DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.10.020

非调质曲轴钢 S38MnSiV 低温轧制技术研究

朱　叶

(石钢京诚装备技术有限公司 技术中心,辽宁 营口 115000)

摘　要:采用"100 t 转炉→120 t LF→120 t VD→ϕ450 圆坯连铸→铸坯加热→开坯→8 架连轧(低温控轧)→控制冷却"工艺生产了 ϕ150 mm 非调质曲轴用 S38MnSiV 钢。通过低温控制轧制和正常轧制进行了对比试验研究。结果表明,与正常轧制相比,当连铸坯均热温度为 1 210~1 260 ℃,开坯温度为 1 000~1 050 ℃,开坯后冷却速度控制到 0.2~0.3 ℃/s,进入连轧温度为 880~895 ℃;轧后冷却速度控制到 0.3~0.4 ℃/s 时,S38MnSiV 钢 1/2R 珠光体球团晶粒度 6.5~5.0 级,提高 2 级;心部 6.5~4.0 级,提高 3.5~1.0 级;带状 2.0 级,提高 0.5 级;力学性能差异较小。

关键词:低温控轧;非调质钢;S38MnSiV;晶粒度;带状组织

中图分类号:TF771　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)10-0982-04

Research on Low Temperature Rolling Technology of Non-quenched Crankshaft S38MnSiV Steel

ZHU Ye

(Technical Center, Shigang Jingcheng Equipment Development & Manufacturing Co., Ltd., Yingkou 115000, China)

Abstract: Using '100 t converter 120 t→ 120 t LF→ 120 t VD →ϕ 450 round billet continuous casting →slab heating → slab opening →eight continuous rolling (low temperature controlled rolling) to control cooling process', 150 mm in diameter crankshaft with S38MnSiV non-quenched and tempered steel was prepared. A comparative experiment was conducted between controlled rolling at low temperature and normal rolling. The results show that, compared with normal rolling, when the billet's soaking temperature is 1 210~1 260 ℃, the slab opening temperature is 1 000~1 050 ℃, the cooling rate after slab opening is controlled to 0.2~0.3 ℃/s, the rolling temperature is 880~895 ℃. When the cooling rate of S38MnSiV steel is controlled to 0.3~0.4 ℃/s, the grain size of 1/2R pearlite pellets of S38MnSiV steel is 6.5~5.0 grades, increasing by 2 grades. The heart level is 6.5~4.0 grades, and the improvement is 3.5~1.0 Grade 2.0 in banded structure, 0.5 in increase; There is little difference in mechanical properties.

Key words: low temperature rolling; non quenched and tempered steel; S38MnSiV; grain size; bands structure

含氮非调质钢以其性能优良、高效节能,并且有利于环境保护等突出优点,被誉为"绿色钢材",倍受世界先进国家青睐[1]。生产的非调质曲轴钢 S38MnSiV 热轧钢棒,经锻造加工成曲轴毛坯后,利用锻后余热进行正火控制冷却处理,改善锻后组织,提高综合机械性能[2]。在不进行调质的情况下,达到调质态轧材力学性能。在冶炼过程中添加 Nb、V、Ti 微合金化元素[3],通过低温轧制,设计合理的工艺参数以保证产品质量。因此,调整化学成分相关生产工艺的控制,包括氮、氧、氢含量控制难度比较大,尤其是氮含量的控制。在加热过程中,既要保证 Nb、V、Ti 充分固溶于奥氏体晶格中,又要保证出炉温度尽量低,为低温轧制做准备。本文通过合理控制终轧温度,以期对 S38MnSiV 热轧钢棒的晶粒度和力学性能的提高提供依据。

1　成分及工艺流程

1.1　化学成分要求

非调质钢的力学性能取决于基体显微组织和析出相的强化[4]。S38MnSiV 非调质钢是在中碳锰钢的基础上加入 Nb、V 微合金化元素,使其在加热过程中固溶于奥氏体中,因奥氏体中 Nb、V 的固溶度随着冷却而减小,微合金元素 Nb、V 将以细小的碳化物和氮化物形式在先析出的铁素体和珠光体中析出。这些析出相与母相保持共格关系,以使钢强化。曲轴用 S38MnSiV 钢化学成分如表 1 所示。

内控化学成分的设计既要保证曲轴强度的同时,还要兼顾塑、韧性设计。冶炼过程按目标成分进行控制,可以保证钢材的力学性能。同时 P、S 要求极低,脱氧要完全,钢液尽可能纯净。

收稿日期:2020-06-19

作者简介:朱　叶(1982-),女,河北辛集人,硕士,工程师.主要从事钢的轧制技术方面的工作.

E-mail:1315290535@qq.com

表1 试验研究用S38MnSiV化学成分 w(%)

Tab.1 Chemical composition of S38MnSiV for experimental steel

	C	Si	Mn	Cr	Ni	V	Cu	N	P	S
标准要求	0.41～0.45	0.55～0.70	1.40～1.55	0.10～0.20	≤0.15	0.11～0.15	≤0.20	0.012～0.020	≤0.025	≤0.020

备注：O≤20×10⁻⁴%，内控≤12×10⁻⁴%，H≤1.5×10⁻⁴%。

1.2 生产工艺流程

采用“100 t 转炉→120 t LF→120 t VD→ϕ450 圆坯连铸→铸坯加热→开坯→8 架连轧(低温控轧)→控制冷却→锯切→入坑缓冷→表面检查→倒棱→修磨→探伤→包装→入库”生产工艺生产的 ϕ150 mm 非调质曲轴用 S38MnSiV 钢。

2 主要生产工艺要点

2.1 冶炼过程控制

S38MnSiV 非调质钢炼钢过程的主要控制要点是[N]含量控制，VD 破空后喂氮化锰线，转炉和精炼要注意 Mn 控制。

(1)转炉高拉碳出钢[5]，避免钢水过氧化，出钢过程依次加入钢芯铝 3 kg/t、合金、渣料，炉内少量留钢、严禁下渣，出钢后按 t 钢 0.5 kg/t 喂入铝线，LF 到位 Mn 质量分数按 1.10%~1.20%控制。

(2)LF 过程使用铝粒和碳化硅进行扩散脱氧，提高炉渣的还原性，降低炉气中的氧分压，减少 LF 过程二次氧化[6]。合理的供电制度，尽快造出高碱度还原渣。根据标准对钢中氧含量和夹杂物要求，在生产过程中对钢水中的氧含量要严格控制，在还原渣下进行 25 min 以上的搅拌(钢包底吹氩搅拌)，对钢水脱氧脱硫，并可一定程度的吸附脱氧产生的钢中夹杂物。在此过程中，调整化学成分达到内控要求。

(3)VD 高真空(67 Pa 以下)保持时间≥15 min；真空保持期间能观察到钢液面有明显裸露，以保证真空脱气效果。破空后测温取样、氧氮样，按目标喂氮化锰线调整氮含量(注意残锰)。按 1.2 kg/t 钢加覆盖剂，均匀覆盖整个渣面。

VD 处理后软吹时间不低于 20 min，促进夹杂物上浮。

(4)弧形连铸机(R14 m)，四机四流，断面 ϕ450 mm，结晶器电磁搅拌(电流为 150 A，频率 2 Hz)，末端电磁搅拌(电流为 100 A，频率 8 Hz)。中间包容量 30 t，中间包密封吹氩保护浇铸。VD 后钢水成分和温度合格后上台浇铸。结晶器液位自动控制，铸坯拉速为 0.43 m/min。

2.2 轧制过程控制

用 ϕ450 圆铸坯，同时冷装入炉，抽取两支连铸坯进行轧制对比试验，一支正常轧制，一支控制轧制。正常轧制的一直连铸坯出炉后，经过水除磷后，直接进入开坯机往复轧制开坯成 270 方，经过液压剪切头后进入 8 架连轧机组。低温轧制的一支连铸坯经过除磷后在开坯机前等待，进入开坯机的温度为 1 000～1 050 ℃，经过开坯机往复轧制后，在开坯机延伸辊道进经过喷水冷却环(如图 1 所示)；进入连轧温度为 880～895 ℃，连轧后安装两个风筒鼓风冷却(如图 2 所示)。加热炉温度控制如表 2 所示。

正常轧制和低温轧制的对比坯料从出炉后开始记录温度和时间，一直到两支坯料到出连轧，对比冷却速度对轧材内部质量的影响，如表 3 所示。



图 1 开坯后喷水装置

Fig.1 Water cooling device after bloom



图 2 连轧后鼓风装置

Fig.2 Air cooling device after continuous rolling

表2 加热制度

Tab.2 Heating schedule

项目	预热区	1 区	3 区	5 区	7 区	9 区	11 区	13 区	15 区	开轧
工艺要求温度 /℃	≤830	850±50	980±50	1 080±50	1 160±30	1 210±30	1 250±20	1 255±15	1 255±15	1 100~1 200
实际加热温度 /℃	650	801	986	1 106	1 188	1 210	1 234	1 255	1 260	1 180
实际加热时间 / 分	117	40	32	34	33	43	52	51	51	-

表 3 正常轧制坯料和低温轧制坯料在不同时间的轧制温度

Tab.3 Rolling temperature of normal rolling stock and low temperature rolling stock at different time

位置	正常轧制		低温轧制	
	温度 /℃	时间 / 分:秒	温度 /℃	时间 / 分:秒
出炉温度	1 260	0:00	1 259	0:00
除磷后温度	1 130	0:47	1 154	0:47
开坯后温度	1 042	5:15	1 050	3:56
喷水冷却温度	-	-	1 030	4:31
进连轧前温度	1 014	7:33	895(头部)880(中部)	13:34
连轧后温度(轧件头)	963	9:45	880	15:38
轧后吹风温度	950	9:58	875	16:10

从表 3 可以看出,正常轧制和低温轧制在冷却速度上是不一样的。由于轧件出口速度 0.75 m/s,轧件全长约 54 m,轧件运行 72 s。每隔 15 s 测一次,可测 4 次。尽管测量数据有偏差,但是仍有代表性。根据文件检索,在 0.1~0.5 ℃/s 冷却速率范围内,其组织为铁素体和珠光体[7]。不同冷却速率对应的实际晶粒度的级别不同。

(1)正常轧制时,冷却速度为 0.17 ℃/s,连轧前进行喷水冷却,冷却速度为 0.2~0.3 ℃/s。

(2) 连轧后进行吹风冷却, 冷却速度为 0.3~0.4 ℃/s。

(3)连轧后自然冷却,冷却速度为 0.4 ℃/s。

3 结果分析

本次生产共计 3 炉, 过热度控制在 43~55 ℃, 其中第三炉过热度最低,低倍质量最好,故选取第三炉 2 支连铸坯进行对比试验。轧材化学成分、非金属夹杂物、低倍全部满足技术协议要求。

3.1 钢材气体含量分析

钢中氮、氢和氧含量的检验结果如表 4 所示,通过控制转炉吹炼终点碳含量、原料控制和合金烘烤 LF 造还原渣脱氧、钢包“软吹氩”操作和中间包保护浇铸等措施[8,9],生产的 S38MnSiV 钢材氮、氢和氧含量符合标准要求。

表 4 钢材气体化学成分 w(%)

Tab.4 Chemical composition of steel gas

炉号	[N]	[H]	[O]
8026180	0.014 50	0.000 12	0.000 81
8026181	0.013 42	0.000 12	0.001 11
8026182	0.013 74	0.000 12	0.000 97

3.2 非金属夹杂物分析

本次生产增氮采用 VD 破空后,喂入氮化锰线,反映剧烈,钢水氧化性较强,但是通过后期 VD 处理后软吹时间不低于 20 min, 促进夹杂物上浮。连铸进行保护浇注等措施,夹杂物检验合格,如表 5 所示。

3.3 高倍结果分析

带状、魏氏组织脱碳层检验结果如表 6 所示。

曲轴钢晶粒度按照铁素体围成的珠光体球团进行评级,不同位相的珠光体球团评为一个晶粒,故低温轧制时, 使固溶在奥氏体的 Nb、V 微合金化元素随着温度的降低,固溶度减小,微合金元素 Nb、V 将以细小的碳化物和氮化物形式在先析出的铁素体和珠光体中析出。这些析出相与母相保持共格关系,使钢强化。所以低温轧制技术控制的最终目的是晶粒度降低。本次试验低温轧制比正常轧制不同位置晶粒度均有相应提高。

3.4 力学性能分析

力学性能检验结果如表 8 所示。正常轧制与低

表 5 非金属夹杂物级别

Tab.5 Non metallic inclusion level

项目	A 细 / 级	A 粗 / 级	B 细 / 级	B 粗 / 级	C 细 / 级	C 粗 / 级	D 细 / 级	D 粗 / 级	DS/ 级
标准要求	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤1.0	≤4.5
8026182	0.5	0.5	0.5	0	0	0	1.0	0.5	3

表 6 正常轧制与低温轧制带状、魏氏组织、脱碳层对比

Tab.6 Comparison of bands, widmanstatten structure and decarburized layer between normal rolling and low temperature rolling

项目	带状 / 级	魏氏组织 / 级	脱碳层 /mm
标准要求	≤2.0	无	2.25
低温轧制	2.0	无	0.2
正常轧制	1.5	无	0.3

表 7 正常轧制与低温轧制不同位置晶粒度对比

Tab.7 Comparison of grain size between normal rolling and low temperature rolling

位置	正常轧制 -1/ 级	低温轧制 -1/ 级	正常轧制 -7/ 级	低温轧制 -8/ 级
皮下	8.0	8.0	8.0	8.5
1/2R	4.5~3.0	6.5~4.5	3.0~4.5	6.5~5.0
中心	3.0	6.5~3.0	3.0	6.5~4.0

表 8 正常轧制与低温轧制力学性能对比

Tab.8 Comparison of mechanical properties between normal rolling and low temperature rolling

项目	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)	面缩率(%)	KU2 冲击功 /J
标准要求	≥870	≥550	≥16	≥36	≥30
正常轧制 -1	904	593	18.5	55	48.4/58.1/43.4/38.8
正常轧制 -7	912	607	19.0	50	
低温轧制 -1	882	595	18.5	49	49.0/53.9/48.1/38.8
低温轧制 -8	877	595	18.0	46	

温轧制力学性能无明显差异。

作为生产曲轴的原材料，之后还要进行感应加热，加热温度约 1 200 ℃。原材进行控制轧制和控制冷却对最终成品性能影响程度尚未研究。故与钢厂的下游用户联合研发，通过调整非调质曲轴用钢的微量合金元素，逐步达到提高曲轴综合机械性能的目的[10]，是避免钢厂质量过剩和机械加工厂问题解决的进一步研究方向。

4　结论

(1)含氮非调质钢 S38MnSiV 具有高强、高韧等性能，在生产曲轴时，只需空冷以作为正火工艺，具有可以节减热处理工序，消除热处理带来的污染，缩短生产周期等优点。

(2)VD 破空后喂入氮化锰线，可以保证氮含量合格，后期经过软吹、保护浇注等措施可以满足夹杂物要求。

(3)控制轧后冷却速率 0.1~0.5 ℃/s 时，S38MnSiV 钢 1/2R 珠光体球团晶粒度 6.5~5.0 级，提高 2 级，提高了钢的韧性，但是强度并未有显著提高。

参考文献：

[1] 王开远. 丹东五一八内燃机配件厂. 汽车发动机曲轴技术条件标准新旧版本比对[M]. 车标准化, 2006.

[2] 王荣武，卢秉军. ϕ160mm 高强韧性非调质钢 S38MnSiV 的研制[J]. 特殊钢，2007，28(6):54-55.

[3] 董成瑞，任海鹏，金同哲，等. 微合金非调质钢[M]. 北京:冶金工业出版社，2000:3.

[4] 范连明. 转炉矩形坯生产非调质曲轴钢S38MnSiV 工艺实践[J]. 本钢技术，2010(4):12-14.

[5] 刘超芽，贺鹏，罗继来. 45 t 顶吹转炉拉碳出钢工艺探索与实践[J]. 浙江冶金，2014(4):35-38.

[6] 魏巍，李虹. BOF→LF→VD→CC 流程生产 38CrMoAl 钢实践[J]. 炼钢，2010，35(1):76-78.

[7] 张红云，赵阳，陈礼清，等. 冷却速率对 S38MnSiV 非调质钢显微组织的影响[J]. 汽车工艺与材料，2013(6):38-42.

[8] 王文军，刘金刚，李战军，等. 钢包软吹氩对钢中夹杂物去除效果的研究[J]. 钢铁，2010，45(9):28-31.

[9] 王立涛，薛正良，张乔英，等. 钢包炉吹氩与夹杂物去除[J]. 钢铁研究学报，2005，17(3):34-38.

[10] 周亚倬，金文辉，于勤，等. 非调质钢曲轴用材发展趋势[J]. 热处理技术与装备，2018(4):61-64.

(上接第 977 页)

3　结论

(1)铸轧速度增加时，共晶硅的平均长度，平均长径比，平均面积都随之减小。即提高冷却速度可以细化共晶硅尺寸。

(2)铸轧速度较小时，共晶硅为针片状；当铸轧速度较大时，针片状共晶硅转变为纤维状。提高冷却速度可以改变共晶硅的形态。

(3)铸轧速度较高时，铸轧板材可能会出现共晶硅反偏析的现象。板材边部组织的硅含量高于心部组织。

参考文献：

[1] 陈淑英, 王建中. AL-Si 合金在汽车工业中的应用前景及研究现状[J]. 辽宁工学院学报, 2000, 20(3): 5-7.

[2] 熊艳才, 刘伯操. 铸造铝合金现状及未来发展[J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (4): 1-4.

[3] 王益志. 铝铸件的世界市场 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999 (1): 36-40.

[4] 廖恒成, 方们贤, 孙国雄. 铸造 AL-SI 合金熔体处理—晶粒细化[J]. 特种铸造及有色合金, 1999 (3): 49-53.

[5] Hosch T, Napolitano R E. The effect of the flake to fiber transition in silicon morphology on the tensile properties of Al-Si eutectic alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2010(528): 226-232.

[6] 李豹. A1Si7Mg 合金共晶硅变质规律及其微观机 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学，2011.

[7] 黄治黎. 受控扩散凝固法制备 A390 铝合金微观结构及其形成机制研究[D]. 重庆:重庆大学，2017.