

热输入对 S43932 超纯铁素体不锈钢焊接接头组织性能的影响

张晶晶^{1,2} 段秀峰^{1,2} 李国平^{1,2}

(1 太原钢铁(集团)有限公司 先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司 技术中心,太原 030003)

摘要 对 1.0 mm 厚度的 S43932 不锈钢冷轧板分别进行 88、101、132、188 J/mm 的钨极氩弧焊接,研究了焊接区的显微形貌和相组成。详细分析了垂直焊缝、平行焊缝和带缺口焊缝试样的拉伸性能及焊缝杯突试验结果,当热输入为 101 J/mm 时,焊接接头具有最佳的拉伸及成形性能匹配,之后随热输入 >101 J/mm,焊接接头抗拉强度和埃里克森杯突值急剧下降。焊接接头良好的力学性能与焊接区小尺寸晶粒的形成及大量富 Ti(Nb,Ti)(C,N)相的析出有关。

关键词 S43932 铁素体不锈钢 钨极氩弧焊 热输入 焊接接头 组织性能

Influence of Heat Input on Microstructure and Properties of Welded Joint of S43932 Ultra-pure Ferritic Stainless Steel

Zhang Jingjing^{1,2}, Duan Xiufeng^{1,2} and Li Guoping^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel Materials, Taiyuan Iron & Steel (Group) Co Ltd, Taiyuan 030003;

2 Technology Center, Shanxi Taiyuan Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract S43932 stainless steel cold rolled plate with a thickness of 1.0 mm is welded with heat input of 88, 101, 132 and 188 J/mm by tungsten inert gas welding, and the micro-morphologies and phase constitutes of the weld zone are investigated. By the systematic analysis of the tensile properties of welded specimens when perpendicular to and parallel to weld seam, and with notch weld seam and the weld seam Erichsen cupping test results, it is found that when the heat input is 101 J/mm, the welded joint has optimum matching of tensile and forming performance. However, when the heat input larger than 101 J/mm, the tensile strength and Erichsen cupping value of the welded joint decreases drastically. The formation of small grains and the precipitation of Ti-riched (Nb, Ti)(C, N) phase in the weld zone lead to good mechanical properties of the welded joint.

Material Index Ferritic Stainless Steel S43932, Tungsten Inert Gas Welding (TIG), Heat Input, Welded Joint, Structure and Properties

S43932 超纯铁素体不锈钢 Cr 含量在 17% ~ 19%, 采用超低 C、N 控制, 并通过 Nb、Ti 双稳定的方式来改善该钢种的耐蚀性、焊接性和加工性^[1-3]。目前 S43932 焊管被大量用于生产汽车排气系统中的消音器、催化转换器、中心管等零部件, 由于冷轧板厚度较薄(0.8 ~ 2.0 mm), 常选用不填丝的自熔焊接工艺, 具体包括钨极氩弧焊(TIG)、激光焊、高频焊等。焊管的后续成形方式包括弯曲、扩口、缩口、胀形等, 焊缝开裂是焊管成形失效的主要因素。超纯铁素体不锈钢焊缝区容易晶粒长大且第二相形态发生改变, 导致焊接接头的力学性能有别于母材^[4-5]。热输入是影响焊缝区组织及性能最重要的焊接工艺参数, 本文系统研究了热输入对 S43932 超纯铁素体不锈钢焊缝组织、焊接接头拉伸及成形性能的影响, 并采用扫描和透射电子显微镜对焊缝区的显微组织进行了详细研究。

表 1 S43932 不锈钢冷轧板化学成分/%

Table 1 Chemical composition of S43932 stainless steel cold rolled plate/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti	N
0.08	0.38	0.08	0.02	0.001	17.3	0.16	0.18	0.013

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

序号	电流 (I)/A	电压 (U)/V	焊速 v/ (mm · min ⁻¹)	热输入 E/ (J · mm ⁻¹)
1 [#]	120	11	920	88
2 [#]	120	11	780	101
3 [#]	120	11	600	132
4 [#]	120	11	420	188

1 实验材料与方法

本实验所采用的 S43932 不锈钢冷轧板为商业化的成品板, 成分如表 1 所示。冷轧板厚度为 1.0 mm, 焊接试板尺寸为 300 mm(// 轧制方向) × 100 mm(⊥

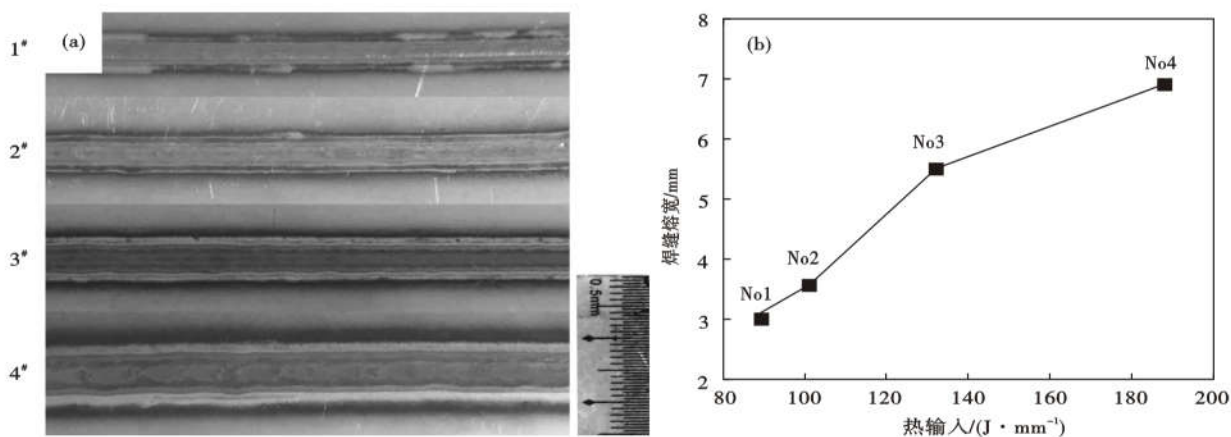


图 1 热输入/(J · mm⁻¹):1#,88,2#,101,3#,132 和 4#,188 S43932 钢焊接接头的宏观形貌(a);热输入对焊缝熔宽的影响(b)
Fig.1 Macroscopical morphology of S43932 steel welded joint with heat input/(J · mm⁻¹):No1,88,No2,101,No3,132 and No4,188 (a);effect of heat input on weld seam width (b)

轧制方向) × 1.0 mm, 焊接方式采用钨极氩弧焊 (TIG), 100% 氩气保护, 沿冷轧板的轧制方向在试板中间自熔一道, 焊接工艺参数如表 2 所示, 热效率系数(η)取 1。焊接接头截面经机械抛光后使用 25 g FeCl₃ + 25 ml HCl + 100 ml H₂O 配制的盐酸氯化铁溶液浸蚀, 采用 Leica DM4000 光学显微镜和 LEO438VP 扫描电子显微镜 (SEM) 进行微观组织观察, 采用 JE-OL2100 透射电子显微镜 (TEM) 进行焊接接头析出相分析。力学拉伸试样按照 GB/T 2975-1998《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》标准制样, 平行部宽度 12.5 mm, 长度 75 mm。采用德国 Zwick/Roell 公司的 Z100 电子拉伸试验机对焊接接头进行力学性能检测, 每个热输入条件下至少取三片拉伸试样。

2 实验结果与讨论

2.1 焊接接头宏观形貌

图 1(a) 给出了不同热输入条件下焊接接头的宏观形貌, 可以看到随着热输入增加, 焊缝逐渐增宽。热输入分别为 88、101、132、188 J/mm 时, 测量的焊缝熔宽分别为 ~3.1、3.6、5.5、6.9 mm, 如图 1(b) 所示。

表 3 焊缝中心线垂直拉伸方向, 热输入对焊接接头力学性能的影响

Table 3 Effect of heat input on mechanical properties of welded joint with tensile direction perpendicular to weld seam center line

热输入 $E/(J \cdot mm^{-1})$	屈服强度均值 $R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度均值 R_m/MPa	延伸率均值 $A_{50}mm/\%$
母材	259.6	443.8	32.5
88	259.5	443.5	31.5
101	258.2	443.4	29.2
132	259.5	444.1	30.1
188	259.3	443.7	29.3

2.2 焊接接头力学性能

垂直焊缝制取拉伸试样, 对不同热输入条件下 S43932 钢焊接接头的室温力学性能进行评价。焊缝中心线垂直拉伸方向, 不同热输入条件下断裂均发生在母材且断裂处有明显的缩颈现象。力学性能结果如表 3 所示, 随着热输入增加, 抗拉强度和屈服强度并未有明显的变化, 但焊接试样的延伸率与母材相比, 有 1% ~ 3% 不等的下降, 这主要是由于焊接接头熔合区等轴晶和柱状晶组织的形成阻碍了材料的均匀塑性变形。

为了研究 S43932 钢焊接接头强度, 垂直焊缝取力学拉伸样, 并在焊缝位置切取缺口, 缺口中心线与焊缝中心线重合, 其几何尺寸如图 2 所示, 缺口底部曲率半径为 0.25 mm。

表 4 给出了不同热输入条件下带缺口焊缝试样

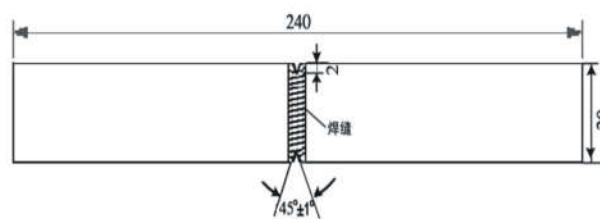


图 2 缺口焊缝拉伸试样的几何尺寸

Fig.2 Geometry dimension of tensile specimens with weld seam notch

表 4 热输入对带缺口焊缝抗拉强度的影响

Table 4 Effect of heat input on tensile strength of weld seam with notch

热输入 $E/(J \cdot mm^{-1})$	母材	88	101	132	188
抗拉强度均值 R_m/MPa	464.3	483.5	490.1	482.7	472.3

抗拉强度值。可以看到热输入不超过 101 J/mm 时, 缺口试样抗拉强度随热输入的增加而增加, 当热输入为 101 J/mm 时, 抗拉强度达到最大值 490.1 MPa, 高出母材 25.8 MPa。热输入超过 101 J/mm 后, 缺口试样抗拉强度值随热输入的增加逐渐下降。

平行焊缝制取拉伸试样, 焊缝中心线平行拉伸方向且与拉力试样平行部轴线重合, 对不同热输入条件下 S43932 钢焊缝试样的室温力学性能进行评价。表 5 给出了焊缝中心线平行拉伸方向, 不同热输入条件

表 5 热输入对焊缝中心线平行拉伸方向焊缝力学性能的影响

Table 5 Effect of heat input on mechanical properties of weld seam with tensile direction parallel to weld seam center line

热输入 $E/(J \cdot mm^{-1})$	屈服强度均值 $R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度均值 R_m/MPa	延伸率均值 $A_{50}mm/\%$
母材	253.6	447.8	31.5
88	300.0	451.1	30.5
101	308.1	461.0	30.2
132	300.4	447.6	29.6
188	294.8	445.4	26.1

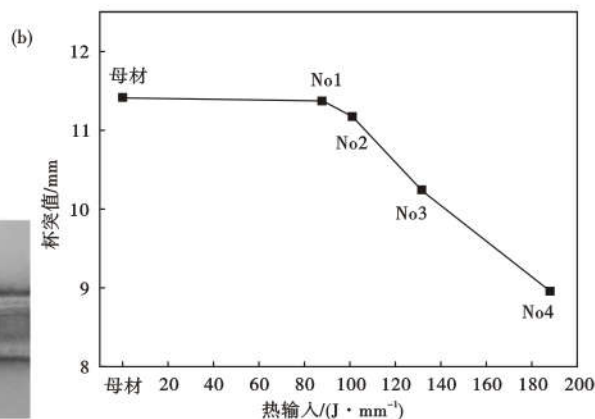
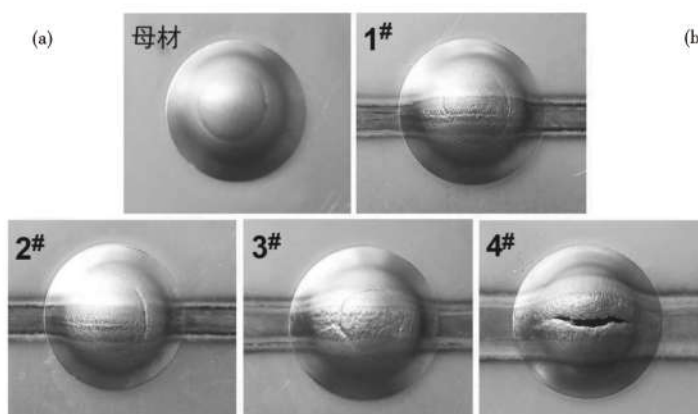


图 3 热输入对焊缝杯突开裂典型形貌(a)和埃里克森杯突值(b)的影响

Fig. 3 Effect of heat input on weld seam cupping fracture typical morphology (a) and Erichsen cupping value (b)

下, 焊缝拉伸试样力学性能试验结果。可以看到屈服强度和抗拉强度随热输入的变化趋势与缺口焊缝试样抗拉强度随热输入的变化趋势保持一致(见表 4), 均为先增后降。当热输入为 101 J/mm 时, 焊缝试样的屈服强度和抗拉强度均达到最大值, 其中平均屈服强度值为 308.1 MPa, 高于母材 54.5 MPa, 平均抗拉强度值为 461.0 MPa, 高于母材 13.2 MPa。不同热输入条件下焊缝试样的延伸率均低于母材, 且热输入越高, 延伸率值越低。

2.3 焊接接头成形性能

依照 GB/T4156-2007《金属材料 薄板和薄带 埃里克森杯突试验》对焊缝试样进行杯突测试, 焊缝中心线与压膜轴线重合, 研究热输入对焊缝的成形性能的影响。图 3(a)展示了不同热输入条件下, 焊缝试样杯突试验典型开裂形貌; 图 3(b)为杯突值随热输入的变化。可以看到当热输入为 88 J/mm 和 101 J/mm 时, 焊缝杯突开裂方向垂直焊缝, 焊缝杯突值可达到母材的 99.5% 和 97.7%。通常认为杯突值与延伸率及抗拉强度存在正相关关系, 虽然热输入为 88 J/mm 和 101 J/mm 时, 焊接接头与母材相比具有高的抗拉强度(见表 4), 但由于其塑性(延伸率)相对

较差(见表 5), 因此杯突性能不及母材。当热输入值达到 132 J/mm 和 188 J/mm 时, 杯突值只有母材的 89.0% 和 78.4% (见图 3b), 这与低的焊缝抗拉强度和低的延伸率有关。

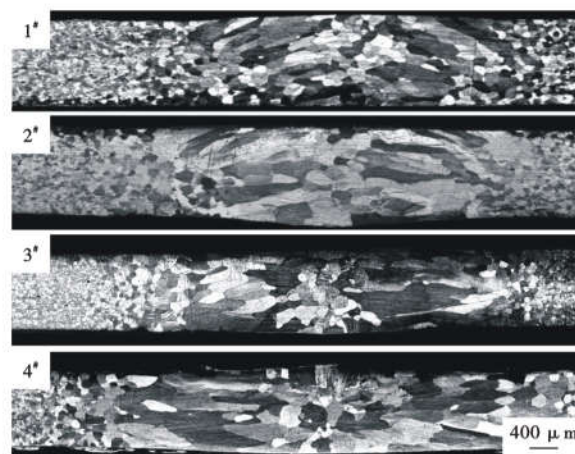


图 4 热输入/(J · mm⁻¹): 1#, 88, 2#, 101, 3#, 132 和 4#, 188 S43932 钢焊接接头金相组织

Fig. 4 Metallographic structure of S43932 steel welded joint with heat input/(J · mm⁻¹): No1, 88, No2, 101, No3, 132 and No4, 188

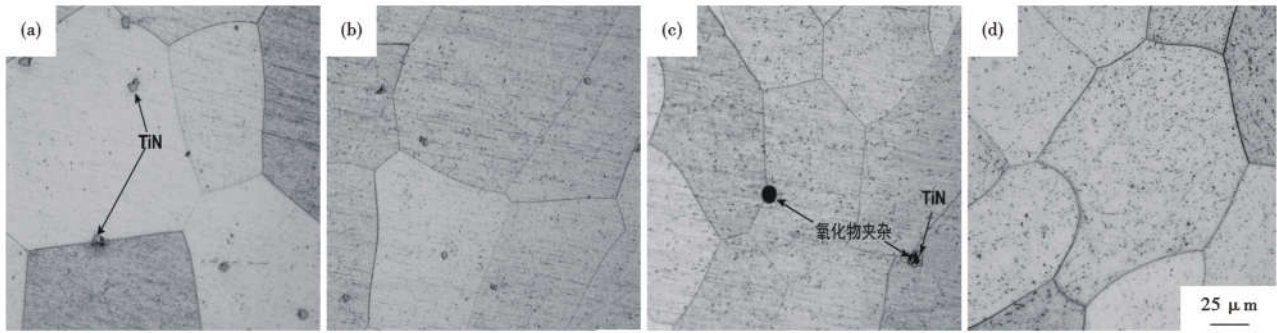


图5 S43932 钢焊缝等轴晶区的光学显微组织,热输入:(a) 88 J/mm;(b) 101 J/mm;(c) 132 J/mm;(d) 188 J/mm

Fig.5 Optical micrographs of S43932 steel weld equiaxed zone with heat input:(a) 88 J/mm;(b) 101 J/mm;(c) 132 J/mm;(d) 188 J/mm

综合表3~5及图3的试验结果,当热输入为101 J/mm时,焊接接头具有最佳的拉伸及成形性能匹配。

3 焊缝显微组织分析与讨论

图4给出了不同热输入条件下焊接接头的金相组织,实验用S43932钢母材晶粒尺寸约为30 μm,热输入增加后,焊缝中心等轴晶区和热影响区的晶粒尺寸均有所增大,其中当热输入由88 J/mm增加至188 J/mm时,等轴晶区晶粒尺寸由平均37 μm增加至225 μm。柱状晶的宽度和长度也随热输入增加而增大,且等轴晶区所占焊缝区比例下降。此外,当热输入值为188 J/mm时,杯突试验沿焊缝熔合线方向开裂(见图3a),这可能与该焊缝区晶粒组织粗大及等轴晶比例较低有关。

S43932超纯铁素体不锈钢母材中除了Fe-Cr合金基体,还含有氧化物夹杂(主要成分为Mg、Al、Ca的氧化物)、TiN颗粒及少量的(Ti,Nb)(C,N)相,其中TiN在钢水凝固过程中常以氧化物夹杂为核心长大析出,呈方形,经轧制变形后大尺寸的TiN与氧化物形成复合的链状夹杂;(Ti,Nb)(C,N)相则在热处理及随后的冷却过程中析出,以晶内析出居多,单颗粒平均尺寸在1.0 μm左右,扫描电镜能谱分析结果表明母材(Ti,Nb)(C,N)相中的Nb、Ti原子百分比较为接近。

图5给出了S43932超纯铁素体不锈钢不同热输入下焊接等轴晶区的光学显微组织。可以看到焊接区TiN以单颗粒分布为主,如图5(a,b)所示。氧化物夹杂发生了二次冶金,呈球形,随机分布,如图5(c)所示。随热输入由88 J/mm增加到101 J/mm,等轴晶区TiN的颗粒尺寸变小,由平均6 μm降低至4 μm以下;试验还发现在88 J/mm和101 J/mm的热输入条件下,焊接等轴晶区的TiN颗粒数明显多于柱状晶区。随着热输入增加至132 J/mm,无论等轴晶

区还是柱状晶区,TiN相含量明显下降,在188 J/mm的热输入条件下,等轴晶区和柱状晶区的TiN相几乎不可见。

焊接熔池体积小,温度梯度大,很容易通过联生结晶形成柱状晶,超纯铁素体不锈钢通过Ti稳定化元素的加入增加焊缝等轴晶比例来提高焊缝的耐腐蚀性和韧性。S43932超纯铁素体不锈钢中TiN相的析出温度高于凝固点^[6-7],母材中的TiN颗粒在焊缝凝固前的熔融状态析出。焊接过程中,熔池中的温度较高,原母材中的TiN颗粒发生了部分溶解,而未溶解完全的和新生成的TiN颗粒成为潜在异质形核点,有利于等轴晶粒形成。热输入增加到132 J/mm后,熔池温度高,一方面原母材中的TiN颗粒大量溶解,另一方面母材溶解残留的TiN颗粒及部分析出的TiN颗粒有足够的时间和空间浮到熔池表面,降低了异质形核点数量,降低了等轴晶比例^[8-9],如图4所示。

对S43932超纯铁素体不锈钢不同热输入条件下熔合区进行SEM显微组织观察,结果显示在等轴

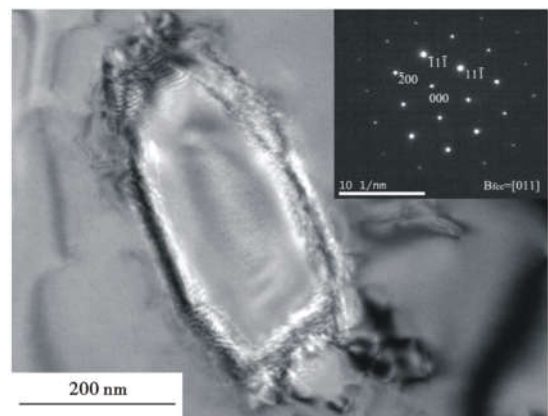


图6 S43932 钢焊缝熔合区富Ti(Ti,Nb)(C,N)相的典型TEM形貌及电子衍射花样

Fig.6 Typical TEM micrograph and corresponding electron diffraction pattern of Ti-rich (Ti,Nb)(C,N) phase in S43932 steel weld seam fusion zone

晶区和柱状晶区均析出大量尺寸 0.5 μm 左右的富 Ti (Ti,Nb)(C,N)相,能谱分析结果显示 Ti 元素原子分数约为 Nb 元素的 10.8 倍,其尺寸明显低于母材中的 (Ti,Nb)(C,N)相,且该相在等轴晶区和柱状晶区的尺寸及分布没有明显的差异。此外,随热输入增加,富 Ti (Ti,Nb)(C,N)相在等轴晶区和柱状晶区的数量和尺寸也未发现有明显变化。图 6 给出富 Ti (Ti,Nb)(C,N)相的 TEM 显微形貌及衍射斑点。该相的析出温度低于 1 200 ℃^[6],在焊接接头凝固后的冷却过程中析出。

S43932 超纯铁素体不锈钢焊接熔合区稳定化元素 Ti 的存在形式有固溶 Ti、TiN 及富 Ti 的 (Ti,Nb)(C,N)相。熔合区 TiN 相的溶解对焊接接头具有固溶强化作用,大量富 Ti (Ti,Nb)(C,N)相的析出则具有第二相强化作用,因此从相组成角度来说,熔合区具有比母材更高的强度,101 J/mm 焊接热输入下 S43932 钢焊接接头的强度高于 88 J/mm 焊接接头的强度就可能与大颗粒 TiN 相的溶解有关。然而,随着

焊接热输入继续升高,焊接接头等轴晶和柱状晶晶粒粗大,焊接接头强度和塑性均急剧下降,导致焊接接头的成形性恶化,如图 3 所示。

4 结论

(1) 当热输入为 88 J/mm 和 101 J/mm 时, S43932 不锈钢冷轧板焊缝杯突值可分别达到母材的 99.5% 和 97.7%,综合垂直焊缝、平行焊缝和带缺口焊缝试样的拉伸性能,当热输入为 101 J/mm,焊接接头具有最佳的拉伸及成形性能匹配。之后随热输入的增加,焊接接头力学性能急剧下降。

(2) 显微组织研究表明, S43932 不锈钢焊接接头良好的力学性能与焊接区小尺寸晶粒的形成及大量富 Ti(Nb,Ti)(C,N)相的析出有关。当焊接热输入为 132 J/mm 和 188 J/mm 时,焊接熔合区 TiN 相颗粒数量急剧下降,等轴晶和柱状晶异常长大,导致焊接接头成形性恶化。

参考文献

[1] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2012:87-102.
 [2] Aksoy M, Yilmaz O, Korkut M H. The Effect of Strong Carbide-Forming Elements on The Adhesive Wear Resistance of Ferritic Stainless Steel[J]. Wear, 2001, 249:639-646.
 [3] Kuzucu V, Aksoy M, Korkut M H. The Effect of Strong Carbide-Forming Elements Such as Mo, Ti, V and Nb on The Microstructure of Ferritic Stainless Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 82:165-171.
 [4] Demo J J. Weldable and Corrosion-Resistant Ferritic Stainless Steel [J]. Metallurgical Transactions, 1974, 5:2253-2256.
 [5] Villafurte J C, Pardo E, Kerr H W. The Effect of Alloy Composition and Welding Conditions on Columnar-Equiaxed Transitions in Ferritic Stainless Steel Gas-Tungsten arc Welds[J]. Metallurgical Transactions A, 1990, 21A:2009-2019.
 [6] Gate J D, Jago R A. Effect of Nitrogen Contamination on Intergranular Corrosion of Stabilized Ferritic Stainless Steels[J]. Materials Science

and Technology, 1987, 3(6):450-454.
 [7] Gate J D, Jago R A. Absorption of Gaseous Contaminants by Welds and Weld Simulations in Ferritic Stainless Steels[J]. Materials Science and Technology, 1987, 3(5):386-393.
 [8] Koseki T, Inoue H. Equiaxed Solidification of Steel Nucleating on Titanium Nitride[J]. J. Japan Inst. Metals, 2001, 65(7):644-651.
 [9] 韩 俭, 郑宏光, 吴狄峰, 等. 钛元素的添加对超纯铁素体不锈钢焊缝区等轴晶组织的影响[J]. 宝钢技术, 2010(2):30-34.

张晶晶(1982-),女,博士(2010年浙江大学),正高级工程师,2005年浙江大学(本科)毕业,不锈钢材料产品及技术开发, E-mail:zhangjj02@tisco.com.cn

收稿日期:2021-03-19

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告**