

连铸坯质量研究

卢盛意 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

连铸坯质量研究

卢盛意 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2011

内 容 提 要

本书分六个专题,阐述了有关连铸坯质量问题的综合性讨论、连铸常见钢中的质量问题、硅脱氧钢和铝脱氧钢的质量、影响连铸坯质量的一些综合因素、有关包晶钢的理论、影响连铸板坯质量的基础知识等内容。

本书可供从事连铸生产、科研、设计和管理的工作人员使用,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

连铸坯质量研究/卢盛意著. —北京:冶金工业出版社,
2011. 2

ISBN 978-7-5024-5481-4

I. ①连… II. ①卢… III. ①连铸坯—质量—研究
IV. ①TG249. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 014138 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 杨秋奎 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-5481-4

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2011 年 2 月第 1 版, 2011 年 2 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 12 印张; 229 千字; 178 页

36.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

序

就现代钢厂的生产流程结构优化及其全流程的动态运行而言，连铸仍是重要的关键工序。新世纪以来连铸技术仍在持续深化、发展，其中高拉速、恒拉速工艺，连铸坯的质量和铸机装备系统的完善与可靠性仍是十分重要的命题。

得悉北京科技大学卢盛意教授有新著《连铸坯质量研究》问世，备感兴奋。因为卢先生早在1994年就有《连铸坯质量》一书问世，接着又有经修订、补充的第2版于2000年出版，这些工作对推动我国钢铁工业连铸技术的健康发展和技术改进起到了推动作用，很有价值。卢先生的新书《连铸坯质量研究》是2000年《连铸坯质量（第2版）》的延伸和拓展，相信此书将具有指导性，可供钢厂、钢铁设计院、冶金专业院校和有关研究单位的科技人员和广大师生参考。

卢盛意教授已年逾八旬，从教六十年主要讲授钢锭质量与连铸坯质量的专业课，并开展相关的研究，积累了丰富的知识和经验，收集了国内外大量有关连铸坯质量的文献资料，同时又深入国内有关钢厂开展相关的研究，对连铸坯的质量研究造诣颇深。从此次新著中可以看出：卢先生研究的问题或是问题的提出大都来自工业生产实际，针对性很强；同时，重视理论的分析，理论联系实际，从实践中提升理论层次上的认识。新著又对比、梳理了国内外一些典型钢厂的经验，具有很好的参考意义。此外，我感到此书在研究问题的思想方法上，有着引导读者联系实际、深入思考的价值，这是很重要的。

作为卢先生在上世纪五十年代大学期间的学生，我由衷地钦佩老

师为人正派、静心读书、面向实践、深入研究、不断拓展的品格与治学精神。新著的出版，体现了卢盛意教授为我国连铸事业的持续发展，发挥专长，持续奉献的崇高精神。



2011 年 1 月 11 日于钢铁研究总院

中国冶金学教育家——卢盛意

卢盛意，1927年4月出生于辽宁省海城县。1951年毕业于唐山铁道学院冶金系，留校任助教。1952年因国家调整高等院校专业，调至新成立的北京钢铁学院（现北京科技大学），历任冶金系炼钢专业助教、讲师、副教授和教授。

卢盛意教授长期从事钢铁冶金的教学工作。20世纪60年代以前主要讲授普通炼钢学、平炉热工和平炉构造等课程。60年代以后为本科生和研究生主要讲授钢锭质量和连铸坯质量专业课。卢盛意教授结合教学内容、带领本科生和研究生深入钢厂生产实际，对钢锭和连铸坯质量进行了大量的、系统的深入研究，并发表数十篇论文，编著了论述《钢锭质量》和《连铸坯质量（第1版和第2版）》3本专著。

卢盛意教授潜心研究钢锭质量，并提出了一些很有见地的学术观点。例如 Hultgren 等人在 1939 年曾提出“沸腾钢在平衡成分时（即钢液中 $[C] = 0.06\%$ 、 $[O] = 0.04\%$ 时），钢液的氧化性最强”的观点，卢盛意教授经过仔细研究和论证，对上述观点进行了修正，其修改表述为“沸腾钢在 $[C]$ 、 $[O]$ 达到平衡成分时，不但氧化性最强，而且氧化性最容易波动”，即沸腾钢在 $[C]$ 、 $[O]$ 达到平衡成分时能否对锭模内的钢液进行封顶和取得好的封顶效果，应取决于钢液的温度、锰含量、Fe-Mn 硅含量等能否控制在一个很窄的范围内。根据上述观点，卢盛意教授撰写《沸腾钢钢锭质量》论文，获 1985~1987 年中国金属学会优秀论文奖。1989 年他在津巴布韦钢厂讲学时将上述观点进行讲解，取得了良好的教学效果。

卢盛意教授在深入生产实际、发现生产中存在的一些质量问题时，总是悉心研究，将理论与实践密切结合，提出改进建议并与钢厂一道

共同进行试验研究，取得良好的效果。例如对宝钢沸腾钢钢锭 BP₂₀ 窄面出现裂纹缺陷，他提出在浇注过程采取加入少量 MgAl 合金，调整初始沸腾程度等措施而获得明显效果；对上钢一厂、南钢、太钢、安钢无缝钢管的发纹缺陷进行了仔细考察、研究，得出发纹缺陷的生成是由于钢中硅酸盐夹杂在钢锭加热时的固体氧化所致，经过采取减少钢锭中硅含量、适当增加钢中铝含量，使钢中夹杂物多以 Al₂O₃ 存在，从而大幅度地减少了发纹缺陷。针对我国很多企业引进德马克小方坯连铸机，而这类小方坯常出现脱方和角裂漏钢的情况，卢盛意教授和他的研究生进行了系统研究，并归结出此种小方坯角裂漏钢的两种类型：一种漏钢是单独由铸坯鼓肚引起，另一种漏钢则是以铸坯鼓肚为主、脱方为辅引起。并指出德马克小方坯连铸机原型在足辊和结晶器设计上存在的问题。经过钢厂采取相应措施，这一问题得到了解决。

卢盛意教授知识渊博，经验丰富，为人正派，一直坚持精心读书，研究学问，尤其是对于钢的凝固、成形和质量方面，学问功底深厚，涉猎范围很宽，时有独到见解。他几十年教书育人，培养了一批又一批的钢冶金方面的专门人才，为我国的冶金事业做出了积极的贡献。

卢盛意教授退休后，仍然悉心研究国内外有关钢的质量问题。进入 21 世纪以来已先后写出三十多篇连铸坯质量、品种等方面的文章，在刊物上发表，充分体现了卢盛意教授为我国炼钢事业的持续发展发挥专长、奉献余热的高尚精神。

《炼钢》编辑部

前 言

本书是我编写的《连铸坯质量（第2版）》一书有关内容的延伸和扩展。本书对近年来一些国外和国内刊物有关连铸坯质量的多方面的问题进行了整理，对连铸坯用硅脱氧和用铝脱氧的历史演变进行了跟踪，指出在优化钢包渣的情况下连铸坯有用硅脱氧取代铝脱氧的趋势，列出一些常见钢种（从超低碳钢到高碳钢）为了保证钢质量在生产过程中应注意的事项，此外对中间包不设挡墙的可能性进行了探索。

本书由24篇已发表于《炼钢》和《连铸》的文章、一篇发表于《太钢科技》的文章、一篇未发表的文章及一篇讲课稿组成。在编写本书时，对一部分原稿进行了修改，并分为对连铸坯质量问题的综合性讨论、连铸常见钢种的质量问题、硅脱氧钢和铝脱氧钢的质量、影响连铸坯质量的一些综合因素、有关包晶钢的讨论、影响连铸坯质量的基础知识6个专题进行研究和探讨，以便于钢铁生产领域科研、操作、教学、管理人员阅读参考。

殷瑞钰院士在百忙之中对本书进行了审阅并写了序言。吕湘提总工对本书进行了审阅。本书的出版，得到了《炼钢》杂志编委会，特别是潘荫华总工的大力支持，鞍山钢铁集团公司、天津冶金集团有限公司、福建省三钢集团有限责任公司、安阳钢铁集团有限责任公司、南京钢铁联合有限公司和山钢集团济南钢铁股份有限公司给予了帮助。在此一并表示感谢！

本书对问题的论述不妥之处，敬请指正。

卢盛意

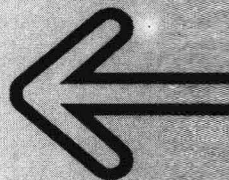
2010年12月

目 录

1 有关连铸坯质量问题的综合性讨论	1
有关连铸坯质量的几个问题（一）	3
有关连铸坯质量的几个问题（二）	16
改进连铸薄板钢质量的几项操作	22
2 连铸常见钢中的质量问题	31
连铸轮胎钢丝钢的质量	33
连铸钢轨钢的质量	39
连铸滚珠轴承钢的质量	46
连铸管线钢的质量	52
冷轧薄钢板的表面缺陷	60
连铸板坯和连铸异型坯腹板中心内裂形成原因的探讨	64
3 硅脱氧钢和铝脱氧钢的质量	67
用硅代替铝脱氧来消除连铸水口堵塞	69
无缝钢管的发纹问题	77
铝含量对钢质量的影响	83
板坯连铸中间包挡墙的设置问题	87
4 影响连铸坯质量的一些综合因素	91
结晶器保护渣的润滑作用和水平传热	93
用多模式电磁搅拌控制结晶器内的钢水流动形式	102
电弧炉（EAF）钢中氮含量的控制	108
电弧炉内泡沫渣的形成条件	112
影响高碳钢连铸小方坯中心偏析的因素	119
5 有关包晶钢的理论	125
包晶钢的碳含量及相关的凝固收缩	127

有关连铸坯质量的几个问题（三）	132
6 影响连铸板坯质量的基础知识	137
连铸板坯包晶钢的纵裂问题	139
板坯连铸拉速提高对铸坯质量的影响	144
板坯连铸拉速变化对铸坯质量的影响	149
机型和结晶器对板坯质量的影响	155
减少连铸板坯中心偏析的措施	161
结晶器振动对铸坯表面质量的影响	166
连铸异型坯的主要缺陷	173

1 有关连铸坯质量问题的 综合性讨论



本专题论述了有关连铸坯质量的主要环节，还论述了与薄板坯质量有关的几项操作。

- ☆ 有关连铸坯质量的几个问题（一）
- ☆ 有关连铸坯质量的几个问题（二）
- ☆ 改进连铸薄板钢质量的几项操作

有关连铸坯质量的几个问题（一）

摘 要：介绍了对理解连铸坯质量有用的钢锭知识；讨论了连铸坯的形状缺陷及相关质量问题、水口堵塞问题以及结晶器保护渣的选用。

关键词：连铸坯；钢锭；铸坯质量

1 钢锭和连铸坯质量的对比^[1~3]

钢锭和连铸坯有许多相似之处，对于过去从事钢锭质量研究的人转入从事连铸坯质量的研究时，他们在钢锭质量研究上取得的认识和体会，对于研究连铸坯质量也是很有帮助的。以下将镇静钢钢锭与连铸坯做一对比，因为连铸坯都是镇静钢。

笔者经对国内大中小镇静钢钢锭的考察，将镇静钢钢锭分为大锭和小锭，横断面不大于 266.7mm (10.5in) 的钢锭为小锭，配 650mm 轧机；横断面不小于 508mm (20in) 的钢锭为大锭，配 750mm 轧机。大锭和小锭的结构和偏析不同，镇静钢大锭的结构和偏析有严格的对应关系，大锭的结构和偏析如图 1 所示。

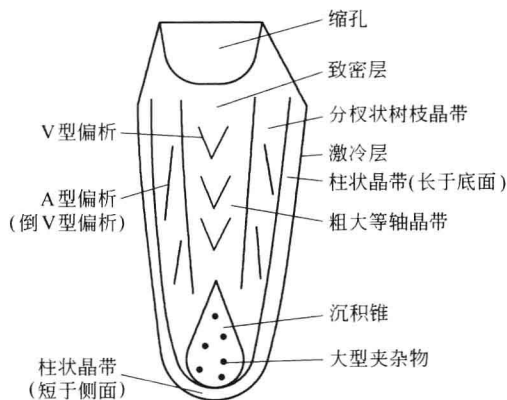


图1 大钢锭的结构与偏析

镇静钢小锭的结构和偏析与大锭不同，小锭没有 A 型偏析，也没有沉积锥，这主要是因为小锭没有充分发育的分枝状树枝晶。

钢水在钢锭模内凝固时有一个收缩过程，从钢水到室温钢锭的总收缩 $V_{\text{总}}$ 由

两部分组成，一部分是线收缩 $V_{\text{线}}$ （即钢锭外壳向内收缩所占的体积），另一部分是体积收缩 $V_{\text{体}}$ （即钢锭内部缩孔和疏松所占的体积）。钢水含碳量不同时，如果姑且认为它们的 $V_{\text{总}}$ 相等，都等于 11.8%，但它们各自的 $V_{\text{线}}$ 和 $V_{\text{体}}$ 却相差很多，见表 1。

表 1 钢锭凝固的收缩特征

钢 锭	$V_{\text{线}}$	$V_{\text{体}}$	在钢锭表面上的波痕	黏膜倾向
高碳钢	小	大	浅	大
低碳钢	大	小	深	小

表 1 关于钢锭凝固收缩的认识可以联系到连铸坯，有关 $V_{\text{线}}$ 与连铸坯质量的关系，见表 2。

表 2 连铸坯凝固的收缩特征

连 铸 坯	在弯月面附近初始 形成坯壳的 $V_{\text{线}}$	振痕	黏结倾向	表面裂纹生成倾向
高碳钢 ($C > 0.40\%$)	小	浅	大	小
中碳钢（或称包晶钢） ($C \approx 0.1\%$)	大 ($C = 0.1\%$ 时最大)	深	小	大

从表 1、表 2 可见，钢锭和连铸坯的凝固收缩与质量的关系有相似之处。

奥氏体不锈钢大锭和电渣重熔锭的结构都由穿晶（柱状晶一直生长到锭心）组成，它们没有分枝状树枝晶，也无粗大等轴晶，所以它们既无 A 型偏析也无沉积锥，但因它们都由穿晶组成，所以它们的 $V_{\text{线}}$ 将会更大一些。

连铸坯的结构和偏析与镇静钢小锭相近，在横向上由激冷层、柱状晶、等轴晶组成，在纵向上有中心偏析和 V 型偏析。连铸坯没有 A 型偏析也没有沉积锥。连铸坯由于冷却强度大于小锭，所以柱状晶长于小锭，柱状晶越长，中心偏析越严重，但如果柱状晶的长度发展到穿晶时，中心偏析的严重程度不但不继续增加，反而会显著减少，但要想得到穿晶，必须具有一定的条件：（1）断面小；（2）高碳钢；（3）浇注温度高和二冷强度高。例如 105mm × 105mm 小方坯， $C = 0.55\% \sim 0.85\%$ ，浇注温度高和二冷强度高时可以得到穿晶，中心偏析显著减少。高碳钢的柱状晶长于中、低碳钢，有利于得到穿晶^[4]。

在采用轻压缩来减少连铸板坯中心偏析的文章中，有的作者也用到 A 型偏析一词^[5]，该处所指的 A 型偏析与模铸大锭的 A 型偏析截然不同，该处所指的 A 型偏析是由于轻压缩过度，使轻压缩前连铸坯中的 V 型偏析反方向逆转成为所谓的 A 型偏析，如果轻压缩适度，既可以消除 V 型偏析，也不会出现 A 型偏析。

2 连铸坯的形状缺陷^[3]

模铸锭没有形状缺陷, 连铸坯有形状缺陷问题。形状缺陷随连铸坯的形状和大小而异。连铸坯的形状缺陷不仅仅是铸坯外形问题, 还密切联系于连铸坯的裂纹和漏钢等问题。

连铸板坯的形状缺陷是窄面凸出和宽面鼓肚。板坯窄面的正常形状应为微凹。窄面凸出容易引起偏离角内裂或凹陷, 窄面凹入太多容易产生三重点裂纹。鼓肚有无对连铸板坯和小方坯质量的影响见表 3。

表 3 鼓肚有无对板坯和小方坯质量的影响

鼓 肚 位 置		板 坯	小 方 坯
1	弯月面处	有 可能引起宽面纵裂和 宽面中部黏结漏钢	有 不会引起表面纵裂, 可能引起黏结, 但不会引起黏结漏钢
2	结晶器下部 和其下方	有 可能引起偏离角内裂漏钢	有 可能引起偏离角内裂漏钢
3	二冷区	有 可能引起柱状晶晶间裂纹	无 可能引起偏离角内裂漏钢
4	最后凝固区	有 可能引起中心偏析和中心裂纹	无 —

连铸小方坯的形状缺陷是凸肚和脱方。小方坯偏离角内裂漏钢有两种类型, 一种类型是单独由鼓肚引起的, 另一种类型是以鼓肚为主脱方为辅引起的。根据在天津第二炼钢厂实测, 150mm × 150mm 小方坯, 如果在离开结晶器时的鼓肚虽没有凸到引起漏钢的程度, 但如果在二冷区以后的脱方大于 15% 时也会引起漏钢。小方坯这两种漏钢类型都与鼓肚有关, 如果没有鼓肚, 脱方再大也不会单独引起漏钢。

小方坯拉速 (v_c) 的提高受到坯壳角部和面部凝固速度不同的限制, 为了改善凝固的均匀性和克服单锥度结晶器的缺点, 邯钢、马钢、武钢引进了钻石型结晶器。小圆坯不存在小方坯角部和面部凝固速度不同的问题, 所以 v_c 可以高于小方坯。小方坯为了提高 v_c 也可以采用设计思路类似于小圆坯的 Concast 凸形结晶器。钻石型结晶器不但适用于小方坯, 也适用于板坯窄面 (称为 Diaface 结晶器), Mansfield AK Steel 在中等厚度的板坯连铸机上浇注 409 不锈钢时, 对 Diaface 结晶器进行了研究。单锥度结晶器的缺点是结晶器锥度不符合坯壳在结晶器内的凝固收缩, 在结晶器上部坯壳的 $V_{\text{线}}$ 大于结晶器的锥度, 形成较大空隙

($C=0.1\%$ 时形成的空隙最大),在结晶器出口处,坯壳的 $V_{\text{线}}$ 小于结晶器的锥度,坯壳受到挤压。

天津二钢连铸小方坯曾出现内裂,笔者认为内裂的形成源于二冷水不均匀引发的形状缺陷,见图2。

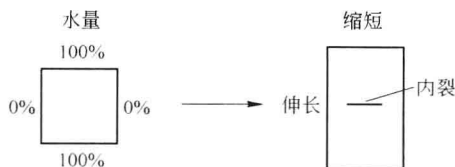


图2 二冷水不均引起内裂

异形坯腹板的纵裂倾向大于板坯,这是由于异形坯的凸缘顶部在凝固初期,可能向外变形,使腹板受到向外的拉力产生纵裂。

3 连铸机机型^[6]

连铸机机型的演变经历了立式→弧形→立弯式乃至又回到立式的过程,这在很大程度上反映了对铸坯从要求产量到要求质量的转变。

此前建立的板坯连铸机大多为弧形。为了提高铸坯洁净度、避免夹杂物在内弧富集、消除IF钢在连续退火后成型时在内弧钢带表面出现铅笔型气泡和消除在铸坯内弧出现横裂^[7]、偏离角纵向凹陷、星形裂纹及与弧形铸机有关的梯形,目前新建或改建的板坯连铸机多为立弯式或立式。

2000年5月Terni钢厂决定建立最新一代用于生产高合金钢(主要是不锈钢)的立式工业化CSP连铸机,冶金长度为9.265m。

神户钢厂认为滚珠轴承钢为了避免夹杂物在铸坯内弧富集,最好用立弯式或立式连铸机来生产。

4 连铸中间包水口堵塞问题^[3]

自连续铸钢问世以来,由于中间包水口内径小于模铸钢包水口内径,因而连铸中间包水口堵塞成为突出问题。水口堵塞使 v_c 降低甚至使注流中断。 v_c 降低还使振痕深度增加。水口内的黏附物一旦被钢水冲掉,大量钢水随之涌出,引起结晶器液面起伏,在这段时间内拉出的铸坯将被降级或报废。

水口堵塞是由于钢水中高熔点的 Al_2O_3 (熔点 $2020^{\circ}C$)、 CaS (熔点 $2450^{\circ}C$)、 $Al_2O_3 \cdot MgO$ 、 AlN 等黏附在水口内壁上引起的。关于水口堵塞的机理和消除水口堵塞的研究,迄未中断。

4.1 挡渣和测钢包渣层厚度

美国Edgar Thomson钢厂的两座250t BOF在2000年3月和11月开始用VAI公司开发的气动挡渣塞棒(pneumatic slag stopper)来挡渣^[8],使钢包内的渣层厚度从127mm减少到91.44mm。VAI-Con是上述挡渣棒的改进型,我国包钢和

本钢都已采用 VAI-Con 塞棒挡渣。

出钢时进入钢包的氧化渣的 ($\text{FeO} + \text{MnO}$) 应被还原到 4% ~ 8%, 否则 $3(\text{FeO}) + 2[\text{Al}] \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$, 使水口堵塞和使铸坯表面产生缺陷, 但如果 ($\text{FeO} + \text{MnO}$) 被还原过度, ($\text{FeO} + \text{MnO}$) < 2%, 会生成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 及正常含量的 Al_2O_3 夹杂, 这些夹杂也会使水口堵塞和使铸坯表面产生缺陷。

用钢棒测渣层厚度的误差可达 $\pm 31.75\text{mm}$, U. S. 钢研所等单位开发的雷达测厚法是一种不与被测物体接触的测量方法。据介绍这种方法的优点是: (1) 在远处测量; (2) 测量时间短 (30 ~ 45s); (3) 安全; (4) 精度高; (5) 电子设备和传感器耐用可靠^[9]。

4.2 BHP Steel 减少板坯连铸水口堵塞的经验^[10]

4.2.1 钢轨钢

钢轨钢是 Mn-Si 镇静钢。钢中各元素质量分数为: C 0.77%、Mn 0.90%、Si 0.28%。他们期望这种钢中的 Al_2O_3 夹杂尽量少。 Al_2O_3 夹杂含量多, 由于滚动接触疲劳, 使钢轨头部开裂 (heading), 这是因为 Al_2O_3 夹杂容易偏析到钢轨头部。 Al_2O_3 夹杂含量多还使中间包滑动水口堵塞, 使连浇炉数受到限制。

BHP Steel 的 New Castle 钢厂 (该厂在 1999 年关闭) 的经验是在钢包处理时取出的最后 1 个试样的 $[\text{O}] = 0.0020\% \sim 0.0028\%$ (1530℃ 左右), 可以连浇 10 炉, $[\text{O}] < 0.0020\%$ 时, 引起水口堵塞; $[\text{O}] = 0.0027\% \sim 0.0033\%$ 时, 钢轨钢中 MnO-SiO₂- Al_2O_3 三元系夹杂的 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20\% \sim 30\%$, 这种夹杂的熔点最低。

4.2.2 管线钢

BHP Steel 的 Port Kembla 钢厂生产的电阻焊管线钢是 Al 镇静钢。该厂生产这种钢时用钙处理钢水将固态 Al_2O_3 转化为液态 C_{12}A_7 , 已有 20 多年的历史。生产的这种钢要求含硫低, $[\text{S}] < 0.012\%$, 刚喷入 CaSi 后, $[\text{Al}] = 0.02\% \sim 0.03\%$, $[\text{Ca}] = 0.0050\%$ 。钢包处理后 $[\text{Ca}]/[\text{Al}] \geq 0.2$ 时, 成品管的钩形裂纹 (hook crack) 最少。

4.2.3 弹簧钢

New Castle 钢厂浇注弹簧钢时钢包防护套管 (ladle shroud) 堵塞严重。钢中各元素质量分数为: C 0.59%, Mn 0.8%, Si 1.9%, Cr 0.175%, Al 0.025%。

可见, 弹簧钢是铝镇静钢, 堵塞物主要由 CA_2 (熔点 1765℃)、CA (熔点 1597℃) 组成。为了消除堵塞, 要将 Al_2O_3 转化为 C_{12}A_7 。弹簧钢因含硅高, 所加 FeSi 中的钙可能足以将 Al_2O_3 转化为 C_{12}A_7 。例如, 若 FeSi 中 $\text{Ca} = 0.03\%$, 所加 FeSi 带入钢中的 $[\text{Ca}] = 0.0070\%$ 。