

· 组织和性能 ·

风电塔筒法兰用 S355NL 钢的低温冲击韧性

戈文英

(山东钢铁股份有限公司莱芜分公司特钢事业部, 莱芜 271104)

摘要 试验和分析了风电塔筒法兰 S355NL 钢 (/%: 0.14C, 0.22Si, 1.35Mn, 0.010P, 0.002S, 0.06Cr, 0.01Mo, 0.10Ni, 0.03Cu, 0.40Ceq) -20 ~ -80 °C 切向和轴向冲击韧性。结果表明, S355NL 钢 V-型冲击功随试验温度降低而下降, 切向试样的韧脆转变温度低于 -80 °C (-80 °C 平均冲击功 76.89 J), 轴向试样的韧脆转变温度在 -65 °C 左右 (-60 °C 平均冲击功 96.10 J, -70 °C 13.28 J), 冲击断口形貌由韧性剪切断口转变为准解理断口, 直至具有“扇形”解理花样的完全解理断口。

关键词 风电塔筒法兰钢 S355NL 低温冲击韧性 韧脆转变温度 冲击断口形貌

Low Temperature Impact Toughness of Steel S355NL for Wind Power Tower Flange

Ge Wenyang

(Special Steel Division, Laiwu Company, Shandong Iron and Steel Co Ltd, Laiwu 271104)

Abstract The tangential and axial impact toughness of steel S355NL for wind power tower flange (/%: 0.14C, 0.22Si, 1.35Mn, 0.010P, 0.002S, 0.06Cr, 0.01Mo, 0.10Ni, 0.03Cu, 0.40Ceq) at -20 ~ -80 °C has been tested and analyzed. The results show that with decreasing test temperature the V-type impact energy of steel S355NL decreases, the ductile-brittle transition temperature of tangential specimen is lower than -80 °C (average impact energy at -80 °C is 76.89 J) and the ductile-brittle transition temperature of axial specimen is about -65 °C (average impact energy at -60 °C is 96.10 J and that at -70 °C is 13.28 J), the morphology of impact fracture transfers from ductile shear fracture to quasi cleavage fracture and until to complete cleavage fracture with “fan-shaped” cleavage pattern.

Material Index Steel S355NL for Wind Power Tower Flange, Low Temperature Impact Toughness, Ductile-Brittle Transition Temperature, Morphology of Impact Fracture

欧标 S355NL 钢设计用于制造高度 50 ~ 100 m 的风塔法兰, 风塔法兰经受恶劣环境和复杂的交变载荷, 对钢的综合力学性能、低温性能和焊接性能要求很高。高纬度地区和海上风力资源丰富, 为满足这些恶劣环境下钢的安全使用, 开展了 S355NL 钢低温性能试验研究。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

实验用钢为风电塔筒法兰专用欧标 S355NL 钢^[1], 化学成分见表 1, Ceq 为碳当量值。

1.2 生产工艺流程

采用配料(热装铁水)→100 t UHP EAF→120 t LF + VD→CCM→缓冷工艺生产 Φ800 mm 圆坯^[2]。采用下料(圆坯)→加热炉加热→制坯→二次加热→碾环→码垛缓冷→粗加工→热处理→精加工→探伤→成品工艺生产风电塔筒法兰^[3]。

热处理为正火, 正火温度 (910 ± 10) °C/空冷, 保温时间

3.8 h。

1.3 实验研究方法

按 JB/T11218-2011《风力发电塔架 法兰锻件》, 从热处理后的塔筒法兰件上分别切取切向(图 1a)、轴向(图 1b)冲击试样; 试样应取自热处理锻件本体延伸部位, 试样轴线距锻件两热处理表面的距离应不小于相应厚度的 1/4, 但不大于 90 mm(图 1), 研究不同取向钢的低温性能。

采用标准夏比 V 型缺口冲击试样, 按 GB/T228-1994《金属夏比缺口冲击试验方法》进行钢的系列低温冲击试验, 并结合金相组织和扫描电镜断口观察, 分析研判其断裂机理。

1.4 实验研究内容

按 JB/T11218-2011《风力发电塔架 法兰锻件》中 S355NL 钢在室温和 -50 °C 时冲击功的标准要

表 1 实验用钢 S355NL 分析成分 / %
Table 1 Analysis of test steel S355NL / %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Nb	Ti	Ceq
0.14	1.35	0.22	0.010	0.002	0.06	0.01	0.10	0.03	0.05	0.035	0.003	0.40

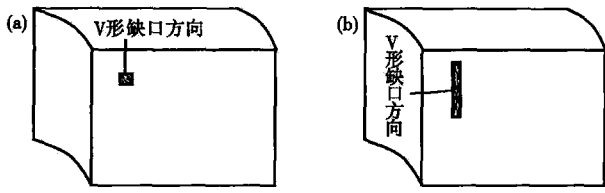


图 1 低温冲击试样的取样位置:(a)切向;(b)轴向

Fig.1 Location of sampling of low temperature impact specimen: (a) tangential; (b) axial

表 2 S355NL 钢夏比 (V 型) 冲击试验冲击功标准要求 / J
Table 2 Standard requirement for Charpy impact test (V type) impact energy of steel S355NL / J

试验温度/ ℃	切向		轴向	
	平均值	最低值	平均值	最低值
20	≥63	≥44	≥43	≥30
-50	≥50	≥35	≥30	≥21

注:每组取 3 个试样进行冲击试验

求,见表 2。为了确定实验钢的韧脆转变温度范围,根据标准要求并考虑风电塔筒可能的服役环境,选择冲击试验的温度分别为: -20、-40、-50、-60、-70、-80 ℃。在冲击试验低温仪中进行冲击试样的冷却、恒温, -20 ~ -50 ℃用 CDW-60 型低温仪,冷却介质为无水乙醇; -60 ~ -80 ℃在 CDW-196 型低温仪中用液氮进行冷却。

根据不同温度下冲击功值,画出切向、轴向试样冲击功随温度的变化曲线。根据曲线形态结合特定值判定法分别确定切向、轴向的韧脆转变温度范围。

对冲击试样断口进行扫描电镜 (SEM) 观察,比较各温度条件下的冲击断口特征及变化情况。根据其断口形貌并结合冲击试验结果,分析确定不同温度下钢的断裂类型及断裂机理。

2 实验结果及分析

2.1 钢的低温冲击性能及韧脆转变温度

表 3 为切向和轴向 V 型缺口试样在 -20 ~ -80 ℃不同温度下冲击功。图 2 为切向和轴向试样平均冲击功随温度的变化曲线。

表 3 显示,实验钢具有优异的低温冲击性能。所有试样的冲击功均满足 JB/T11218-2011 标准规定;切向

试样的平均冲击功 A_{KV} 为 124.57 J,轴向试样的平均冲击功为 127.06 J,均超过 ≥ 50 J (-50 ℃,切向)和 ≥ 35 J (-50 ℃,轴向)的要求。

由表 3 和图 2 可知,实验钢的冲击功随温度下降而降低,从 -20 ℃到 -60 ℃,同一温度下切向试样和轴向试样的冲击功大致相同,取向不同对低温冲击性能的影响低于 -60 ℃才显现。

图 2(a) 中实验钢切向试样的冲击功与温度的关系曲线变化平缓,温度低至 -80 ℃时仍具有较高的冲击功。在整个试验温度范围内,冲击功无突变,未形成完整的“S”型曲线,即没有发生明显的、突然的韧脆转变现象。图 2(b) 中实验钢轴向试样的冲击功与温度曲线具有明显的韧性降低现象,从 -60 ℃到 -70 ℃,冲击功突降了约 83 J。

采用冲击功达到某一特定值的方法判断韧脆转变温度,并统一以 ≥ 50 J 作为特定值,实验钢切向韧脆转变温度 $T_{切}$ 低于 -80 ℃;轴向韧脆转变温度 $T_{轴}$ 在 -60 ~ -70 ℃,对数据插值处理,其韧脆转变温度应为 -65 ℃左右^[4]。

表 3 实验钢 S355NL 不同温度下的冲击功
Table 3 Impact energy of test steel S355NL at different temperature

试样	试样编号	试验温度/℃	冲击功 A_{KV} /J			平均值	备注
			第 1 次	第 2 次	第 3 次		
切向	T-20BZ	-20	155.76	161.98	163.02	160.25	均未冲断
	T-40BZ	-40	128.40	97.00	133.68	119.69	2 号冲断
	T-50BZ	-50	127.34	143.17	103.21	124.57	全部冲断
	T-60BZ	-60	95.83	117.85	72.89	95.52	2 号未断
	T-70BZ	-70	54.01	58.61	131.57	81.40	全部冲断
	T-80BZ	-80	26.31	98.03	106.32	76.89	全部冲断
轴向	T-20AZ	-20	181.30	221.26	203.47	202.01	均未冲断
	T-40AZ	-40	138.96	146.33	152.62	145.97	均未冲断
	T-50AZ	-50	122.35	145.88	112.94	127.06	全部冲断
	T-60AZ	-60	94.95	58.61	134.74	96.10	全部冲断
	T-70AZ	-70	10.19	16.85	12.79	13.28	全部冲断
	T-80AZ	-80	24.80	25.55	16.85	22.40	全部冲断

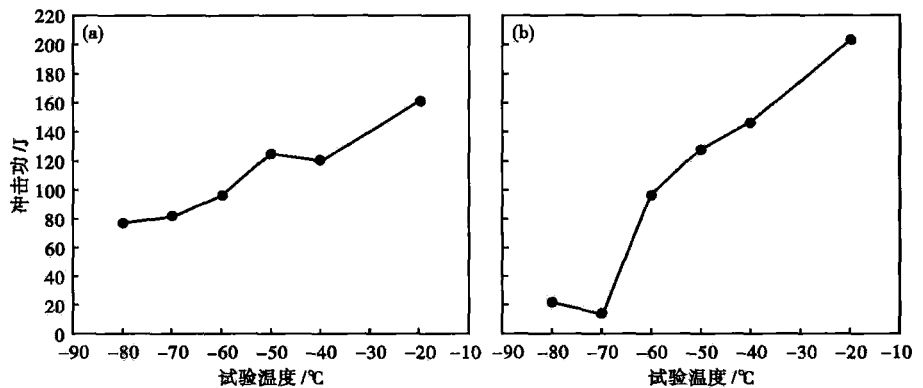


图 2 温度对实验钢 S355NL 切向试样(a)和轴向试样(b)冲击功的影响

Fig.2 Effect of temperature on impact energy of tangential specimen (a) and axial specimen (b) of test steel S355NL

2.2 钢的冲击断口形貌

2.2.1 冲击断口宏观形貌

-20 ℃ 断口为典型的韧性剪切断裂断口, -40 ~ -60 ℃ 断口是剪切断裂和解理断裂的混合断口形貌, -70 ℃ 断口呈现脆性的解理断裂瓷状断口特征。

图 3 是切向试样在 -60 ℃ 断口低倍形貌的二次电子像。-20 ~ -80 ℃ 断口形貌上均有剪切和解理两种断裂形态混合存在,只是各自比例不同;随试验温度下降,剪切撕裂形态所占比例越来越少,瓷状平面形态越来越多,说明钢的断裂由韧性撕裂逐渐过渡到准解理、解理断裂^[5]。轴向冲击试样断口低倍形貌有同样的变化趋势。

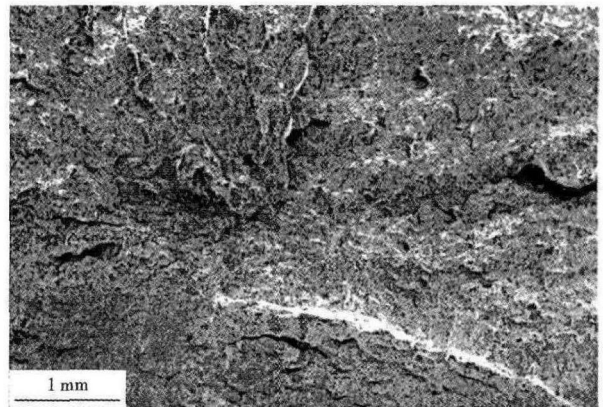


图 3 实验钢 S355NL 切向冲击试样断口低倍形貌 (-60 ℃, A_{KV} 177.85 J)

Fig. 3 Morphology of fracture macrostructure of test steel S355NL tangential impact specimen (-60 ℃, A_{KV} 117.85 J)

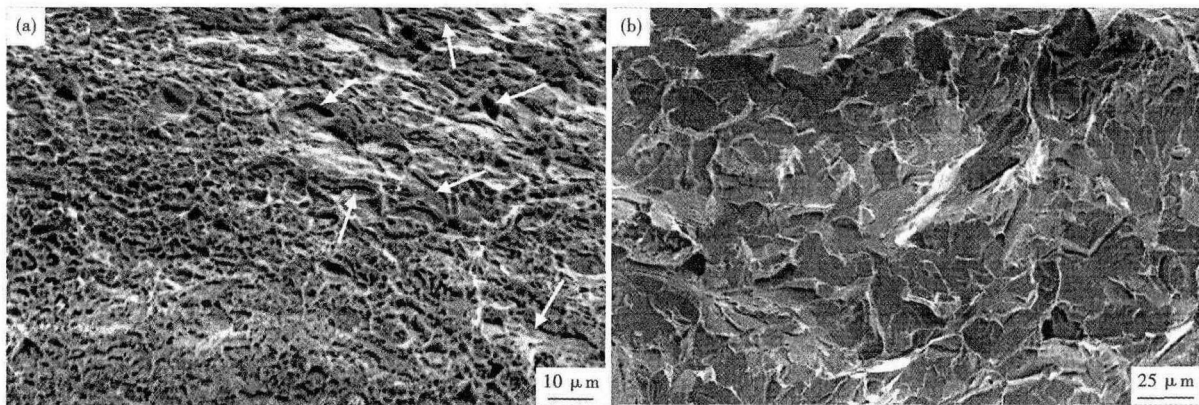


图 4 实验钢 S355NL 切向试样断口剪切部分的韧窝 (-80 ℃, A_{KV} 26.31 J) (a) 和准解理平面 (-60 ℃, A_{KV} 117.85 J) (b)

Fig. 4 Morphology of dimples at shear part (-80 ℃, A_{KV} 26.31 J) (a) and quasi-cleavage planes (-60 ℃, A_{KV} 117.85 J) (b) of test steel S355NL tangential specimen fracture

2.2.2 不同断裂类型断口形貌

-20 ~ -80 ℃ 切向试样断口上都有不同比例的韧窝形貌存在。试验温度高于 -70 ℃ 时,断口上的韧窝形态密集、大小不一,且有许多显微孔洞存在。图 4 (a) 显示,试验温度降至 -80 ℃,断口上虽仍有韧窝存在,但其形态已经有明显改变。韧窝小而浅,尺寸基本一致,没有大的撕裂岭和显微孔洞,反而混合有许多小的类解理断面(箭头所指区域),表明此处已是剪切和解理混合断裂的区域。

图 4 (b) 显示,切向试样断口瓷状区域在高倍下观察的形貌,显示准解理断裂特征。断口上有许多尺寸相对较小、取向各异的断裂面,有从小断裂面中部向四周放射的解理台阶形成近似的“河流花样”,有大量高密度的短而弯曲的断裂岭线条,还有韧窝、韧窝带等^[5]。

图 5 显示,轴向韧脆转变温度(-80 ℃),断口

呈现解理断裂形貌,但在解理平面上依然有一些韧窝、韧窝带和撕裂岭的存在(箭头所指)。

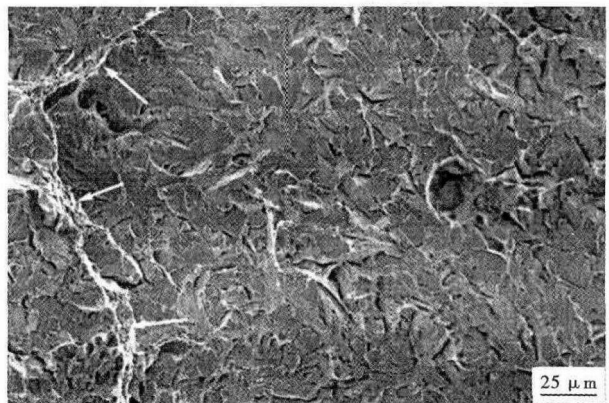


图 5 实验钢 S355NL 轴向试样断口解理断裂形貌 (-80 ℃, A_{KV} 24.80 J)

Fig. 5 Morphology of cleavage fracture of test steel S355NL axial specimen fracture (-80 ℃, A_{KV} 24.80 J)

2.3 不同取向对低温冲击性能的影响

表 3 和图 2 显示,当试验温度低于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,实验钢 S355NL 切向和轴向的低温性能略有不同。

2.3.1 晶粒大小对低温性能的影响

图 6 显示,不同取向的组织形貌相差不大,切向试样组织更均匀,晶粒也更细;轴向组织均匀性相对较差,有轻微的带状组织形态。对铁素体晶粒大小及晶粒度统计测定,切向试样铁素体晶粒平均直径为 $7.46\text{ }\mu\text{m}$,对应显微晶粒度 11.2 级;轴向试样铁素体晶粒平均直径 $9.84\text{ }\mu\text{m}$,对应显微晶粒度 10.4 级,两者相关不足 1 级。

2.3.2 热锻变形方向的影响

切向试样断口韧窝多呈现拉长的圆形或抛物线形,深度较大,更有许多很深很大的显微孔洞;轴向试样的韧窝则为椭圆或有一定长宽比的扁平盘状,深度很小,且未发现有大显微孔洞。试验温度较高时,钢材滑移变形能力和多晶协调变形能力强,空穴扩展方式和方向对断裂过程及裂纹扩展所消耗的能量影响不大;但在温度很低时,原子、位错活动受到限制,钢材协调变形能力下降,截面较大的扁平空穴就更易于沿空穴边缘撕裂,裂纹快速扩展进入瞬时断裂阶段,剩余断口面积以解理或准解理机制断裂。

3 结论

(1) 实验钢 S355NL 的冲击功随温度降低较为平缓地下降;切向试样的韧脆转变温度低于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$,轴向试样的韧脆转变温度在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

(2) 试验温度高于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,所有冲击断口均

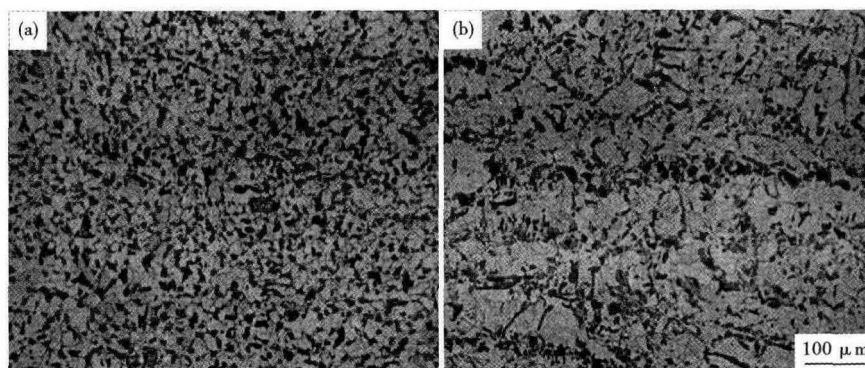


图 6 实验钢 S355NL 的金相组织形貌:(a)切向;(b)轴向
Fig. 6 Morphology of structure of test steel S355NL: (a) tangential; (b) axial

为韧窝断口,有明显变形撕裂特征,是典型的韧性剪切断裂;切向试样在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、轴向试样在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$,断口都存在韧性裂纹萌生与扩展区和脆性的失稳扩展区,前者是韧窝形貌,后者显示解理平面加少量韧窝带和撕裂岭的准解理形貌特征。随温度降低,裂纹萌生区越来越小,失稳扩展区越来越大。温度低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,轴向试样断口为解理断裂特征,形貌特征以“扇形”解理花样为主。

参考文献

- [1] 高立福. 莱钢 S355NL 海上平台用特厚板的开发研制[J]. 山东冶金,2013,35(5):20-22.
- [2] 于学文. 100 t EAF-LF-VD-CCM 流程 S355NL 风电法兰用钢 $\Phi 500 \sim 800\text{ mm}$ 连铸坯的研制[J]. 特殊钢,2015,36(1):28-30.
- [3] 牛余刚. 大型连铸圆坯应用与制造环形锻件的优势[J]. 风能产业,2014,59(6):62-66.
- [4] 束德林. 金属力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,1987:34-54.
- [5] 王从曾. 材料性能学[M]. 北京:北京工业大学出版社,2001:56-62.

戈文英(1972-),男,硕士(2005 年南京工业大学),高级工程师,1995 年山东工业大学(本科)毕业,特殊钢新品种及工艺研发、标准管理。E-mail: gwy55@163.com

收稿日期:2015-04-13

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