

Microstructure and Mechanical Properties of High-silicon K52 Pipeline Steel in Cold Area

An Chenggang^{1,3,*}, Niu Tao^{1,3}, Wu Xinlang², Dai Xiaoli^{1,3}, Yu Cheng², Zhang Caixia²

¹Shougang Research Institute of Technology, Beijing, China

²Shougang Qian'an Steel Company, Qian'an, China

³Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron & Steel Production Technology, Beijing, China

Email address:

ancg0613@126.com (An Chenggang), Johnniu@126.com (Niu Tao), Wuxinlang2160@sgqg.com (Wu Xinlang), Daixiaoli1302@sina.com (Dai Xiaoli), Yuchen@sgqg.com (Yu Cheng), Zhangcaixia@sgqg.com (Zhang Caixia)

*Corresponding author

To cite this article:

An Chenggang, Niu Tao, Wu Xinlang, Dai Xiaoli, Yu Cheng, Zhang Caixia. Microstructure and Mechanical Properties of High-silicon K52 Pipeline Steel in Cold Area. *Science Discovery*. Vol. 5, No. 3, 2017, pp. 164-168. doi: 10.11648/j.sd.20170503.11

Received: March 20, 2017; Accepted: May 4, 2017; Published: May 11, 2017

Abstract: In this paper, high-silicon K52 and API X52 were studied comparatively, which were with similar yield strength. The results showed that K52 with high-silicon and low-manganese asked for higher tensile strength, lower yield ratio and higher impact energy than API X52. K52 was successfully produced with more content of Nb, V, Ti and so on, which is with high tensile strength, low yield ratio and high impact energy. The oxide scale of K52 was more thickness because of the high-silic. The thickness of oxide scale could be reduced by the lower tapping temperature during hot rolling. The inclusion of silicon oxide was bad for the toughness of welding line, which was forming during the welding process. The squeeze amount should be increased to improve the impact energy of welds.

Keywords: K52, High-Silicon, Pipeline Steel, Oxide Scale

高寒地区长输管线用高硅K52组织性能研究

安成钢^{1,*}, 牛涛^{1,3}, 吴新朗², 代晓莉^{1,3}, 于晨², 张彩霞²

¹首钢技术研究院薄板研究所, 北京, 中国

²首钢迁安钢铁有限责任公司制造部, 迁安, 中国

³绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室, 北京, 中国

邮箱

ancg0613@126.com (安成钢), Johnniu@126.com (牛涛), Wuxinlang2160@sgqg.com (吴新朗), Daixiaoli1302@sina.com (代晓莉), Yuchen@sgqg.com (于晨), Zhangcaixia@sgqg.com (张彩霞)

摘要: 本文对比研究了屈服强度相近的俄标高硅K52与API X52的组织性能, 通过对比发现: 高硅K52要求高硅低锰的成分体系, 且抗拉强度、屈强比以及低温冲击韧性上要求更高。通过成分的优化设计, 适量的添加Nb、V、Ti等微合金元素并降低卷取温度, 实现细化晶粒提高强韧性的目的, 成功的开发了高硅K52。由于K52高硅低锰的成分体系, 热轧过程中其氧化铁皮较为严重, 较低的出炉温度可以减少氧化铁皮厚度。K52在焊接过程中易产生含硅氧化物夹杂, 对焊缝冲击韧性造成不利影响, 可以通过增大挤压量的方法解决。

关键字: K52, 高硅含量, 管线钢, 氧化铁皮

1. 引言

近些年来能源需求逐步增加，油气开采范围逐渐扩大，开采环境日趋恶劣。俄罗斯是世界能源大国，其西伯利亚地区油气资源丰富，但开采及输送环境恶劣，对管线钢的性能提出了更高的要求[1, 2]。由于高寒地区的极端地理环境，除了对高强高韧的基本要求外，更强调低屈强比、高延伸率，以及管材在屈服变形后的塑性变形能力，同时对试样低温韧性也提出了较高的要求[3]。

基于极端环境下的油气集输工作，俄罗斯积累了丰富的经验，形成了一套独有的管线钢标准，并在管道设计、建设上特点鲜明，对中国管道建设有重要的借鉴意义[4]。本文对俄标高硅K52的组织性能进行了研究，充分剖析俄标管线钢的设计特点，为深入了解俄标管线钢提供了一个窗口，对中国出口管线用钢有重要意义。

2. 管线钢标准对比

中国油气输送管线钢常采用的标准有GB/T9711、API SPEC 5L以及IOS 3183等，整体上所采用的管线钢标准与欧美国家标准相近。而俄罗斯油气输送用焊管标准自成体系，主要为GOST标准，如俄联邦国家标准GOST R 52079。该标准与API SPEC 5L存在较大差异。特别是由于俄罗斯特殊的地理环境，其在产品成分及性能要求上有着鲜明的特色。下面以屈服强度相近的高寒地区长输用高硅K52管线钢与API X52作为对比，进一步说明俄罗斯管线钢标准与API SPEC 5L的差异。

2.1. 成分要求

高硅K52与API X52成分上最大的差异在于Si、Mn元素的要求，其次在微合金元素Nb、V的要求上同样存在一定的差异，具体的对比情况如表1所示。

表1 高硅K52与API X52化学成分/(质量分数，%)。

牌号	C	Si	Mn	Nb	V
高硅K52	0.07~	0.50~	0.50~	0.015~	0.04~
	0.12	0.80	0.80	0.06	0.12
API X52	≤0.22	≤0.45	≤1.40	Nb+V+Ti≤0.15	

通过对比发现，高硅K52对Si、Mn成分的要求与API X52存在明显的差异。高硅K52的Si含量明显高于API X52，其下限要求的0.5%仍高于API X52的上限要求，Si元素作为奥氏体稳定元素，有利于固溶强化和提高塑形，K52的高硅成分体系有利于制管后管端的扩径以及防腐层附着效果的提高，但易形成红色氧化铁皮，在后续ERW制管过程中容易在焊缝位置形成含硅氧化物夹杂，降低焊缝的冲击韧性。高硅K52的Mn含量明显较低，上限仅为0.80%，这样的成分要求给卷板强度的保证增加了难度，需通过微合金元素的优化提高卷板强度。此外，对于Nb、V的要求相较于API X52更为的严格。

2.2. 性能要求

表2 高硅K52与API X52力学性能。

牌号	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	屈强比	硬度 HV10	冲击韧性
高硅K52	353~510	≥510	≤0.87	≤194	-60℃ U型≥35J -20℃ V型≥35J
API X52	360~530	460~760	≤0.93	≤220	-20℃ V型≥27J

通过对比发现，虽然在屈服强度上两者要求的较为接近，但抗拉强度要求高硅K52要高出50MPa，同时屈强比要求为≤0.87。对维氏硬度的要求高硅K52要求更为严格，要求≤194 HV10。

最大的差别在于两者对冲击韧性的要求，高硅K52不仅要求-20℃V型冲击功≥35J，而且还要求-60℃条件下U型冲击功≥35J，而API X52仅-20℃V型冲击功≥27J。对U型冲击功而言，主要侧重于衡量裂纹的形成过程，即保证在极低温度下裂纹不易形成；而对V型冲击功而言更侧重于衡量裂纹扩展过程，即形成裂纹后的止裂性。

3. 试验材料及方法

本文所采用的实验钢为中国某钢厂在相近热连轧工艺生产的6mm规格俄高硅管线钢K52和API X52热轧卷板。其实际冶炼成分如表3所示，实际轧制工艺控制如表4所示。

表3 高硅K52与API X52化学成分/(质量分数，%)。

编号	牌号	规格/mm	C	Si	Mn	Nb+V+Ti+Cr
1	高硅K52	6	0.10	0.60	0.70	0.13
2	高硅K52	6	0.09	0.61	0.75	0.15
3	API X52	6	0.085	0.20	1.40	0.08

高硅K52和API X52的化学成分对比如表3所示。由于高硅K52特殊的成分要求，在成分设计时尽可能的采用偏下限的Si含量和偏上限的Mn含量，降低高硅低锰所带来的不利影响。此外，虽然提高Si含量有利于固溶强化，然而其并不能弥补Mn元素降低所带来的影响。Mn元素除了作为重要的固溶强化元素外，同样具有一定程度的细晶强化作用，对于提高管线钢的低温韧性具有一定的作用。因此在高硅K52的成分设计时，适当的提高了细晶强化元素和析出强化元素的含量，细化显微组织并提高低温韧性。为保证其较高的抗拉强度和较低的屈强比要，适当的提高了C元素含量。

表4 高硅K52与API X52热轧工艺。

编号	牌号	出炉温度 /℃	R2出口温 度/℃	终轧温度 /℃	卷取温度 /℃
1	高硅K52	1200	982	861	566
2	高硅K52	1170	974	865	578
3	API X52	1200	980	860	600

高硅K52和API X52的化学成分对比如表所示。在工艺设计的过程中, 为保证高硅K52的高强度, 适当的降低了卷取温度, 细化组织, 提高强度和冲击韧性。此外, 在工艺执行上高硅K52成分的1#、2#试样采用延迟加速冷却的方法促进先共析铁素体的析出, 实现降低屈强比的目的。

由于高硅K52的Si含量超过0.60%以上, 根据相关文献报道[5], 其氧化铁皮厚度将明显增厚。为降低氧化铁皮厚度, 减少带钢表面红锈对ERW焊接的影响, 对2#试样采用低温加热工艺, 研究加热工艺对氧化铁皮厚度的影响。

采用ARL-4460型直读光谱仪对热轧卷板进行成分分析。对所生产的热轧卷板进行拉伸性能测试、冲击性能测试等常规力学性能检验。利用金相显微镜以及JSM 7001F场发射扫描电镜(SEM)观察和分析其显微组织和氧化铁皮层。对制管后冲击功偏低的焊缝通过扫描电镜观察冲击断口的形貌并进行能谱分析。

4. 试验结果与分析

4.1. 力学性能对比

高硅K52和API X52的力学性能对比如表所示。通过对比发现, 较低温度出炉的2#试样强度明显低于其他两个试样。这主要是由于低温加热工艺不利于微合金元素的固溶, 在控轧控冷过程中不能得到更为充分的析出, 起到细晶强化和析出强化的作用, 造成强度偏低。

高硅K52成分的1#、2#试样屈强比为0.85和0.83, 明显低于API X52的0.89。这是因为高硅K52采用了延迟加速冷却的轧制工艺, 促进了先共析铁素体的析出, 明显降低了带钢的屈强比[6]。

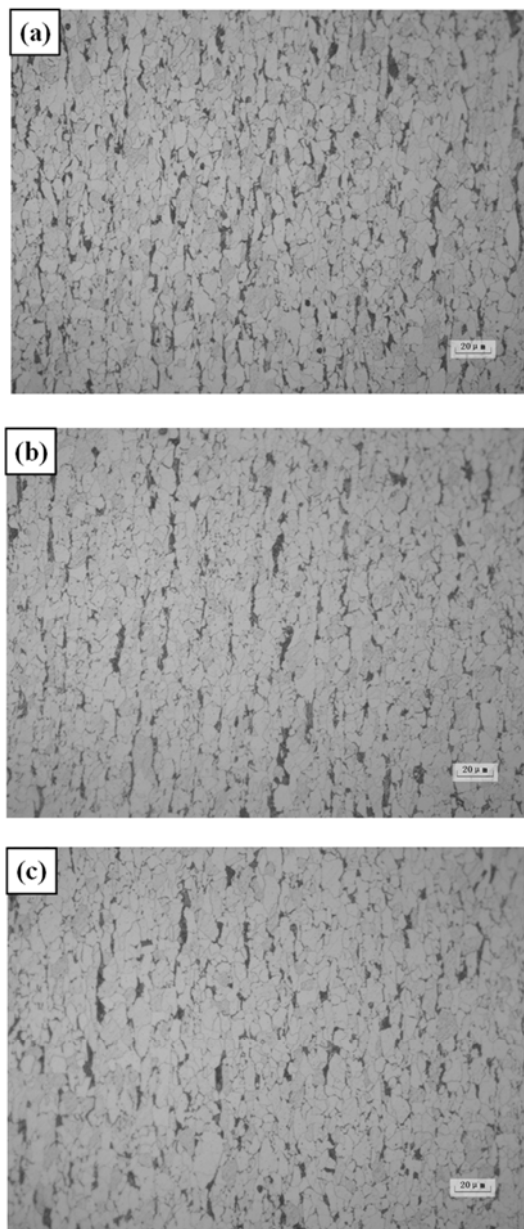
通过成分及工艺的优化, 高硅K52的-60℃U型冲击功达到100J左右, 完全满足高硅K52的技术条件要求。由于添加了较多的细晶强化元素, 细晶强化左右明显, 强度提升的同时低温韧性相较于API X52同样有一定程度的提高。

表5 俄罗斯高硅K52与API X52力学性能。

编号	牌号	规格/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	硬度HV10	冲击功
1	高硅K52	6	478	561	0.85	183	-60℃U型98J -20℃ V型 185J
2	高硅K52	6	455	550	0.83	183	-60℃U型102J -20℃ V型 192J
3	API X52	6	467	525	0.89	171	-20℃ V型171J

4.2. 显微组织对比

如图1所示为高硅K52与API X52的显微组织。三个试样的显微组织均为铁素体+珠光体组织。由于高硅K52的合金成分中加入了较多含量的细晶强化元素, 加之卷取温度较低, 组织细化明显, 其晶粒度约为12.5级左右。而API X52由于卷取温度较高, 细晶强化元素较少, 其显微组织较为粗大, 晶粒度约为11级左右。



(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52

图1 俄罗斯高硅K52与API X52的显微组织。

4.3. 氧化铁皮对比

如(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

图2所示为俄罗斯高硅K52与API X52的氧化铁皮层的宏观和微观形貌。如(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

图2(d)所示, 高硅K52卷板表层的红色氧化铁皮明显。通过(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

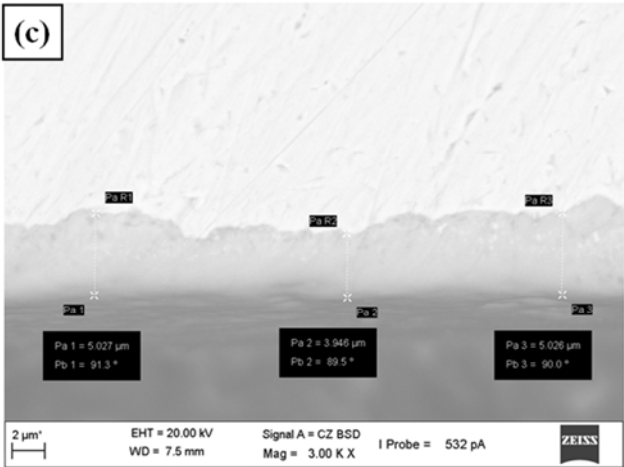
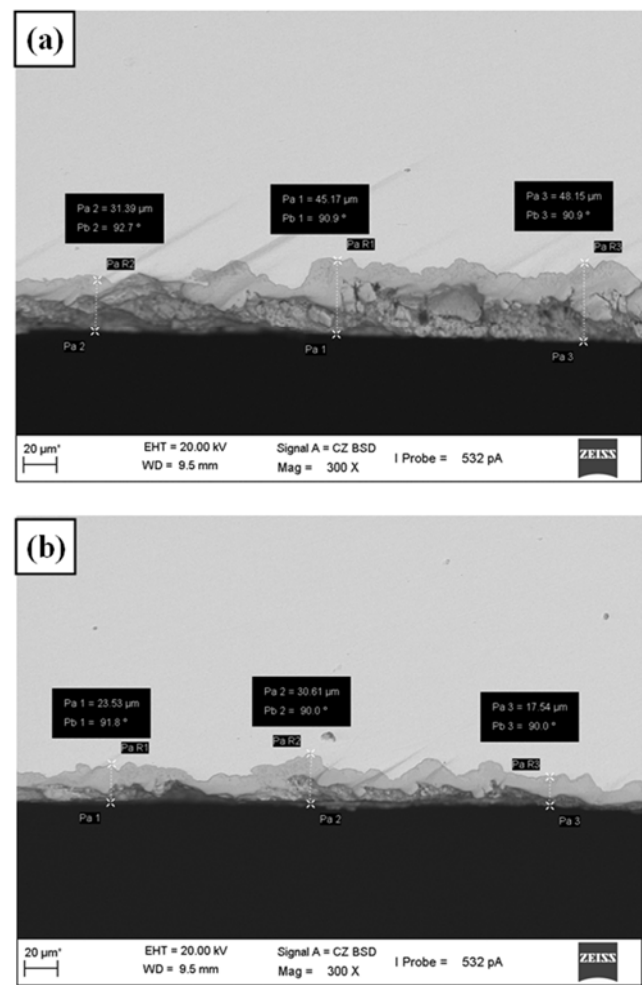
图2(a)、(b)与(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

图2(c)的对比发现, 高硅K52的氧化铁皮层明显厚于API X52。有研究表明[7], 在其他条件不变的情况下, Si

含量是影响钢卷表面红锈的主要原因，随Si含量的增加带钢表面红锈明显较多。因此，导致高硅K52的氧化铁皮层厚度增大的主要原因是较高的Si含量，易于形成 FeSiO_4 ，其钉扎作用导致一次氧化铁皮难以除尽，在轧制过程中压入基体中，进而氧化成红色氧化铁皮[8]。

如 (a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

图2(a)、(b)对比可知，同样为高硅K52的2号试样的氧化铁皮层厚度明显低于1#试样。通过对比两试样的热轧工艺，如表所示，两试样的主要差别在于出炉温度的不同。较高的出炉温度容易导致Si在较高激活能的作用下向一次氧化铁皮层和基体之间扩散，形成了较多的铁橄榄石，其与基体结合度较高，无法通过后续除鳞祛除。该实验结果与宝钢杨峰等人的研究结果一致[9]。



(a) 1#试样, K52; (b) 2#试样, K52; (c) 3#试样, X52; (d) K52宏观氧化铁皮

图2 俄罗斯高硅K52与API X52的氧化铁皮层。

4. 4. 焊缝冲击断口分析

对俄高硅K52的卷板夹杂物进行分析，结果表明，如图3(a)和表所示，典型的夹杂物尺寸较小，仅为3~5 μm，属于典型的 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaS}$ 类夹杂，对冲击功没有明显的影响。同时对母材的冲击断口进行了观察，如图3(b)所示，未发现明显的含硅氧化物夹杂，冲击断口呈现典型的韧性断裂特征。

高硅K52在ERW制管过程中，在焊缝位置出现了冲击功不合的现象，冲击功仅为5 J，其断口如图3(c)所示。经能谱分析结果表明，如表所示，在断口处发现了大量的含硅氧化物夹杂。这主要是由于K52高硅低锰的成分特点，Mn/Si比较低，夹杂物裂纹指数较高。在高频焊接过程中Mn、Si、Fe与O反应生成了 $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ，该物质熔点为1270℃，通过机械辊挤压易于从焊缝中排出。低Mn/Si比在高频焊接时，会残留有熔点为1700℃的 SiO_2 ，影响焊缝的质量。

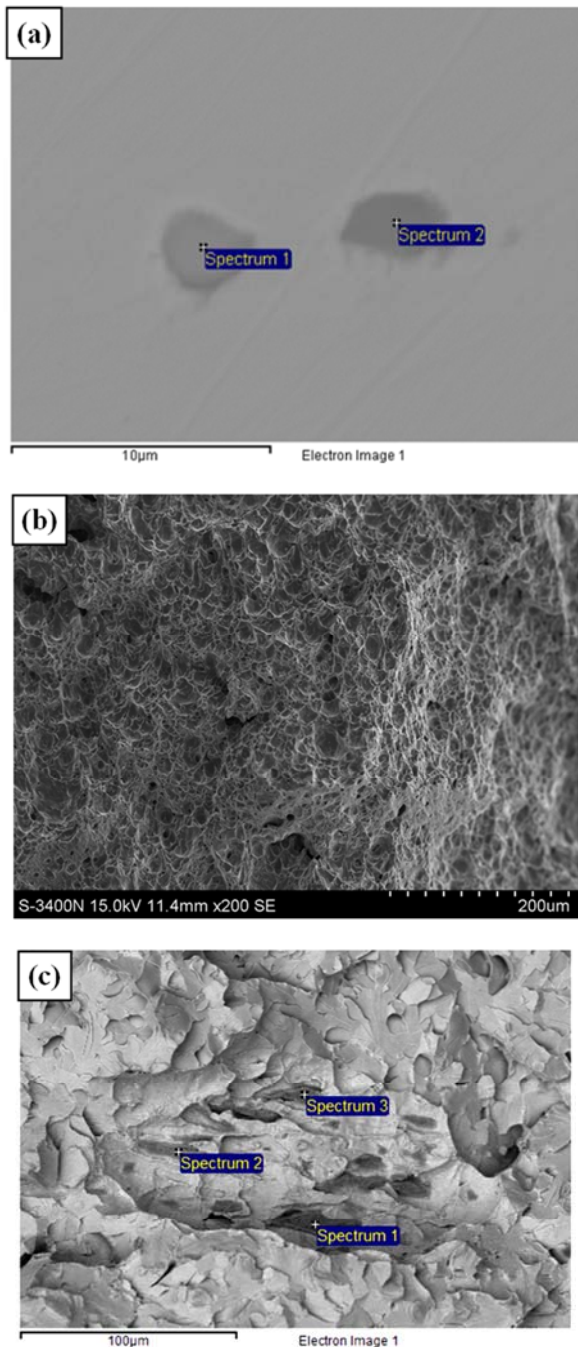


图3 1#试样母材夹杂物、母材及焊缝冲击断口。

(a) 1号试样典型夹杂物；(b) 1号试样母材冲击断口；(c) 1号试样焊缝冲击偏低断口

表6 图3(a)能谱分析结果/(质量分数, %)。

Spectrum	O	Mg	Al	S	Ca	Fe
Spectrum 1	—	25.28	—	33.51	29.97	11.23
Spectrum 2	42.11	9.51	30.31	1.63	1.88	14.56

表7 图3(c)能谱分析结果/(质量分数, %)。

Spectrum	O	Na	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe
Spectrum 1	54.43	0.45	3.11	23.38	0.34	0.90	14.35	3.05
Spectrum 2	45.91	—	2.38	21.00	—	2.32	22.50	5.90
Spectrum 3	43.29	—	2.09	24.73	—	1.44	23.78	4.67

为解决这一问题,需在焊接的过程中需通过较大的挤压力尽可能的将氧化夹杂物排出[10],提高焊缝的纯净度,进而提高焊缝的低温冲击韧性。

5. 结论

相较于API 5L标准,俄标高硅K52其最大的特点为高硅低锰的成分要求,且对其他合金成分要求范围更为狭窄;在性能上尽管高硅K52与API X52屈服强度相近,但是其抗拉强度要求更高、屈强比要求更低,冲击韧性要求更高,这都给产品开发带来了较大的难点。因此,在开发高硅K52时,需增加一定含量的微合金元素,并适当的降低卷取温度可以有效的细化晶粒,提高强度和冲击韧性;通过延迟加速冷却的方法可以有效的降低屈强比。在轧制过程中,高硅K52由于其高硅的成分体系,热轧过程中其氧化铁皮较为严重,较低的出炉温度可以减少氧化铁皮厚度,但会在一定程度上降低热轧卷板的强度。高硅K52在ERW制管过程中,在焊缝位置容易形成含硅氧化物,对焊缝的冲击韧性造成不利影响。需在焊接的过程中需通过较大的挤压力尽可能的将氧化夹杂物排出,改善焊缝的组织性能。

参考文献

- [1] 王晓香. 我国天然气工业和管线钢管发展展望[J]. 焊管, 2010, 33(3): 5-9.
- [2] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 中国石化出版社, 2012, 6-7.
- [3] 万朝晖. 俄罗斯油气输送用焊接钢管标准及认证初探[J]. 焊管, 2014, 37(3): 60-67.
- [4] 谢勇, 李记科, 李云龙, 等. 俄罗斯油气输送钢管标准与国内标准对比分析[J]. 焊管, 2008, 31(1): 88-92.
- [5] 王畅, 于洋, 牛涛, 等. X80管线钢高温氧化膜的生长机理[J]. 钢铁研究学报, 2016(5): 57-63.
- [6] 高惠临. 管线钢屈强比分析与评述[J]. 焊管, 2010, 33(6): 10-14.
- [7] 王松涛, 李敏, 朱立新, 等. Si含量对热轧卷板表面氧化铁皮的影响[J]. 热加工工艺, 2011, 40(16): 50-52.
- [8] Tomoki Fukagawa, Hikaru Okada, Yasuhiro Maehar. Mechanism of Red Scale Defect Formation in Si Added Hot Rolled Steel Sheets. ISIJ International, 1994, 34(11): 906-911.
- [9] 杨峰, 欧鹏. 热轧产品红色氧化铁皮成因及消除方法研究[J]. 钢铁, 2006, 41(增刊2): 380-385.
- [10] 安成钢, 牛涛, 崔阳, 等. 俄罗斯高硅管线钢K52焊缝缺陷影响因素分析[J]. 热加工工艺, 2016(5): 204-207.