

## 固溶温度和晶粒尺寸对 S31608 不锈钢挤压管超低温冲击功的影响

王哨兵, 孙文强, 王曼, 周珠, 杜雷, 陆乾乾

(浙江久立特材科技股份有限公司, 湖州 313000)

**摘要** 对 1 060 ~ 1 020 °C 固溶、晶粒尺寸 50.2 ~ 17.6 μm 的 S31608 不锈钢( /% : 0.065C, 16.50Cr, 11.80Ni, 2.2Mo) Φ168 mm × 13 mm 挤压无缝管进行了 20 °C 和 -40 ~ -269 °C 超低温冲击试验。并用扫描电子显微镜进行冲击断口分析。结果表明, S31608 钢在 -296 ~ 20 °C 具有较高冲击功, 即 290 ~ 360 J, 且晶粒尺寸只对 -80 °C 和 -120 °C 冲击功明显的影响, 25.3 ~ 50.2 μm 晶粒钢( 1 060 ~ 1 040 °C 固溶处理) 的 -80 °C 和 -120 °C 冲击功为 330 ~ 360 J, 17.6 μm 晶粒钢( 1 020 °C 固溶处理) 的 -80 °C 和 -120 °C 冲击功为 320 ~ 360 J。

**关键词:** S31608; 超低温; 晶粒尺寸; 冲击功; 断口形貌

## Effect of Solution Temperature and Grain Size on Ultra Low Temperature Impact Energy of S31608 Stainless Steel Extruded Pipe

Wang Shaobing, Sun Wenqiang, Wang Man, Zhou Zhu, Du Lei, Lu Qianqian

( Zhejiang Jiuli Hi-Tech Metals Co., Ltd., Huzhou 313000)

**Abstract** The ultra low temperature impact tests for S31608 stainless steel ( /% : 0.065C, 16.50Cr, 11.80Ni, 2.2Mo) Φ168 mm × 13 mm extruded seamless pipe ( solid-solution-treated at 1 060-1 020 °C with grain size 50.2-17.6 μm) at 20 °C and -40- -269 °C are carried out, and the impact fracture is analyzed by scanning electron microscope. The results show that the S31608 steel has high impact energy i. e. 290-360 J at -269-20 °C, and only the grain size of steel has obvious effect on impact energy at -80 °C and -120 °C, the impact energy of steel with grain size 25.3-50.2 μm ( solid-solution-treated at 1 060-1 040 °C) at -80 °C and -120 °C is 330-360 J, but that of steel with grain size 17.6 μm ( solid-solution-treated at 1 020 °C) at -80 °C and -120 °C is 320-360 J.

**Key Words:** S31608; Ultra Low Temperature; Grain Size; Impact Energy; Fracture Morphology

随着科学技术的发展, 低温技术也迅速的应用到各个科学领域。低温技术的发展和运用, 伴随着低温用材料的推广, 考虑到低温材料的使用环境, 如低温管道广泛应用在石油、化工生产装置上, 低温下金属材料的韧性决定了材料的使用, 工业上常利用相关的检验手段来确定材料的低温韧性。但是常规材料的低温研究主要是集中在液氮( -196 °C) 环境下, 并没有考虑到更低的使用温度, 近年来超低温环境应用的材料越来越多, 如液氢( -253 °C) 材料、液氮( -269 °C) 材料等。本文探索了 S31608 不锈钢管在不同晶粒尺寸和不同温度条件下的超低温冲击功, 可为实际应用提供科学指导<sup>[1-15]</sup>。

### 1 试验材料与方法

试验材料为 S31608 不锈钢挤压管, 挤压温度为 1 190 ~ 1 210 °C, 挤压规格为 Φ168 mm × 13 mm, 采用 4 200 t 的挤压机直接挤压成型, S31608 不锈钢管

表 1 S31608 不锈钢管化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of S31608 stainless steel tube /%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
0.065	0.25	1.50	0.025	0.005 0	16.50	11.80	2.20	0.08

的化学成分见表 1 所示。

本试验在室温 20、-40、-80、-120、-160、-196、-269 °C 下分别进行低温冲击试验, 采用不同晶粒尺寸下的试样、每个试验温度取 3 个平行样, 取平均值作为最终的结果, 并采用扫描电镜分析试样的断口形貌。

冲击试样沿管材长度方向取样, 按照 GB/T229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》进行加工, 图 1 为低温冲击试样的尺寸, 尺寸规格为 10 mm × 10 mm × 55 mm, 要求试样缺口底部平滑, 同时在试样加工过程中控制加工温度, 避免加工过程中的温度过高造成的加工硬化现象。选用 7 个温度点进行

低温冲击试验,其中,室温冲击在室温下进行; -40 ~ -196 ℃ 的低温冲击试样冷却液采用的是液氮和酒精的混合液体,保温时间为 20 min; -269 ℃ 的低温冲击试样冷却液采用的是液氦,在中科院理化所的 ZBC2752-CE 设备上冲击试验。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 S31608 钢管的低温冲击功

为了获得 S31608 钢管不同的晶粒尺寸,对 3 支  $\Phi 168 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$  规格的挤压管采用了不同的热处理工艺制度。在保持保温时间不变的情况下,通过改变热处理时的保温温度,可获得不同的晶粒尺寸。

保温温度 1 020 ℃ 可获得 S31608 钢管的平均晶粒尺寸为 17.6  $\mu\text{m}$ ;保温温度 1 040 ℃ 可获得 S31608 钢管的平均晶粒尺寸为 25.3  $\mu\text{m}$ ;保温温度为 1 060 ℃

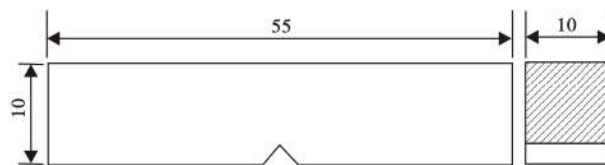


图 1 超低温冲击试样的尺寸

Fig. 1 Dimensions of sample for ultra low temperature impact test

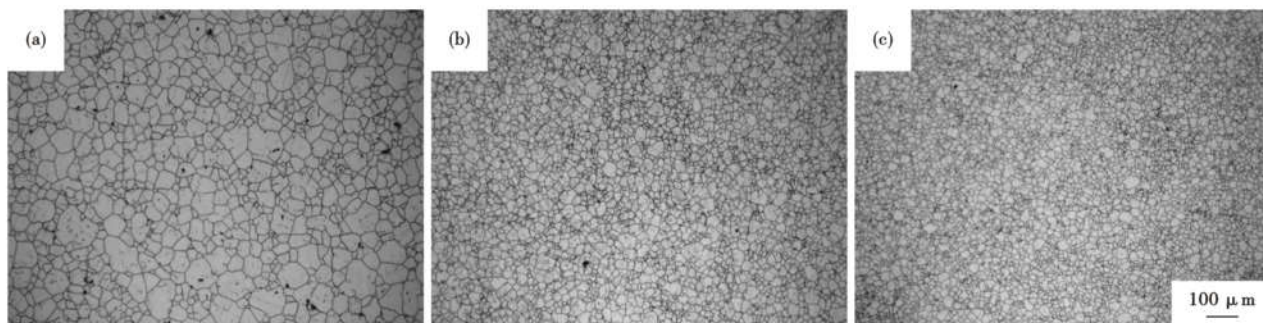


图 2 试验 31608 钢管固溶温度、时间和平均晶粒尺寸:(a) 1 060 ℃ 30 min, 50.2  $\mu\text{m}$ , (b) 1 040 ℃ 30 min, 25.3  $\mu\text{m}$ , (c) 1 020 ℃ 30 min, 17.6  $\mu\text{m}$

Fig. 2 Solid solution temperature, time and average grain size of test 31608 steel pipe: (a) 1 060 ℃ 30 min, 50.2  $\mu\text{m}$ , (b) 1 040 ℃ 30 min, 25.3  $\mu\text{m}$ , (c) 1 020 ℃ 30 min, 17.6  $\mu\text{m}$

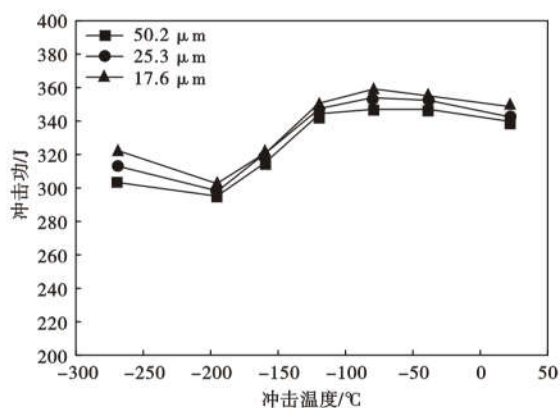


图 3 S31608 无缝管的不同晶粒尺寸下冲击功随温度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of impact energy with temperature under different grain sizes of S31608 seamless pipe

可获得 S31608 钢管的平均晶粒尺寸为 50.2  $\mu\text{m}$ 。本试验研究了 3 种不同晶粒尺寸下的 S31608 管材冲击韧性,分析不同晶粒尺寸的 S31608 无缝钢管在不同试验温度下的低温冲击性能,结果如图 2 和 3 所示。

依据图 3 不同晶粒尺寸下在不同温度下的冲击功的结果,可以得到:平均晶粒尺寸在 50.2  $\mu\text{m}$  时,在 20 ~ -120 ℃ 这 4 个温度点的冲击功保持在 340 ~ 347 J,冲击功的变化呈现平稳的趋势。-120 ℃ 时的冲击功为 345 J, -160 ℃ 时的冲击功只有 315 J,而在 -196 ℃ 时的冲击功为 295 J。-160 ℃ 冲击功较 -120 ℃ 时的下降比例为 8.70%; -196 ℃ 的冲击功较 -160 ℃ 的下降比例为 6.35%, -269 ℃ 时的冲击功为 303 J,冲击功增大了 8 J。平均晶粒尺寸在 25.3  $\mu\text{m}$  时,在 20 ~ -120 ℃ 这 4 个温度点的冲击功保持在 342 ~ 354 J,冲击功保持平稳。在 -120 ℃ 时的冲击功为 348 J, -160 ℃ 时的冲击功只有 320 J, -196 ℃ 时的冲击功为 298 J。-160 ℃ 冲击功较 -120 ℃ 时的下降比例为 8.05%; -196 ℃ 的冲击功较 -160 ℃ 的下降比例为 6.88%, -269 ℃ 时的冲击功为 313 J,冲击功增大了 15 J。平均晶粒尺寸在 17.6  $\mu\text{m}$  时,在 -120 ℃ 时的冲击功为 350 J, -160 ℃ 时的冲击功为 321 J, -196 ℃ 时的冲击功为 302 J。-160 ℃ 下的冲击功

较  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功降低了  $8.29\%$ ,  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功较  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  的降低了  $5.92\%$ 。 $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的冲击功为  $322\text{ J}$ , 冲击功增大了  $20\text{ J}$ 。

综合平均晶粒尺寸在  $50.2$ 、 $25.3$ 、 $17.6\text{ }\mu\text{m}$  下的冲击功变化情况, S31608 钢的冲击功在  $20\sim-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  基本保持不变, 晶粒尺寸越小, 冲击功会存在轻微偏高的现象。冲击功在  $-196\sim-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  有轻微增高的趋势, 温度降低, 奥氏体不锈钢有轻微塑性变形, 在低温下很难脆化, 金属变形时, 受到外力影响金属内部出现位错运动, 温度降低时, 位错运动减小, 因此, 冲击功会出现随着温度降低而出现轻微增加的现象。在  $-120\sim-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  时为冲击功下降的较为明显。通过对比发现,  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  较  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功下降的比例在  $8.05\%\sim 8.70\%$ ,  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  较  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功下降的比例在  $5.92\%\sim 6.88\%$ 。特别是在  $-120\sim-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功数值变化, 不管奥氏体的晶粒尺寸有多大的差异, 其冲击功的变化基本上保持在  $45\sim 50\text{ J}$ , 随着温度的下降呈现稳定

的降低趋势。通过对比不同晶粒尺寸下的冲击功结果, S31608 钢的超低温冲击呈现一种典型的“S”型曲线。

## 2.2 S31608 无缝管不同温度下的断口分析

为了揭示 S31608 无缝管在不同晶粒尺寸和不同温度下的冲击断裂机理, 采用扫描电镜对冲击断口进行分析。由超低温冲击功试验的结果可以知道, 在  $20\sim-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $-196\sim-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  的冲击功变化较小, 基本上处于一个平稳状态。因此, 选择冲击功变化明显的  $-120$ 、 $-160$  和  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的 3 个温度点, 对这 3 个温度点进行冲击断口在  $2000\times$  倍下的形貌特征分析。不同冲击温度下的断口形貌具体如图 4 所示。

平均晶粒尺寸在  $50.2\text{ }\mu\text{m}$  时, S31608 不锈钢管在  $-120\sim-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  的断裂表现为典型的塑性断裂, 断口形貌有不同尺寸分布的韧窝和撕裂棱组成, 在韧窝的中间, 并没有发现有第二相粒子存在, 韧窝底部平滑。随着冲击温度的降低, 断口处的尺寸较大

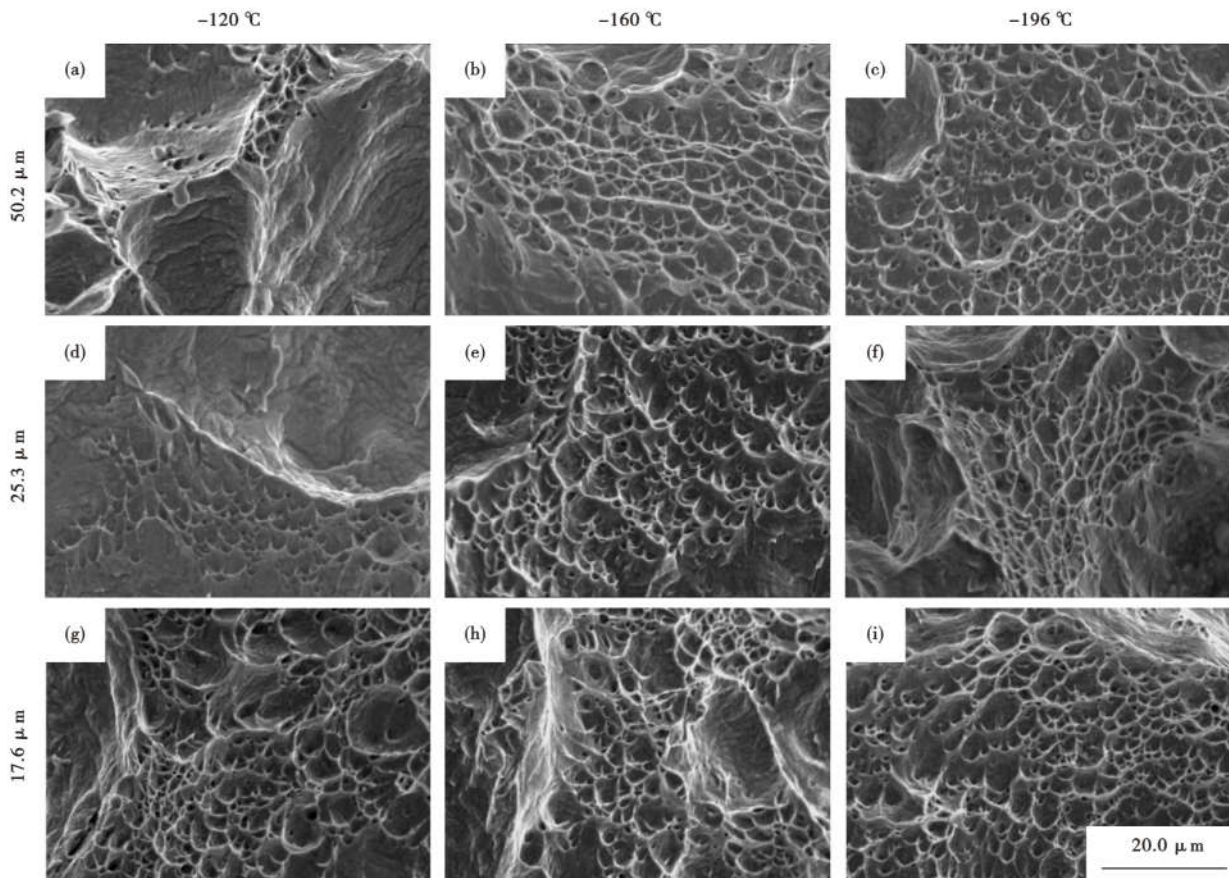


图 4 晶粒尺寸  $50.2\text{ }\mu\text{m}$ (a)(b)(c)、 $25.3\text{ }\mu\text{m}$ (d)(e)(f) 和  $17.6\text{ }\mu\text{m}$ (g)(h)(i) S31608 钢无缝管在  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a)(d)(g)、 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)(e)(h) 和  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c)(f)(i) 的冲击断口形貌

Fig. 4 Impact fracture morphology of S31608 steel seamless pipe with grain sizes  $50.2\text{ }\mu\text{m}$ (a)(b)(c)、 $25.3\text{ }\mu\text{m}$ (d)(e)(f) and  $17.6\text{ }\mu\text{m}$ (g)(h)(i) at  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a)(d)(g)、 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ (b)(e)(h) and  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (c)(f)(i)

的韧窝数量减少,大韧窝的深度也减少,但是小而浅的韧窝数量呈现增加的趋势。平均晶粒尺寸在 25.3 μm 和 17.6 μm 时,S31608 不锈钢管在 -120 ~ -196 ℃ 的断裂表现也为塑性断裂。随着冲击温度的降低,断口处的大而深的韧窝数量减少,小而浅和超大尺寸较浅的韧窝数量呈现增加的趋势,并且在 2000X 倍的微观组织下,断口处的解理面平台和撕裂棱呈现增大的趋势。

冲击温度为 -120 ℃ 时,随着晶粒尺寸从 50.2 μm 到 17.6 μm 时,晶粒尺寸越来越细小,在该温度下表现为塑性断裂,断口处的韧窝形貌变化为:拉长或等轴韧窝-大而深的韧窝减少,小而浅的韧窝增多。结合图 3 的冲击功数据,晶粒尺寸为 50.2 μm 时的冲击功为 345 J,晶粒尺寸为 25.3 μm 时的冲击功为 348 J,晶粒尺寸为 17.6 μm 时的冲击功为 350 J,晶粒尺寸越细小,冲击功的下降值越小。

冲击温度在 -160 ℃ 和 -196 ℃ 时,其与 -120 ℃ 温度下的断口形貌和冲击功变化规律相

同;并且在 -196 ℃ 的冲击温度下,随之晶粒越细小,小韧窝数量明显增多。

### 3 结论

(1) S31608 不锈钢无缝管在室温 20 ~ -269 ℃ 以上的温区具有优良的超低温冲击功 290 ~ 360 J。

(2) S31608 无缝管的冲击功在 20 ~ -120 ℃ 和 -196 ~ -269 ℃ 基本保持稳定,-120 ~ -160 ℃ 时为冲击功变化的突变温度范围。晶粒尺寸越细小,在 -120 ~ 196 ℃ 冲击功下降的数值也越小。

(3) 不同晶粒尺寸管材 -120、-160 和 -196 ℃ 三个温度点的冲击断口形貌表明,随着冲击试验温度的降低,断口处尺寸较大的韧窝数量减少,大韧窝的深度也减少,但是小而浅的韧窝数量呈现增加的趋势。断口韧窝形貌变化规律为:拉长或等轴韧窝-大而深的韧窝减少,小而浅的韧窝增多-混合型的韧窝-小而浅的韧窝。

### 参考文献

[1] 宋 坤,刘志成,周鑫华. 1.4418 马氏体不锈钢的低温冲击试验研究[J]. 热加工工艺, 2020,49(24):119-121.

[2] 陈海云,盛水平. S31608 奥氏体不锈钢应变强化诱发马氏体相变实验[J]. 压力容器, 2013,30(8):7-14.

[3] 梁文婷. 奥氏体不锈钢低温性能及选用方法探讨[J]. 中国科技信息, 2014(5):189-190.

[4] 戴起勋,程晓农,王安东. 低温奥氏体钢中合金元素的综合作用[J]. 材料导报, 2002,16(4):35-37.

[5] 付 裕. 金属材料低温疲劳研究进展与展望[J]. 中国科技信息, 2018(7):47-48.

[6] 燕春光,陈胜龙,李雅平,等. 氢对 316H 不锈钢拉伸性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2019,31(11):1004-1011.

[7] 王 庚,郑津洋,蒋利军,等. 中国氢能发展的思考[J]. 科技导报, 2017,35(22):105-110.

[8] 杨 坤,周伟明,郁 峰,等. 固定式真空绝热液氢压力容器专项技术要求[C]. 2021.12.15.

[9] 戴起勋. 奥氏体钢马氏体相变点 Ms、M<sub>ss</sub>[J]. 钢铁, 1995,30(8):52-58.

[10] 熊宴斌,叶 超,郑茂琦,等. 奥氏体不锈钢低温热导率计算方法及验证[J]. 低温与超导, 2017,46(5):19-23.

[11] 戴起勋,程晓农,王安东. 低温奥氏体钢相变的结构参数[J]. 钢铁研究学报, 2002,14(3):47-51.

[12] 浦 江,陈 挺,王步美. 马氏体转变温度对奥氏体不锈钢的马氏体转变的影响[J]. 科技资讯, 2013,35:54-56.

[13] 陈晓露,刘小敏,王娟等. 液氢储运技术及标准化[J]. 化工进展, 2021,40(9):4806-4814.

[14] 郑津洋,刘自亮,花争立,等. 氢安全研究现状及面临的挑战[J]. 安全与环境学报, 2020,20(1):106-115.

[15] 吴业正. 制冷与低温技术原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

## “讲文明树新风”公益广告

绿色 环保  
人人 有责