

大宽厚比扁钢锭的锭型设计和 61 t Q345B 钢扁锭的生产实践

耿明山^{1,2} 曹建宁^{1,2} 刘艳^{1,2}

(1 中冶京诚工程技术有限公司,北京 100176;2 北京市铸轧工程技术研究中心,北京 100176)

摘要 对国内外扁钢锭的宽厚比进行了分析,并得出宽厚比对扁锭质量的影响。研发了 60 t 大宽厚比扁钢锭模和大型水冷模铸装备。对 EAF-LF-VD 冶炼 Q345B 钢(∕%:0.19C,0.36Si,1.39Mn,0.010P,0.003S)浇铸成 61 t 扁锭(宽 3 070 mm,厚 1 022 mm,宽-厚比 3.0,浇铸温度 1 580 ℃),并轧成 220 mm 特厚板。探伤和取样试验结果表明,钢锭质量优良,钢板屈服强度 348~373 MPa,抗拉强度 562~588 MPa,-40 ℃ 冲击功 40.76~88.80 J,延伸率 17.00%~28.50%,Z 向断面收缩率 33.79%~60.88%,晶粒度 8~9 级,达到标准要求;钢板探伤性能达到 JB/T4730-2005 I 级探伤要求。工业试验表明,大宽厚板扁钢锭水冷模铸技术具备为高品质特厚板提供坯料的能力。

关键词 60 t 扁钢锭模 锭型设计 宽厚比 特厚板 水冷模 性能

Design of Ingot Shape with Large Width to Thickness Ratio and Production Practice of 61 t Flat Ingot of Steel Q345B

Geng Mingshan^{1,2}, Cao Jianing^{1,2} and Liu Yan^{1,2}

(1 MCC Capital Engineering and Research Corp Ltd, Beijing 100176;
2 Beijing Casting-Rolling Engineering Research Center, Beijing 100176)

Abstract An analysis on width to thickness ratio of flat ingot at home and abroad has been carried out to get the effect of width to thickness ratio on quality of ingot. And the 60 t flat ingot with large width to thickness ratio and large water-cooling mould casting equipment are developed. The casting test of 61 t flat ingot with width 3 070 mm, thickness 1 022 mm, width to thickness ratio 3.0 and casting temperature 1 580 ℃ of steel Q345B (∕%: 0.19C, 0.36Si, 1.39Mn, 0.010P, 0.003S) steelmaking by EAF-LF-VD process and rolled to 220 mm heavy plate has been carried out. Results by non-destructive testing and sampling analysis show that the quality of ingot is better; the heavy plate mechanical properties are yield strength 348~373 MPa, tensile strength 562~588 MPa, impact energy at -40 ℃ 40.76~88.80 J, elongation 17.00%~28.50%, Z direction reduction of area 33.79%~60.88% and rating of grain size 8~9 to meet the requirement of standard; and the non-destructive testing results of heavy plate meets the requirement of JB/T4730-2005 I-grade detection of defect. The commercial test shows that the technology of flat ingot water-cooling mould for large width heavy plate has the ability to provide bloom for high quality extra-heavy plate.

Material Index 60 t Flat Ingot, Design of Ingot Shape, Width to Thickness Ratio, Extra-Heavy Plate, Water Cooling Mould, Properties

大单重特厚钢板一般是指成品板单重达 20~30 t,厚度 >100 mm 的钢板,这些产品不但要求强度高,还要求钢质纯净度、均质性好,有的还要求保证 Z 向性能或超声波探伤合格要求。轧制特厚板的坯料有连铸板坯、传统模铸扁钢锭^[1-3]、钢锭初轧坯、钢锭锻压坯和电渣重熔锭(坯)^[4]、单向凝固钢锭^[5]、水冷模铸锭^[6-14]。大单重特厚板一直是我国尚未解决的难题,主要瓶颈是缺少大单重坯料,热处理设备能力也不能满足大单重和大型重钢板的生产要求。重点需要解决大单重特厚钢板用大钢锭问题^[15]。

特厚钢板采用冶炼、钢锭浇铸、轧制的传统方法生产,钢锭的设计及其质量控制成为制约特厚板生产的关键^[16]。

1 大宽厚比扁钢锭锭型分析

1.1 钢锭宽厚比定义

钢锭的宽厚比定义为:

$$K = (A/B) = \text{宽面平均长度} / \text{窄面平均长度} = (\text{顶长} + \text{底长}) / (\text{顶宽} + \text{底宽})^{[17]}$$

式中:K- 宽厚比;A- 钢锭宽度;B- 钢锭厚度。

1.2 大型扁钢锭宽厚比对比分析

查阅国内外相关文献资料,总结国内外大型扁钢锭锭模设计尺寸,针对国内外钢锭锭型宽厚比进行对比分析^[18],如图 1 所示。锭重在小于 40 t 的情况下,日本钢锭宽厚比集中分布在 1.5~3.0,少量锭型宽厚比小于 1.5 或者大于 3.0;国内钢锭宽厚比分布在 2.0~2.5,两者差异不大;锭重 40~70 t 的钢锭,日本钢锭宽厚比集中分布在 3.5~4.0,国内钢锭宽厚比集中分布在 2.0~3.0,较少锭型宽厚比大于 3.5;锭重大于 70 t 的钢锭情况下,日本钢锭宽

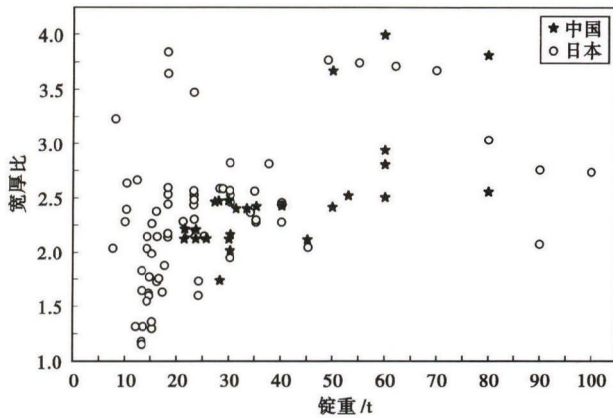


图 1 宽厚比和锭重的相关性

Fig. 1 Correlation of width to thickness ratio and ingot weight

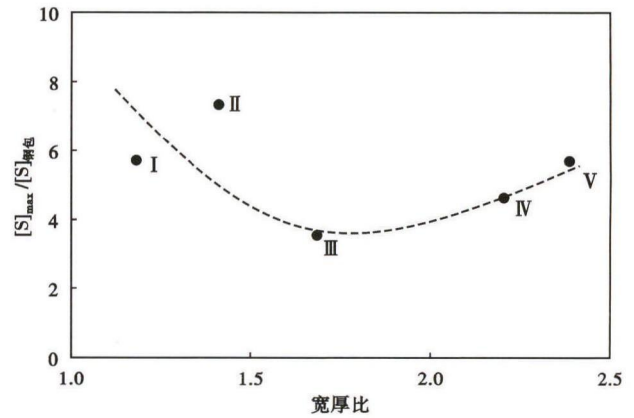


图 2 钢锭模宽厚比对钢锭最大硫偏析的影响

Fig. 2 Effect of ingot mould width to thickness ratio on max segregation of sulfur in ingot

厚比分布在 2.0 ~ 3.0, 国内两种锭型宽厚比分别为 2.56 和 3.82^[18]。

1.3 钢锭宽厚比对钢锭质量的影响

浅野钢一^[19-20]分析了宽厚比、锭重、钢锭宽度和钢锭高度对钢锭偏析的影响,其中宽厚比对钢锭的偏析的影响如图 2 所示,与其他锭型比较,锭型 III 的偏析较轻。

加藤健^[21]针对大宽厚比钢锭的偏析进行了分析,钢锭成分如表 1 所示。随着钢锭宽厚比的增加,钢锭头部中心的高浓度偏析程度减小。

加藤健^[22-23]针对沸腾钢锭锭型对硫偏析的影响进行了研究,认为随着钢锭宽厚比的增加,钢锭中的偏析位置向钢锭头部方向移动。

在钢锭厚度一定的前提下,增大钢锭宽度可以增加宽厚比,宽面冷却能力增加,钢锭冷却强度增强,厚度方向的凝固速度增加,减轻钢锭结晶偏析。增大宽厚比对钢锭本体疏松具有显著的改善作用,但并非越大越好,宽厚比大的钢锭浇铸时裂纹倾向

较大。平均宽厚比一般在 2.0 ~ 4.0, 尽量增大宽厚比。

2 大宽厚比扁钢锭锭型设计和生产实践

2.1 大宽厚比型扁钢锭锭型设计

结合国内多条宽厚板轧机的设备和工艺参数,设计适用于国内 5 000 mm 宽厚板轧机的大宽厚比扁钢锭,钢锭锭模尺寸如表 2 所示。

2.2 大宽厚比扁钢锭生产实践

在中冶京城(营口)装备技术有限公司进行了 60 t 水冷钢锭浇铸试验,采用 60 t EAF-LF-VD 进行钢液冶炼和精炼,钢种 Q345B,浇铸温度 1 580 ℃,钢种成分(%)为 0.19C, 1.39Mn, 0.36Si, 0.003S, 0.010P, 钢锭重 61 t, 钢锭尺寸(mm) 2 980 × 1 085 × 2 280。浇铸试验的大宽厚比扁钢锭如图 3 所示。钢锭经整体探伤和解剖分析,钢锭组织较致密,无缩孔、疏松、裂纹、夹杂等缺陷,质量明显好于普通铸锭。同时对激冷层、柱状晶区、中心等轴晶区进行了

表 1 钢水成分、钢锭宽厚比,浇铸工艺参数和钢锭头部中心[S]偏析指数

Table 1 Liquid composition, width to thickness ratio, casting process parameters and segregation index of [S] at center of ingot head

序号	钢水成分/%				宽厚比	浇铸工艺			钢锭头部中心 [S]偏析指数
	C	Mn	P	S		高度/mm	时间/s	速度/(mm·s ⁻¹)	
A1	0.06	0.37	0.016	0.016	3.65	2 150	176	12.2	5.8
B1	0.08	0.33	0.012	0.021	2.50	2 100	170	12.6	7.4
B2	0.09	0.39	0.011	0.017	2.50	2 075	155	13.6	7.5
C	0.09	0.45	0.013	0.027	2.15	2 050	170	12.1	7.8

表 2 60 t 扁钢锭锭模设计尺寸

Table 2 Design size of mould for 60 t flat ingot

资料来源	锭重/t	钢锭模尺寸/mm				宽厚比 (W/D)	高厚比 (H/D)	锥度(φ)/%
		宽度(W)	厚度(D)	高度(H)	本体高度(L)			
大宽厚比钢锭 ^[24-25]	60.0	3 070	1 022	2 750	2 250	3.00	2.69	9.07



图 3 61 t 水冷扁锭形貌
Fig. 3 Morphology of 61 t water cooling flat ingot

表 3 220 mm 钢板力学性能检测结果
Table 3 Examination results of mechanical properties of 220 mm plate

项目	屈服强度 (σ_s)/MPa	抗拉强度 (σ_b)/MPa	延伸率 (δ)/%	冲击韧性/J							
				20°		0°		-20°		-40°	
				横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向
公称厚度/ mm	>200 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250	>150 ~ 250
Q345E 国标	≥265	450 ~600	≥18	≥27	≥27	≥27	≥27	≥27	≥27	≥27	≥27
ST0	353.56	562.08	28.29	133.60	197.10	126.82	156.57	63.75	114.87	62.74	76.71
ST1	352.00	564.00	26.00	161.04	181.91	147.22	138.09	99.77	118.05	71.65	75.11
ST2	373.00	572.00	28.50	164.72	193.25	130.24	141.28	126.07	133.54	48.64	86.46
SW0	356.00	586.00	20.00	163.90	165.29	140.49	129.25	128.51	108.51	66.67	88.80
SW1	348.00	572.00	24.50	199.22	158.45	147.31	118.11	137.22	113.23	63.71	75.60
SW2	367.00	588.00	17.00	165.76	163.24	126.00	154.42	96.51	106.16	56.57	40.76

表 4 220 mm 钢板 Z 向力学性能检测结果
Table 4 Examination results of mechanical properties of 220 mm plate at Z-direction

编号	1/2 处			编号	1/4 处		
	试样直径(d_0)/mm	断后直径(d_u)/mm	断面收缩率(Z)/%		试样直径(d_0)/mm	断后直径(d_u)/mm	断面收缩率(Z)/%
ST4-①	10.26	6.48	60.11	ST4-①	10.20	8.30	33.79
ST4-②	10.32	6.38	61.78	ST4-②	10.16	6.52	58.82
ST4-③	10.22	6.48	59.80	ST4-③	10.18	6.78	55.64
SW4-①	9.90	6.02	63.02	SW4-①	10.10	5.90	65.88
SW4-②	9.92	5.74	66.52	SW4-②	10.20	5.90	66.54
SW4-③	10.10	5.80	67.02	SW4-③	10.10	5.90	66.88

测量,激冷层在 30 ~ 40 mm,柱状晶区在 60 ~ 110 mm,中心等轴晶区达到 78% 以上^[13]。

在厚板厂水冷锭被轧制成 220 mm 特厚板,按照国标要求,分别对钢板头部、尾部不同部位进行取样,取样位置如图 4 所示,进行了力学性能检测、低倍和高倍组织检测,钢板力学性能检测结果如表 3 所示,钢板 Z 向性能检测结果如表 4 所示。检测结果显示,Q345B 试制钢种的各项力学性能均达到了 Q345E-Z35 的要求,屈服强度达到了 348 ~ 373 MPa,抗拉强度达到了 562 ~ 588 MPa, -40 °C 冲击韧性 40.76 ~ 88.80 J, Z 向断面收缩率大于 33.79%,晶粒度等级 8 ~ 9 级,钢板探伤性能达到

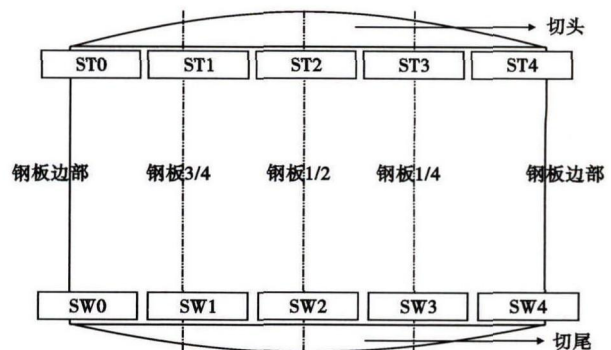


图 4 钢板取样位置示意图
Fig. 4 Schematics of sampling location at plate

JB/T4730-2005 I 级探伤要求^[24-25]。

3 结论

(1) 国内和日本小于 40 t 的钢锭的宽厚比基本相近,国内 40~70 t 钢锭的宽厚比略小于日本钢锭宽厚比,建议钢锭的宽厚比在 2.5~3.5;70 t 以上钢锭建议参考日本钢锭锭型尺寸进行设计,钢锭宽厚比在 2.0~3.0。

(2) 钢锭宽厚比增加,钢锭头部中心高浓度偏

析情况减轻,钢锭中的偏析位置向钢锭头部方向移动。

(3) 针对国内 5 000 mm 宽厚板轧机的设备现状,设计了 60 t 大宽厚比扁钢锭的锭型和水冷模铸装备。通过水冷钢锭的工业试制,成功浇铸成 61 t 大型扁钢锭,钢锭内部质量和表面质量良好。钢锭轧制成 220 mm 特厚板,钢板达到 Q345E-Z35 性能要求,同时满足 JB/T4730-2005 I 级探伤要求。

参考文献

- [1] 喜多村実,小山伸二,有菌芳昭,等.大型扁平鋼塊の内質におよぼす頭部保温、断熱の影響[J].鉄と鋼,1980,66(11):782-782.
- [2] 喜多村実,小山伸二,川崎正蔵,等.マクロ偏析と介在物におよぼす鑄型形状および押湯保温条件の影響[J].鉄と鋼,1979,65(4):160-160.
- [3] 石黒守幸,遠藤豪士,村上勝彦,等.極厚鋼板用鑄型の設計と鋼塊の品質について[J].鉄と鋼,1980,66(4):180-180.
- [4] 耿明山,刘艳,黄衍林.大型特厚板坯料制造技术现状和发展趋势[J].中国冶金,2014,24(8):10-17.
- [5] 耿明山,刘艳,曹建宁,等.单向凝固技术在大型扁钢锭制造中应用现状[C].第十届(2015)中国钢铁年会论文集,上海:2015:1-8.
- [6] 中冶京诚工程技术有限公司.大型水冷热能回收金属模系统.中国,CN100525961C[P].2008-5-14.
- [7] 中冶京诚工程技术有限公司.超大型特厚板矩形锭坯制造装置.中国,CN101791682B[P].2010-8-4.
- [8] 中冶京诚工程技术有限公司.超大型矩形锭坯倾斜铸造的组合式制造装置及方法.中国,CN102069160B[P].2011-5-25.
- [9] 中冶京诚工程技术有限公司.用于锭坯组合式水冷铸造装置的钢结构水梁框架.中国,CN102151806B[P].2011-8-17.
- [10] 中冶京诚工程技术有限公司.锭坯组合箱式水冷铸造装置.中国,CN102114525B[P].2011-7-06.
- [11] 中冶京诚工程技术有限公司.用于锭坯组合箱式水冷铸造装置的箱式水冷板组件.中国,CN102126002B[P].2011-7-20.
- [12] 耿明山,周守航,刘艳.水冷模单向凝固钢锭生产特厚板生产技术发展及展望[C].第八届(2011)中国钢铁年会论文集,北京:2011.
- [13] 耿明山,刘艳,曹建宁,等.水冷模铸技术在大型扁钢锭制造中的应用[C].2014年全国炼钢-连铸生产技术会论文集,唐山:2014:524-535.
- [14] 张克胜,陆明辉,周凤标.P80 板材表面结疤形成原因及预防措施[J].现代冶金,2012,40(1):11-13.
- [15] 翁宇庆,陈蕴博,刘玠,等.特殊钢在先进装备制造业应用中的战略研究[M].北京:冶金工业出版社,2012:207-208.
- [16] 胡林,李春福,孟祥利,等.厚板用 35t 巨型扁钢锭的研制[J].轧钢,2003,20(6):1-4.
- [17] 兰鹏,李鹏善,刘春秀,等.基于凝固数值模拟的 13 t 扁锭结构设计优化[J].中国冶金,2014,24(10):22-31.
- [18] 项利,耿明山.国内外大型扁钢锭锭型对比分析[J].河北冶金,2016(8):18-23.
- [19] 浅野钢一,大橋徹郎.リムド鋼塊の偏析パターンについて[J].日本鉄鋼協会第 72 回講演大会論文集,1966,68(16):1517-1519.
- [20] 浅野钢一,大橋徹郎.ムド鋼塊の偏析におよぼす鑄型形状の影響について[J].日本鉄鋼協会第 72 回講演大会論文集,1966,68(16):1519-1522.
- [21] 加藤健,松田亀松,徳重勝.極厚車リムド鋼塊の性状について[J].鉄と鋼,1963,49(3):453-456.
- [22] 加藤健,松田亀松,徳重勝.リムド鋼の S 偏析におよぼす鋼塊形状の影響[J].鉄と鋼,1963,49(3):888-894.
- [23] 加藤健,松田亀松,徳重勝.リムド鋼塊の S の偏析について[J].鉄と鋼,1962,48(3):462-464.
- [24] 刘艳,曹建宁,耿明山,等.大型扁钢锭水冷制造技术[J].钢铁,2014,49(8):35-41.
- [25] 刘艳,曹建宁,耿明山,等.大型特厚板坯料水冷模铸技术[C].第十届(2015)中国钢铁年会论文集,上海:2015:1-7.

耿明山(1979-),男,博士(2009年北京科技大学),高级工程师,2002年河北理工学院(本科)毕业,炼钢连铸工艺开发。E-mail:gengmingshan@tom.com.cn

收稿日期:2017-02-09