基于 CSP 工艺低碳钢的热变形模拟[*1]

尚秀廷,华国龙,高 军

(内蒙古包钢钢联股份有限公司薄板坯连铸连轧厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 采用热模拟试验机研究了包钢 CSP 薄板的热轧工艺。研究结果表明: 卷取温度越高、轧制速度越大、终轧温度越高,轧后的晶粒尺寸就越大; 按先大后小分配压下率更利于粗化晶粒。该研究结果为 CSP 工艺条件下轧制合格冷轧基料提供试验依据。

关键词: CSP; 热轧板; 热模拟; 晶粒度

中图分类号: TG335.5 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2019)01 - 0068 - 05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.01.017

Thermal Deformation Simulation for Low - carbon Steel with CSP Technology

Shang Xiu - ting, Hua Guo - long, Gao Jun

(*CSP Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The hot rolling process for thin plate of CSP of Baotou Steel was studied with the thermal simulation test machine in this experiment. The test results showed that the higher the coiling temperature is, the greater the rolling speed is, the higher the finishing temperature is, the bigger the grain size is after rolling; it is better for grain coarsening to distribute the reduction ratio from big to small. The test results provide the experimental evidence for rolling the qualified base material for cold rolling with the CSP technological conditions.

Key words: CSP; hot rolled plate; thermal simulation; grain size

CQ 级、DQ 级、DDQ 级等冷轧冲压产品,使用传统工艺生产冷轧薄板技术已经成熟,并占很大的市场份额。薄板坯连铸连轧虽然具有技术和质量上的优势,但作为一种短流程生产工艺,其生产冷轧退火基料与长流程工艺板材相比,在微观结构、组织、产品的性能上仍有差距,譬如材料强度偏高,影响冷轧产品冲压性能[1]。包钢 CSP 产线生产的冷轧基料,其晶粒度在 8 ~ 9 级之间,屈服强度较高,冷轧产品会遗传部分热轧组织性能,导致冷轧产品冲压性能不好。针对薄板坯连铸连轧生产低碳冷轧基料强度偏高问题,通过改变热轧工艺的方法使其晶粒变大,从而降低冷轧基料的强度,进而提高冷轧产品冲压性能。本次试验结果将为包钢 CSP 产线获得较低强度冷轧基料提供借鉴。

1 冷轧板用热轧基料的要求

(1) 对低碳钢,终轧温度应略高于 A_{r3},卷取温度控制在 500 ~ 600 ℃之间;

* 收稿日期: 2018 - 11 - 28

作者简介: 尚秀廷(1982 -),男,蒙古族,内蒙古通辽市人,工程师,现从事轧钢技术管理工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2) 基板晶粒度控制在 6 ~ 8 级之间,这是生产 DDQ 级及以上级别产品的前提;

(3) 较高的延伸率和较低的屈服强度[2]。

2　影响热轧板性能的因素

热轧钢带的组织和性能直接影响冷轧钢板及钢带的组织和性能,而影响热轧钢带组织和性能的主要因素有终轧温度、卷取温度、冷却速度。以低碳钢为例,决定其性能好坏的组织就是铁素体晶粒的大小、形状及均匀程度,其次才是珠光体的尺寸大小及分布的弥散程度。冷轧退火后冷轧钢板及钢带的铁素体晶粒大小,除与冷轧热处理条件有关外,也与热轧钢带的显微组织有关[3]。

CSP 产品用作冷轧基板最大的问题是产品晶粒细小,屈服强度偏高。CSP 产品晶粒度一般在8 ~ 10 级,但为了保证冲压性能,冷轧基板的晶粒度最好保持在 6 ~ 8 级之间。

3　试验方案

晶粒大小对金属的机械性能有很大影响,在常温下,金属的晶粒越细小,强度和硬度则越高[4]。因此,粗化铁素体组织是降低热轧钢带屈服强度的有效方法之一。本文结合 CSP 流程的工艺特点,在 Geeble 1500D 热模拟试验机上研究了不同工艺参数对冷轧基料组织的影响规律。

3.1　试验材料

在包钢薄板坯连铸连轧生产线均热炉前随机选取淬水状态的连铸坯,从连铸坯上直接加工热模拟试样。钢种成分见表 1。在连铸坯沿厚度方向上截取 6 个直径为 10 mm,高度为 14.2 mm 的试样以备试验。

3.2　试验方法

包钢 CSP 现场轧制工艺见表 2。

表 1　试验钢种主要化学成分(质量分数)　%

C	Si	Mn	P	S	Al_t	Al_s	Ca	[O]	[N]
0.043	0.021	0.17	0.010	0.004	0.021	0.019	0.002 2	0.003 6	0.005 3

表 2　CSP 热轧轧制工艺

均热温度	均热时间	铸坯厚度	热轧厚度	开轧温度	终轧温度	卷取温度	轧制速度	轧机各道次变形率/%					
/℃	/s	/mm	/mm	/℃	/℃	/℃	/(m·s^{-1})	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1 032	1 580	70	2.75	1 007	900	540	12.56	54.5	54.6	47.6	36.3	29.3	19.9

结合包钢 CSP 生产的实际情况和试验设备能力,从压下量、轧制速度、终轧温度、卷取温度 4 个方面在热模拟设备上进行了对比试验,试验过程如下:

6 个试样均以 20 ℃/s 升到 1 250 ℃奥氏体化,保温 360 s,以 10 ℃/s 降至 950 ℃,以 10 ℃/s 升至 1 050 ℃,再以 5 ℃/s 降至 1 030 ℃进行轧制,终轧温度分别为 900 ℃、930 ℃,轧后以 3.2 ℃/s 分别降至 630 ℃、560 ℃,再以 0.5 ℃/s 的速度冷却到室温,试样经 6 道次的轧制最终厚度为 1 mm,试样编号与工艺编号一致,具体热模拟工艺制度见表 3。

表 3　热模拟工艺制度

工艺编号	均热温度	开轧温度	终轧温度	卷取温度	轧机各道次压下率(%)/轧制速度(m/s)					
	/℃	/℃	/℃	/℃	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	1 050	1 030	900	630	48.0/1.46	48.0/2.80	44.0/4.83	30.0/6.90	24.0/9.05	15.0/10.66
2	1 050	1 030	900	560	48.0/1.46	48.0/2.80	44.0/4.83	30.0/6.90	24.0/9.05	15.0/10.66
3	1 050	1 030	900	630	40.0 /1.46	40.0/2.80	38.0/4.83	38.0/6.90	32.0/9.05	25.5/10.66
4	1 050	1 030	900	560	40.0 /1.46	40.0/2.80	38.0/4.83	38.0/6.90	32.0/9.05	25.5/ 10.66
5	1 050	1 030	930	630	40.0 /1.72	40.0/3.31	38.0/5.69	38.0/8.13	32.0/10.66	25.5/12.56
6	1 032	1 030	930	560	40.0 /1.72	40.0/3.31	38.0/5.69	38.0/8.13	32.0/10.66	25.5/12.56

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

试样1、3、5卷取温度相同均为630 ℃，试样2、4、6卷取温度相同均为560 ℃。

试样1、2与试样3、4工艺异同：开轧温度、终轧温度、轧制速度相同，试样1、2的前两道次压下率较大为48%，其余道次呈递减趋势，压下率范围48% ~15%；试样3、4的道次压下率较均匀为40% ~25.5%。

试样3、4与试样5、6工艺异同：开轧温度、压下率相同，试样3、4的终轧温度为900 ℃，试样5、6的终轧温度为930 ℃，试样5、6的轧制速度(1.72 m/s ~12.56 m/s)较试样3、4的轧制速度(1.46 m/s ~10.66 m/s)大。

4 试验结果与讨论

4.1 晶粒尺寸的测量

以上工艺轧制的试样，经过磨制、抛光、腐蚀，最后通过金相显微镜、晶粒度测试软件分别对金相组织、晶粒度进行检测分析，晶粒度值见表4。

表4 各试验工艺和原生产工艺晶粒直径 μm

工艺	1	2	3	4	5	6	原生产工艺
晶粒直径	59.0	56.3	37.5	30.0	46.0	45.0	29.4

4.2 金相组织分析

6个试样的工艺只有开轧温度相同，分别对不同卷取温度、不同压下率、不同压下速率和终轧温度工艺参数下得到的组织进行对比。各工艺对应的金相组织如图1所示。

4.2.1 不同卷取温度的组织对比

工艺1、3、5的卷取温度是630 ℃，工艺2、4、6的卷取温度是560 ℃，工艺1与2，工艺3与4，工艺5与6之间只有卷取温度不同，其它工艺参数相同。所以它们之间可以对比不同卷取温度对组织变化的影响。

由晶粒度测量结果和金相组织图可以看出，工艺1、3、5分别比工艺2、4、6的晶粒尺寸大3.3 μm、7.5 μm、1 μm，卷取温度越高，原子扩散能力越强，晶粒越容易长大。所以提高卷取温度有利于铁素体组织在卷取过程中长大、粗化。

4.2.2 不同压下率的组织对比

工艺1、2与工艺3、4的区别在于，它们的总压下率相同，但工艺1、2的第一、二道次的压下率较大，后面的道次压下率依次递减，而工艺3、4的六道项压下率分配较为平均。工艺1与工艺3，工艺2与工艺4的各道次压下率分配不同，其它工艺条件相同，所以它们之间可以对比不同压下率对组织变化的影响。

由晶粒度测量结果和金相组织图可以看出，工艺1的晶粒尺寸比工艺3的晶粒尺寸大21.5 μm，工艺2的晶粒尺寸比工艺4的晶粒尺寸大26.3 μm，前两道次大压下较压下平均的情况下的晶粒尺寸大，压下较平均的情况更利于晶粒的细化。因此，前两道次的大压下率更有利于铁素体组织的粗化。

4.2.3 不同压下速率和终轧温度的组织对比

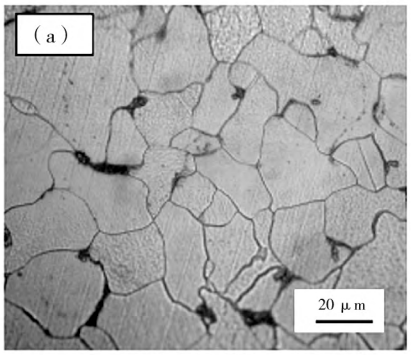
工艺3、4与工艺5、6的区别在于，工艺5、6的终轧温度和轧制速率比工艺3、4的高。由以上数据和组织可以看出，工艺5的晶粒尺寸比工艺3的晶粒尺寸大8.5 μm，工艺6的晶粒尺寸比工艺4的晶粒尺寸大15 μm，在终轧温度和轧制速率相对较高的情况下，其晶粒尺寸要比终轧温度和轧制速率低的大，轧制速率大，则变形温度高，晶粒长大的速度快，最终的晶粒尺寸相应的大一些，而终轧温度高，晶粒越容易长大，所以最终的晶粒尺寸也要大一些。

4.2.4 现场工艺与本试验组织的对比

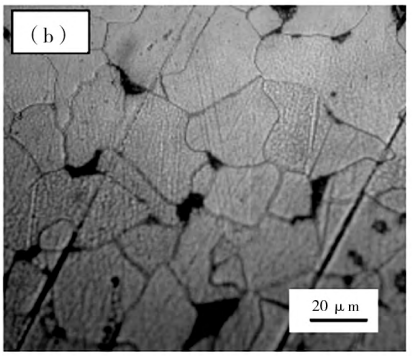
在包钢现场工艺(终轧温度900 ℃、卷取温度540 ℃、第一、二道次大压下率)所轧制的热轧板上取样进行磨制、抛光、腐蚀、金相显微所得的组织如图2所示。

包钢现场工艺条件下所测得的晶粒尺寸为29.4 μm，本试验各工艺的平均晶粒尺寸为45.6 μm，比原工艺晶粒尺寸大了16.2 μm，本试验的工艺与原工艺的区别是，各工艺模拟的卷取温度比现场卷取温度高20 ℃和90 ℃，工艺5和工艺6的终轧温度比现场终轧温度高30 ℃。由此可以看出，提高卷取温度、终轧温度以及前两道次大压下率能够有效使晶粒粗化，而压下率的平均分配对晶粒的长大影响较小。

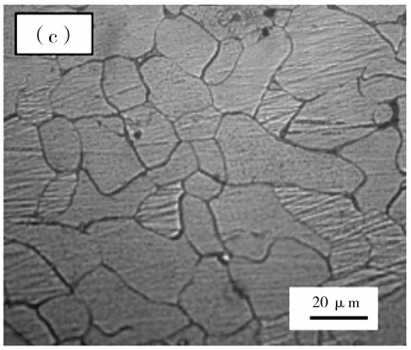
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



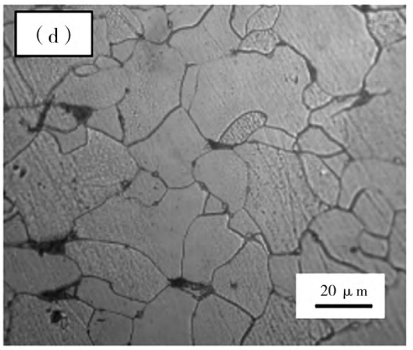
(a) 工艺1



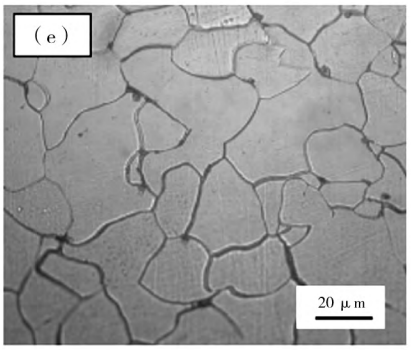
(b) 工艺2



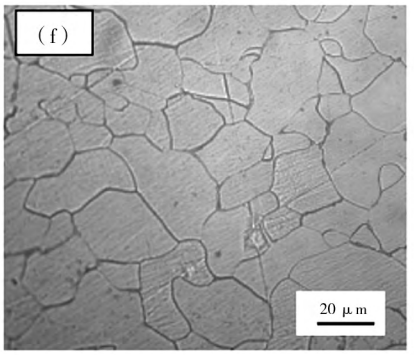
(c) 工艺3



(d) 工艺4

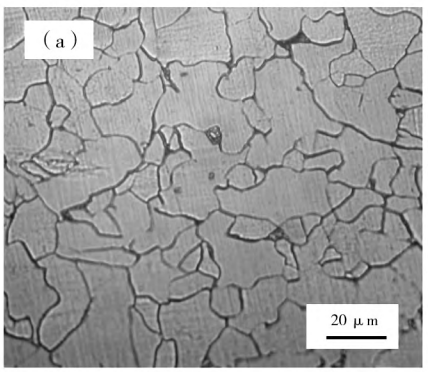


(e) 工艺5

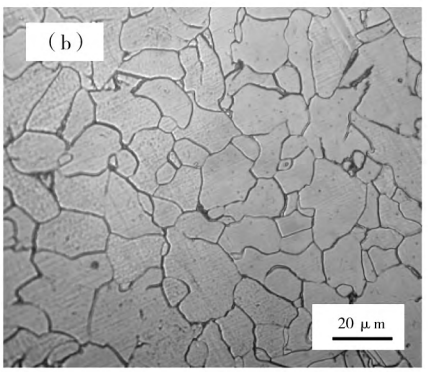


(f) 工艺6

图 1　不同工艺的热轧钢带金相组织



(a) 横向



(b) 纵向

图 2　包钢现场工艺的热轧钢带金相组织

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

晶粒长大是通过晶界迁移来实现的，温度是影响晶界迁移的主要影响因素，由于晶界迁移的过程就是原子的扩散过程，所以温度越高，晶粒长大速度就越快。所以，轧后得到的晶粒尺寸随着终轧、卷取温度的提高而变大。

而前两道次大压下率，轧制初期变形能转化为热能，温度的提高有利于原子的扩散，同样在轧后得到较大的晶粒尺寸。

5 结论

(1) 提高卷取温度将有利于组织的粗化，终轧温度越高、轧制速度越大，轧后的晶粒尺寸越大。

(2) 按先大后小的压下率比压下率平均分配的情况更利于粗化晶粒。

(3) 目前包钢 CSP 产线生产冷轧 CQ 基料执行终轧温度 880～900 ℃，卷取温度 570～600 ℃的工艺制度，其中卷取温度较原工艺提高30～60 ℃，其强度得到降低，冷变形抗力减小，有利于冷轧工序生产，冷轧成品因其较好的成型冲压性能得到市场的认可。

参 考 文 献

[1] 屈啸. 不同生产工艺对微碳深冲钢组织和性能的影响[D]. 长沙: 中南大学，2012.

[2] 章晓辉，彭伟，蒋灿东，等. CSP 产品做冷轧基板的适用性[J]. 轧钢，2005，119(4)：5.

[3] 康永林，温德智，吴光亮，等. 薄板坯连铸连轧生产冷轧基板的工艺与组织性能分析[J]. 山东冶金，2006，28(02)：6.

[4] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社，2000.

信息

河钢舞钢助力我国首台乏燃料贮存容器用钢国产化

日前，河钢舞钢为国内某高端用户研制的最大厚度达 100 mm 的核电用调质高强钢 SA517GrF 发往用户。该钢板成功填补国内空白，并独家用于大亚湾核电站和田湾核电站干式贮存项目首台乏燃料贮存容器制作。

大亚湾核电站位于我国广东省深圳市大鹏新区大鹏半岛，拥有两台百万千瓦级压水堆机组，所生产电力70%供应香港，30%供应广东，是中国大陆第一座大型商用核电站，也是大陆首座使用国外技术和资金建设的核电站。田湾核电站位于江苏省连云港市高公岛乡柳河村田湾境内，是中俄两国迄今最大的技术经济合作项目，也是我国“九五”计划开工的重点核电建设工程之一。

据了解，我国采取核燃料闭路循环方式，核电站的乏燃料组件从反应堆卸出后，一般在乏燃料水池贮存一定时间后外运至离堆贮存设施贮存，或直接运往后处理厂处理、处置。其中，乏燃料贮存容器是不可或缺的关键设备。伴随我国商用核电的快速发展，对每年需要的乏燃料贮存容器提出了更高要求，尽快填补我国大型商用核电站乏燃料贮存容器研制的空白，并实现批量化生产，已成为我国核电站的急切需求。河钢舞钢以满足重大项目设备国产化为已任，全力研发国产特种钢。

该客户提出的核电用调质高强钢要求较高，采用美国标准，且比正常标准要求的钢板强度更强，其中要求屈服强度最大达到 695 MPa，高出正常标准 1 倍多，在零下 40 ℃下要具有很强的抗冲击能力——冲击功≥80 J，比正常标准高 1 倍多，钢板厚度比标准规定的厚 40 mm。生产如此难度的钢板，不仅对河钢舞钢是第一次，而且在国内也是首次研制。为填补国内空白，研发出中国人自己的特种核电高强钢，助力首台乏燃料贮存容器用钢国产化，河钢舞钢从制定工艺方案时就严格标准，优化成分设计，在冶炼环节调整合金元素含量，在热处理环节优化工艺制度，同时确保热处理工艺执行的准确性，最终保证了最大厚度达 100 mm 的核电用调质高强钢 SA517GrF 顺利研发成功，完全满足了客户的个性化需求。

来源《世界金属导报》2019 年 1 月 29 日第 5 版

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net