



## 16MnCr5 高温热塑性及连续冷却转变曲线测定及应用

王宁涛<sup>1,2</sup>, 王利军<sup>1,2</sup>, 郭俊成<sup>1,3</sup>, 韩光洋<sup>1,4</sup>

(1 河北省线材工程技术创新中心, 邢台 054027; 2 邢台钢铁有限责任公司技术中心, 邢台 054027; 3 邢台钢铁有限责任公司线材厂, 邢台 054027; 4 邢台钢铁有限责任公司销售公司, 邢台 054027)

**摘要:** 动态高温热塑性实验表明 16MnCr5 钢在第 II 脆性区 (900~1 200 °C) 未出现脆性, 最佳变形温度为 800~1 050 °C。在 600~750 °C 之间塑性变差, 对应于第 III 脆性区。连续冷却转变实验表明 16MnCr5 钢在 0.5~3 °C/s 之间冷却时, 得到均匀的铁素体和珠光体组织; 超过 5 °C/s 冷却时, 出现贝氏体组织。16MnCr5 钢连铸坯冷却到 600 °C 组织转变刚完成或尚未完成, 因此, 热装的温度应尽量低于 600 °C。16MnCr5 钢盘条轧制后关闭保温罩缓冷, 运用于生产 Φ30 mm 大规格 16MnCr5 钢线材, 组织为 F+P, 晶粒度约 7.5 级, 硬度达到 80HRB, 组织均匀, 可以满足下游用户拉拔、冷镦使用要求。

**关键词:** 16MnCr5 钢; 高温热塑性; CCT; 热装

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00007 **中图分类号:** TG142. 1

## Determination and Application of High Temperature Thermoplasticity and Continuous Cooling Transition (CCT) Curve of 16MnCr5

Wang Ningtao<sup>1,2</sup>, Wang Lijun<sup>1,2</sup>, Guo Juncheng<sup>1,3</sup>, Han Guangyang<sup>1,4</sup>

(1 Hebei Engineering Innovation Center for Wire Rod, Xingtai 054027, China; 2 Technical Centre, Xingtai Iron & Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, China; 3 Wire Rod Plant of Xingtai Iron & Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, China; 4 Sales department of Xingtai Iron & Steel Co., Ltd., Xingtai 054027, China)

**Abstract:** The dynamic high temperature ductility test shows that 16MnCr5 steel does not appear brittleness in the second brittle zone (900-1 200 °C), and the optimum deformation temperature is 800-1 050 °C. The plasticity decreases between 600 and 750 °C, corresponding to the third brittle zone. The continuous cooling transformation experiment shows that when 16MnCr5 steel is cooled at speed between 0.5-3 °C/s, uniform ferrite and pearlite structure can be obtained; When the cooling speed is more than 5 °C/s, bainite appears. The structure transformation of 16MnCr5 steel continuous casting billet cooled to 600 °C has just been completed or has not yet been completed, therefore the temperature of hot charging should be lower than 600 °C as far as possible. After 16MnCr5 wire rod is rolled, close the insulation cover for slow cooling, which is conducive to subsequent processing. After rolling 16 MnCr5 steel wire rods, the insulation cover is closed for slow cooling, which is used in the production of Φ30 mm large size 16 MnCr5 steel wire rod. The microstructure is F + P with grain size about 7.5, hardness about 80HRB, and uniform microstructure, which can meet the requirements of downstream customers for drawing and cold heading.

**Key Words:** 16MnCr5 Steel; High Temperature Thermoplasticity; CCT; Hot Charging

16MnCr5 钢为德标产品, 有良好的淬透性和切削性, 低温冲击韧性高, 经渗碳淬火后, 用于齿轮、气门顶杆、链轮、凸轮轴等, 用途广泛<sup>[1]</sup>。

16MnCr5 钢通常为棒材、线材产品, 从连铸大方坯经过高温开坯或轧制得到最终产品。为了保证得到良好质量的产品, 对轧制过程进行模拟以便更好的选择工艺。其中常用的实验是高温热塑性实验和奥氏体连续冷却转变实验。本文从连铸大方坯取样进行动态高温热塑性实验和连续冷却实验, 以期对 16MnCr5 钢轧制工艺提供参考。

单独测量高温热塑性以及连续转变曲线的研究已经有很多, 但两者结合分析, 并且联系对轧制以及热装工艺的影响目前还比较少见。

### 1 试验材料及方法

高温热塑性从模拟轧制的角度出发设计试验过程。钢坯生产工艺为: 80 t 转炉-80 t LF 精炼-80 t RH-连铸。连铸大方坯断面尺寸为 280 mm×325 mm, 从近表面部分进行取样。车削成 Φ10 mm×120 mm 短棒, 并在两端加工螺纹。试验材料的化学成分

见表 1, 在 Gleeble-1500 热模拟机上进行试验。

表 1 16MnCr5 大方坯的化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of 16MnCr5 bloom %

C	Si	Mn	S	P	Cr	N	Ni	Alt	O
0.17	0.05	1.20	0.005	0.014	1.05	0.0040	0.01	0.030	0.0011

高温热塑性试验方案如图 1 所示。预加热至 1 100 °C, 保温 5 min, 加热速度为 10 °C/s。然后降温或升温到试验温度 T (速率 3 °C/s), 保温 3 min。测定试样在该温度下的断面收缩率和抗拉强度, 拉伸速率为 0.01 s<sup>-1</sup>。试样拉断之后在热模拟试验机中自然冷却, 冷却速度为 15 ~ 20 °C/s。试验温度 T 从 600、650、700、750……1 200 °C, 每间隔 50 °C 进行一组试验, 一共进行 13 组试验。

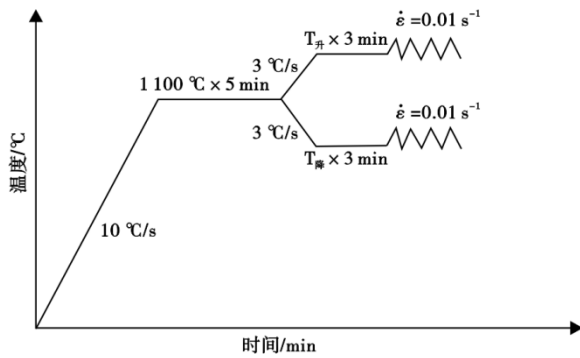


图 1 高温热塑性试验方案  
Fig. 1 Test scheme of high temperature thermoplasticity

连续冷却转变同样采用模拟轧制的方式: 试样先加热到 1 100 °C, 保温 5 min。降温至 935 °C (冷却速度为 20 °C/s), 进行 35% 的应变 (应变速率为 20 s<sup>-1</sup>); 间隔 1 s 后, 再进行 30% 的应变 (应变速率为 20 s<sup>-1</sup>); 应变完成后冷却至 850 °C (冷却速度为 20 °C/s), 从 850 °C 正式开始冷却转变试验, 以不同的冷却速度冷却至 300 °C。冷却速度分别为 0.1、0.5、1、3、5、10、15 °C/s, 动态 CCT 曲线试验如图 2 所示。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 高温热塑性

研究表明, 钢在 600 ~ 1 400 °C 的温度区间, 存在着三个塑性较差的区域, 称之为脆性区<sup>[2-3]</sup>。随着冶炼水平提高, 第 I 脆性区 (1 200 °C ~) 和第 II 脆性区 (900 °C ~ 1 200 °C) 目前已经较少提及。因为国标对于 P、S、O 含量的要求加严, 出钢脱氧和保护浇注的普及, 以及对 Mn/S 比的控制等, 大部分钢

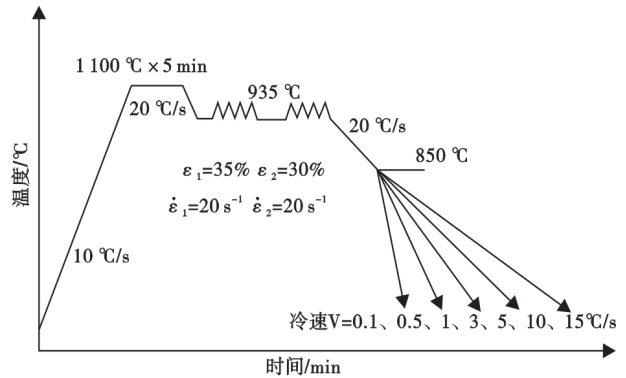


图 2 动态 CCT 曲线试验图  
Fig. 2 Dynamic CCT curve test scheme

种中 O、S 分别与 Al、Mn 结合, 因此, 无 FeS、FeO 等杂质在晶界的析出, 减少了第 II 脆性区的出现机率。第 III 脆性区 (600 ~ 900 °C) 根据机理不同, 又可以分为奥氏体的脆化和两相区或低温区的脆化。

16MnCr5 钢高温热塑性曲线如图 3 所示。脆性区发生在 600 ~ 750 °C 之间, 对应于第 III 脆性区, 断面收缩率最低处为 700 °C, 断面收缩率为 60%。微观形貌借助扫描电镜对比分析, 如图 4 所示。650 °C 和 700 °C 均具有准解理特征, 没有明显的韧窝特征。700 °C 放大 3 000 倍时可以看到断面上凸起部分类似城墙型或棱状, 凸起部分可能是晶界位置, 判断应该是晶间断裂类型。文献[5]表明, 低碳钢出现晶间破坏主要是与先共析铁素体有关, 先共析铁素体优先在奥氏体的晶界处形成, 刚开始形成时以铁素体薄膜形式存在, 对塑性的影响最大。1 000 °C 试样韧窝比较大, 该温度完全位于奥氏体相区, 与两相区或铁素体相区断口形貌区别较大。1 050 °C 以上断口已经液化无法分析。

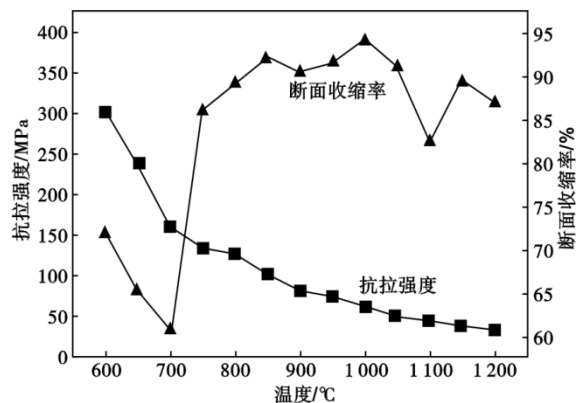


图 3 16MnCr5 钢的高温热塑性曲线  
Fig. 3 High temperature thermoplasticity curve of 16MnCr5 steel

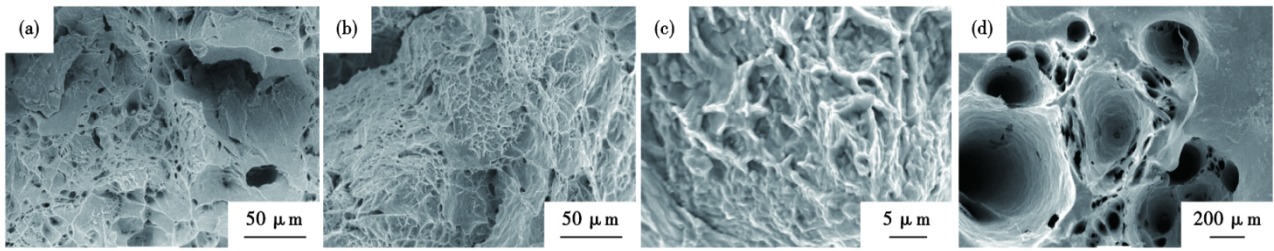


图4 16MnCr5钢高温热塑性实验断口电镜图片:(a)650 °C,(b)700 °C,(c)700 °C(3 000×),(d)1 000 °C

Fig. 4 Fracture electron microscope picture of 16MnCr5 steel high temperature thermoplasticity test : (a) 650 °C , (b) 700 °C , (c) 700 °C (3 000×) , (d) 1 000 °C

对试样断口附近组织进行横剖面观察,如图5所示。由于此时试样已经是拉拔断裂后冷却到常温时的组织,与试验时的组织有所区别。700 °C试样铁素体部分呈现长条状,并且位于原奥氏体晶界处,图5(a)中红色箭头所指位置为原奥氏体晶界,可以看到黑色的线条形貌,这些线条是从原晶界析出的碳氮化物或其他晶界杂质。如图5(b)所示,1 000 °C断口附近的组织均为马氏体组织,因为冷却速度较快,试样相当于淬火,证明之前为奥氏体组织。

700 °C时的脆性机理,文献[3~5]显示,主要因为先共析铁素体、晶界析出物。700 °C试样铁素体部分呈现长条状并且在晶界附近,证明是先共析铁素体组织。从后面的连续转变曲线可知,700 °C正好位于先共析铁素体刚开始析出的区域,刚开始析出的铁素体呈薄膜状,影响最大,到650 °C铁素体已经成长为块状,这时对塑性的影响小于刚析出时。对于晶界析出的碳氮化物,主要为Al(C,N)。一般研究表明<sup>[5]</sup>,Al含量较低(0.02%~0.04%)且氮含量0.005%左右时,其析出物对于高温热塑性的影响不大,且AlN对热塑性的影响集中在800 °C左右区域。

700 °C时塑性已经变差,热加工时需要避开该

温度区间。钢坯热装温度有可能在这一区间,这在后面重点进行讨论。

### 2.2 CCT曲线试验结果

根据不同冷却速度下试样长度变化和温度的曲线,简称膨胀曲线。从曲线各拐点位置处做切线与温度相交的点记为临界点<sup>[6-8]</sup>,并根据组织确定临界点代表的意义,结果见表2。对试样冷却后的组织进行检测,结果如图6所示。以不同冷却速度的转变温度为基础,绘制的CCT曲线图如图7所示。

从不同冷却速度的组织上观察,0.1~3 °C/s的冷却速度下,组织均为铁素体+珠光体。0.1 °C/s冷却速度下,组织有聚集,组织呈现为珠光体团和铁

表2 CCT试验临界转变点

Table 2 Critical transition point of CCT test

冷却速度 /(°C·s <sup>-1</sup> )	转变温度/°C					组织	硬度值
	F <sub>s</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>f</sub>	B <sub>s</sub>	B <sub>f</sub>		
0.1	760	-	650	-	-	F+P	79.8HRB
0.5	742	-	630	-	-	F+P	84.2HRB
1	730	620	605	-	-	F+P	85.7HRB
3	720	590	568	-	-	F+P	93.3HRB
5	710	-	-	580	480	F+P+ B	23.5HRC
10	701	-	-	560	450	F+B	28HRC
15	694	-	-	550	445	F+B	29HRC

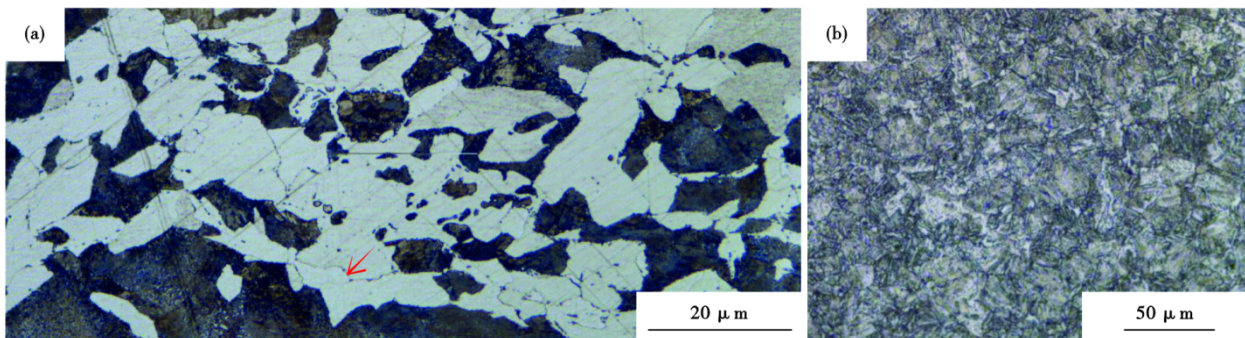


图5 16MnCr5钢高温热塑性实验断口附近组织:(a)700 °C,(b)1 000 °C

Fig. 5 Microstructure near fracture surface of 16MnCr5 steel high temperature thermoplasticity test : (a) 700 °C , (b) 1 000 °C

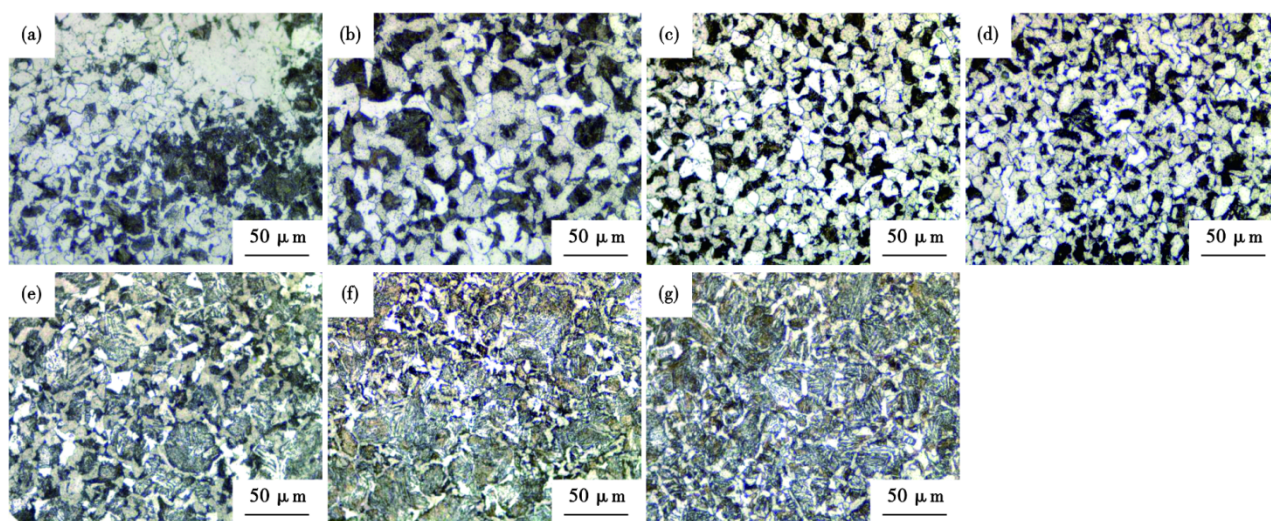


图6 CCT曲线不同冷却速度后得到的组织:(a)0.1 °C/s,(b)0.5 °C/s,(c)1 °C/s,(d)3 °C/s,(e)5 °C/s,(f)10 °C/s,(g)15 °C/s

Fig. 6 Microstructure obtained after CCT curve different cooling rates : (a) 0.1 °C/s , (b) 0.5 °C/s , (c) 1 °C/s , (d) 3 °C/s , (e) 5 °C/s , (f) 10 °C/s , (g) 15 °C/s

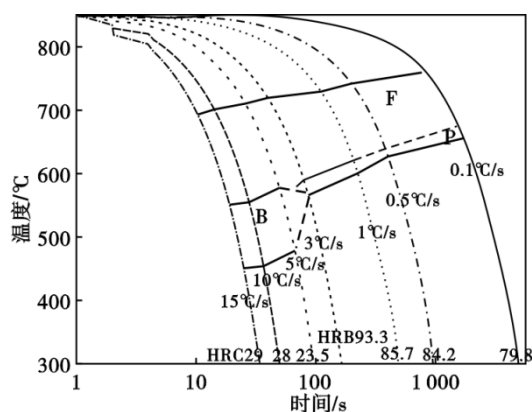


图7 16MnCr5钢的CCT曲线图

Fig. 7 CCT curve of 16MnCr5 steel

素体团。0.5~3 °C/s冷却速度下为正常的珠光体和铁素体结构,铁素体晶粒度分别为8、8.5、9级,可见随着冷却速度增加,晶粒度呈细化趋势。冷速5 °C/s开始出现贝氏体组织,F+P的组织仍占50%以上。10 °C/s和15 °C/s冷却速度下组织以贝氏体为主,含量80%以上,剩余铁素体大部分呈网状,少部分为块状。

由图7可以看出,3 °C/s的冷却速度下,转变完成的温度为600 °C左右,间接表明650~700 °C正好位于两相区,组织转变尚未完成,具备形成网状先共析铁素体的条件。

### 3 讨论

根据高温热塑性和CCT曲线试验结果,对热加工过程工艺进行优化控制。根据热塑性结果,该钢

种高温的最佳变形区间为800~1050 °C,锻造和轧制的温度应控制在该温度区间。根据CCT曲线,该钢种最佳的冷却速度为0.5~3 °C/s,此时冷却后得到的组织为F+P。并且冷却速度越快,晶粒越为细小。过于缓慢的冷却速度下,晶粒容易相互吞噬长大,不利于组织均匀性。

钢厂采用连铸连轧及热装工艺可节省能源消耗<sup>[9]</sup>,但热装不当会产生热装裂纹缺陷<sup>[10]</sup>。根据16MnCr5钢的CCT曲线和高温热塑性曲线,可制定合适的热装工艺。根据CCT曲线,常规冷却速度下600 °C时组织转变尚未完成。如果高于该温度进行热装,一方面奥氏体没有完全转变,晶粒还较为粗大<sup>[11]</sup>,再奥氏体化时晶粒得不到细化;另外碳化物在晶界析出,同样不利于后续的再加热组织。综合考虑热装的温度应尽量小于600 °C。为了生产节奏,有企业在连铸后采用三冷工艺,钢坯表面温度降低很快,能够达到400 °C以下,且心部还保留大量热量。采用三冷工艺可以保证钢坯表面组织完成转变。

针对线材生产过程,钢坯的加热温度选择为1050~1100 °C,经过高压水除鳞之后降低100 °C,表面温度为950~1000 °C,整个轧制过程温度控制在850 °C以上,吐丝温度在850~900 °C之间。冷却线上保温罩关闭,有利于降低强度,方便下游客户加工。实际生产的Φ30 mm大规格热轧线材铁素体晶粒度7.5级左右,硬度80HRB,组织均匀,组织形貌如图8所示。

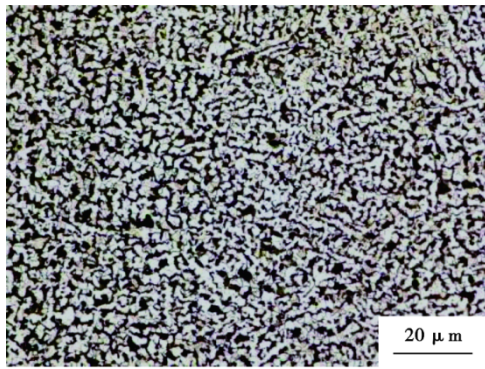


图 8 Φ30 mm 16MnCr5 钢热轧盘条组织

Fig. 8 Microstructure of Φ30 mm 16MnCr5 steel hot rolled wire rod

#### 4 结论

(1) 随着冶炼水平提高, 减少了第 II 脆性区出

现的机率。16MnCr5 钢最佳高温变形温度为 800 ~ 1 050 °C, 建议轧制温度为 950 ~ 1 000 °C, 吐丝温度 850 ~ 900 °C, 在 700 °C 附近处于脆性区域, 主要是先共析铁素体薄膜导致塑性降低。

(2) 一般连铸坯冷却到 600 °C 时组织才转变完成, 600 °C 以上热装时, 初始铸态晶粒以及晶界析出物均可能遗传到再加热的组织导致塑性不良, 因此, 热装温度应尽量 < 600 °C。

(3) 热轧后最佳冷却速度为 0.5 ~ 3 °C/s, 组织为 F+P, 考虑到后续的深加工, 应关闭保温罩, 此时冷却速度约为 1 °C/s。超过 5 °C/s 时出现贝氏体组织, 导致强度明显升高。

(4) 实际生产 Φ30 mm 大规格 16MnCr5 钢线材组织为 F+P, 晶粒度约 7.5 级, 硬度 80HRB, 组织均匀, 可以满足下游用户拉拔、冷镦等要求。

#### 参考文献

- [1] 李永超, 李瑞鹏, 李家杨, 等. 汽车发动机气门挺柱用 16MnCr5 冷镦钢盘条的研发与生产[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 24-27.
- [2] 王宁涛, 阮士朋, 段路昭, 等. SAE8640 合金钢 280 mm×325 mm 连铸坯的高温力学性能[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 68-70.
- [3] 刘江, 文光华, 唐萍. 微合金钢连铸坯横裂纹研究现状[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(10): 1-9.
- [4] Mintz B, Abu-Shosha R, Shaker M. Influence of deformation induced ferrite, grain boundary sliding, and dynamic recrystallisation on hot ductility of 0.1-0.75% C steels[J]. Materials Science and Technology, 1993, 9(10): 907-914.
- [5] Mintz B, Yue S, Jonas J J. Hot ductility of steels and its relationship to the problem of transverse cracking during continuous casting[J]. International Materials Reviews, 1991, 36(1): 187-220.
- [6] 夏新蕊, 黄斌斌. 高铬锻钢轧辊 CCT 曲线的测定及其结果分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2018, 54(12): 3.
- [7] 李世琳, 阮士朋, 王利军, 等. 15MnVB 钢 160 mm×160 mm 铸坯热变形奥氏体连续冷却转变行为[J]. 特殊钢, 2019, 40(3): 5-7.
- [8] 李战卫, 于学森, 沈奎, 等. 高强度汽车紧固件用钢 SCr440 连续冷却和等温冷却组织转变研究及应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 90-94.
- [9] 徐雷, 李海, 茆淑娟, 等. 120 t BOF-LF-180 mm×180 mm 坯连铸-连轧流程生产易切削钢 1215 工艺实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(1): 36-38.
- [10] 唐广波, 赵军, 裴英豪, 等. 热送热装微合金钢板坯轧制过程表面裂纹分析[C]//中国金属学会青年委员会, 北京机械工程学会. 2010 钢材质量控制技术、形状、尺寸精度、表面质量控制与改善学术研讨会文集. 2010: 10.
- [11] 刘亚丽, 段晓鸽, 张君平, 等. 冷装与热装加热对 GCr15 轴承钢晶粒度影响的热模拟试验[J]. 特殊钢, 2018, 39(4): 9-11.