

文章编号:1000-582X(2011)11-050-06

冷却速率对耐候钢高温力学性能的影响

陈登福^{a,b}, 宋立伟^a, 董志华^a, 高兴建^a, 王水根^a

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 重庆市冶金工程重点实验室, 重庆 400030)

摘要:铸坯高温力学性能是铸坯受力过程中决定裂纹产生的关键因素。在 Gleeble 热/力模拟实验机上模拟测试 1.65, 5, 10 °C/s 3 个冷却速率下耐候钢 Q450NQR1 铸坯高温力学性能。在 1 050 °C, 3 个冷却速率下试样都出现奥氏体动态再结晶; 在 850 °C, 塑性值都达到最低点, 断面收缩率接近 23%; 随着冷却速率的增大, 铸坯易产生裂纹的 III 塑性区扩大, 且向低温段扩展, 塑性凹槽变深; 增大冷却速率钢的各种强度降低, 但增大到一定程度后强度不再降低; 小的冷却速率下, 奥氏体晶界上很少析出网状或薄膜状铁素体、微合金的化合物被包裹在基体中, 利于提高钢的塑性。

关键词:冷却速率; 耐候钢; Q450NQR1 钢; 高温力学性能

中图分类号: TF777.1

文献标志码: A

Effect of cooling rate on high temperature mechanical properties of weathering steel

CHEN Deng-fu^{a,b}, SONG Li-wei^a, DONG Zhi-hua^a, GAO Xing-jian^a, WANG Shui-gen^a

(a. College of Materials Science and Engineering; b. Chongqing Provincial Key Laboratory of Metallurgic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: High temperature mechanical properties are key factors which affect fracture production during deforming process of continuous casting. High temperature properties of weathering steel Q450NQR1 are tested in 3 cooling rates (1.65, 5, 10 °C/s) using Gleeble thermo-mechanical simulator. Specimens appear austenite dynamic recrystallization at 1 050 °C, and the ductility reaches the lowest point and the reduction of area approaches 23% at 850 °C in 3 cooling rates. As the cooling rate increases, the low ductility area where cracks are easy to be produced in slabs is enlarged and extended towards low temperature, and the ductility troughs are deepened. The increase of the cooling rate decreases the tensile stress and yield stress, while when the cooling rate increases to some degree, it doesn't affect the stress. The low cooling rate decreases the film or network ferrite producing in austenite grain boundary, and the carbonitride of microalloy is enwrapped in matrix, which is helpful to improve the ductility of steel.

Key words: cooling rate; weathering steel; steel Q450NQR1; high temperature mechanical properties

连铸坯的表面及角部裂纹一直是提高铸坯质量的最大困难, 很多冶金工作者对铸坯裂纹做了大量

的研究^[1-4], 始终没有找到合适的解决办法。Suzuki 和 Mintz 的研究发现连铸坯的高温力学性能不良是

收稿日期: 2011-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50774105); 高等学校博士点科研基金资助项目(20090191110012)

作者简介: 陈登福(1963-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事连铸及凝固理论、钢冶金、资源利用与环保、冶金物理化学、过程系统仿真与优化等研究, (Tel)023-65102467; (E-mail)chendfu@cqu.edu.cn。

导致裂纹产生的重要因素^[3-4]。连铸坯在高温段的脆化机理、脆性区域的确定为采用合适的设备及合理的工艺方法有重要指导意义,同时利于减少和防止铸坯裂纹的产生^[4-7],可以从根本上控制铸坯质量缺陷。

板坯连铸过程中存在的问题是喷嘴喷到铸坯表面水量分布的不均匀,造成铸坯冷却速率的不同,从而导致表面和角部温度梯度大,铸坯的力学性能变差,裂纹也就相应的产生。铸坯中夹杂物的析出和第二相粒子的析出和聚合也是裂纹产生的另外一个原因,然而铸坯中氧化物的析出^[8]和铸坯表层组织的结构^[9]等与冷却速率有很大的关系。大的冷却速率使奥氏体晶界上微合金元素形成的碳氮化物析出时,来不及聚合长大便被固定在基体中形成弥散的析出物,同时也成为了铁素体的形核源,凝固组织得到细化;还有大量的微合金尚未完全与碳或氮反应,最终形成第二相固溶物^[8-9],改变了铸坯的力学性能。在连铸过程中采用合理的冷却速率已经成为常规化连铸生产中改善铸坯质量,减少裂纹产生的一种有效方法。然而,冷却速率对铸坯在高温段力学性能的影响鲜有报道,因此,研究冷却速率对铸坯高温力学性能的影响机理也就显得十分必要。

耐候钢,即耐大气腐蚀钢,是在普通钢中添加一定量的合金元素制成的一种低合金钢,一般添加的合金成分为 Cu、P、Cr、Ni 等元素^[10-11]。耐候钢作为一种高效钢材,一直是大气腐蚀用钢品种开发与腐蚀研究的热点。耐候钢 Q450NQR1 则是我国自行设计和研发的钢种^[10],强度高达 450 MPa。然而微合金的添加却对铸坯表面带来很多问题,裂纹大量出现,铸坯质量不合格,给生产带来很大问题。

笔者以国内某钢厂生产的 Q450NQR1 耐候钢连铸板坯为例,首次分析了冷却速率和铸坯高温力学性能的关系。使用 Gleeble 热模拟试验机对铸坯在高温段的应力应变曲线、高温塑性,抗拉强度和屈服强度做了分析,采用扫描电镜 (TESCAN TS 5136XM) 对拉伸试样断口扫面,得出断裂机理;为后续连铸过程中,采用铸坯的高温力学性能制定和完善连铸工艺制度奠定基础。

1 实验方法

实验材料选用 Q450NQR1 钢连铸坯,化学成分如表 1 所示。由表中可以看到 Mn 的量很大,同时还添加了 Cu、Ni 和 Cr 以此来增强铸坯的耐腐蚀性能。

实验主要测试铸坯试样在高温段的力学参数。包括不同降温冷却速率下的应力应变曲线、塑性曲线和强度极限随温度变化曲线,以及拉伸试样的断

口形貌。

拉伸实验选择测试的 Q450NQR1 钢试样是取自 200 mm×1 350 mm 的连铸板坯上。在铸坯中部沿拉坯方向和宽度方向分别切取长度 200 mm 和 250 mm 的矩形。试样加工成 $\phi 10$ mm×120 mm 的圆棒试样,其长度方向与柱状晶生长的方向相同,试样两端加工成 M10 普通螺纹状。

实验测试温度范围:700~1 050 °C。

主要测试步骤:将试样固定在真空度小于 1.33×10^{-5} MPa 的真空室内,采用大电流以 10 °C/s 升温速率对试样进行加热,加热到测试温度以上 50 °C 保温 2 min 均衡试样表面和心部温度,确保试样组织转变结束;开始降温,采用 1.65, 5, 10 °C/s 的降温速率对试样快速冷却,降到实验温度后停止降温,保温 1 min 后以 5×10^{-3} /s 的应变速率进行拉伸;试样拉断后启动高速降温模式,快速降到室温并保存断口形貌,线切割试样即时的扫面断口形貌。具体实验温度制度如图 1 所示。

表 1 Q450NR1 钢的化学成分

元素	C	Si	Mn	P
质量分数 /%	0.05~0.10	0.30~0.50	0.80~1.00	≤0.020
元素	S	Cu	Ni	Cr
质量分数 /%	≤0.008	0.20~0.40	0.15~0.35	0.40~0.60

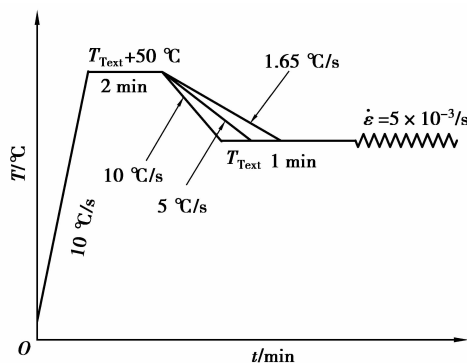


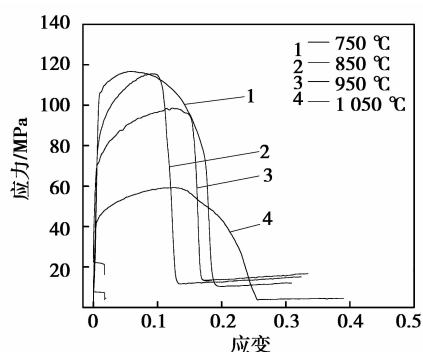
图 1 实验温度制度

2 实验结果及分析

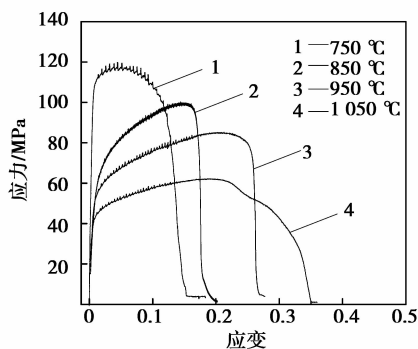
2.1 应力应变曲线和塑性曲线结果及分析

在高温下用热力模拟试验机拉伸试样,使用试验机自带的 Origin 软件进行图像处理,得到拉伸试样在多个温度点应力应变曲线。图 2 中列出了 3 个冷却速率下 Q450NQR1 钢的应力应变曲线。

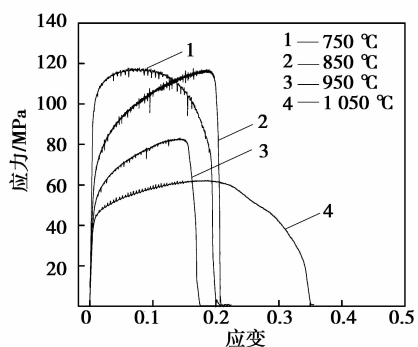
从图中可以看到,3个冷却速率下铸坯试样的应力应变曲线和高温条件下标准应力应变曲线规律相同;3个冷却速率下,塑性变形段,很小的应变下应力的变化很大,曲线上升得很快,迅速达到屈服强度;曲线达最高点后开始降低,其中850℃和950℃下曲线在达到最大值后下降得较快,直至试样断开,曲线的最高点也都随着温度的升高而降低。在温度达到1050℃时,曲线上出现了动态再结晶。3个冷却速率对铸坯试样的应力应变曲线基本没有影响。



(a) 1.65 °C/s



(b) 5 °C/s



(c) 10 °C/s

图2 Q450NQR1的高温应力应变曲线

塑性是衡量钢高温力学性能优劣的重要指标,而通常实验中使用断面收缩率随温度的变化作高温力学性能的热塑性曲线。实验中,对拉伸实验前后试样的直径进行测量,采用公式(1)计算得到断面收

缩率 R. A.。

$$R. A. = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100\% = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 \times 100\%, \quad (1)$$

式中: S_0 为试样原始面积; S 为试样拉断后面积; d 为试样原始直径; d_0 为试样拉断后直径。

由断面收缩率随温度的变化,得到了Q450NQR1钢的塑性曲线,如图3所示。

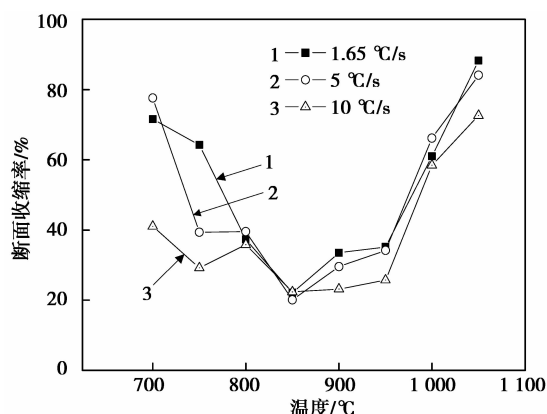


图3 Q450NQR1钢的高温塑性曲线

由图3可以看到,在700~850℃之间,随温度的升高,断面收缩率是降低的,在850℃达到最小值,断面收缩率约为22%;而在850~1050℃,断面收缩率随温度的升高而逐渐增大。在750℃,与实际铸坯冷却速率相接近的1.65℃/s断面收缩率值为64.5%,提高到5℃/s、10℃/s后分别降低到39.3%和29%,随着冷却速率的增大,塑性变得很差;在800℃下,3个冷却速率的断面收缩率值基本相同,随后在850℃达到最小值,在800~850℃之间塑性随冷却速率的变化很小,断面收缩率相差很小;随着温度的变化,10℃/s的塑性值在900℃和950℃时都比另外两个冷却速率的低,而5℃/s的塑性值在这两个温度点下也比1.65℃/s降温速率下的值低;较大的冷却速率导致铸坯塑性曲线最低值向高温域扩展,恶化了铸坯塑性。钢中含有的Cu、Ni和Cr,由于冷却速率造成的过冷使得微小析出物在晶界上大量析出,降低了晶界间的相互结合力,这是钢的塑性随冷却速率升高而变差的主要原因^[3];钢中铁素体在大冷却速率下能够大量形核,在奥氏体晶界上以网状或薄膜状析出,降低了钢在高温下的塑性^[6,12]。

钢的Ⅲ脆性区(R. A. <60%) 在1.65℃/s下的温度宽度约为242℃,而5℃/s和10℃/s的温度宽度分别扩大为268℃和308℃;Ⅲ脆性区的温度上限都在1000℃左右,而温度下限随冷却速

率增大向低温区域移动;得出大的冷却速率致使第Ⅲ脆性区宽度扩大并向低温区域移动。

高温下铸坯处在低塑性区(R. A. <40%)时,铸坯表面很容易出现裂纹^[3,13],图3中,800℃时断面收缩率为40%,在800℃以上,10,5,1.65℃/s 3个冷却速率下的低塑性区宽度分别为175,165,162℃;铸坯在凝固过程中,角部降温速率最快,很容易落在这个温度范围内,控制很小的冷却速率对减小铸坯出现裂纹的几率很重要。在低的冷却速率下,铸坯内外的温度梯度小,热应力变得微弱,也减小了铸坯的总应力,降低了产生裂纹的敏感性^[14],铸坯的塑性得以改善。

2.2 强度曲线结果及分析

对获得的试样应力应变曲线,经过处理和分析,得到了试样随温度变化的抗拉强度曲线和屈服强度曲线,如图4和图5所示。

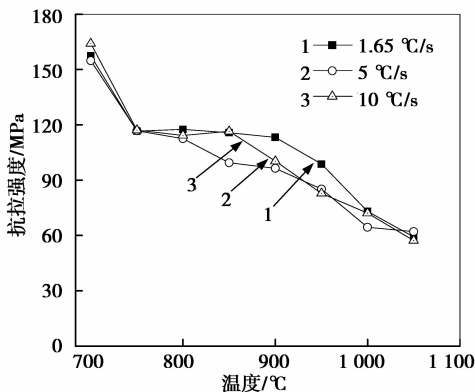


图4 Q450NQR1 钢铸坯的抗拉强度曲线

由图4可以看到,3个冷却速率下试样的抗拉强度随着温度的升高整体趋势是降低的;在700~800℃,3个降温速率下Q450NQR1的抗拉强度没有明显的区别;800~1000℃时,3个冷却速率下强度差别很小,1.65,5,10℃/s的强度差别最大的在20MPa,最小在10MPa,而大冷却速率下,强度相对较小;在1000℃以上,这3个冷却速率的抗拉强度相互差别又减小到5MPa以内。

在图5中,冷却速率对试样的屈服强度有一定的影响,850℃以下,10℃/s的冷却速率下屈服强度很低,700℃为82MPa,而1.65℃/s的冷却速率下试样的屈服强度为125MPa,提高了43MPa;在850~1050℃,10℃/s和5℃/s冷却速率下的屈服强度都小于1.65℃/s的,10℃/s和5℃/s之间的屈服强度差别较小;在整个测试温度范围内,降温速率为5℃/s和10℃/s,屈服强度相差不大,两条曲线有多处相交,数值比较接近;当降温速率提高到

一定程度时,屈服强度的变化会很小,由提高冷却速率对屈服强度造成的影响也就逐渐消失。

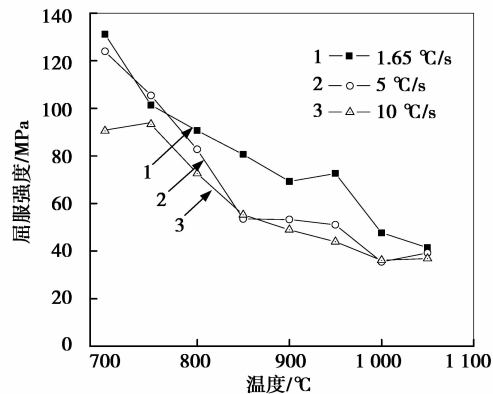


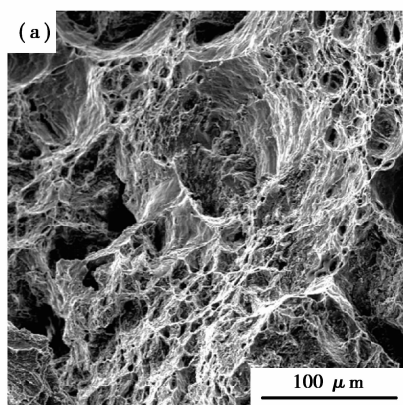
图5 Q450NQR1 钢铸坯的屈服强度曲线

2.3 断口形貌分析

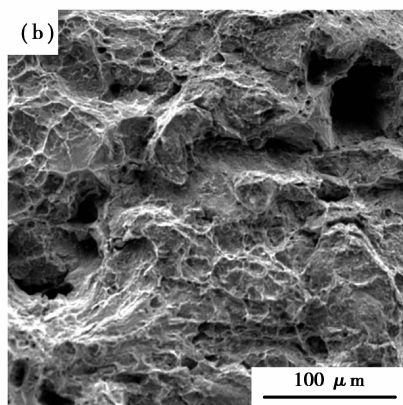
对3个冷却速率冷却到试验温度850℃和1050℃下的6根试样断口进行扫描电镜观察,分析不同冷却速率下断裂机理及断口形貌的差别。

从塑性曲线中得到,在850℃时,10,5,1.65℃/s 3个冷却速率下断面收缩率都是最低值,且都在22%左右。从图6中观察到3个冷却速率下试样的断口形貌都有塑性韧窝和撕裂岭,为典型的塑性断裂;断口上出现的韧窝很浅而小,表现在晶界上塑性变形较小^[15];在撕裂岭上可以看到滑移纹理,这些是在晶界上出现薄膜铁素体滑移的痕迹,铁素体本身的强度为奥氏体强度的1/4,铸坯受力变形时,应力集中在晶界网状铁素体薄膜上,导致微裂纹的产生^[16],最终聚合导致铸坯断裂。钢中含有的Cu、Ni和Cr结合碳、氮和氧等低温下沿晶界析出,受力在晶界上产生微孔,微孔聚合后形成裂纹,钢受力很容易断裂。

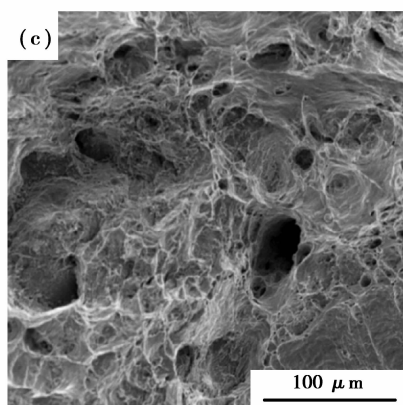
从3个冷却速率的塑性曲线得到,1050℃钢的塑性都提高到70%以上。1.65℃/s的试样塑性最高,断面收缩率88.3%,从图7(a)中观察到,断口以穿晶断裂为主,断面上韧窝很少,深度浅。冷却速率提高到5℃/s后,断面收缩率降低了4%,区别很小;但是断裂形式不相同,图7(b)中断口有很多的韧窝,且深度很深;在部分韧窝中存在着微小的析出物,枝晶滑移面上滑移痕迹明显,韧性很好。10℃/s下的断面收缩率降低到72.6%,强度变化却很小;图7(c)中断口的形貌比较平,断口成杯锥状,韧窝的数量比图7(c)少,但比图7(a)的多;枝晶滑移面很明显,在滑移面上有很多微小的物质析出,铁素体薄膜在大的冷却速率下很容易形核并沿奥氏体晶界析出^[9,17],塑性被降低。



(a) 1.65 °C/s



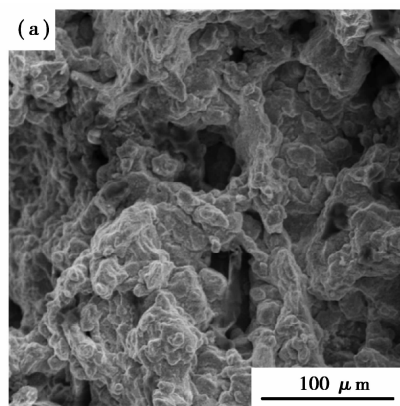
(b) 5 °C/s



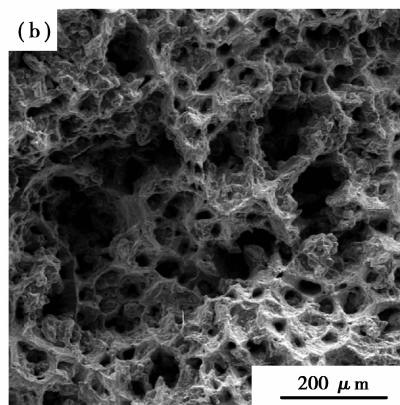
(c) 10 °C/s

图 6 Q450NQR1 在 850 °C 下的断口形貌

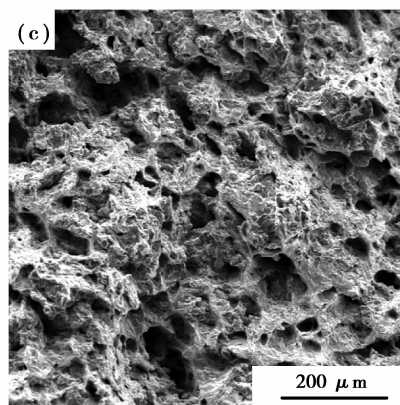
连铸生产中,铸坯在不同冷却速率下进行降温,本身受到各种应力和应变的作用,增大铸坯缺陷产生的几率,从而降低其最终产品的质量。本实验测试结果可以为研究铸坯凝固机理、应力场的分析提供基础数据;得到的相关参数对常规化连铸生产具有重要的参考价值;为改善铸坯质量,降低质量缺陷奠定基础。



(a) 1.65 °C/s



(b) 5 °C/s



(c) 10 °C/s

图 7 Q450NQR1 在 1050 °C 下的断口形貌

3 结 论

1) 使用 Gleeble 热模拟试验机测试了在 1.65, 5, 10 °C/s 3 个冷却速率下耐候钢 Q450NQR1 的高温力学性能,并获得了相应的应力应变曲线;在 1050 °C 下,3 个冷却速率下的试样都出现了动态再结晶。

2) 随着冷却速率的增加,耐候钢的Ⅲ塑性区加深且向低温区扩展;塑性曲线的最低点都落在 850 °C 左右,断面收缩率约为 22%。

3)3个冷却速率下,耐候钢的抗拉强度和屈服强度都是随着温度的升高而减小;增大冷却速率,钢的强度减小,当冷却速率增大到一定程度时,对强度的影响减小。

4)小的冷却速率,在奥氏体晶界上很少析出网状或薄膜状铁素体,微合金的碳氮化物包裹在基体中,利于提高钢的塑性,连铸过程中应根据钢种的不同,在保证产量的同时,尽量控制小的冷却速率,确保板坯表面冷却均匀,避免裂纹的产生。

5)测试结果可为研究铸坯凝固机理及应力场的分析提供重要的基础数据。

参考文献:

- [1] ZHANG J D, KWON H, KIM H, et al. Micro-cracking of low carbon steel in hot-forming processes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162-163:447-453.
- [2] VEDANI M, DELLASEGA D, MANNUCCI A. Characterization of grain-boundary precipitates after hot-ductility tests of microalloyed steels [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(3): 446-452.
- [3] MINTZ B. The influence of composition on the hot ductility of steels and to the problem of transverse cracking[J]. *ISIJ International*, 1999, 39(9):833-855.
- [4] SUZUKI H G, NISHIMURA S, NAKAMURA Y. Improvement of hot ductility of continuously cast carbon steels [J]. *Transaction ISIJ*, 1984, 24(1): 55-60.
- [5] CALVO J, CABRERA J M, REZAEIAN A, et al. Evaluation of the hot ductility of a C-Mn steel produced from scrap recycling[J]. *ISIJ International*, 2007, 47(10):1518-1526.
- [6] SCHWERDTFEGER K, SPITZER K H. Application of reduction of area-temperature diagrams to the prediction of surface crack formation in continuous casting of steel[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(4): 512-520.
- [7] 潘艳华, 陈登福, 董凌燕, 等. 20CrMo 连铸坯高温力学性能和热物理性能分析[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2006, 29(9):68-70.
PAN YAN-HUA, CHEN DENG-FU, DONG LING-YAN, et al. Mechanical performance and thermo physical performance of 20CrMo steel at high temperature [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, 29(9):68-70.
- [8] WOLANSKA N., LIS A K, LIS J.. Microstructure investigation of low carbon steel after hot deformation [J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, 20(1-2):291-294.
- [9] 马范军, 文光华, 唐萍, 等. 冷却速度对含铌、钛微合金钢铸坯表层组织结构的影响[J]. *北京科技大学报*, 2009, 31(9):1116-1121.
MA FAN-JUN, WEN GUANG-HUA, TANG PING, et al. Effect of cooling rate on the slab surface microstructure of microalloyed steel containing Nb and Ti[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(9):1116-1121.
- [10] 钱余海, 李自刚. 加速腐蚀环境下高强耐候钢 Q450NQR1 的耐蚀性能研究[J]. *宝钢技术*, 2007(2): 5-8.
QIAN YU-HAI, LI ZI-GANG. Research on corrosion resistance of high strength weathering steel Q450NQR1 in accelerated corrosion environment [J]. *Bao Steel Technology*, 2007(2):5-8.
- [11] 郑文龙, 俞亚鹏. 耐硫酸露点腐蚀钢: 中国, 94111544.5[P]. 1996-06-05.
- [12] 常桂华, 曹亚丹, 吕志升, 等. 连铸坯的高温力学性能分析[J]. *鞍钢技术*, 2007(6):25-29.
CHANG GUI-HUA, CAO YA-DAN, LU ZHI-SHENG, et al. Analysis on mechanical property of continuous casting block at high temperature [J]. *Angang Technology*, 2007(6):25-29.
- [13] GAO X J, CHEN D F, LONG M J, et al. Embrittlement of low carbon low alloy steel occurring in the austenite and γ -Ferrite regions[C]// *Proceedings of the 2010 TMS Annual Meeting & Exhibition*, February 14-18, 2010, Seattle, WA, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2010, (2):319-326.
- [14] SEOL D J, WON Y M, OH K H, et al. Mechanical behavior of carbon steels in the temperature range of mushy zone [J]. *ISIJ International*, 2000, 40(4): 356-363.
- [15] 吴光亮, 孙彦辉, 周春泉, 等. CSP 板坯(Q235B)高温力学性能试验研究[J]. *钢铁*, 2006, 41(5):73-77.
WU GUANG-LIANG, SUN YAN-HUI, ZHOU CHUN-QUAN, et al. Study on high temperature mechanical properties of CSP Q235B slab[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(5):73-77.
- [16] CARPENTER K R., DIPPENAAR R, KILLMORE C R.. Hot ductility of Nb and Ti bearing microalloyed steels and the influence of thermal history [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2009, 40(3):573-580.
- [17] 梁建平, 王立新, 刘旭峰, 等. 冷却速率对 1Cr18Ni9Ti 钢高温脆性区凝固组织的影响[J]. *材料科学与工艺*. 2009, 17(3):414-417.
LIANG JIAN-PING, WANG LI-XIN, LIU XU-FENG, et al. Effect of cooling rate on solidification structure in high temperature brittle zone of 1Cr18Ni9Ti steel [J]. *Materials Science & Technology*, 2009, 17(3): 414-417.