

低温环境对3种结构钢力学性能的影响研究

苏艳, 苏虹, 胡秉飞, 陈金燕, 钟勇

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究揭示低温对结构钢冲击韧性和拉伸性能的影响规律。**方法** 采用实验室冲击试验和拉伸试验, 研究 $-70\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内3种钢材的冲击吸收能量以及抗拉强度、断后伸长率等力学性能的变化规律。利用金相显微镜(OM)和环境扫描电镜(SEM)观察和表征材料的显微组织及冲击断口形貌特征, 并采用冲击吸收能量法测定材料的韧脆转变温度。**结果** 45A和300M具有体心立方晶格, 随着试验温度的降低, 45A冲击吸收能量变化规律整体呈S形, 发生韧脆转变现象, 300M冲击吸收能量下降幅度明显低于45A, $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的冲击吸收能量保持率仍高达75%。1Cr18Ni9具有面心立方晶格, 在试验温度范围内, 冲击吸收能量变化平缓, 未发现韧脆转变倾向。随着温度的降低, 3种钢材的抗拉强度、屈服强度均不同程度地增高, 而断后伸长率和断面收缩率随温度的降低而减小。**结论** 钢的低温脆性与晶格类型有关, 体心立方晶格的金属具有冷脆性, 而面心立方晶格金属通常不具有冷脆倾向。由冲击吸收能量法测得45A的韧脆转变温度为 $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$, 300M的韧脆转变温度 $< -70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 结构钢; 低温; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)03-0118-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.018

Influence of Low Temperature Environment on Mechanical Performance of Three Structural Steels

SU Yan, SU Hong, HU Bing-fei, CHEN Jing-yan, ZHONG Yong

(Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This paper aims to reveal the influence rules of low temperature on the impact toughness and tensile performance of structural steel. Through impact and tensile test, the change rules of such mechanical performance as impact absorbed energy, tensile strength, and the elongation rate after fracture of three structural steels at $-70\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ were studied, the microstructure and the impact fracture morphology features of materials were observed and characterized by the metallographic microscope (OM) and environmental scanning electron microscope (ESEM), and the ductile-brittle transition temperature was measured by impact absorbed energy method. Both 45A and 300M structural steels had body-centered cubic lattice. The change rule of the impact absorbed energy of 45A structural steel was S-shaped with the temperature decreases and produced ductile-brittle transition. Compared with 45A structural steel, the decrease range of impact absorbed energy for 300M structural steel was smaller, and its impact absorbed energy was still up to 75% at $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1Cr18Ni9 had face-centered cubic lattice and gentle change of

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2021-12-20

Received: 2021-12-08; Revised: 2021-12-20

作者简介: 苏艳(1971—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为产品环境效应与评价。

Biography: SU Yan (1971—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: product environmental effect and evaluation.

引文格式: 苏艳, 苏虹, 胡秉飞, 等. 低温环境对3种结构钢力学性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 118-125.

SU Yan, SU Hong, HU Bing-fei, et al. Influence of Low Temperature Environment on Mechanical Performance of Three Structural Steels[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 118-125.

impact absorbed energy without ductile-brittle transition found at test temperature range. The tensile strength and yield strength of the three structural steels all increased in different degrees with the temperature fell, but the elongation rate and reduction of cross section after fracture decreased. The low temperature brittleness of structural steel has relation with lattice types. The metals with body-centered cubic lattice have cold brittleness, but the metals with face-centered cubic lattice not. The ductile-brittle transition temperatures of 45A and 300M structural steels measured by the impact absorbed energy method are $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $< -70\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectively.

KEY WORDS: structural steel; low temperature; mechanical performance; microstructure

结构钢在常温下具有较好的力学性能, 广泛应用于国防装备和国家基础设施建设, 如地面车辆/飞机结构、桥梁钢结构等。这些结构用钢材面临的使用工况环境极其复杂, 不仅要承受交变载荷的作用, 还要经受外界环境温度的循环变化, 尤其是我国高原高寒地区以及极地科考使用的钢结构, 会遭遇持续低温的影响, 其力学性能与常温环境下明显不同, 容易发生低温脆性破坏^[1-3]。因此, 掌握结构钢主要性能随温度的变化规律具有重要的意义。

国内外学者对铁基合金低温性能的研究主要集中在低温压力容器用中低合金钢上^[16-19], 虽然针对结构钢低温性能开展了一些试验研究和低温损伤机制探索, 取得了部分研究成果^[4-10,20], 但相比常温环境, 结构钢的低温力学性能研究还相对薄弱。由于缺乏足够的低温性能变化数据, 使得工程技术人员在低温选材时无据可依, 而仅根据材料的许用应力考虑设计, 将给结构的安全使用埋下隐患。本文针对 45A、300M、1Cr18Ni9 等 3 种典型结构钢, 采用夏比冲击

试验和拉伸试验研究了冲击吸收能量和抗拉强度、断后伸长率等力学性能随温度的变化规律, 阐明了断裂类型与断口显微特征的关系, 探讨了影响钢低温脆性的因素, 为低温环境下钢结构设计选材与应用提供理论依据。

1 试验

1.1 试样

试验采用碳钢、超高强度钢、不锈钢 3 种结构钢材的典型牌号 45A、300M 和 1Cr18Ni9, 其化学成分见表 1。试样类型分为拉伸试样和缺口冲击试样 2 类。拉伸试样为标准棒状哑铃试样 (见图 1), 用于抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{P0.2}$ 、断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 的测试。缺口冲击试样尺寸为 $55\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 缺口类型为 V 形缺口, 缺口深度为 2 mm, 用于冲击吸收能量的测试。

表 1 45A、300M 和 1Cr18Ni9 等 3 种结构钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 45A, 300M and 1Cr18Ni9 structural steels

牌号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	%
45A	0.45	0.26	0.62	0.013	0.0079	0.060	0.061	<0.05	—	—	
300M	0.43	1.68	0.67	0.0024	0.0024	0.84	1.97	0.033	0.47	0.08	
1Cr18Ni9	0.083	0.25	1.26	0.019	0.0082	18.67	9.18	—	—	—	

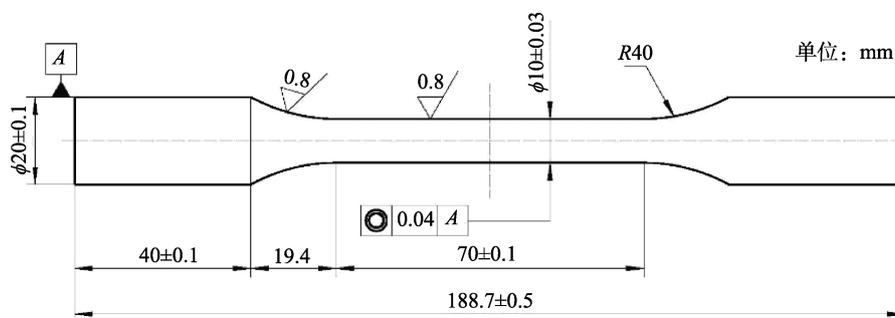


图 1 拉伸试样外形尺寸
Fig.1 Geometric dimension of tensile specimen

1.2 显微组织与晶体结构分析

磨制三种钢材的金相试片, 45A、300M 采用 4%

(硝酸的体积分数)的硝酸酒精溶液侵蚀表面 4~6 s, 1Cr18Ni9 采用 6.6 g $\text{FeCl}_3 + 20\text{ mL HCl} + 80\text{ mL H}_2\text{O}$ 的混合溶液侵蚀后, 用 Observer A1 m 金相显微镜 (OM)

对其显微组织进行观察。采用 Rigaku SmartLab 型 X 射线衍射仪对 3 种钢材的晶体结构进行分析, Cu 靶 ($\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$), 扫描范围为 $20^\circ\sim 110^\circ$, 扫描速度为 $10\ (^{\circ})/\text{min}$ 。

1.3 方法

1.3.1 低温冲击试验

低温冲击试验按照 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》执行。将试样分别置于 20 、 -10 、 -20 、 -30 、 -40 、 -50 、 -60 、 $-70\ ^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下 $15\ \text{min}$ 后, 取出并于 $5\ \text{s}$ 内在室温环境下对试样进行冲击试验。每组平行试样 5 件, 记录冲击吸收能量值, 取冲击能量降至室温测试值 50% 时所对应的温度为韧脆转变温度。试验后, 测试冲击断口的剪切断面率, 并采用 Quanta200 环境扫描电镜 (SEM) 观察断口的显微特征。

1.3.2 低温拉伸试验

低温拉伸试验按照 GB/T 228.3—2019《金属材料拉伸试验第 3 部分: 低温试验方法》执行。根据我国地面车辆低温环境适应性要求及高寒地区低温极

值, 将试验温度设计为 20 、 -43 、 $-60\ ^{\circ}\text{C}$ 。试样置于低温试验箱中保温 $60\ \text{min}$ 后, 采用 MTS880 电液伺服材料试验机进行低温拉伸试验, 每组平行试样 5 件, 测试抗拉强度、屈服强度、断后伸长率和断面收缩率。

2 结果与讨论

2.1 3 种钢材的显微组织与晶体结构

采用 OM 观测到的 3 种钢材金相显微组织如图 2 所示。可以看出, 3 种试验钢材的微观组织结构有所不同。45A 为碳素结构钢, 调质态下主要表现为回火索氏体+铁素体, 见图 2a; 300M 属于超高强度钢, 微观组织以回火索氏体为主, 含少量铁素体, 见图 2b; 1Cr18Ni9 为奥氏体不锈钢, 微观组织以奥氏体为主, 含少量铁素体, 部分组织呈带状分布, 见图 2c。

XRD 分析 (见图 3) 表明, 调质态 45A 的微观组织结构主要为体心立方 α -铁素体; 超高强度钢 300M 主要由体心立方 α -铁素体和体心立方 α -马氏体相构成; 1Cr18Ni9 不锈钢基体组织为面心立方 γ -奥氏体。

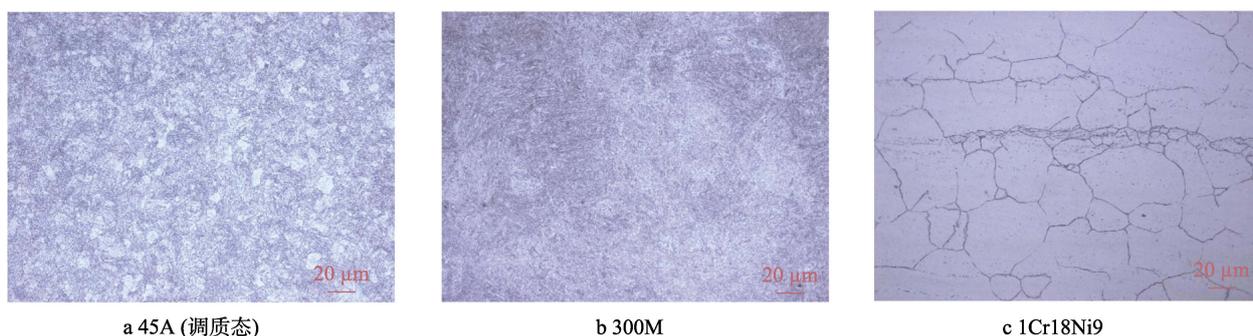


图 2 3 种试验钢材的显微组织
Fig.2 Microstructures of three test structural steels

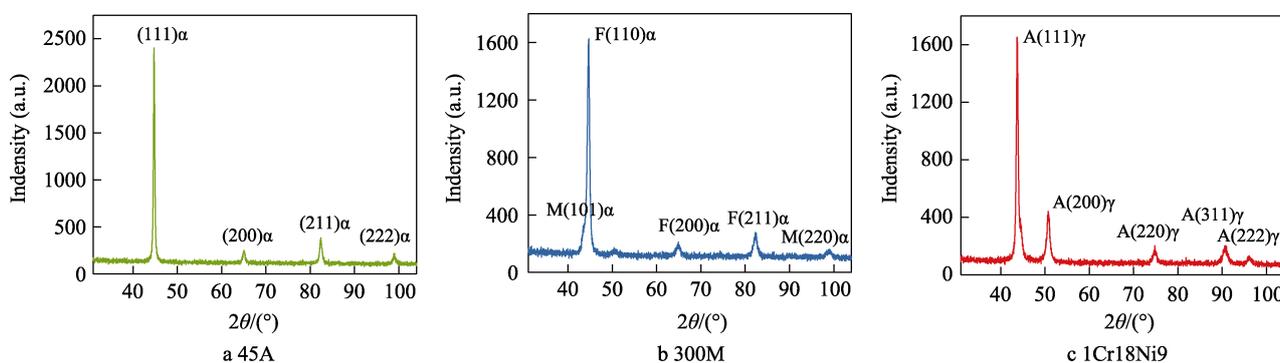


图 3 3 种试验钢材的 XRD 谱图
Fig.3 XRD pattern of three test structural steels

2.2 低温对 3 种钢材冲击性能的影响规律

2.2.1 冲击吸收能量随温度的变化规律

3 种钢材冲击吸收能量-温度的变化曲线如图 4 所

示, 其中图 4a 是采用 Boltzmann 函数拟合的趋势曲线。可以看出, 随温度的降低, 45A 的冲击吸收能量表现出显著下降趋势, 整体变化呈 S 形。采用 $20\ ^{\circ}\text{C}$ 的温度间隔来分析冲击吸收能量的变化规律, $0\sim 20\ ^{\circ}\text{C}$ 冲击吸

收能量基本无变化，在-20~0℃急剧下降 42.8 J，-40~-20℃下降幅度趋缓（10 J），-70~-40℃减小不明显。这说明在试验温度范围内，45A 存在韧脆转变现象。300M 的冲击吸收能量也表现为随温度降低而减小的趋势，相比常温（20℃），-70℃时的冲击吸收能量下降 4.8 J，下降率为 25%。根据拟合曲线插值计算，可知当冲击吸收能量降至室温测试值的 50%时对应的温度为韧脆转变温度，即 45A 的韧脆转变温度为-28℃，而 300M 在-70℃时的冲击吸收能量保持率仍高达 75%，可推断其韧脆转变温度<-70℃。在整个

试验温度范围内，1Cr18Ni9 的冲击吸收能量变化平缓，与温度近似呈线性关系，下降率仅为 11%，未发现韧脆转变倾向。

采用 SEM 观察 45A、300M、1Cr18Ni9 等 3 种钢材冲击断口显微特征，如图 5—7 所示。可以看出，常温下，45A 断口上撕裂棱、韧窝形貌较明显，存在少量的河流花样和二次裂纹，呈现出典型的准解理特征。当温度降至-50℃时，断口上出现大量解理台阶和二次裂纹^[21-22]，表现为明显的解理特征，断裂机理由以微孔聚集型为主转变为穿晶解理，材料由韧性转

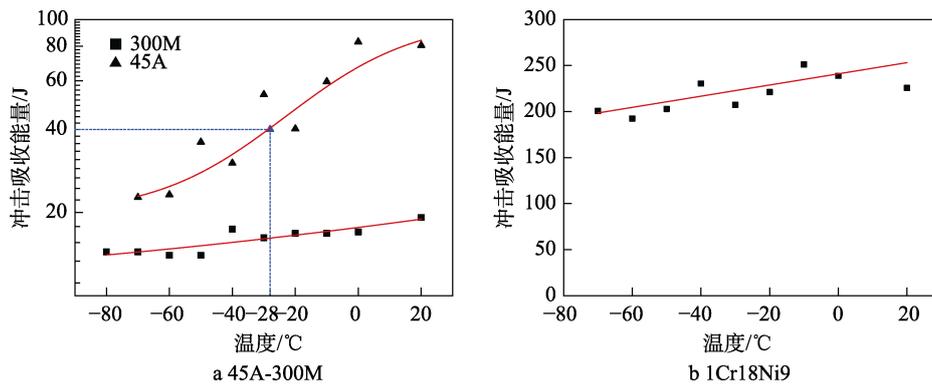


图 4 三种钢材冲击吸收能量-温度变化曲线
Fig.4 Impact absorbed energy-temperature curve of three structural steels

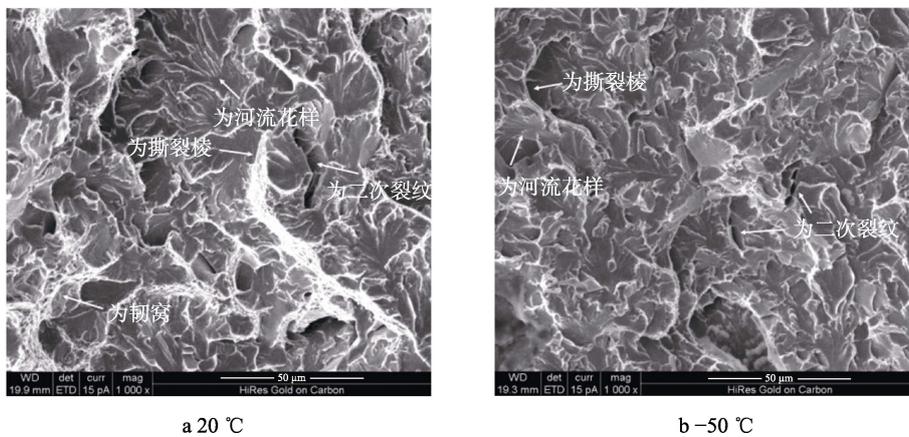


图 5 45A 不同温度下的断口形貌
Fig.5 SEM of fracture morphology for 45A structural steel at different test temperatures

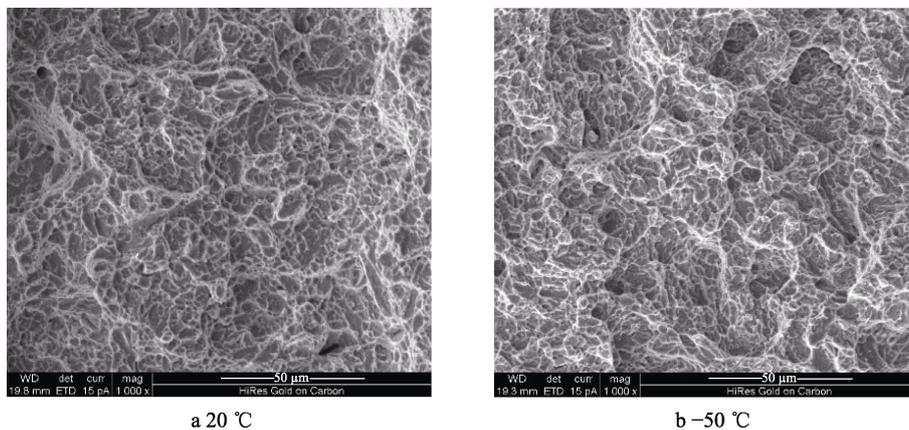
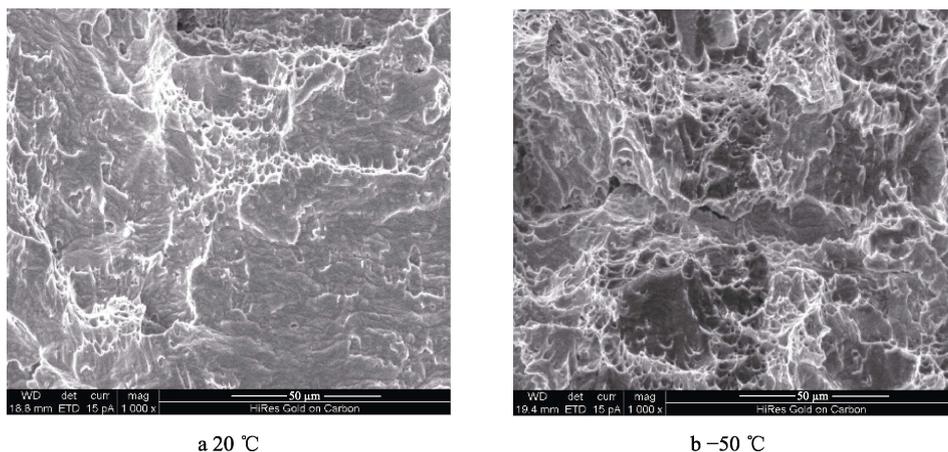


图 6 300M 不同温度下的断口形貌
Fig.6 SEM of fracture morphology for 300M structural steel at different test temperatures



a 20 °C

b -50 °C

图7 1Cr18Ni9不同温度下的断口形貌

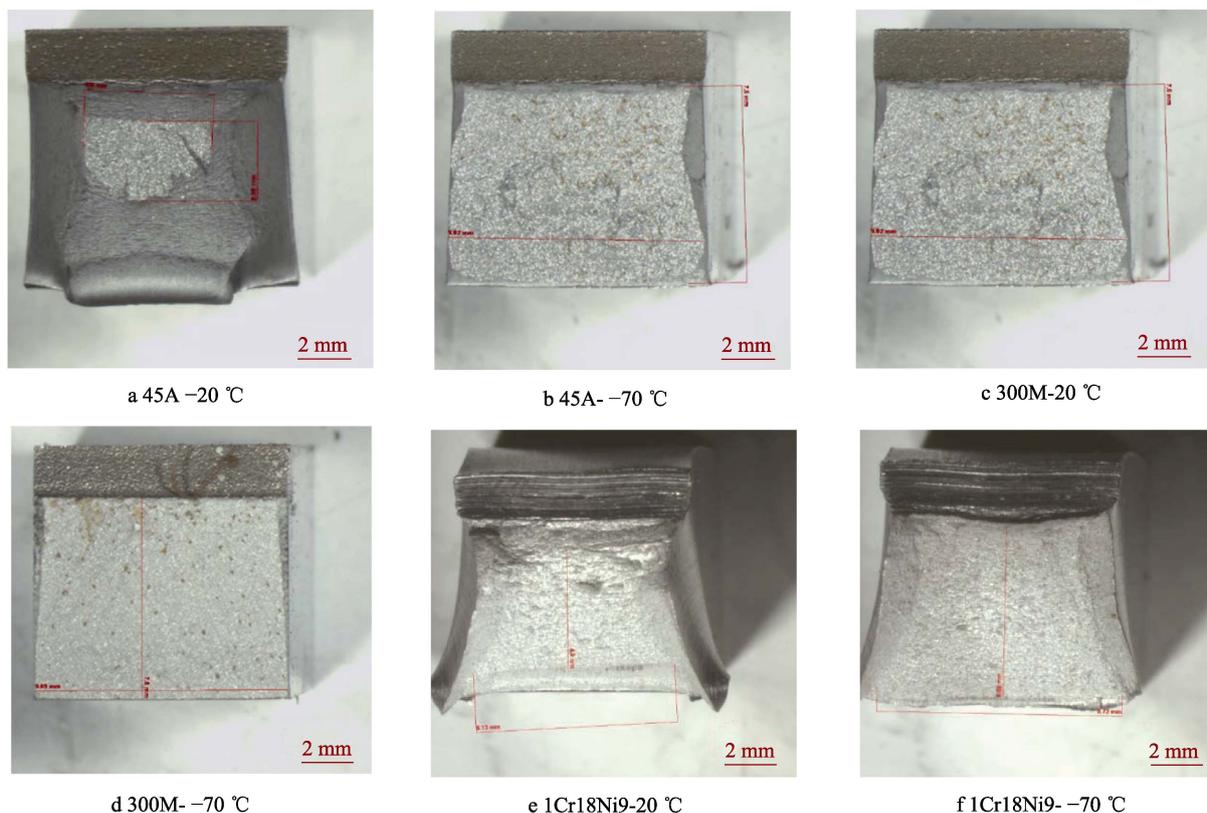
Fig.7 SEM of fracture morphology for 1Cr18Ni9 structural steel at different test temperatures

变为脆性，这与前文中 45A 低温冲击吸收能量变化规律相吻合。300M 常温断口形貌以韧窝为主，呈现出韧性断裂特征；-50 °C 时断口微观特征仍然以韧窝为主，但断面出现少量沿原奥氏体晶界的台阶，说明材料塑韧性略有下降。1Cr18Ni9 常温断口表现为拉长韧窝和撕裂的混合形貌，撕裂面反映了冲击断裂过程的塑性变形能力；-50 °C 时以韧窝为主，撕裂面减少，仍然具有较好的塑性。

2.2.2 剪切断面率随温度的变化规律

冲击样品断口通常由剪切区和结晶区组成，剪切

区面积率越大，说明材料韧性越好，结晶区面积率越大，则说明材料脆性越高。采用体式显微镜观察识别 3 种钢材断口的剪切区和结晶区边界（见图 8），并结合数字图像处理技术计算得到各个温度点下的剪切断面率，绘制 45A 剪切断面率-温度曲线，见图 9。可以看出，45A 在室温条件下具有较好的韧性。随着温度的下降，其剪切断面率从最初的 70%（20 °C）降至 30%（-70 °C），说明 45A 的断裂性质逐步从韧性断裂转变为脆性断裂。300M 和 1Cr18Ni9 在试验温度区间冲击断口形貌均以结晶区为主，剪切断面率随温度下降的变化幅度较小。



a 45A-20 °C

b 45A- -70 °C

c 300M-20 °C

d 300M- -70 °C

e 1Cr18Ni9-20 °C

f 1Cr18Ni9- -70 °C

图8 3种钢材不同温度下冲击断口形貌

Fig.8 Impact fracture morphology of three structural steels at different temperatures

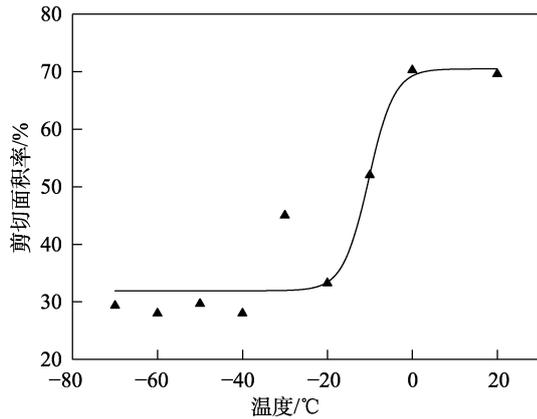


图 9 45A 剪切断面率-温度变化曲线

Fig.9 Shear section rate-temperature curve of three structural steels

2.3 低温对 3 种钢材拉伸性能的影响规律

3 种钢材在 20、-43、-60 °C 下的拉伸性能数据见表 2。结果表明，随着温度的降低，3 种钢材的抗拉强度、屈服强度均有所增加，而断后伸长率和断面收缩率不同程度地减小，说明钢材的塑性变形能力逐渐下降。随温度的下降，1Cr18Ni9 的抗拉强度和屈服强度增幅较大，相比室温，-60 °C 抗拉强度和屈服强度的增幅分别达 82% 和 162%。相同温度下，其断后伸长率和断面收缩率明显高于 45A 和 300M。当温度降至 -60 °C 时，断后伸长率和断面收缩率仍保持在

50% 左右，韧性较好，这与前文得出的结论一致。1Cr18Ni9 在低温下强度快速提高的原因还需进一步的分析研究。

表 2 3 种钢材在不同温度下的拉伸性能数据
Tab.2 Tensile property of three structural steels at different temperatures

材料 牌号	试验温度 /°C	抗拉强度 R _m /MPa	屈服强度 R _{p0.2} /MPa	断后伸 长率 A/%	断面收 缩率 Z/%
45A	-60	849	634	3.0	39
	-43	830	616	3.0	40
	20	791	617	22.5	62
300M	-60	2014	1775	13.0	28
	-43	1996	1579	13.0	27
	20	1934	1616	10.0	41
1Cr18Ni9	-60	1043	602	50.0	48
	-43	1014	592	49.0	43
	20	573	230	47.0	77

3 种钢材在不同温度下的应力-应变曲线如图 10 所示。温度对拉伸曲线的弹性变形、弹塑性变形和颈缩 3 个阶段的影响明显，随着温度的降低，拉伸曲线左移。温度下降提高了 45A 和 300M 的弹性模量，抗拉强度增大，弹塑性变形阶段缩短。低温下 1Cr18Ni9 的拉伸变形表现出明显的应变硬化现象^[23]，抗拉强度和屈服强度显著增大。

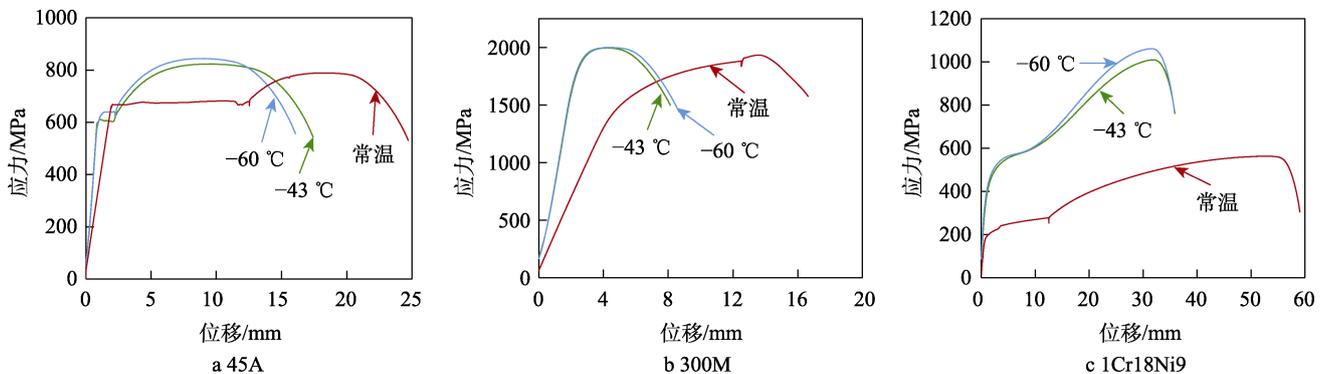


图 10 3 种钢材不同温度下的应力-位移曲线

Fig.10 Stress-displacement curves of three structural steels at different temperatures

2.4 金属韧脆转变的影响因素分析

上述钢材冲击性能和拉伸性能随温度下降的变化规律表明，金属材料在低温条件下其韧性会明显降低，发生由韧变脆的现象。然而，并非所有的金属材料都存在冷脆性^[11-12]。从微观角度出发，金属材料本身的组织结构、成分、冶金质量等是影响韧脆转变的主要因素^[13-15]。

1) 晶体结构的影响。如 2.1 所述，45A 碳钢、300M 超高强度钢属于体心立方晶格，由于晶面原子少，排列稀疏，滑移阻力较大，导致变形困难，容易

发生韧脆转变。1Cr18Ni9 奥氏体不锈钢为面心立方晶格，由于具有较多的滑移系，在低温下可以产生相应的多系滑移，材料塑性储备高，应变协调性好，从而不易解理断裂，表现出较好的韧性。

2) 材料组织的影响。均匀细小的组织能显著提高钢的断裂韧性，降低韧脆转变温度。晶粒细小，滑移距离较短，由于相邻晶粒位向不同，裂纹越过晶界会受到阻碍。材料组织越细，相界面越多，这种阻碍作用就越大，可降低断裂发生的概率。调质态的 45A 碳钢组织中仍然可见块状的铁素体，在 500× 光学显微镜下，珠光体中的碳化物清晰可辨。相同倍数下，

300M 超高强度钢已较难辨认细珠光体(索氏体)中分布的碳化物,显然 300M 的组织优于调质态 45A 钢。相较于调质态 45A 钢,300M 的晶粒细小,滑移距离较短,且组织中细小的碳化物弥散分布,对裂纹扩展的阻碍作用相对较大,降低了断裂发生的概率,是 300M 不易发生韧脆转变的本质原因。

3) 元素成分的影响。由试验可以看出,随着钢中 C 含量的增加,冲击韧性显著降低,韧脆转变温度明显提高。低温下,基体组织中过饱和的碳有脱溶的倾向。低温时,碳原子不易发生长程扩散,一部分[C]在正韧性位错的下半部分偏聚,形成柯氏气团,增大了位错滑移的阻力^[24],表现为结构钢材料在低温时强度的提高和塑性的降低。随着温度的降低,碳含量高的材料可能析出碳化物,发生组织劣化,更容易向脆性断裂转变。杂质元素 P 含量高,会造成晶粒粗大,同时还会降低裂纹的表面能,均提高韧脆转变温度,使材料表现出冷脆性。另一方面,增加非碳化物形成元素 Ni 的含量,可抑制珠光体转变^[23],细化晶粒,形成低碳马氏体和回火索氏体,对提高钢的韧塑性是有利的^[1,11]。

3 结论

1) 钢的低温脆性与晶格类型有关。45A 和 300M 具有体心立方晶格,前者的冲击吸收能量随试验温度的降低而明显减小,变化规律整体呈 S 形,表现出韧脆转变现象;后者的冲击吸收能量虽然也表现为随温度降低而减小的趋势,但下降幅度明显低于 45A, -70 °C 时的冲击吸收能量保持率高达 75%,这与其晶粒细小、相界面多的微观组织有关。1Cr18Ni9 具有面心立方晶格,在试验温度范围内冲击吸收能量变化平缓,未发现韧脆转变倾向。

2) 观察冲击断口的 SEM 形貌发现,随着温度下降,45A 从常温的准解理断裂发展为解理断裂,材料由韧性转变为脆性;300M 常温断口形貌呈现出韧性断裂特征, -50 °C 时仍然以韧窝为主,出现了少量滑移台阶,说明材料塑韧性略有下降;1Cr18Ni9 常温和 -50 °C 断口形貌均表现为韧窝断口。该结论与 3 种钢材的低温冲击吸收能量变化规律相吻合。

3) 45A、300M 和 1Cr18Ni9 等 3 种钢材在低温拉伸变形时,抗拉强度、屈服强度随温度的降低均不同程度地增高,1Cr18Ni9 的增幅较大;断后伸长率和断面收缩率随温度的降低而降低,相同温度下 1Cr18Ni9 的韧塑性明显优于 45A 和 300M。

4) 韧脆转变温度为合理确定材料使用温度提供了依据。由冲击吸收能量法测定的 45A 和 300M 的韧脆转变温度分别为 -28 °C、<-70 °C。

参考文献:

- [1] 郭金. 高强度钢低温力学性能及应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
GUO Jin. A Study on Cryogenic Mechanical Properties and an Application of High Strength Steels[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2012.
- [2] 戚国胜. 脆断事故的原因分析和预防措施[J]. 南方冶金学院学报, 2002, 23(1): 28-33.
QI Guo-sheng. Analysis on Reasons and Preventive Measures for Fragile Split[J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 2002, 23(1): 28-33.
- [3] 王元清. 钢结构脆性破坏事故分析[J]. 工业建筑, 1998, 28(5): 55-58.
WANG Yuan-qing. Analysis of Brittle Failure Accident of Steel Structure[J]. Industrial Construction, 1998, 28(5): 55-58.
- [4] DAHMANI L, KHENANE A, KACI S. Behavior of the Reinforced Concrete at Cryogenic Temperatures[J]. Cryogenics, 2007, 47(9-10): 517-525.
- [5] PARK W S, YOO S W, KIM M H, et al. Strain-Rate Effects on the Mechanical Behavior of the AISI 300 Series of Austenitic Stainless Steel under Cryogenic Environments[J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3630-3640.
- [6] LIU Xi-yue, WANG Yuan-qing, ZONG Liang, et al. Experimental Study on Mechanical Properties and Toughness of Q460C High-Strength Steel and Its Butt Welded Joint at Low Temperature[J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3): 457-469.
- [7] WANG Y Q, LIU X Y, LIN Y, et al. Experimental Study on Fracture Toughness of High-Strength Structural Steel and Its Butt Weld[J]. Advanced Steel Construction, 2015, 11(4): 440-451.
- [8] 张玉玲, 潘际炎. 低温对钢材及其构件性能影响研究综述[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 89-96.
ZHANG Yu-ling, PAN Ji-yan. Study on Performance of Steel and the Components under Low Temperature[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 89-96.
- [9] 王元清, 王晓哲, 武延民. 结构钢材低温下主要力学性能指标的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 63-65.
WANG Yuan-qing, WANG Xiao-zhe, WU Yan-min. The Experimental Study on the Main Mechanical Parameters of Structural Steel under Low Temperature[J]. Industrial Construction, 2001, 31(12): 63-65.
- [10] 王元清, 武延民, 石永久, 等. 低温对结构钢材主要力学性能影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(1): 1-4.
WANG Yuan-qing, WU Yan-min, SHI Yong-jiu, et al. Experimental Study on the Main Mechanical Parameters of Building Steel under Low Temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(1): 1-4.
- [11] 李红英. 浅论低温对金属材料性能的影响[J]. 现代矿业, 2011, 27(4): 113-115.
LI Hong-ying. On the Influence of Low Temperature on the Properties of Metal Materials[J]. Modern Mining,

- 2011, 27(4): 113-115.
- [12] 刘波. 金属材料的低温性能分析[J]. 住宅与房地产, 2015(S1): 73.
LIU Bo. Analysis of Low Temperature Properties of Metal Materials[J]. Housing and Real Estate, 2015(S1): 73.
- [13] 柳永宁, 冯耀荣, 宋小龙, 等. X65 管线钢的动态断裂行为研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(11): 1171-1174.
LIU Yong-ning, FENG Yao-rong, SONG Xiao-long, et al. Dynamic Fracture of Pipeline Steel X65[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(11): 1171-1174.
- [14] 张吉兆. 冻结管常温和低温力学性能试验研究[J]. 煤炭技术, 2008, 27(12): 102-103.
ZHANG Ji-zhao. Experimental Study of Mechanical Characteristics of Frozen Steel Pipe under Normal Temperature and Low Temperature[J]. Coal Technology, 2008, 27(12): 102-103.
- [15] 蒋建州. 浅论低温对金属材料性能的影响[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2015(16): 1439.
JIANG Jian-zhou. On the Influence of Low Temperature on the Properties of Metal Materials[J]. Urban Construction Theory Research, 2015(16): 1439.
- [16] KRISHNADEV M R, CUTLER L R, SOJKA G J, et al. Characterization of the Fracture Behavior of Fine-Grained High-Strength Low-Alloy (HSLA) Steels and Iron-Base Alloys under Low-Temperature and Mechanical Environments[C]//Fractography and Materials Science. West Conshohocken: ASTM International, 1981.
- [17] BERNAUER G, BROCKS W, SCHMITT W. Modifications of the Beremin Model for Cleavage Fracture in the Transition Region of a Ferritic Steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 64(3): 305-325.
- [18] GAUDER P, SEIDENFUß M. Experimental and Numerical Investigations of Tensile Specimens Containing Multiple Flaws in the Ductile-to-Brittle Transition Region[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 248: 107714.
- [19] 张丽红, 陈芙蓉. 低温钢及其低温韧性研究现状[J]. 电焊机, 2020, 50(12): 88-91.
ZHANG Li-hong, CHEN Fu-rong. Research Status of Low-Temperature Steel and Its Low-Temperature Toughness[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(12): 88-91.
- [20] 谢剑, 韩晓丹, 裴家明, 等. 超低温环境下钢筋力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 126-129.
XIE Jian, HAN Xiao-dan, PEI Jia-ming, et al. Experimental Study of Mechanical Properties of Reinforcing Steels at Cryogenic Temperatures[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 126-129.
- [21] KANTOR M M, VORKACHEV K G, SOLNTSEV K A. Nature of Microcracks in Ferritic Steels Occurred during Fracture under Conditions of Ductile-Brittle Transition Temperature Region[J]. Inorganic Materials, 2018, 54(10): 1071-1077.
- [22] 王淑花, 杨德庄, 何世禹, 等. 1Cr₁₈Ni₉Ti 钢的低温拉伸变形行为[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(6): 579-582.
WANG Shu-hua, YANG De-zhuang, HE Shi-yu, et al. Tensile Deformation Behavior of 1Cr₁₈Ni₉Ti Steel at Low Temperatures[J]. Material Science and Technology, 2004, 12(6): 579-582.
- [23] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
SONG Wei-xi. Metalology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989.
- [24] 王红涛. 厚规格 EH40、EH47 船舶用钢组织性能与低温韧性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
WANG Hong-tao. Study on Microstructure and Low Temperature Toughness of Thick Specification EH40, EH47 Ship Plate Steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.