J55石油套管显微组织与冲击性能研究*

米永峰,刘玉荣,宋 歌,吕婉姝,宋立民,罗忠辉

(内蒙古包钢钢联股份有限公司钢管公司,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章基于中国石油天然气集团有限公司发布的《无缝套管采购技术规格书》,针对热轧态J55钢级套管对冲击性能和晶粒度的附加技术要求,分析了试验钢的显微组织与力学性能,提出了抑制奥氏体组织异常长大的微钛合金化钢种设计和热连轧温度控制协同方案。工业化生产了规格为Φ244.48 mm×8.94 mm的J55钢级套管,结果表明:钢管的晶粒度、冲击功及拉伸性能均满足《无缝套管采购技术规格书》要求。

关键词: J55套管;显微组织;微钛合金化

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)03-0001-04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.03.001

Study on Microstructure and Impact Property of J55 Oil Casing

Mi Yong-feng, Liu Yu-rong, Song Ge, Lv Wan-shu, Song Li-min, Luo Zhong-hui

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

Abstract: In the paper, the microstructure and mechanical properties of test steel are analyzed aiming at the additional technical requirements for impact property and grain size of hot rolled J55 steel grade casing based on the *Technical Specification for Seamless Casing Procurement* published by China National Petroleum Corporation as well as the steel grade design of microalloying of titanium for restraining abnormal growth of austenite structure and the scheme for cooperative control of hot continuous rolling temperature are proposed. The industrial production of J55 steel grade casing with the specification of Φ244.48 mm×8.94 mm has been carried out, the results showed that the grain size, impact energy and tensile property could all meet the requirements of *Technical Specification for Seamless Casing Procurement*.

Key words: J55 casing; microstructure; microalloying of titanium

石油套管是用于支撑油气井壁的钢管,以保证钻井过程进行和完井后整个油井的正常运行。每一口油气井根据不同的钻井深度和地质情况,要使用数层套管。套管下井后要采用水泥等进行固井,因此固井套管无法重复利用,属于一次性消耗材料。一般情况下,按使用情况套管可分为导管、表层套管、技术套管和油层套管。

油气井钻采作业中,J55套管主要作为表层套管服役,是油气井钻采作业中不可或缺的服役材料。随着钻采技术发展及地质地貌复杂化,受井壁塌陷、地层错动及地层压力影响,要求表层套管在满足拉伸性能的基础上,还具有较高的冲击韧性。为保证油气井钻井、完井及开采过程稳定,2018年中国石油天然气集团有限公司正式发布了《无缝套管采购

* 收稿日期:2021-05-06

作者简介:米永峰(1984-),男,陕西省榆林市人,硕士,高级工程师,现从事无缝钢管产品、工艺开发及技术管理工作。

技术规格书》，明确规定了J55套管产品的冲击韧性和晶粒度验收要求。

J55套管以热轧状态交货，然而，无缝钢管热连轧过程中钢的变形分配及温度联动调节性较差，难以实现钢管组织转变及力学性能的柔性控制。因此，研究获得热连轧过程中钢的组织转变特性、常温显微组织与力学性能的关系，对产品成分设计、工艺控制技术及获得目标产品性能具有重要的指导意义。

1 背景

J55是美国石油学会发布的API Specification 5CT[1]标准中的国际化通用牌号，在产品性能上其仅规定了化学成分和拉伸性能。2018年中国石油天然气集团有限公司发布了《无缝套管采购技术规格书》，与API Specification 5CT标准要求相比较，《无缝套管采购技术规格书》对J55钢级套管附加规定了冲击功和晶粒度的要求，见表1。

表1 J55钢级套管主要力学性能要求

钢级	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	K_{V8}/J	晶粒度/级
J55	379～552	≥517	≥32	≥6

注：K_{V8}为室温纵向冲击功值，试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm。

API Specification 5CT规定J55套管以热轧态交货。基于无缝钢管的生产工艺特性、热连轧机组变形特点及产品拉伸性能验收要求，钢种设计上主要以普通碳锰钢为主，如37Mn5、34Mn6等。

文章基于国内某钢厂采用34Mn6钢种生产的规格为Φ244.48 mm×8.94 mm的J55套管，批量检验分析了产品的显微组织、冲击韧性及拉伸性能。钢管横截面内、中、外壁的显微组织见图1，力学性能检验结果见表2。

表2 J55套管批量性能检测结果

钢级	K_{V8}/J		R_m/MPa	$R_{t0.5}$/MPa	$A_{50.8}$/%	晶粒度/级
	检验结果	平均值				
J55	17～37	29	720～745	420～460	26～32	5～8

注：K_{V8}为室温纵向冲击功值，试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm。

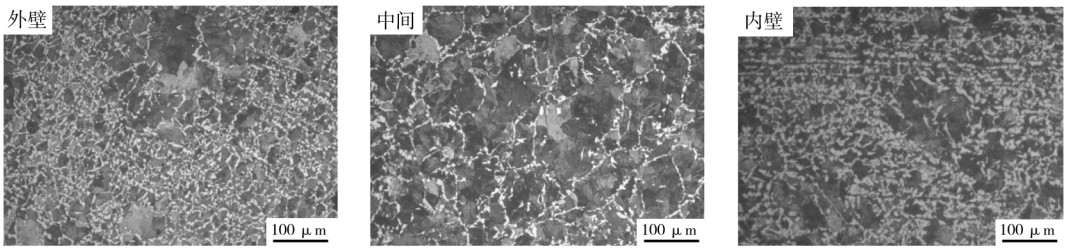


图1 J55套管产品的显微组织

从检验结果分析来看，产品的拉伸性能满足《无缝套管采购技术规格书》要求；冲击功为17～37 J，平均冲击功为29 J，内外壁的显微组织为块状铁素体+少量网状铁素体+珠光体，管壁中间的显微组织为网状铁素体+珠光体，晶粒度为5～8级，显微组织不均匀。产品的冲击功及晶粒度未达到《无缝套管采购技术规格书》要求。

2 原因分析

从金相组织可以看出，钢管基体组织为铁素体+珠光体，晶粒度不均匀，从5级到8级不等。亚共析钢中，网状铁素体主要是由于缓慢冷却形成的，钢管内、外壁为块状铁素体+珠光体，管壁中间为网状铁素体+珠光体组织，这与无缝钢管热连轧工艺吻合，热连轧过程中钢管内壁与顶头、芯棒接触，钢管外壁与空气接触，与管壁中间相比，钢管内外壁因热传导及对流的方式提高了冷却速率，因而，适当提高冷却速率可减少网状铁素体析出。然而，由于无缝钢管三维截面特性及热变形特点，除配置冷却设备以实现热连轧过程控制冷却速率外，目前在工艺措施上还没有显著手段。

热连轧变形时材料处于奥氏体区，热变形将使

奥氏体晶粒破碎，形成不均匀的混合晶粒，同时热变形将为奥氏体动态再结晶及奥氏体晶粒长大提供驱动力，使奥氏体晶粒容易长大。动态再结晶阶段晶界处能量较高，原子有更大的自由能和运动空间，碳原子和合金原子容易扩散，按照亚共析钢的组织转变特点，碳原子向聚碳的组织扩散，即碳原子向奥氏体晶内扩散，使晶界上处于脱碳状态，晶界上析出先共析铁素体[2]。随着先共析铁素体在晶界处的形成，晶内的碳含量不断升高，剩余奥氏体达到共析点的碳含量时，发生共析转变，晶内形成粗大的珠光体组织。轧制过程中材料温降速率慢及轧后冷却速率低，导致先共析铁素体沿奥氏体晶界析出形成网状铁素体。铁素体属于软化相，而软化相铁素体在晶界处的聚集，将会大大降低晶界处的韧性，即晶界处是钢的薄弱处，遭受冲击时将使金属材料首先在晶界处断裂，并沿晶断开。晶粒越粗大，晶界越少，加速了断裂。所以网状铁素体和晶粒粗大将使钢的冲击韧性大大降低。

为保证轧制后产品的冲击性能和晶粒度满足《无缝套管采购技术规格书》要求，应抑制网状铁素体的产生和奥氏体晶粒长大。工艺控制可实施措施有：①控制轧制，适当降低环形炉加热温度，严格控制终轧温度，提高热轧后的冷却速率；②正火处理，重新加热至奥氏体区，获得均匀的块状铁素体 + 珠光体组织。另外，基于无缝钢管热变形过程中温度及变形分配适调空间窄的特性，可通过钢种微合金化处理的方法，以抑制高温下奥氏体晶粒长大，缩小奥氏体相区，提高奥氏体向铁素体的转变温度，为热连轧机组终轧温度控制提供工艺窗口。

3　技术方案

为使 J55 套管热轧状态交货性能满足《无缝套管采购技术规格书》要求，以获得块状铁素体 + 珠光体组织为目标，从钢种微合金化处理和控制轧制协同控制开展显微组织控制。

钢在加热后形成的奥氏体组织，特别是奥氏体晶粒大小对冷却转变后钢的组织和性能有重要影响，奥氏体晶粒越细小，则室温状态下钢的强度越高，塑形和冲击韧性越高。钢的加热温度、加热时间、钢的化学成分直接影响奥氏体晶粒大小。奥氏体晶粒越细小，晶界越多，将为先共析铁素体提供更多的形核位置，抑制网状铁素体形成，钢冷却转变后的组织越细小。细化晶粒元素中，Nb、V、Ti 是强碳化物形成元素，能形成高熔点的弥散碳化物和氮化物，可细化奥氏体晶粒，其中高温析出的、弥散分布的 TiN 对阻止奥氏体晶粒长大最为有效[3]。

从控制奥氏体晶粒长大角度入手，制定了工业化钢种微合金化和热连轧工艺控制措施，见表 3。

表 3　工业化控制方案

方案	钢种设计优化	管坯均热温度/℃	终轧温度/℃
原工业化工艺方案	34Mn6	1 260 ~ 1 285	860 ~ 880
新设计工艺方案	在 34Mn6 钢种基础上，吨钢加入不大于 1 kg 钛，实现微钛合金化处理。	1 230 ~ 1 250	820 ~ 850

按照新设计工艺方案，开展了工业试验，关键生产工艺控制指标满足设计要求，结果见表 4。

表 4　关键生产工艺控制结果

Ti 含量/%	管坯实际均热温度/℃	终轧温度/℃
0.004	1 235 ~ 1 248	835 ~ 850

4　结果与分析

工业生产 18 炉次，产品的拉伸性能、冲击韧性及晶粒度均满足《无缝套管采购技术规格书》要求，产品各项力学性能合格率 100%。产品的横截面显微组织见图 2，各项力学性能见表 5。

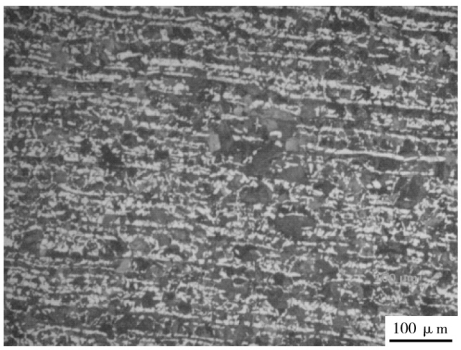


图 2　J55 套管产品的显微组织形貌

批量化生产检验结果表明，通过钢种微钛合金化处理、热连轧工艺控制，J55 套管热轧态的力学性能及显微组织满足《无缝套管采购技术规格书》要求。

产品的冲击功为 35 ~ 64 J，平均冲击功为 47 J，显微组织为铁素体 + 珠光体，晶粒度为 6 ~ 8 级，经钢种及工艺协同优化设计，产品的组织较均匀且网状铁素体明显减少。一方面微钛合金化处理后，高温变形区析出细小弥散的 TiN、Ti(CN) 第二相质点，在奥氏体晶粒长大时起到对晶界迁移的拖曳作用，使奥氏体晶粒长大需要更多的能量，从而抑制晶粒度的长大[4]。细小的奥氏体晶粒使冷却后钢的组织更均匀细小，从而起到细晶强化韧性的作用。钛的第二个作用是析出强化，钛元素的加入可以形成细小均匀弥散分布的第二相质点，而第二相粒子可以有效的阻碍位错运动，运动中的位错遇到滑移面上的第二相粒子时，或切过，或绕过，这样滑移变形才能继续进行，这一过程要消耗额外的能量，需要提高外加应力，所以实现强韧化，从而起到提高韧性的作用[5]。另一方面，通过管坯加热温度控制，抑制了高温区奥氏体晶粒异常长大，为动态再结晶提供了更多的形核质点和形核位置；而终轧温度控制，为钢在奥氏体区变形、组织转变区冷却先共析铁素体形核和均匀长大提供了条件，充分抑制网状铁素体形成。

表 5 新设计工艺工业化产品性能检验结果

钢级	K_{V8}/J		R_m/MPa	$R_{t0.5}$/MPa	$A_{50.8}$/%	晶粒度/级
	检验结果	平均值				
J55	35 ~ 64	47	690 ~ 730	435 ~ 460	28 ~ 33	6 ~ 8

注：K_{V8} 为室温纵向冲击功值，试样尺寸为 10 mm × 10 mm × 55 mm。

5 结论

(1) J55 套管用钢中铁素体以网状形貌存在及组织不均匀是造成产品冲击韧性不满足中国石油天然气集团有限公司《无缝套管采购技术规格书》要求的主要原因。

(2) 通过钢种微钛合金化处理、热连轧机组管坯加热温度和终轧温度控制，规格为 Φ244.48 mm × 8.94 mm 的 J55 套管在热轧态下的全尺寸纵向室温冲击韧性不小于 35 J，基体组织晶粒度大于等于 6 级。

(3) 高温变形区析出细小弥散的 TiN、Ti(CN) 第二相质点可抑制网状铁素体的形成，细化高温奥氏体组织，进而细化冷却后产品的显微组织。文章研究的钢种微钛合金化处理技术可为热轧态产品提高冲击韧性提供钢种优化指导。

参 考 文 献

[1] API SPECIFICATION 5CT, Specification for Casing and Tubing [S].

[2] 赵品，谢辅洲，孙振国. 材料科学基础教程 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2003.

[3] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京：机械工业出版社，1992.

[4] 钱永兰，孙少乐，乐敏毅. 微钛处理钢的奥氏体晶粒长大行为及第二相质点的作用 [J]. 钢铁钒钛，1989，(1)：82 - 88.

[5] 甘晓龙，岳江波，杜涛，等. 钛铌微合金化钢强韧化机理研究 [J]. 热加工工艺，2013，(22)：89 - 94.