIU Y. Research on QPQ process in material processing of hydraulic cylinder piston rod[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2018.
- [10] 赵洁瑛,闵永安,吴晓春,等.不同热处理工艺对S890高强钢强韧性的影响[J].材料热处理学报,2015,36(5):129-134.
ZHANG J F, MIN Y A, WU X C, et al. Effect of heat treatment on strength and toughness of S890 high strength steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(5): 129-134.
- [11] 杨涤心,孙远方.S890低合金高强度结构钢焊接性能的研究[J].热加工工艺,2010,39(17):180-182.
YANG D X, SUN Y F. Study on weldability of S890 low alloy high-strength steel[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(17): 180-182.
- [12] 王炉,秦世斌,程相榜,等.液压油缸用高强度高耐蚀材料的工艺研究[J].热加工工艺,2023,52(16):133-138.
WANG L, QIN S B, CHENG X B, et al. Research on application of high strength and high corrosion resistant materials in hydraulic cylinders[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(16): 133-138.
- [13] 原长锁,孙红发,宋晓冰.8.8m液压支架高强度材料匹配性应用研究[J].煤炭技术,2020,39(6):137-140.
YUAN C S, SUN H F, SONG X B. Research on matching applica-

- tion of 8.8m hydraulic support high strength material [J]. *Coal Technology*, 2020, 39(6): 137-140.
- [14] 王丹, 钟庆东. Cr和Ni对低碳合金钢微观结构和耐蚀性的影响 [J]. *材料保护*, 2023, 56(6): 63-74.
WANG D, ZHONG Q D. Effect of Cr and Ni on the microstructure and corrosion resistance of low carbon alloy steel [J]. *Materials Protection*, 2023, 56(6): 63-74.
- [15] 李小琳, 赵利媛, 李雅婷, 等. 回火温度对FCC高熵合金 $Fe_{49.5}Mn_{29.7}Co_{9.9}Cr_{9.9}C_1$ 显微组织和力学性能的影响 [J]. *铸造技术*, 2022, 43(10): 875-881.
LI X L, ZHAO L Y, LI Y T, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and mechanical properties of FCC high-entropy alloy $Fe_{49.5}Mn_{29.7}Co_{9.9}Cr_{9.9}C_1$ [J]. *Foundry Technology*, 2022, 43(10): 875-881.
- [16] 高博, 严江波, 王斌, 等. 球墨铸铁缸盖黑斑产生的原因与消除 [J]. *铸造技术*, 2021, 42(11): 958-960.
GAO B, YAN J B, WANG B, et al. Causes and elimination of black spots defects on the surface of nodular cast iron cylinder head [J]. *Foundry Technology*, 2021, 42(11): 958-960.
- [17] LIU R, SUN H L, JIANG X S, et al. Study of microstructure and corrosion resistance of FeCrAl-Gd alloys [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 297: 127384.
- [18] 张放, 刘艳芬, 李继林, 等. 固溶温度对6181A铝合金板材显微组织和性能的影响 [J]. *铸造技术*, 2017, 38(5): 1042-1046.
ZHANG F, LIU Y F, LI J L, et al. Effect of solution treatment temperature on microstructure and properties of 6181A aluminum alloy [J]. *Foundry Technology*, 2017, 38(5): 1042-1046.
- [19] 杨轶轩, 阳晋, 张威, 等. 夹杂物对Q235钢耐腐蚀行为的影响 [J]. *工程科学学报*, 2020, 42(S1): 27-33.
YANG Y X, YANG J, ZHANG W, et al. Effect of inclusions on corrosion resistance of carbon steel [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(S1): 27-33.
- [20] AVCI R, DAVIS B H, WOLFENDEN M L, et al. Mechanism of MnS-mediated pit initiation and propagation in carbon steel in an anaerobic sulfidogenic media [J]. *Corrosion Science*, 2013, 76: 267-274.
- [21] LIU C, REYNIER R I, ZHANG D W, et al. Role of Al_2O_3 inclusions on the localized corrosion of Q460NH weathering steel in marine environment [J]. *Corrosion Science*, 2018, 138: 96-104.
- [22] RAY G P, JARMAN R A, THOMAS J G N. The influence of non-metallic inclusions on the corrosion fatigue of mild steel [J]. *Corrosion Science*, 1985, 25(3): 171-184.
- [23] 李斌, 朱航宇, 郑志豪, 等. 脱氧方式对高铝钢中非金属夹杂物的影响 [J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(11): 1240-1249.
LI B, ZHU H Y, ZHENG Z H, et al. Effect of deoxidation methods on non-metallic inclusions in high-Al steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(11): 1240-1249.
- [24] 郑万, 付学好, 瞿勇, 等. Al-Mg/Ti-Mg脱氧钢中夹杂物诱发点蚀行为研究 [J]. *武汉科技大学学报*, 2017, 40(2): 81-87.
ZHENG W, FU X H, QU Y, et al. Inclusion-induced pitting corrosion behaviors in Al-Mg/Ti-Mg deoxidized steel [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2017, 40(2): 81-87.
- [25] 王云龙, 张雄, 余伟, 等. V(C, N)在V-N微合金非调质钢奥氏体中的析出动力学 [J]. *上海金属*, 2023, 45(4): 10-17.
WANG Y L, ZHANG X, YU W, et al. Precipitation kinetics of V(C, N) in austenite of V-N microalloyed non-quenched and tempered steel [J]. *Shanghai Metals*, 2023, 45(4): 10-17.