

# 马氏体气阀钢夹杂物分析及控制

张敏, 谢鑫, 曾建华, 吴国荣

(攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

**摘要:** 针对国内某特钢厂生产的马氏体气阀钢轧材夹杂物评级合格率偏低的问题, 通过对轧材夹杂物的系统分析并结合现有钢包渣组分, 制定了有利于吸收气阀钢夹杂物的钢包渣最佳组分。该技术的应用, 有效提高了该厂马氏体气阀钢轧材夹杂物评级合格率, 稳定了产品质量。该技术应用后气阀钢轧材夹杂物合格率由 78% 左右提高到 97% 以上。

**关键词:** 马氏体气阀钢; 夹杂物; 钢包渣; 轧材评级

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)10-1060-04

## Analysis and Control of Inclusions in Martensitic Steel for Valves

ZHANG Min, XIE Xin, ZENG Jianhua, WU Guorong

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, China)

**Abstract:** Aiming at the low qualified rate of inclusion rating of martensitic valve steel rolled by a special steel plant in China, through the systematic analysis of rolled inclusions and the combination of existing ladle slag composition, the optimal composition of ladle slag which is beneficial to absorb the air valve steel inclusions was established. The application of this technology can effectively improve the inclusion rating rate and stabilize the product quality. After the application of this technology, the qualified rate of inclusions in the steel rolled by air valve increased from about 78% to more than 97%.

**Key words:** martensitic steel for valves; inclusions; refining slag; rate of inclusion in rolling products

气阀钢是制造汽、柴油发动机关键部件气阀门的专用材料。其工作条件恶劣, 在高温、高压、腐蚀性环境承受频繁的机械应力, 对材料的纯净度要求非常高。几十年来, 随着内燃机参数的不断提高, 使得气阀钢的工作温度提高、承受应力增大、燃气腐蚀严重、气阀锥面磨损加速, 气阀工况越来越苛刻, 推动了气阀钢的迅速发展。本文研究的为中碳马氏体气阀钢, 主要有 42Cr9Si2, 40Cr10Si2Mo 和 51Cr8Si2 等钢号。该类气阀钢的特点是含有较高的硅含量(钢中[Si]含量 1.2%~4.0%), 且要求钢材洁净度较高, 轧材夹杂物评级 A、B、D 类夹杂物粗、细系均 ≤ 1.5 级, C 类粗、细均 ≤ 1.0 级。因此, 如何实现高合金条件下的钢液夹杂物控制, 是提高气阀钢轧材合格率, 稳定产品质量的关键。

## 1 气阀钢轧材夹杂物分析

### 1.1 合金与钢中夹杂物关系

脱氧方式对钢中最终夹杂物的种类、形态及尺寸影响很大。铝脱氧钢的特点是脱氧彻底, 但钢中存在较多的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物。这类夹杂物尺寸小, 在钢液中很难上浮去除<sup>[1]</sup>。但由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物表面张力较大<sup>[2]</sup>, 在钢液中极易形成团簇状的夹杂物群, 若未能及时上浮同时由于该类夹杂物变形能力弱 (如图 1), 在轧制过程中极易沿轧制方向碎裂为链状夹杂

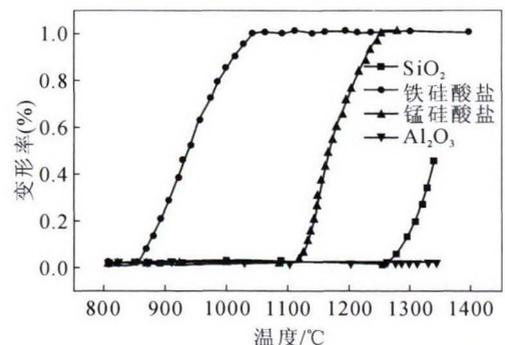


图 1 温度和夹杂物变形率的定性关系  
Fig.1 Qualitative relationship between temperature and inclusion deformation rate

收稿日期: 2019-06-06

作者简介: 张敏 (1982-), 女, 四川遂宁人, 硕士, 高级工程师。

研究方向: 精炼工艺技术。电话: 0812-3380790,

E-mail: 61727885@qq.com

物带,除了引起表面质量降低<sup>[3]</sup>,在产品内部其尖锐的棱角易引发形成空穴和应力源,导致产品在交变应力作用的工作环境下出现疲劳裂纹,疲劳裂纹的繁殖和长大极易引起产品的断裂<sup>[4,5]</sup>。

由于气阀钢的工作环境恶劣,对产品裂纹要求很高<sup>[6]</sup>。国内特殊钢厂一般都采用硅脱氧。硅脱氧钢脱氧产物主要为硅酸盐夹杂物,虽然这类夹杂物尺寸较大但热加工时(温度大于1100℃)变型能力比Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物好,有利于降低产品在加工过程中对裂纹的敏感性和提高产品的抗疲劳性能<sup>[7]</sup>,如图1所示,但同样存在冷却过程中热膨胀系数比基体小的问题。

此外,有研究表明,钢中含有大于0.001%的铝时,钢液中就会有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物生成,如图2所示。受合金生产工艺的限制,硅铁等合金中一般含有0.2%~0.5%的铝,脱氧或合金化时不可避免地会带进一定量的铝,工业生产中气阀钢的铝含量一般在0.030%,因此,即便采用硅铁脱氧,气阀钢冶炼过程中仍不可避免地会生成Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物。

### 1.2 夹杂物控制现状

42Cr9Si2等气阀钢要求A、B、D各类夹杂物的

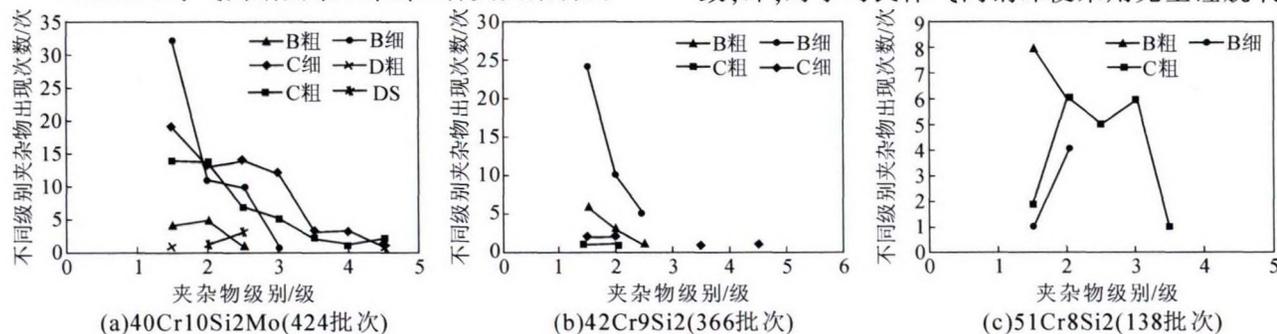


图3 40Cr10Si2Mo、42Cr9Si2 和 51Cr8Si2 气阀钢轧材评级  
Fig.3 40Cr10Si2Mo, 42Cr9Si2, and 51Cr8Si2 steel rating of rolling materials

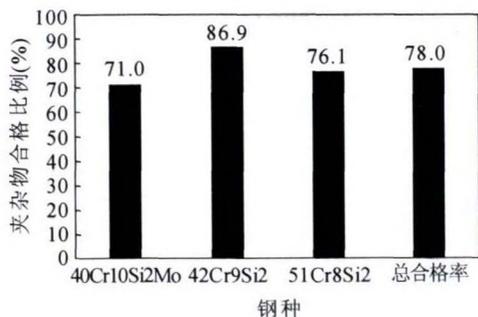


图4 气阀钢夹杂物合格率统计  
Fig.4 Qualification rate of inclusions in gas valve steel products

钢中同样会不可避免地存在较多的大型Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物。同时,40Cr10Si2Mo气阀钢C类夹杂物评级最高达到了5级,说明轧材中存在大尺寸的硅酸盐夹杂物。结合气阀钢成分可见,随着钢种硅含量要求的提高,轧材的B、C类夹杂物评级结果均变差,尤

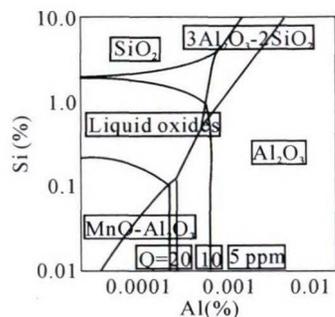


图2 不同[Al]和[Si]含量下夹杂物生成区域(Fe-Al-Si-Mn-O, 1480℃(a<sub>Mn</sub>=1.0))

Fig.2 Oxygen saturation and domains of stability of oxides in the system Fe-Al-Si-Mn-O at 1480℃

粗、细系均≤1.5级,C类粗、细均≤1.0级。对某特钢厂连铸生产的42Cr9Si2以及51Cr8Si2等气阀钢轧材夹杂物超标的批次进行了统计。结果表明,没有大于1.5级的A类夹杂物,且D类大颗粒夹杂物很少,仅个别批次有;大颗粒超标夹杂物主要为B、C类夹杂,级别高时甚至达到了3.5~6.0级。不同牌号的气阀钢夹杂物合格率仅71%~86.9%,综合合格率仅78%,严重影响了产品效益,见图3和图4。

综上所述,图3和图4与前述图2的研究结果一致,即,对于马氏体气阀钢即便采用完全硅脱氧,

其是C类夹杂物增长尤其明显。因此,如何有效地解决高硅钢中夹杂物去除问题,是生产高质量气阀钢,提高轧材夹杂物合格率的一个重要难点。

## 2 气阀钢夹杂物控制技术

通过上述分析可知,气阀钢夹杂物评级合格率低主要体现在B、C类夹杂物超标。通过对现有钢包渣成分和性能分析发现,现有精炼终渣CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>偏高,熔点高,渣面易结壳,对夹杂物吸收效率低等问题,为此,对精炼渣成分进行了设计和计算。

为更好地控制气阀钢中夹杂物的组成,基于现有工艺及设备条件,对钢包渣组成进行了理论计算。为了保护炉衬和包衬,钢包渣中一般会配制一定量的MgO。图5是用Factsage计算得到的不同MgO含量下1500℃时SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO三元相图

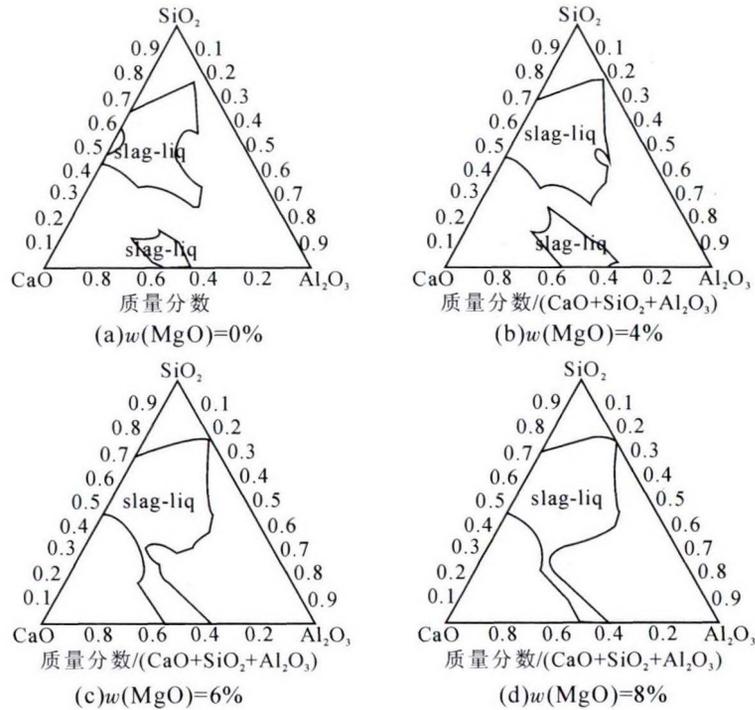


图 5 1 500 °C 时 MgO 含量对 SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 三元相图液相区大小的影响  
Fig.5 Relationship between MgO content and liquid phase region of SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phase diagram (1 500 °C)

中液相区形貌的变化行为。当  $w(\text{MgO})=0\%$  时,液相区被分割成两个部分,且下半部分液相区中 CaO 含量较高 SiO<sub>2</sub> 含量较低,其脱硫能力好并对钢液中 Si 含量的控制有益。当  $w(\text{MgO})=4\%$  时,液相区增大并且液相区开始连成一片。当  $w(\text{MgO})=6\%$  时,液相区最大。当  $w(\text{MgO})=8\%$  时,下半液相区变窄且右移显著不利于造高碱度渣脱硫。因此精炼渣中适量的 MgO 可改善其熔化性能,MgO 的最佳值为 6%,其含量应控制在 4%~8% 之间。

采用 Factsage 计算了 SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-6%MgO 在 1 600 °C 的准三元相图,如图 6 所示。在液相区的下半部分(图 6 方框内),高碱度、高 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的区域中,SiO<sub>2</sub> 的活度为 0.000 1~0.001,低  $a_{(\text{SiO}_2)}$  有利于稳定控制钢水中的硅含量。在此区域内即使渣中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数达到 30~35%,但其活度仍然较低,

仅为 0.001~0.05 甚至更低,钢包渣中的  $a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)}$  低,有利于钢包渣吸收钢液中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物。CaO 活度很高接近于 1 有利于脱硫。此区域内 MgO 的活度接近于 1 有利于保护炉衬。因此,综合考虑气阀钢成分并结合钢包渣吸收夹杂物能力,设计了最佳的精炼钢包渣组成为:CaO 50%~60%,SiO<sub>2</sub> 0~10%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 20%~30%,MgO 4%~8%。

### 3 试验结果及分析

工艺改进前后轧材夹杂物评级结果,图 7 所示。工艺优化后轧材中 B 粗夹杂物大于 1.5 级的比例由 2.2%降低到 0.8%;B 细夹杂物大于 1.5 级的比例由 11.5%降低到 3.1%。C 类夹杂物合格率达到 100% (原工艺 C 粗合格率 94.1%,C 细合格率仅 88.7%)。工艺改进后,气阀钢轧材夹杂物评级综合合格率由改进前的 78%左右提高到 97%以上,大大提高了气阀钢产品品质。

### 4 小结

针对马氏体气阀钢在钢中高硅成分条件下,钢中夹杂物控制困难的问题。通过对轧材夹杂物的系统分析,在理论分析的基础上,研发了新的钢包精炼终渣成分。该技术应用后气阀钢轧材夹杂物合格率为 78%左右提高到 97%以上。

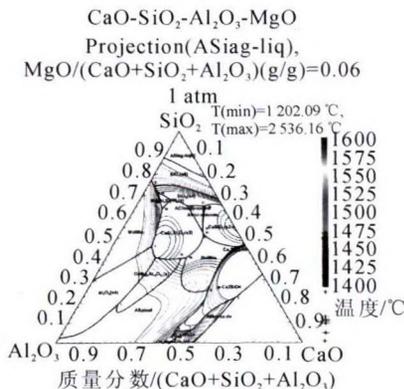


图 6 降温析出相图  
Fig.6 Isotherm of SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO (6%) Phase Diagrams

### 参考文献:

[1] 徐春杰,赵振,徐信锋,等. 钢液夹杂物粒径与上浮时间关系研

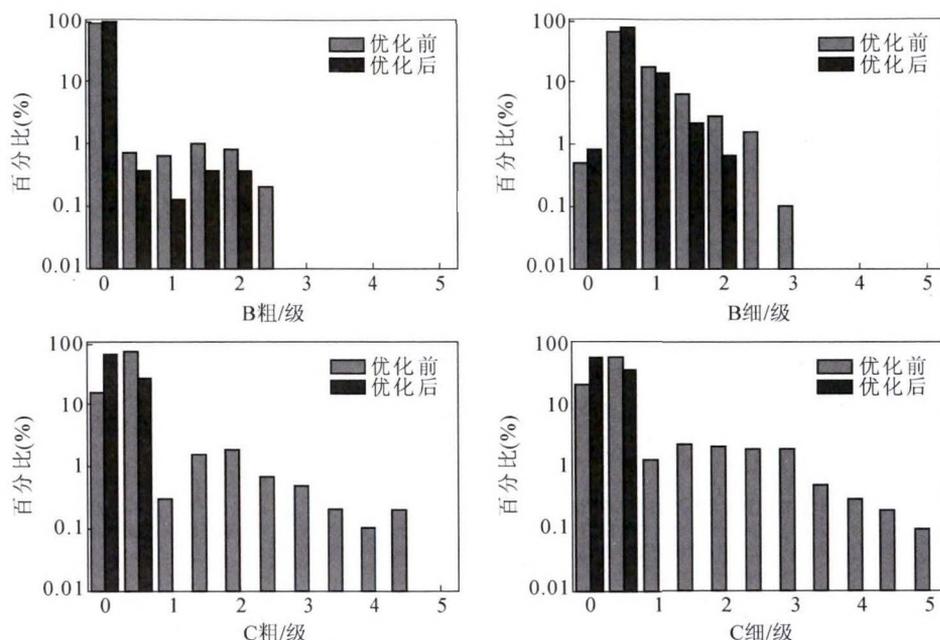


图 7 工艺优化前后轧材 B、C 类夹杂物控制情况

Fig.7 Control of B and C inclusions in rolled materials before and after process optimization

究[J]. 铸造技术,2018,39(4):747-750.

[2] 董履仁,刘新华. 钢中大型非金属夹杂物[M]. 北京:冶金工业出版社,1991,3-6.  
 [3] 李道明. 不锈钢中非金属夹杂物的危害及去除 [J]. 山西冶金, 2008,4: 24-26,55.  
 [4] 王火清, 宋波. 熔炼过程产生的夹杂物对高强度钢疲劳失效的影响[J]. 铸造技术,2017,38(7): 1620-1624.  
 [5] 张欣杰,张欢欢,崔利民. 奥氏体不锈钢夹杂物控制工艺技术探

讨[J]. 中国冶金,2018,26(1): 45-48.

[6] Zhao F X, Liu J P, Huang J H, et al. Analysis of the Wedge Tip Fillet for Central Defects in the Process of Cross Wedge Rolling 4Cr9Si2 Valve steel[J]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2013, 706: 3-6  
 [7] 张爱梅. 非金属夹杂物对钢性能的影响 [J]. 物理测试, 2006,24 (4):42-44.

(上接第 1053 页)

着温度进一步降低。初生硅的尺寸先减小随后会在 700 °C 会出现尺寸的增大。

(3)传统铸造工艺下,吸铸不同温度梯度下,金相组织的演变规律可知:随着温度的下降,初生硅的晶粒尺寸和圆整度都随之降低。

参考文献:

[1] 赵爱民,毛卫民,甄子胜,等. 冷却速度对过共晶铝硅合金凝固组织和耐磨性能的影响 [J]. 中国有色金属学报,2001(5): 827-833.  
 [2] 庞金辉,崔庆玲,王明星,等. 硼对 Al-20Si 合金初晶硅的细化作用[J]. 特种铸造及有色合金,2010,30(1):85-88,127.  
 [3] Gao B, Hao Y, Wang Z, Tu GF, et al. High current pulsed electron beam treatment of hypereutectic Al-17.5Si alloy[J].Transactions of

Materials and Heat Treatment, 2011, 31(9):115-118.

[4] 吴岳壹,陈耘,陈敏,等. 过共晶铝合金汽缸体的挤压铸造[J]. 兵器材料科学与工程,2005(5):35-37.  
 [5] 苏愉钦,黄晓灵,刘晓萍. 高硅铝合金的喷射成形与组织性能研究[J]. 铸造技术,2018,39(11):2490-2493.  
 [6] 王西方, 赵越. 烧结工艺对汽车用高硅铝合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术,2016,37(8):1684-1685,1697.  
 [7] 罗松,魏晓伟,郑丽,等. 高温纯铝低温高硅铝合金熔体混合对组织的影响[J]. 铸造,2013,62(4):337-339.  
 [8] 张威,阎峰云,杨小建,等. 等温处理工艺对触变压铸 Al-30Si 合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(19):20-22.  
 [9] 李庆林. 过共晶 Al-20%Si 合金 Si 相形态的演变及性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2014.  
 [10] 党博,坚增运,常芳娥,等. 熔体温度处理对 Al-25%Si 合金凝固特性及组织的影响[J]. 铸造, 2015, 64(8):789-795.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2020 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52-64 国外发行号:M855 国内定价:25 元/本 海外定价:25 美元/本