

55SiCrA 弹簧钢线材夹杂物与组织研究

王 宁, 彭红兵*, 唐 尧, 谢 震, 陈 凯

(江苏科技大学冶金与材料工程学院, 江苏 张家港 215600)

摘 要: 利用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM-EDS) 以及 Factsage 热力学软件对国内外弹簧用线材夹杂物与组织进行了研究。结果表明: 国内外 3 家钢厂弹簧钢线材在显微组织、中心偏析、脱碳层厚度、晶粒度等方面相差不大; 国内 Y 厂弹簧钢线材中发现有 1 级 D 类夹杂物以及 1.5 级 Ds 类夹杂, 而国外 H 厂和国内 B 厂相对较好, 均未出现 Ds 类夹杂物。国外 H 厂弹簧钢夹杂物数量最少, 尺寸最小, 最大尺寸仅 $3.4\ \mu\text{m}$ 且可变形比例近 100%; 然而国内弹簧钢线材夹杂物数量多、尺寸大且不可变形。国内 Y 厂线材夹杂物平均 Al_2O_3 、 MgO 含量较高, 国内 B 厂发现有纯 Al_2O_3 夹杂物。此外, 国内钢厂需进一步合理控制钢水、精炼渣成分以及提高耐材质量并合理选用耐火材料, 来强化夹杂物的改性和脱除。

关键词: 弹簧钢; 线材; 显微组织; 夹杂物

中图分类号: TF76, TG335.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)01-0144-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.01.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者
聊科研

Study on inclusions and microstructure of 55SiCrA spring steel wire rod

Wang Ning, Peng Hongbing*, Tang Yao, Xie Zhen, Chen Kai

(School of Metallurgical and Materials Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, Jiangsu, China)

Abstract: Inclusions and microstructure of 55SiCrA spring steel wire rod were studied by means of OM, SEM-EDS and Factsage software. The results show that the microstructure, central segregation, thickness of decarburized layer and grain size of spring steel wire rod in the three plants at home and abroad are almost the same. Moreover, the level 1 D-type inclusions and the level 1.5 Ds-type inclusions are found in domestic steel Y (DSY), however, no Ds-type inclusions are found in foreign steel H (FSH) and domestic steel B (DSB). The number of inclusions in spring steel of FSH is the least and their size is the smallest, the maximum size is only $3.4\ \mu\text{m}$, and the deformable ratio is nearly 100%; however, the inclusions in spring steel wire rod of DSY and DSB are large in number and size, and are not deformable. The average contents of Al_2O_3 and MgO are higher in inclusions of DSY, and pure Al_2O_3 inclusions are found in the wire rod of DSB. In addition, for domestic steel mills it is necessary to further control the composition of molten steel and refined slag, improve the quality of refractory materials and select refractory materials reasonably to enhance the modification and removal of inclusions.

Key words: spring steel, wire rod, microstructure, inclusion

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51704127); 江苏高校“青蓝工程”资助; 江苏省本科生创新训练项目 (126190049); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20200997); 江苏省高等学校自然科学研究资助项目 (17KJD460003)。

作者简介: 王宁 (1998—), 男, 江苏徐州人, 本科生, 研究方向: 弹簧钢质量控制, E-mail: 448393356@qq.com; * 通讯作者: 彭红兵 (1989—), 男, 江苏沭阳人, 博士, 副教授, 主要从事高品质钢品种开发与质量控制, E-mail: phbing1021@126.com。

0 引言

弹簧钢在汽车、航空航天以及工程机械等领域发挥着不可替代的作用^[1-2], 作为装备制造业的关键零部件, 在服役过程中需要承受复杂的交变应力, 因此对其性能要求十分严苛。疲劳破坏是导致弹簧零部件失效的主要原因^[3-5]。国外对气门簧的疲劳寿命要求达 5×10^7 次, 实际失效率小于百万分之一, 而我国二汽要求国产气门簧的疲劳寿命为 2.5×10^7 次, 但实际失效率却高达百万分之二十三^[6-7]。

与国外弹簧钢线材相比, 国产弹簧钢线材的质量还存在一定差距, 国内汽车用户所使用的高档弹簧钢线材主要依赖进口^[7], 为此急需提高国产弹簧钢线材质量。为明晰国产弹簧钢线材与国外的质量差异, 笔者选取了国产及国外共 3 家钢厂生产的 55SiCrA 线材进行夹杂物与组织研究, 为提高国产 55SiCrA 线材质量提供一定的参考。

1 试验材料与方法

试验用 55SiCrA 弹簧钢线材成品由国内外不同钢厂提供, 分别为国外 H 厂 (FSH), 规格为 $\phi 7$ mm,

国内 Y 厂 (DSY), 规格 $\phi 12$ mm, 国内 B 厂 (DSB), 规格为 $\phi 15$ mm。利用光学显微镜 (OM)、配有能谱的扫描电子显微镜 (SEM-EDS), 对各厂线材的显微组织、中心偏析、脱碳层的厚度、夹杂物的级别、数量、形貌以及成分等方面进行了详细的检测, 另外, 借助 Factsage 软件计算了国内、外线材夹杂物在相图中的分布情况。

2 试验结果

2.1 夹杂物评级与显微组织

对所选 3 个厂弹簧钢线材组织、夹杂物级别等方面进行了分析, 结果如图 1 和表 1 所示, 可以看出, 3 家钢厂线材显微组织均为索氏体 (S)+珠光体 (P)+铁素体 (F)。3 家钢厂 55SiCrA 线材中心偏析均为 0 级, 在晶粒度以及脱碳层厚度方面, 3 家钢厂线材差别不大。另外, 根据标准 GB/T 10561—2005 对试验用弹簧钢线材夹杂物进行了评级, 发现国外 H 厂未出现 Ds 类夹杂物, 除 C 类夹杂物为 1 级外, 其余均为 0.5 级; 国内 Y 厂线材 Ds 类为 1.5 级, D 类为 1 级, 其余为 0.5 级; 国内 B 厂未发现 Ds 类夹杂物, 其余则为 0.5 级。

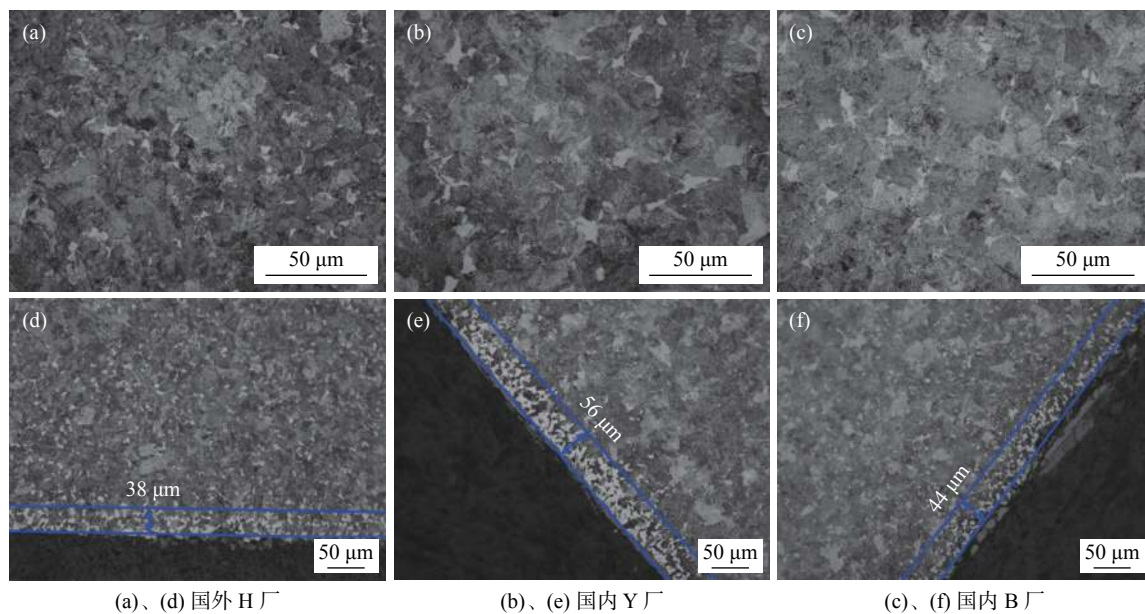


图 1 弹簧钢的显微组织及脱碳层
Fig. 1 Microstructure and decarburization of the tested spring steel

2.2 夹杂物的数量、尺寸及长宽比

利用 SEM-EDS 对 3 家弹簧钢线材夹杂物的数量、尺寸以及可变形性进行了分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可见, 国内、外 3 家钢厂弹簧钢线材中

夹杂物在数量、尺寸方面均存在较大差异, 国外 H 厂、国内 B 厂夹杂物数量最少, 为 3 个/ mm^2 ; 国外 H 厂夹杂物的最大尺寸为 $3.4 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$ 以上的夹杂物占比最少, 为 2.9%, 长宽比 ≥ 3 的夹杂物 (可

变形夹杂物)占比近100%;国内Y厂夹杂物数量为3.9个/ mm^2 ,夹杂物的最大尺寸为9.1 μm ,3 μm 以上的夹杂物占比23.7%,长宽比 ≥ 3 的夹杂物占比为0;国内B厂夹杂物的最大尺寸为4.1 μm ,3 μm

以上的夹杂物占比12.5%,长宽比 ≥ 3 的夹杂物占比为0。另外,国外H厂夹杂物平均尺寸最小为1.3 μm ,国内B厂夹杂物平均尺寸为1.9 μm ,而国内Y厂夹杂物的平均尺寸最大,为2.7 μm 。

表1 弹簧钢的夹杂物级别与显微组织
Table 1 Inclusion grading and microstructure of the tested spring steel

厂家	显微组织	中心偏析	脱碳层厚度/ μm		晶粒度级别	夹杂物级别
			全脱碳层	总脱碳层		
国外H厂	S+P+F	0	0	38	7	A0.5, B0.5, C1, D0.5
国内Y厂	S+P+F	0	0	56	8	A0.5, B0.5, C0.5, D1, DS1.5
国内B厂	S+P+F	0	0	44	8	A0.5, B0.5, C0.5, D0.5e

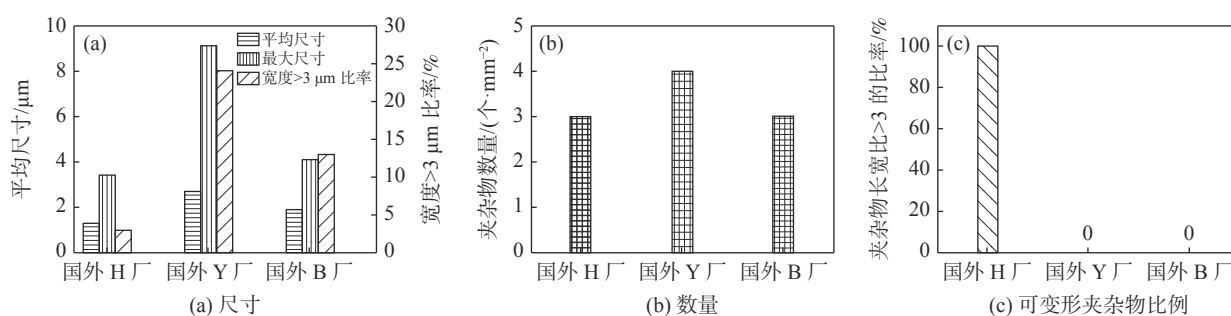


图2 弹簧钢中夹杂物
Fig. 2 Inclusions in the tested spring steel

2.3 夹杂物的成分、形貌及类型

对国内、外3家弹簧钢线材中夹杂物的成分、形貌以及类型进行分析,结果见表2、图3,可以看出,国外H厂夹杂物类型主要为 $\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物,部分夹杂物含少量 MgO ;国内Y厂夹杂

物类型主要为 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 系夹杂物;国内B厂夹杂物类型主要为 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 系夹杂物,其中部分夹杂物含有微量 MgO 。另外,国外H厂弹簧钢线材夹杂物中平均 Al_2O_3 含量最低,与其线材中酸溶铝含量最低相对应。

表2 弹簧钢线材夹杂物成分、尺寸、类型及盘条酸溶铝含量
Table 2 Inclusion composition, size, type and acid soluble aluminum content of the tested spring steel

编号	夹杂物成分/%					平均 Al_2O_3 含量/%	平均 MgO 含量/%	夹杂物尺寸(长×宽)/ μm	夹杂物类型	盘条Al _s 含量× 10^6
	Al_2O_3	MgO	SiO_2	MnO	CaO					
国外H厂	20.93	16.96	52.55	9.56		11.8	0.5	23.3×2.5	$\text{MnO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (- MgO)	3
国内Y厂	50.9	22.5	14.04		12.56	23.6	24.5	4.7×4.7	$\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$	23
国内B厂	92.17	1.84	3.18		2.81	89.6	4.4	4.1×3.1	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ (- MgO)	10

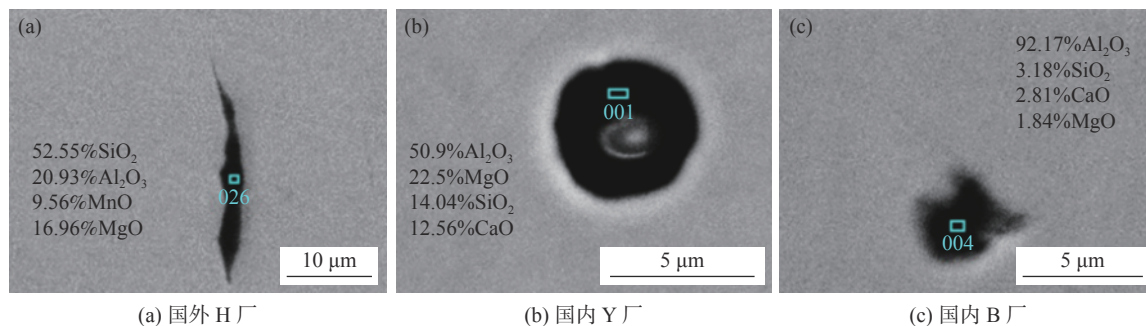


图3 夹杂物形貌
Fig. 3 Shape of the inclusions

利用 Factsage 热力学软件, 对 3 家钢厂供应的弹簧钢线材夹杂物进行了计算, 分析其在相图中的分布, 在三元相图计算时, 固定了其他氧化物成分, 以使计算结果更加接近夹杂物的实际成分, 具体如图 4 所示。结果表明, 国外 H 厂夹杂物主要处于

SiO_2 初晶面, 甚至存在 SiO_2 含量在 90% 以上的高 SiO_2 夹杂物, 国内 Y 厂夹杂物中 Al_2O_3 、 MgO 含量较高, 国内 B 厂夹杂物中 Al_2O_3 含量较高, 甚至出现纯 Al_2O_3 夹杂物, 另外, 3 个厂线材夹杂物处于 1 400 °C 低熔点区的比例几乎均为 0。

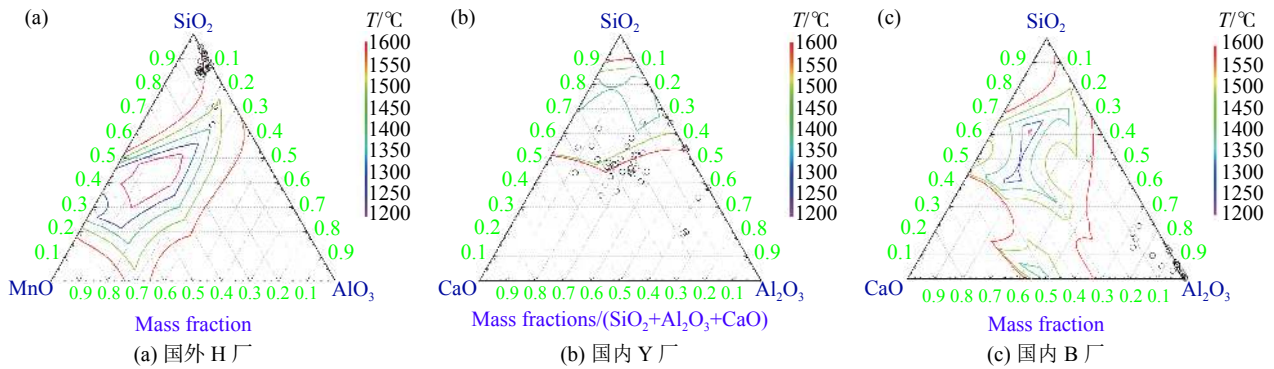


图 4 夹杂物在相图中分布
Fig. 4 Distribution of the inclusions in the phase diagram

3 分析与讨论

根据上述国内、外 3 家钢厂弹簧钢线材质量的对比结果, 分析认为国内外弹簧钢线材在质量控制上的主要差异及原因为:

1) 在显微组织、中心偏析、脱碳层厚度、晶粒度等方面, 国内外弹簧钢相差不大; 在夹杂物级别方面, 国外 H 厂和国内 B 厂相对较好, 均未出现 Ds 类夹杂物; 而国内 Y 厂弹簧钢线材中发现有 1 级 D 类夹杂物以及 1.5 级 Ds 类夹杂, 另外, 根据国内 Y 厂夹杂物能谱结果可知, 其夹杂物中 Al_2O_3 、 MgO 含量较高, 推测可能与国内 Y 厂采用碱性精炼渣、镁

质耐材侵蚀较严重以及直通式浸入式水口不利于大尺寸夹杂物的上浮有关。

2) 国产弹簧钢线材中夹杂物在数量、尺寸以及可变形性方面与国外相比存在一定差距, 国内 Y 厂夹杂物数量最多, 尺寸(宽度)最大, 最大尺寸达 9.1 μm ; 尽管国内 B 厂夹杂物数量与国外 H 厂相同, 然而其夹杂物尺寸较大, 3 μm 以上夹杂物占比较大, 且夹杂物中 Al_2O_3 含量较高, 甚至出现纯 Al_2O_3 夹杂物, 如图 5 所示, 推测可能与含铝耐材和渣中较高 Al_2O_3 含量有关; 国外 H 厂夹杂物最大尺寸为 3.4 μm , 3 μm 以上夹杂物占比仅为 2.9% 且可变形比例最大, 约 100%, 夹杂物控制最好。

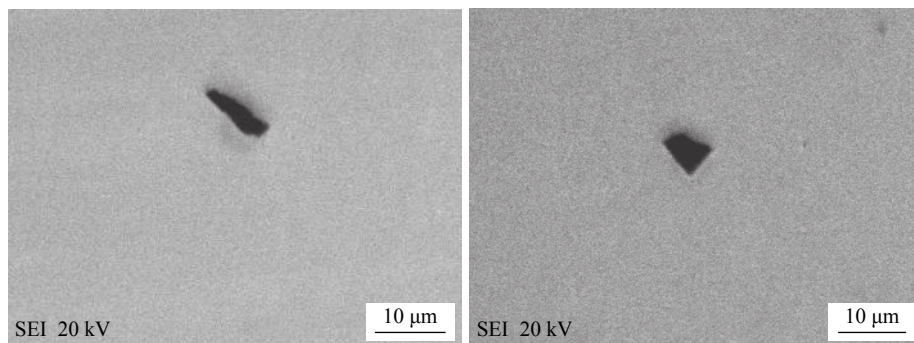


图 5 国内 B 厂弹簧钢中纯 Al_2O_3 夹杂物形貌
Fig. 5 Morphologies of pure Al_2O_3 inclusions in the tested spring steel of DSB

3) 根据 Factsage 热力学计算结果可知, 3 家钢厂弹簧钢夹杂物处于低熔点区比例均为 0。国内两

个厂因线材中 Als 含量以及夹杂物中 Al_2O_3 、 MgO 含量较高, 偏离低熔点区, 与其形貌相对应; 国外 H

厂弹簧钢线材夹杂物,主要分布在高 SiO_2 含量区,偏离其低熔点区,但这些高 SiO_2 含量的夹杂物,如图 4(a) 所示,在轧钢过程中仍能继续发生塑性变形,并且沿着轧制方向呈长条状,如图 6 所示,推测可能与其玻璃态结构有关^[8]。因而导致了国外 H 厂弹簧钢可变形夹杂物比例与其处于低熔点区夹杂物比例不一致这一现象。

另外,夹杂物中的 Al_2O_3 、 MgO 含量能够显著

影响其性能。研究表明^[9-13],钢中 Als 质量分数控制在 4×10^{-6} 时,热力学平衡时夹杂物中 Al_2O_3 含量为 20%,此时夹杂物变形性能最佳;而精炼渣中相同 Al_2O_3 含量的条件下,钢液中 Als 含量随着碱度增加而升高,同碱度下,钢液中 Als 含量随渣中的 Al_2O_3 含量增加而升高;另外, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物中含少量 MgO 时,有利于扩大低熔点区,然而当 MgO 含量超过 20% 时,低熔点区将显著减小。

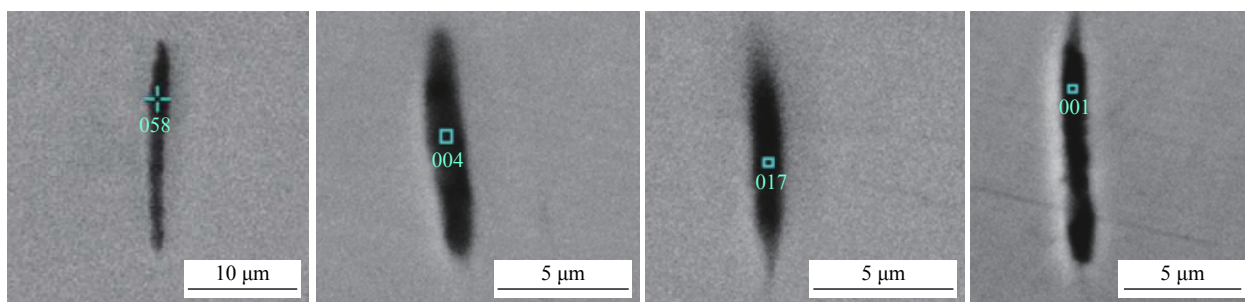


图 6 国外 H 厂弹簧钢中高 SiO_2 含量夹杂物沿轧制方向的形态

Fig. 6 Morphologies of the high SiO_2 content inclusions along rolling direction in the tested spring steel of FSH

综合上述分析,表明国产弹簧钢线材质量要达到国外的水平,在生产过程中需要进一步强化夹杂物的脱除和改性,合理控制钢水、精炼渣成分以及提高耐材质量并合理选用耐火材料。

4 结论

1) 3 家钢厂弹簧钢在显微组织、中心偏析、脱碳层厚度、晶粒度等方面相差不大,国内 Y 厂弹簧钢线材中发现有 1 级 D 类夹杂物以及 1.5 级 Ds 类夹杂,而国外 H 厂和国内 B 厂相对较好,均未出现

Ds 类夹杂物。

2) 国外 H 厂弹簧钢夹杂物尺寸最小且数量最少,最大尺寸为 $3.4 \mu\text{m}$ 且可变形夹杂物占比近 100%;然而国内两厂线材中夹杂物数量、尺寸相对较大且均不可变形。国内 Y 厂线材夹杂物平均 Al_2O_3 、 MgO 含量较高,国内 B 厂发现纯 Al_2O_3 夹杂物。

3) 国内钢厂需进一步合理控制钢水、精炼渣成分以及提高耐材质量并合理选用耐火材料,来强化夹杂物的改性和脱除。

参考文献

- [1] Canale L C F, Penha R N, Totten G E, *et al.* Overview of factors contributing to steel spring performance and failure[J]. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2007, 2(3-4): 262-309.
- [2] Lyu S, Ma X, Huang Z, *et al.* Inclusion characterization and formation mechanisms in spring steel deoxidized by silicon[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(2): 732-747.
- [3] Wu Xuexing, Sun Haibo, Yu Dahua. Production practice of high quality automobile suspension spring steel 55SiCr[J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2016, 36(2): 13-16.
(吴学兴, 孙海波, 余大华. 高品质汽车悬架弹簧钢 55SiCr 生产工艺实践[J]. *江西冶金*, 2016, 36(2): 13-16.)
- [4] Meng Yaoqing, Guo Xiaopei, Zhao Lei, *et al.* Study on exogenous inclusions in rotary bending fatigue fracture of Si-killed spring steel 55SiCr[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2018, 30(12): 977-982.
(孟耀青, 郭晓培, 赵垒, 等. 硅脱氧弹簧钢 55SiCr 旋转弯曲疲劳断口中外来夹杂物的研究[J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(12): 977-982.)
- [5] Meng Yaoqing, Wang Kunpeng, Zheng Yongrui. Analysis of sources of inclusions induced fatigue failure in 1950 MPa-grade spring steel 55SiCrA[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, 29(10): 859-864.

- (孟耀青, 王昆鹏, 郑永瑞. 1950 MPa级弹簧钢55SiCrA疲劳断口夹杂物来源分析[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(10): 859-864.)
- [6] Ying Ruiyu. Progress of quality of steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.
(殷瑞钰. 钢的质量现代进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.)
- [7] Hu Yang, Chen Weiqing, Han Huaibin, *et al.* Quality contrast of domestic and overseas spring steel wire rod for valve spring[J]. *Steelmaking*, 2015, 31(6): 47-52.
(胡阳, 陈伟庆, 韩怀宾, 等. 国内外气门簧用弹簧钢线材质量对比[J]. 炼钢, 2015, 31(6): 47-52.)
- [8] Cui Huaizhou, Chen Weiqing, Cao Changfa. Analysis of banded structure in wire rod for tire cord steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2011, 36(6): 41-45.
(崔怀周, 陈伟庆, 曹长法. 帘线钢盘条带状组织的分析[J]. 金属热处理, 2011, 36(6): 41-45.)
- [9] Karihara K. Production technology of wire rod for high tensile strength steel cord[J]. *Kobelco Technology Review*, 2011, 30: 62-65.
- [10] Maede S, Soejima T, Saito T, *et al.* Shape Control of inclusions in wire rods for high tensile cord by refining with synthetic slag[C]//*Steelmaking Conference Proceedings*. Warrendale: Iron and Steel Society of USA, 1989, 77: 379-385.
- [11] Yin Xue. Investigation on non-metallic inclusion plasticization control for automotive suspension spring steel[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
(殷雪. 汽车悬架弹簧钢非金属夹杂物塑性化控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.)
- [12] Peng Hongbing, Tang Yao. Quality comparison of the domestic and foreign high carbon steel cord wire[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2019, 44(12): 44-48.
(彭红兵, 唐尧. 国内外帘线用高碳钢线材质量对比[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 44-48.)
- [13] Wang Kunpeng, Jiang Min, Wang Xinhua, *et al.* Progress of control technology of inclusions in steel for tyre cord and saw wire[J]. *Special Steel*, 2016, 37(2): 26-31.
(王昆鹏, 姜敏, 王新华, 等. 钢帘线和切割丝用钢夹杂物控制技术的进展[J]. 特殊钢, 2016, 37(2): 26-31.)

编辑 杨冬梅

日本成功合成适用于全固态电池的逆钙钛矿化合物

(2021年3月3日)日本精密陶瓷中心(JFCC)于日前发表,他们成功与京都大学、东北大学、东京工业大学合作开发出高极化性(Polarizability)阴离子构成的逆钙钛矿化合物。新合成出的Li₃HX与Na₃HX没有多数钙钛矿化合物具有的歪曲构造,其优异特性使其有望被用作碱离子电池的固体电解质。

此前,研究团队关注到带有负电荷之氢化物(Hydride)具有高极化性,藉由结合同样具有高极化性的硫属元素(硫黄、硒、碲),合成出具有逆钙钛矿型构造的新物质Li₃HX与Na₃HX,藉此高极化性的阴离子晶格中存在着碱金属离子,进而实现了离子传导体的理想环境。此外,经过实验与理论计算证明,新逆钙钛矿化合物的碱离子扩散的活性化能非常的低。

新开发的逆钙钛矿化合物除了呈现出可望应用做为固体电解质的离子传导性之外,还由于是以软性的阴离子构成,成形性佳,因此可望形成致密的电解质层。此现象也意味新开发的化合物容易与锂金属或钠金属之类的电极活物质形成良好的界面,对于今后的材料开发将有所助益。

摘自 https://www.materialsnet.com.tw/material/DocView_MaterialNews.aspx?id=45726