X65 管线钢连铸的高温力学性能研究[*1]

白元武[1,2], 陈 林[1], 赵晓敏[3]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司生产部, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心, 内蒙古 包头 014010)

摘 要: X65 管线钢主要用于加工制造油气管线, 要求其具有高强度、高韧性、抗脆断以及良好的焊接性能, 但在连铸过程中易出现铸坯缺陷, 会使管线钢的综合性能降低。文章针对 X65 管线钢铸坯进行高温塑性研究, 利用 Gleeble－1500D 热模拟试验机对其进行热拉伸实验, 分析应变速率为 2.0×10^{-3}/s 变形温度 700～1 300 ℃变形条件下的断裂强度和断面收缩率随温度的变化情况。通过扫描电镜对断口形貌进行观察, 明确了断裂原因, 为连铸生产提供理论依据。

关键词: 连铸; X65 管线钢; 高温塑性

中图分类号: TG113.25 **文献标识码**: B **文章编号**: 1009－5438(2017)06－0042－05

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.06.015

Study on Mechanical Behavior Under High Temperature of X65 Pipeline Steel Continuous Casting

BAI Yuan－wu[1,2], *CHEN Lin*[1], *ZHAO Xiao－min*[3]

(1. *School of Material and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
2. *Productive Dept. of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
3. *Technical Center of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: X65 pipeline steel is mainly used in the manufacture of oil and gas pipelines, requiring high strength, high toughness, brittle fracture and good welding performance, but it is easy to appear slab defects in the continuous casting process, which will reduce the comprehensive performance of pipeline steel. In the paper, the high－temperature plasticity of X65 pipeline steel slab is studied. The hot tensile test is carried out by using Gleeble－1500D thermal simulation testing machine, and under the strain rate of 2.0×10^{-3}/s, deformation temperature of 700～1 300 ℃, the fracture strength and the section shrinkage change with temperature are analyzed. The fracture morphology is observed by scanning electron microscope, and the cause of fracture is clarified to provide a theoretical basis for continuous casting production.

Key words: continuous casting; X65 pipeline steel; high－temperature plasticity

* **收稿日期**: 2017－07－17

作者简介: 白元武(1983－), 男, 内蒙古五原县人, 在读硕士, 工程师, 现从事生产管理工作。

中国知网 https://www.cnki.net

当前材料的高温力学性能研究是一个较热门的课题之一,材料的高温性能包括材料在高温下和高温冷却后的力学性能。然而,目前国内外有关机构尚未对高温钢材力学性能的试验方法作具体规定,有关高温钢材力学性能研究的报道也较少。近年来,在连铸凝固过程方面,国内外对铸坯的高温力学性能的研究做了一些工作,但总的说来所做工作并不多,也不够深入,不够全面。本文研究 X65 管线钢铸坯高温力学性能,可以为该钢种连铸生产提供重要基础数据。

1　实验材料及方案

试验所选用的材料均取自包钢某厂,试验钢成分见表 1,方坯横向取样,精加工成 Φ10 mm × 120 mm圆柱体拉伸试样。

表 1　试验钢 X65 的化学成分(质量分数)　%

成分	C	Si	Mn	P	S	V
含量	0.12	0.25	1.50	0.03	0.015	0.08

试验利用 Gleeble－1500D 热模拟实验机,在真空条件下,将试样以 20 ℃/s 的速度快速加热(淬火+回火)到 1 100 ℃,而后以 10 ℃/s 的速度加热至 1 300 ℃,保温 1 min,以均匀成分和温度,促进析出物的溶解,然后以 3 ℃/s 的冷却速率冷却至试验温度(700 ℃、800 ℃、900 ℃、1 000 ℃、1 100 ℃、1 200 ℃、1 300 ℃),保温 2 min 后,以 $\varepsilon = 2.0 \times 10^{-3}$/s 的应变速率进行拉伸试验(见图 1)。待试样冷却后,测量断裂部位截面积计算出其断面收缩率、延伸率以及高温抗拉强度。

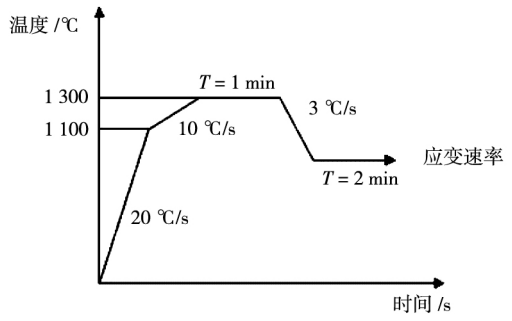


图 1　试验温度控制示意图

2　试验结果与分析

2.1　高温塑性

所谓铸坯的高温塑性,是指固体材料在外力作用下发生永久变形,而不破坏其完整性的能力。金属塑性变形的实质是由于外力在金属内部形成较大的内应力,迫使组成金属的晶粒内部产生滑移,同时晶粒间也产生滑移与移动。因此,金属塑性的好坏既取决于金属本身的晶格类型、化学成分及金相组织,又取决于变形时的外部条件,如变形温度、变形速度及受力状况等。在 1971 年,Adams 博士提出利用断面收缩率来衡量连铸坯高温塑性的高低,并且这个指标作为研究连铸坯的力学性能一直沿用现在[1]。因此,断面收缩率曲线($R_A - T$,$\delta - T$)是连铸坯的高温力学性能的重要特征曲线。

利用 Gleeble－1500D 热模拟机进行从 700 ℃到 1 300 ℃的高温拉伸实验,获得了 X65 铸坯的高温塑性参数(见表 2)。以其断面收缩率和延伸率为主要指标确定了 X65 钢坯的高温脆性温度区如图 2 所示。

表 2　断面收缩率与延伸率测试结果

拉伸温度/℃	断面收缩率/%	延伸率/%
700	65.26	7.55
800	50.31	4.82
900	70.72	6.83
1 000	89.65	10.71
1 100	81.44	7.66
1 200	68.27	5.86
1 300	62.38	4.61

由图 2 可知,断面收缩率和延伸率反映材料性能基本相同,并且表现出相似的变化规律,但由于断面收缩率所反映的是材料在断裂前的最大塑性变形量,而延伸率却并不能反映出铸坯的最大塑性。所以本文只对断面收缩率的变化进行分析。从图中可以发现,在 1 000 ℃时铸坯的塑性最好,其断面收缩率达到 89.65%,800 ℃时为脆性凹槽的谷底,塑性最差,其断面收缩率为 50.31%。温度高于 800 ℃时,材料的塑性有所回升。从图中可以看出 X65 连铸坯在 900～1 200 ℃都具有良好的热塑性。其原因是由于在此温度下连铸坯发生了动态再结晶。动态再结晶是通过动态再结晶的晶核形成与其长大来完成的。动态再结晶的晶粒是由再结晶刚刚结束后具有低位错密度的的晶粒和即将开始再结晶之前具有高位错密度的的晶粒所构成[2]。由于形变的不

中国知网　https://www.cnki.net

断进行,再结晶后的每个晶粒仍处于不断的变形状态。一定的变形条件下,金属的变形晶粒储存的畸变能积累到足够大时,便会促使动态再结晶的发生。动态再结晶使晶界在高温和高应变下获得足够的驱动力而发生迁移,当晶界迁移的速度超过了晶界滑移的速度,使得变形过程中形成的微裂纹被包围在晶粒中,阻止了裂纹的进一步扩展,致使这些裂纹的聚集和长大不能在晶界上产生。此时的裂纹只有通过应力集中形成的剪切力来横贯整个晶粒并相互连接,才能导致断裂。晶界迁移能阻断晶界的裂纹,但这些裂纹对晶界也产生一定的拖拽力,而"钉扎"正在迁移的晶界。为抵消脆化,晶界迁移的驱动力需要大于裂纹的拖拽力,而高温和高的应变速率有利于晶界的迁移,故此温度区表现为良好的塑性[3]。根据实际生产经验,常把断面收缩率($Z = 60\%$)作为判断产生裂纹的门槛,当断面收缩率小于门槛值,铸坯极易产生各种裂纹缺陷[4]。

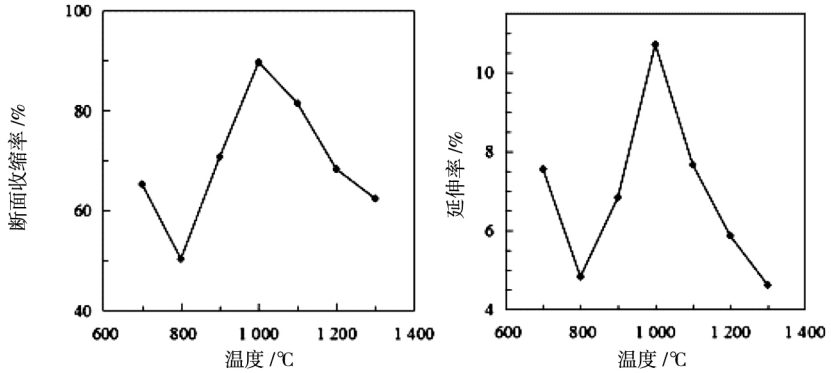
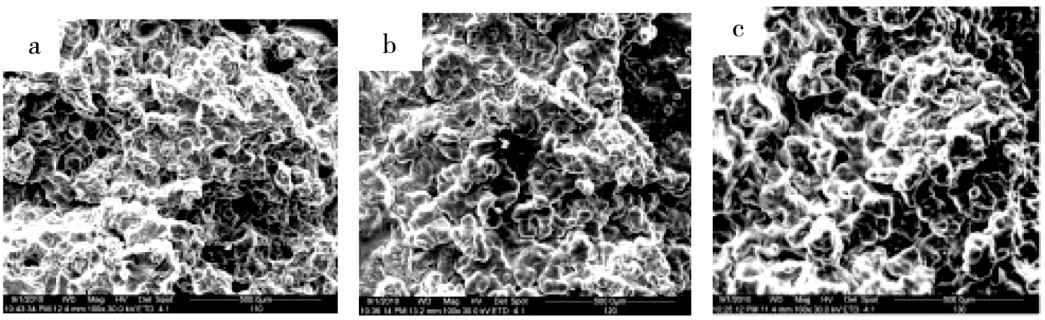


图 2 X65 铸坯断面收缩率和延伸率随温度的变化曲线

2.2 高温断口形貌

由于试件被拉断的瞬间,断口处的温度很高,断口形貌容易被破坏。所以,拉断后必须立即喷水冷却,才能保存高温断口,通过扫描电镜进行微观形貌观察分析。

(1) 1 100 ~ 1 300 ℃区间试样断口形貌。图3为试样在不同温度下的断口在扫描电镜下的二次电子成像形貌特征,断口较平滑,呈液相凝固自由收缩,晶粒细小,沿晶界液膜处断裂的特征。此区间内塑性值均大于50%,在1 100 ℃断口形貌可以观察到少部分沿晶界滑移的特征,其余大部分是晶间断裂。这是主要因为,此温度区间内变形要高于晶界处存在的 FeS、Fe(S,O) 杂质熔点,这就使得晶界处有的杂质在变形过程中被融化形成微小孔洞,在外力作用下,这些微孔不断聚合长大而产生晶间裂纹。随着变形温度的升高,实验钢的热延展性呈现下降的趋势,并且在此温度区间内,塑性与应变速率没有直接的关系。

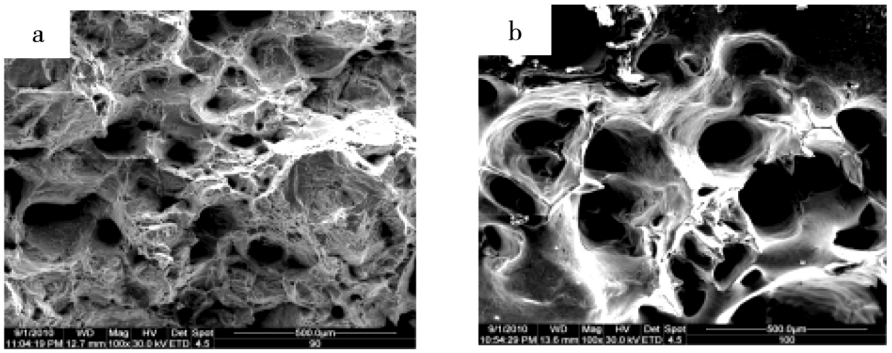


(a) 1 100 ℃ (b) 1 200 ℃ (c) 1 300 ℃

图 3 不同温度下的断口形貌

中国知网 https://www.cnki.net

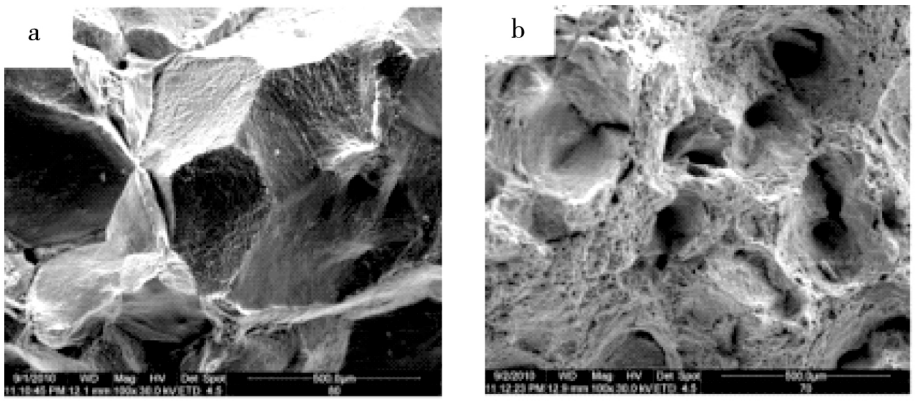
(2) 900 ~ 1 000 ℃区间试样断口形貌。变形温度为 1 000 ℃下的断口形貌如图 4 中(b) 所示,由大量的等轴韧窝组成,属于塑性断裂特征,从照片上观察,图中的等轴韧窝小而密,宏观表现为塑性最好。变形温度为 900 ℃下的断口形貌如图 4(a) 所示,断裂机理为混合的穿晶断裂和沿晶断裂,但前者占主导地位。断口处存在少量的大而深的韧窝和大量的小而密的晶界微孔。塑性值较 1 000 ℃有所下降,归其原因如下: 在此温度下钢中会发生 S - Mn - Fe 的包晶反应,生产富铁的硫化物,并且 FeS 会与铁形成低熔点共晶体分布在奥氏体晶界上,于此同时 V、Ti、Nb 的析出物在晶界处聚集,在变形过程晶界的三重点处易产生应力集中,造成晶界破坏,同时当滑移带冲击这些微粒析出物时,在每个粒子周围产生局部应力集中,此时在较小的应力下就会在粒子周围产生微孔,孔洞通过变形机理和空位扩散机理聚合长大,形成晶界裂纹,这就所谓的在宏观形貌上观察到晶界滑移处的小韧窝孔洞形成原因。



(a) 900 ℃　　(b) 1 000 ℃

图 4　X65 铸坯断口形貌

(3) 700 ~ 800 ℃区间试样断口形貌。断口组织形貌如图 5(a) 所示,明显为沿晶脆性断裂特征,晶粒间有微小的空洞生成。归其原因主要是在此温度下晶界上有大量的钒、钛、铌碳氮化物析出。



(a) 800 ℃　　(b) 700 ℃

图 5　X65 铸坯断口形貌

低温析出的析出物尺寸较小,弥散的分布在晶界上,在变形过程中钉扎晶界的滑移,当外力增加时位错会绕过析出物使其在周围形成位错环,导致析出物分布处应力集中,形成微小孔洞。由热塑性曲线可知,随着变形温度的下降,700 ℃时的塑性值要比 800 ℃有所回升,700 ℃时的断口形貌如图 5(b)

中国知网　https://www.cnki.net

所示,断裂机理属于沿晶断裂和穿晶断裂的混合。而且随着应变速率的增大,穿晶韧性断裂逐渐占主导地位。这是因为温度的下降促使铁素体的进一步析出,与此同时,由于晶界存在较多伸长变形的MnS析出物,促进了应变诱导铁素体在晶界和基体内同时形成,随着铁素体析出量的增加,使晶界处的应力集中得以缓解或消除。根据实际生产经验,常把断面收缩率($Z=60\%$)作为判断产生裂纹的门槛,当断面收缩率小于门槛值,铸坯极易产生各种裂纹缺陷。

3 结束语

X65实验钢在应变速率为2.0×10^{-3}/s变形条件下,塑性凹槽谷底温度为800 ℃,此时断面收缩率降到最低值为50.31%,塑性最差。归其原因:一是由于低温奥氏体发生相变析出薄膜网状铁素体,铁素体强度小于奥氏体,在变形过程中引起不均匀变形,裂纹易在铁素体上形成;二是奥氏体低温区域合金元素钒、钛、铌的碳氮化物或氮化物在晶界析出,易成为应力集中点,造成晶界破坏,导致晶间脆断。因此,结合生成经验判断,X65实验钢在实际连铸矫直区温度应大于850 ℃。

参 考 文 献

[1] 蔡开科,程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.

[2] 贺道中. 连续铸钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2013.

[3] L. Li, Zhou J, Duszczyk J. Determination of a constitutive relationship for AZ31B magnesium and validation through comparison between simulated and real extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(3): 372-380.

[4] 邸洪双,康向东. 低碳钢的高温力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版),2004,25(1): 26-27.

(上接第41页)

铈延展性较好,可避免钢材冷加工过程中在夹杂物周围产生大的附加应力,有利于提高钢板的成型性能。同时夹杂物的变质,能增加夹杂物与晶界抵抗裂纹形成与扩展的能力。

4 结论

通过实验室进行不同稀土加入量,不同热处理工艺优化试验,试制结果表明稀土加入量为10×10^{-6},热处理工艺淬火880 ℃ + 回火580 ℃时,试验钢的各项性能,特别是延伸率指标最优。

参 考 文 献

[1] 田志凌. 钢铁材料最新进展[J]. 焊接,2009,(12): 14-19.

[2] 匡震邦,顾海澄. 材料的力学行为[M]. 北京:高等教育出版社,1997.

[3] Zhang Wenyue. Research on hardening factor of welding HAZ[J]. China Welding, 1992, 1(1): 1-8.

[4] BertilAhlbon. Fast Bridge Svetsen special issue[J]. Swedish Welding Society, 1995, (5): 26-27.

[5] 董明水,陈明,秦珠峰. 低合金高强钢WELDOX700与WELDOX900的焊接工艺[J]. 机械工人:热加工,2006,(7): 27-31.

中国知网 https://www.cnki.net