

电液控制器用加 Bi-Ce 易切削不锈钢 1.4104 的开发

雷应华^{1,2} 刘尚潭^{1,2} 张 军^{1,2} 郑振宇^{1,2} 廖 凯³

(1 大冶特殊钢有限公司特冶产品研究所, 黄石 435001; 2 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 黄石 435001;
3 黄石市产品质量监督检验所, 黄石 435000)

摘 要 大冶特钢公司电液控制器用高端不锈钢 1.4104 (1%: 0.16C, 1.23Mn, 16.40Cr, 0.41Ni, 0.43Mo, 0.023Ca) 采用 20 t 电弧炉初炼、LF 与 VD 精炼, 铸 1.2 t 锭, 径锻成材工艺生产, 通过喂入 Bi 包芯线 (Bi: 0.036%) 与稀土球化剂 (Ce: 0.054%) 后该钢横向力学性能与切削性能大幅提高。与无 Bi-Ce 钢相比, 含 Bi-Ce 钢夹杂物总量减少 84.4%, MnS 夹杂减少 85.5%, 夹杂物平均尺寸由 4.5 μm 增至 13.7 μm , 切削力平均降低 70~80 N, 切屑更厚, 更加易断, 横向断面收缩率由 3% 提高至 17%。

关键词 真空脱气 易切削不锈钢 1.4104 Bi-Ce 硫化物球化 切削性能

Development of Adding Bi-Ce Free-Cutting Stainless Steel 1.4104 for Electro-hydraulic Controller

Lei Yinghua^{1,2}, Liu Shangtan^{1,2}, Zhang Jun^{1,2}, Zheng Zhenyu^{1,2} and Liao Kai³

(1 Daye Special Steel Co Ltd, Special Products Research Institute, Huangshi 435001; 2 Hubei Province Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi 435001; 3 Huangshi Product Quality Supervision and Inspection Institute, Huangshi 435000)

Abstract Quality stainless steel 1.4104 (1%: 0.16C, 1.23Mn, 16.40Cr, 0.41Ni, 0.43Mo, 0.023Ca) for electro-hydraulic controller has been first melted at Daye Special Steel Co Ltd by 20 t electronic arc furnace and refined in ladle furnace and vacuum degassing unit, cast 1.2 t ingot and forged into products. The transverse mechanical properties and machinability have been enhanced significantly by feeding bismuth cored wires (Bi: 0.036%) and adding rare earth nodulizer (Ce: 0.054%). Comparing with that of the free Bi-Ce steel, the total number of inclusion of the containing Bi-Ce steel decreases by 84.4% and the number of MnS inclusion decreases by 85.5%, average size of inclusion increases from 4.5 μm to 13.7 μm and cut force lower by 70~80 N with thicker and more easily broken chips, the transverse reduction of area increases from 3% to 17%.

Material Index Vacuum Degassing, Free-cutting Stainless Steel 1.4104, Bi-Ce, Sulfide Nodulizing, Machinability

中国采煤行业正在进行装备智能化、无人化、自动化技术改造, 液压支架电液控制器用不锈钢系关键部件主要依靠进口^[1], 国外主要供应商有德国蒂森克虏伯、法国埃赫曼、艾维斯塔 (Avesta)、美国 AK 钢铁公司、日本新日铁 (JFE)、韩国浦项 (POSCO) 等公司, 由于产品成本高, 交货周期长, 严重影响产品的正常交付和制约行业的装备升级。

电液控制器钢长期承受着高温高压高湿恶劣环境, 要求电液控制器用易切削不锈钢具有耐蚀、耐压、各向异性小、易加工和加工精度高的特点。为改善不锈钢机加工性能和材料性能, 通过控制钢中 S 含量和加入一定钙或稀土来达到优化效果, 如喂钙线形成低熔点钙长石 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$ ^[2]、添加稀土后生成稀土硫化物^[3-4], 添加 V、Nb、Ti 等使硫化物弥散细化, 实现硫化物球化效果。大冶特殊钢有限公司根据用户需求, 综合应用喂钙线、Bi 包芯线, 添加专用稀土球化剂等手段, 开发出新一代高

端液压支架电液控制器用易切削不锈钢 1.4104, 成功实现进口替代。

1 工艺流程与生产检测装备

1.1 工艺流程

大冶特钢公司生产工艺流程为: 20 t 电弧炉→20 t VD→浇注 1.2 t 八角锭→径锻成 135 mm × 145 mm→淬火 + 回火→矫直→铣光至 119.5 mm × 129.5 mm→检验→包装→入库。含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢冶炼方式均为电弧炉 + LF + VD 精炼, 与无 Bi-Ce 钢相比, 含 Bi-Ce 钢加入了 Bi 与 Ce。含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢的工艺流程差异见表 1, 含 Bi-Ce 钢化学成分与无 Bi-Ce 钢 1.4104 化学成分见表 2。

1.2 工艺设计

1.2.1 冶炼

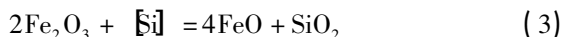
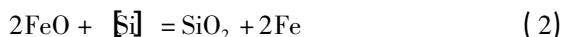
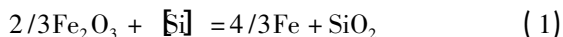
首先在 20 t 电弧炉初炼, 在铁水供应充足的情况下, 最优原料配比是 70% 铁水 + 30% 废钢, 当铁水供应不足时, 增加废钢比, 50% 铁水 + 50% 废钢,

表 1 含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢 1.4104 工艺流程比较
Table 1 Processing route comparison between containing Bi-Ce and free Bi-Ce steel 1.4104

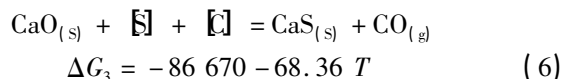
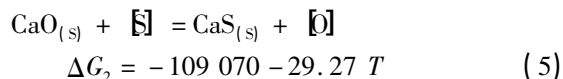
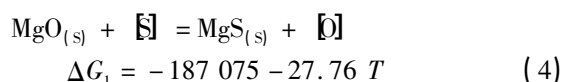
工序	含 Bi-Ce 钢	无 Bi-Ce 钢
冶炼	20 t 电弧炉 + LF + VD, VD 喂入 Ca-Si 包芯线 25 kg	20 t 电弧炉 + LF + VD, VD 喂入 Ca-Si, 包芯线 25 kg、Bi 包芯线 9 kg 与稀土球化剂 18 kg
径锻	锻成 135 mm × 145 mm 方钢	锻成 135 mm × 145 mm 方钢
调质	990 ~ 1 100 °C 淬火 + 620 ~ 640 °C 回火	990 ~ 1 100 °C 淬火 + 620 ~ 640 °C 回火
铣光	四面铣光, 成品 119.5 mm × 129.5 mm	四面铣光, 成品 119.5 mm × 129.5 mm

当铁水没有供应时,可配全废钢初炼。铁合金包括铬铁、钼铁、硅铁、锰铁、电解镍等。为控制钢水氧含量,要求出钢前扒除氧化渣。为改善硫化物形态,Mn/S 要求大于 5,电弧炉出钢温度控制在 $\geq 1\ 630\ ^\circ\text{C}$ 。

为了保证钢水低磷低硫,铁水要求进行预处理,预处理包括脱硅、脱硫与脱磷。脱硅剂可利用除尘灰,用量控制在 16 ~ 18 kg/t_铁,脱硅反应主要为脱硅剂中氧与硅的反应^[5],见式(1)~(3)。



脱硫剂采用 CaO、MgO 和碳化钙(CaC₂),用量控制在 4 ~ 6 kg/t_铁,脱硫时间 9 ~ 11 min,脱硫反应^[6]见式(4)~(6)。



脱磷主要方法是吹氧,氧气流量 150 m³/min,脱磷剂采用转炉渣 + 生石灰(CaO) + 铁矿石(Fe₃O₄、FeO)。

炼钢精炼在 LF 进行,脱氧剂以 CaSi 粉、SiC 粒为主,造渣剂选用石灰、萤石,造渣剂用量为钢水 1.5% ~ 3.0%,分批造渣,造渣次数大于 3 次。主成分命中目标后,喂入硫线,控制 S 含量在 0.20% ~ 0.25%,精炼温度控制在 1 630 ~ 1 650 °C。

Ca-Si 线、稀土球化剂、Bi 包芯线在 VD 加入^[7]。真空度要求 $\leq 10\ \text{Pa}$,真空总时间 $\geq 25\ \text{min}$,真空保持时间 $\geq 15\ \text{min}$,采用氩气软吹,软吹时间 $\geq 15\ \text{min}$ 。破真空后首先喂入 Bi 包芯线 1 个单元(约 9 kg),

表 2 含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢 1.4104 化学成分对比表 / %
Table 2 Chemical composition comparison between containing Bi-Ce and free Bi-Ce steel 1.4104 / %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ca	Bi	Ce
含 Bi-Ce 钢	0.16	0.40	1.23	0.018	0.20	16.40	0.41	0.43	0.023	0.036	0.054
无 Bi-Ce 钢	0.15	0.42	1.28	0.019	0.21	16.37	0.40	0.42	0.022	-	-

Ca-Si 线 110 m(含钙 30.6%,重 24 ~ 26 kg),最后加入粒度为 10 ~ 40 mm 的稀土球化剂,控制在 18 kg。

含 Bi-Ce 钢熔点 1 480 °C,浇注温度控制在 1 530 ~ 1 540 °C 比较合适,浇注锭型为 1.2 t 八角锭。模冷 10 h 后可脱模。

1.2.2 锻造

锻造开坯首先在 2 t 电液锤进行,开坯规格 $\Phi 215\ \text{mm}$ 。钢锭升温速度 $\leq 80\ ^\circ\text{C}/\text{h}$,均热时间 1 170 ~ 1 190 °C,保温时间 2 ~ 3 h,终锻温度 $\geq 850\ ^\circ\text{C}$,锻后空冷。

锻造成材在德国西马克制造的 16MN 径锻机进行,钢锭升温速度 $\leq 100\ ^\circ\text{C}/\text{h}$,均热温度 1 110 ~ 1 130 °C,保温时间 1 ~ 2 h,径锻道次 5 道,首尾道次延长率 1.1,中间道次延长率控制在 1.2 ~ 1.3,锻制规格(90 ~ 130) mm × (90 ~ 150) mm × 3 000 mm,锻后空冷。

1.2.3 热处理

热处理工艺分两步,第一步在淬火炉进行,含 Bi-Ce 钢奥氏体临界转变温度 926 °C,淬火温度控制在 990 ~ 1 010 °C,保温时间 4 ~ 6 h,出炉后 3 min 内浸入淬火池淬火,淬火介质为水,水冷槽中钢坯上下摆动,加快水与钢坯传热效率,提高钢坯冷却速度,水冷时间依截面尺寸不同控制在 10 ~ 25 min,出水后钢温 $\leq 90\ ^\circ\text{C}$ 。

第二步在回火炉进行回火,回火温度控制在 620 ~ 640 °C,保温时间控制在 9 ~ 11 h。为避免钢坯淬火开裂,钢坯淬火后 6 h 内必须安排回火处理。

热处理完成后钢坯必须矫直,平直度要求 2 mm/m。

1.2.4 铣加工

铣加工在数控机床上进行,铣后公差应符合标准要求:(1) 截面公差为 $(-0.5\text{ mm}, +0.5\text{ mm})$, (2) 两相邻断面垂直度公差 0.2 mm , (3) 两对面平行度公差 0.2 mm 。

2 试验结果与分析

2.1 低倍分析

低倍按照 GB/T1979-2001 要求取样与检测。低倍试验从径锻后毛坯截取,断面尺寸为 $135\text{ mm} \times 145\text{ mm}$,厚度为 20 mm ,横截面磨光,光洁度要求 $Ra1.6$,试验表面不

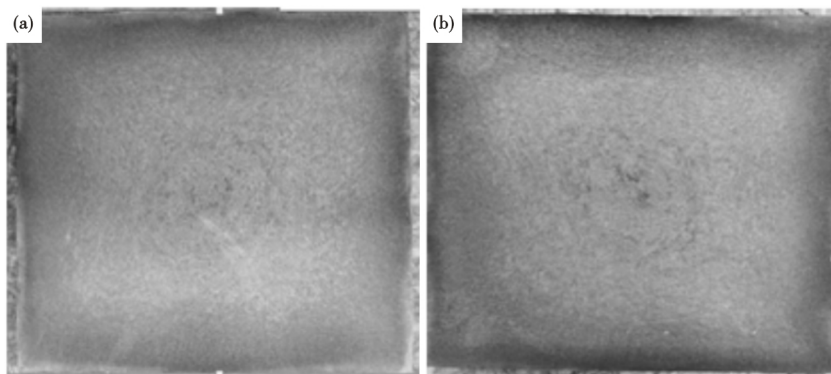


图 1 含 Bi-Ce 钢(a)与无 Bi-Ce 钢(b)的低倍组织

Fig. 1 Macrostructure of containing Bi-Ce (a) steel and free Bi-Ce (b) steel

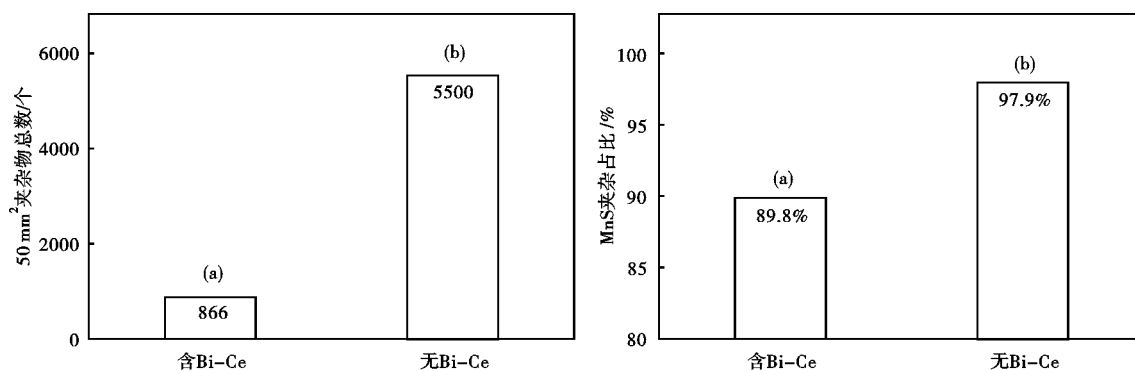


图 2 含 Bi-Ce 钢(a)与无 Bi-Ce 钢(b)夹杂物 MnS 及数量占比

Fig. 2 Inclusions numbers and MnS percentages in containing Bi-Ce (a) and free Bi-Ce (b) steel

得有油污与碰损伤痕。检验前将磨光低倍试样放入盐酸槽中,酸液与水配比 $1:1$ (容积比),酸液温度控制在 $65 \sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 1(a,b)分别为含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢低倍组织图。

含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢相比,低倍组织没有明显变化,经评定,含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢一般疏松均为 1 级,中心疏松均为 1 级,偏析均为 0.5 级,符合标准一般疏松 ≤ 2 级,中心疏松 ≤ 2 级,偏析 ≤ 2 级的要求。

2.2 夹杂物分析

采用美国赛默飞 FEI 公司进口的全自动扫描电镜 ASPEX Explorer4,对含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢夹杂物类型、数量、尺寸进行分析^[9]。

两种钢的主要夹杂物 MnS 数量及占比见图 2。

从图 2 看出,不论是含 Bi-Ce 钢还是无 Bi-Ce 钢,主要夹杂物类型均为 MnS,其中无 Bi-Ce 钢中 MnS 占比 97.9% ,含 Bi-Ce 钢中 MnS 占比 89.8% ,含 Bi-Ce 钢 MnS 夹杂占比有下降,是因为含 Bi-Ce 钢除加入硫线之外,还加入 Ce、Bi,形成了稀土硫化

物、稀土硫氧化物、稀土铝氧化物、 Bi_2O_3 等夹杂^[9]。

图 3 是含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢平均尺寸与最大尺寸比较,结果表明,相比无 Bi-Ce 钢,含 Bi-Ce 钢加入了 Ce、Bi,起到了夹杂物球化的效果。就平均尺寸来说,含 Bi-Ce 钢夹杂物平均尺寸是无 Bi-Ce 钢

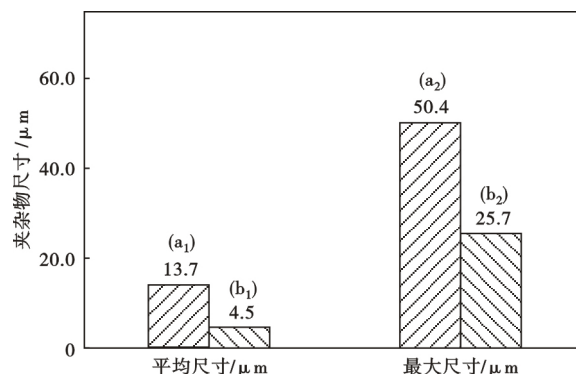


图 3 含 Bi-Ce 钢(a_1, a_2)与无 Bi-Ce 钢(b_1, b_2)夹杂物平均(a_1, b_1)与最大尺寸(a_2, b_2)

Fig. 3 Average (a_1, b_1) and maximum (a_2, b_2) inclusions sizes for containing Bi-Ce (a_1, a_2) steel and free Bi-Ce steel (b_1, b_2)

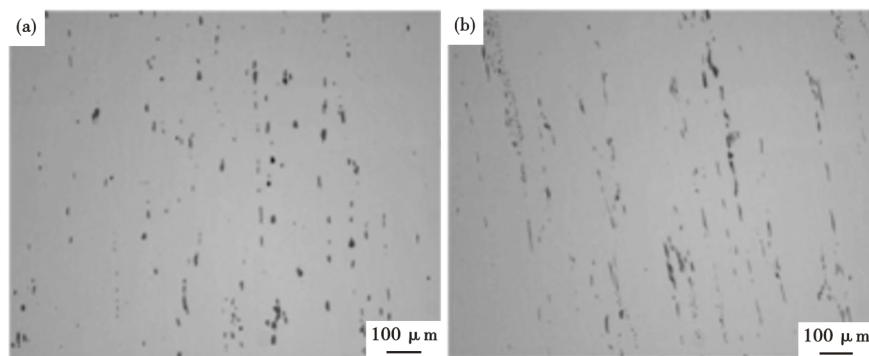


图 4 含 Bi-Ce 钢 (a) 与无 Bi-Ce 钢 (b) 夹杂物形貌

Fig. 4 Inclusions morphology of the containing Bi-Ce (a) and free Bi-Ce (b) steel

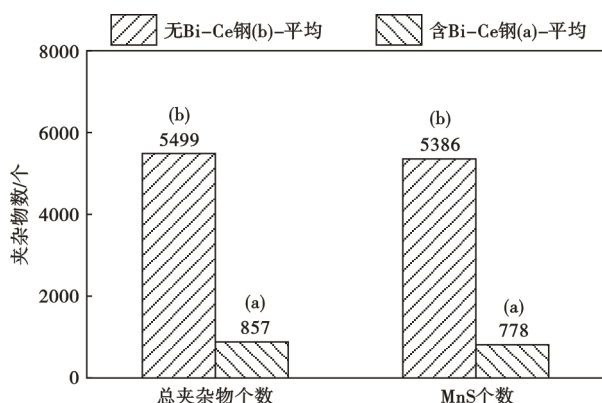


图 5 含 Bi-Ce 钢 (a) 与无 Bi-Ce (b) 钢夹杂物数量对比

Fig. 5 Inclusions number contrast between the containing Bi-Ce (a) and free Bi-Ce steel (b)

的 3.04 倍。

图 4 是含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢夹杂物形貌图。含 Bi-Ce 钢夹杂物球化效果明显^[8], 夹杂物尺寸明显增大。

含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢测得的夹杂物数量见图 5, 检测面积均为 5 mm²。与无 Bi-Ce 钢相比, 含 Bi-Ce 钢总夹杂物数量与 MnS 夹杂数量均呈现大幅降低, 总夹杂物减少 84.4%, MnS 夹杂减少 85.5%。

2.3 力学性能分析

按照 GB/T2975-GB/T2978-2018 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备的要求, 截取横向拉伸试验, 按照 GB/T228-2010 金属拉伸试验方法, 在 Zwick 400KN 电子拉伸试验机完成拉伸试验。

含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢力学性能见图 6 (成品规格均为 119.5 mm × 129.5 mm)。含 Bi-Ce 钢横向延伸率与断面收缩率均有大幅提高, 其中横向延伸率从 4% 提高至 13%, 提高了 225%, 横向断面收缩率从 3% 提高至 17%, 提高了 467%。文献 [4] 指

出, 通过添加 Bi、稀土球化剂等, 可减少夹杂物的数量、净化钢水。由于夹杂物数量大幅降低与夹杂物球化, 减少应力载荷下应力源数量, 显著提高材料的切削性能与横向力学性能。

2.4 切削性能

采用马扎克 LG Mazak NexXus 510C-II L 数控立式加工中心对无 Bi-Ce 钢与含 Bi-Ce 钢做高速切削加工试验 (规格均为 119.5 mm × 129.5 mm), 并对切削力、刀面磨损、切屑形貌进行比较分析。图 7 是切削力对比图。相比无 Bi-Ce 钢, 含 Bi-Ce 钢更加柔软, 切削力平均小 70 ~ 80 N。

图 8 (a, b) 是无 Bi-Ce 钢与含 Bi-Ce 钢切屑形

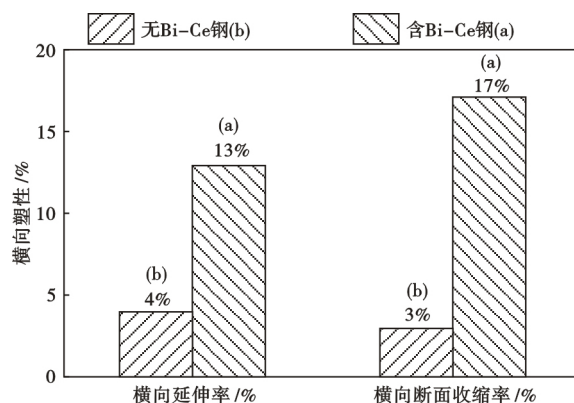


图 6 含 Bi-Ce 钢 (a) 与无 Bi-Ce 钢 (b) 横向延伸率 (左) 和横向断面收缩率 (右)

Fig. 6 Transverse elongation (left) and reduction (right) of area of containing Bi-Ce (a) and free Bi-Ce (b) steel

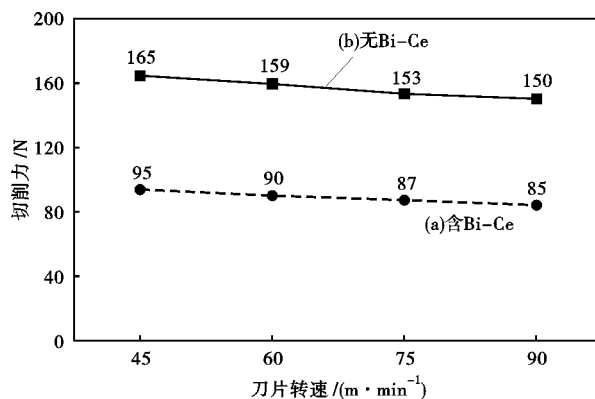


图 7 含 Bi-Ce 钢 (a) 与无 Bi-Ce 钢 (b) 切削力比较

Fig. 7 Cutting force comparison between containing Bi-Ce (a) and free Bi-Ce (b) steel

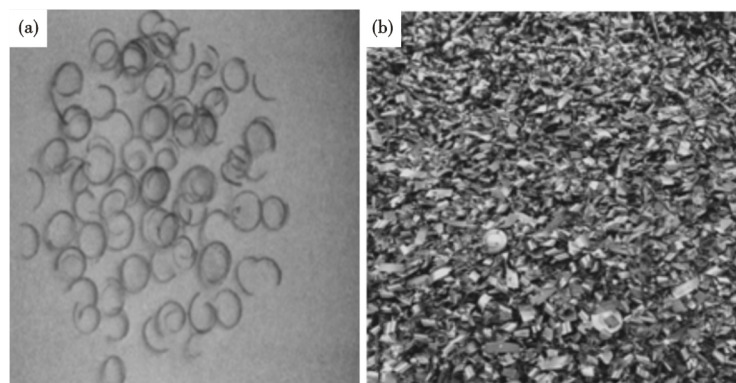


图 8 无 Bi-Ce 钢(a) 和含 Bi-Ce 钢(b) 的切屑形貌

Fig. 8 Chips morphology of free Bi-Ce steel (a) and containing Bi-Ce steel (b)

貌。相比无 Bi-Ce 钢,含 Bi-Ce 钢进刀量更大,切屑更厚,切削更易断,基本不卷曲,说明大冶特钢公司生产的含 Bi-Ce 钢料拥有更好的切削性能。

3 结论

(1) 与无 Bi-Ce 钢相比,含 Bi-Ce 钢夹杂物总量减少 84.4%,MnS 夹杂物减少 85.5%,表明喂入 Bi 包芯线与加入稀土球化剂后钢水纯净度更高,是含 Bi-Ce 钢横向力学性能大幅提高的主要原因。

(2) 含 Bi-Ce 钢喂入 Bi 包芯线与稀土球化剂对高硫易切削不锈钢进行优化处理,促进了夹杂物的球化长大。含 Bi-Ce 钢夹杂物平均尺寸比无 Bi-Ce 钢增长 204%。含 Bi-Ce 钢硫化物以球状为主、无 Bi-Ce 钢以长条形为主。

(3) 含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢相比,切削力平均降低 70 ~ 80 N,切屑更厚,更加易断,说明含 Bi-Ce 钢拥有更佳的切削性能。

(4) 含 Bi-Ce 钢与无 Bi-Ce 钢相比,横向延伸率与断面收缩率均有大幅提高,其中横向延伸率提高了 225%,横向断面收缩率提高了 467%。

参考文献

- [1] 宋晨曦. 基于电液控制的工作面液压支架部件更换技术应用 [J]. 矿业装备, 2019, 11(4): 42-43.
- [2] 王志刚, 王贤才. S 系易切削不锈钢冶炼工艺优化及应用 [J]. 特钢技术, 2010, 16(2): 26-27.
- [3] 邹虎, 陈永峰, 赵文渊. 低碳含碲易切削钢的轧制工艺研究与实践 [J]. 轧钢, 2020, 37(6): 49-52.
- [4] 吴迪, 李壮. 含硫、稀土、铋等合金元素的易切削奥氏体不锈钢研究 [J]. 钢铁, 2011, 46(8): 78-82.
- [5] 李闯, 郭汉杰, 成国光. 铁水温度、炉渣碱度和初始硅含量对碳饱和和铁水脱锰的影响 [J]. 特殊钢, 2009, 30(5): 4-6.
- [6] 吴明, 杨芳, 吕鸣. 复合喷吹石灰与镁粉配比对铁水脱硫效果的影响 [J]. 特殊钢, 2018, 39(5): 18-20.
- [7] 于会香, 邵肖静. 采用 ASPEX 扫描电镜研究钢中总氧和非金属夹杂物的定量关系 [J]. 工程科学学报, 2015, 37(5): 35-43.
- [8] 赵成林. 稀土元素在钢水中的作用机理及加入技术研究 [J]. 鞍钢技术, 2017, 67(1): 20-24.

雷应华(1966-), 男, 高级工程师, 1987 年武汉科技大学(本科)毕业, 冶金新材料工艺技术研发。

E-mail: leiyinghua@citicsteel.com

收稿日期: 2021-10-18

尊敬的作者: 2022 年《特殊钢》杂志创办了投稿网站

[www. specialsteeljournal. com](http://www.specialsteeljournal.com)

地址: 湖北省黄石市黄石大道 316 号、大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

邮编: 435001 咨询电话: 0714-6297386 6297313

《特殊钢》编辑部邮箱: E-mail: tsghs@sina.com, tsghs@citicsteel.com