温度对快速救援剪刀下锲冲击性能的影响

刘邵洋[1]， 姜增辉[1]， 李明刚[2]， 牟 强[2]， 蔡 琨[1]
（1. 沈阳理工大学 机械工程学院，沈阳 110159；2. 四川南山射钉紧固器材有限公司，四川 宜宾 644000）

摘 要：为探究环境温度对快速救援剪刀使用性能的影响，通过示波冲击实验，研究了快速救援剪刀下锲材料S136钢在23℃、0℃、-20℃和-40℃下的冲击性能，分析了温度对快速救援剪刀下锲使用性能的影响。研究结果表明：随着温度的降低，S136钢裂纹扩展能量逐渐减小，S136钢的冲击韧性逐渐降低。S136钢试样在23℃和0℃为韧脆性断裂，-40℃时转变为脆性断裂，温度越低，试样脆性断裂倾向越明显。剪刀下锲可承受的冲击载荷在0℃时为159.34 kN，在-40℃时为93.34 kN，降低了41.4%，表明低温导致剪刀下锲的冲击性能丧失明显。

关键词：冲击性能；示波冲击实验；温度；快速救援剪刀；冲击载荷
DOI：10.15938/j.jhust.2026.03.015
中图分类号：TU998.13 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-2683(2026)03-0143-07

The Effect of Temperature on the Impact Performance of the Lower Blade in Rapid Rescue Scissor

LIU Shaoyang[1]， JIANG Zenghui[1]， LI Minggang[2]， MU Qiang[2]， CAI Kun[1]
（1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. Sichuan Nanshan Powder Actuated Fastening System Co., Ltd., Yibin 644000, China）

Abstract: To investigate the effect of ambient temperature on the performance of rapid rescue scissors, the impact performance of the lower blade material S136 steel was examined at 23℃, 0℃, -20℃, and -40℃ through instrumented impact tests, and the effect of temperature on the performance of the lower blade was analyzed. The research results show that the crack extension energy Wp of S136 steel gradually reduces as the temperature decreases, and the impact toughness gradually declines. Specimens of S136 steel exhibit tough-brittle fracture at 23℃ and 0℃, and are transformed into brittle fracture at -40℃. The lower the temperature, the more obvious the tendency of brittle fracture. The impact load that the lower blade in the rapid rescue scissors can carry is 159.34 kN at 0℃, and 93.34 kN at -40℃, representing a reduction of 41.4%. The low temperature leads to a significant loss of impact performance of the lower blade of the rapid rescue scissors.

Keywords: impact performance; instrumented impact test; temperature; rapid rescue scissors; impact load

0 引 言

快速救援剪刀是体积小巧便携的救援剪切装备，区别于一般的救援装备，该装置通过特种弹产生的高压气体推动内部活塞与剪刀轴的运动，带动剪刀上下锲完成剪切[1-2]，已被广泛应用于救援抢险中，对钢铁类障碍物能够实现快速破拆。在剪切过程中，剪刀的上锲和下锲会承受较大的冲击载荷，剪刀上锲和下锲的冲击性能决定着快速救援剪刀的整体安全性和可靠性，对剪刀的使用性能具有重要影响。

收稿日期：2024-05-08
基金项目：四川省科技计划重点研发项目(2021YFG0343).
作者简介：刘邵洋(1998—)，男，硕士研究生；
李明刚(1965—)，男，正高级工程师.
通信作者：姜增辉(1971—)，男，博士，教授，硕士研究生导师，E-mail：jzh1022@163.com.

近年来,国内外众多学者在温度方面对各种材料、零件性能进行了大量研究。丁一明等[3]研究了U165 超高强度钻杆钢在不同温度下的冲击韧性,发现温度降低到某一临界值后,钻杆钢裂纹扩展阻力急剧下降,裂纹扩展的位移比例也随温度降低而增加,使得 U165 钻杆钢的冲击韧性急剧减小。李泽文等[4]通过拉伸实验、冲击实验研究了温度对地铁转向架材料 P355NL1 钢强度和冲击性能的影响,利用 Boltzmann 函数对实验结果进行了拟合,得到了材料的韧脆转变温度。唐辉[5]通过静力拉伸实验,研究了 TA15 航空用钛合金在不同温度下的拉伸性能,研究发现 TA15 钛合金的抗拉强度、屈服强度和弹性模量随温度的升高而降低,伸长率随温度的升高而增加,而收缩率不随温度的改变而改变。封辉等[6]通过摆锤冲击实验和夏比冲击实验研究了温度对 X80 管线钢冲击性能的影响,发现温度从 10℃降低至 -10℃后,X80 管线钢夏比冲击性能并无显著降低,而摆锤冲击性能下降明显,且断口出现脆性断裂特征。仵金玲等[7]研究了连接温度对 W/Ni/Kovar 接头界面结构和剪切强度的影响,发现随着连接温度的升高,Kovar/Ni 界面与 Ni/W 界面的扩散层厚度逐渐增加,而接头剪切强度呈先上升后下降的趋势。DONG 等[8]研究了环境温度(-20 至 90℃)对聚乙烯(PE)纤维增强 ECC(PE-ECC)力学性能的影响。研究发现,随着温度的升高,PE 纤维的抗拉强度、基体的断裂韧性和纤维桥接强度均有所下降,而纤维的断裂伸长率和裂纹开裂位移则有所增加。RATHORE 等[9]研究了 CNF-GE 复合材料在 30℃、70℃和 110℃温度下的挠曲响应,并与对照组玻璃纤维/环氧树脂(GE)复合材料进行了比较,发现随着环境温度的升高,CNF-GE 复合材料的强度提高幅度持续减小。GHORBANPOUR 等[10]研究了环境温度和试样预应变对镁合金 WE43 高周疲劳强度的影响,发现从室温到 100℃,WE43 疲劳强度随环境温度的升高而降低,压缩预应变试样的疲劳强度比拉伸预应变试样高。周天宇等[11]通过示波冲击实验,研究了不同温度下预制裂纹缺口和 V 型缺口对 X70 管线钢韧性的影响,发现预制裂纹缺口的韧脆转变温度提高了约 44℃。张庶鑫等[12]研究了不同温度对 X90 管线钢冲击韧性的影响,发现 X90 管线钢在 20℃和 0℃时为韧性断裂,-20℃以下时不稳定裂纹扩展特征明显

综上所述,温度对机械材料和零件的强度和韧性具有十分重要的影响。快速救援剪刀在实际使用中会面临各种相对极端的温度环境,为掌握快速救援剪刀在各种环境温度下的使用性能,本文展开了温度对快速救援剪刀刀锷冲击性能的影响研究。

1 快速救援剪刀结构和下锷承载截面

快速救援剪刀由扳机部分、机体部分、执行机构 3 部分组成,其中执行机构主要包括剪刀上锷和下锷,如图 1 所示。

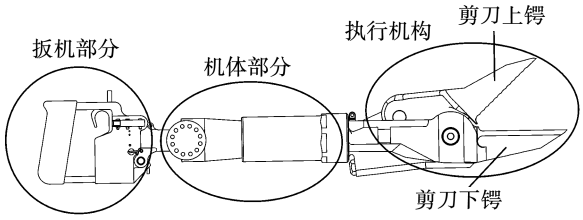

图 1 快速救援剪刀结构图

Fig. 1 Structural drawing of rapid rescue scissors

剪刀上锷是活动构件,其结构相对下锷简单,制造成本较低,损坏后可更换。剪刀下锷是固定构件,一旦发生断裂就会导致剪刀整体报废。因此,剪刀下锷的性能是影响快速救援剪刀的使用性能和寿命的决定性因素,需对其进行重点研究。剪刀下锷材料为 S136 钢,其承载截面的面积对其承载能力有重要影响。图 2 为剪刀下锷剖切得到的承载截面和具体尺寸,由承载截面尺寸可得截面面积为 S_w = 925 mm^2。

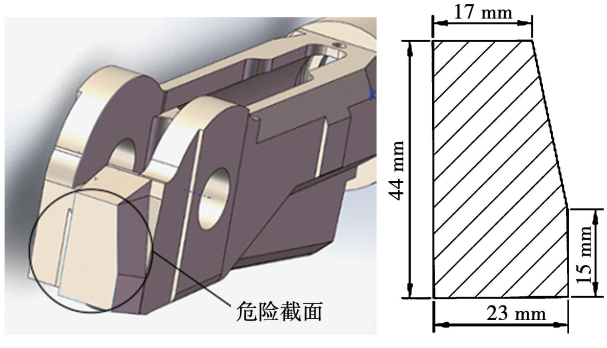

图 2 快速救援剪刀下锷承载截面

Fig. 2 Load section in lower blade of the rapid rescue scissors

2 S136 钢的冲击实验

2.1 试样材料、设备仪器

材料的冲击性能决定构件可承受的冲击性能,

为研究环境温度对快速救援剪刀下锜使用性能的影响,需开展 S136 钢冲击实验研究。传统的冲击实验只能测出冲击能量,而示波冲击实验可通过测量试样在断裂过程中的载荷、位移、吸收能量等数据,动态记录裂纹萌生、扩展至失稳的整个过程[13-15]。

因此,为了更准确地探究温度对 S136 钢的冲击性能及韧脆特性的影响规律,对其在 23℃、0℃、-20℃和-40℃展开示波冲击实验。

S136 钢示波冲击试样的尺寸参数如图 3 所示。总体尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,中间位置缺口形貌为 V 型缺口,夹角为 45°,缺口深度为 2 mm,根部的圆弧半径为 0.25 mm,缺口处截面面积为 S_a = 80 mm^2。

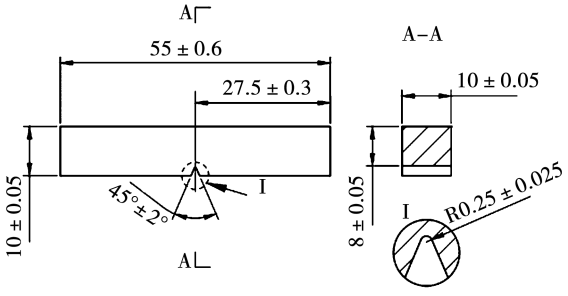

图 3　S136 钢试样尺寸(mm)

Fig. 3　S136 steel specimen size

实验设备为 NI750C 型的金属摆锤示波冲击测试机,如图 4 所示。摆锤顶部配有力传感器与位移传感器,可以在试样被冲断的瞬间进行高频采样,记录冲击过程中的各种数据。为保证实验中的温度要求,可利用 CDC-80B 冲击实验低温槽实现温度设定,如图 5 所示。

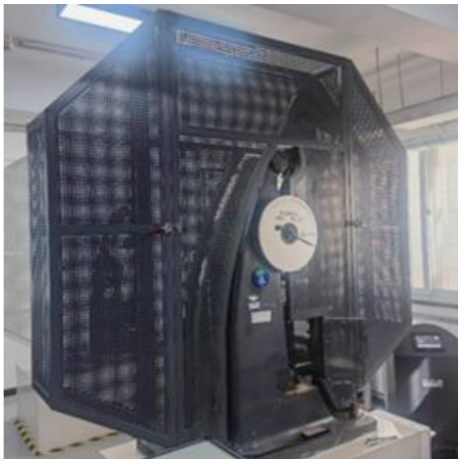

图 4　NI750C 金属摆锤示波冲击测试机

Fig. 4　NI750C metal pendulum instrument impact testing machine



图 5　CDC-80B 冲击实验低温槽

Fig. 5　CDC-80B low temperature tank for impact test

2.2　实验过程

实验温度为 23℃、0℃、-20℃和-40℃,每个温度点取 2 个平行试样。将试样按照实验要求放置在示波冲击测试机中,为保证撞击试样的速度一致,所有试样撞击前锤头的抬起角度均为 150°,撞击锤头的刀刃半径为 2 mm,摆锤摆杆长度为 750 mm,撞击速度为 5.24 m/s。

3　实验结果分析

3.1　温度对 S136 钢冲击力-位移曲线特征的影响

图 6 为 6 类示波冲击力-位移曲线,图中:F_m 为最大力;F_{gy} 为屈服力;S_m 为最大力时的位移;S_{gy} 为屈服位移。如图所示,按照示波冲击力-位移曲线的形状将其分为 A~F 6 种类型,其中 A 型曲线是典型的脆性断裂,F 型曲线是韧性断裂,曲线从 A 型到 F 型材料由脆性断裂向韧性断裂转变[16-17]。

图 7 和图 8 为 S136 钢在 23℃和 0℃的示波冲击力-位移曲线。对比图 6 可知曲线类型均为 E 型,其断裂为韧脆性断裂。在最大力 F_m 前先发生弹性变形,然后发生塑性变形,在最大力 F_m 后出现稳定扩展裂纹,在位移达到 0.6 mm 后冲击力曲线迅速下降,裂纹出现不稳定扩展。

图 9 为-20℃时 S136 钢的示波冲击力-位移曲线,在-20℃时 S136 钢的力-位移曲线近似 B 型,在最大力 F_m 前为弹性变形,无明显塑性变形,在最大力 F_m 后出现稳定扩展裂纹,在位移达到 0.35 mm 后冲击力曲线迅速下降,裂纹出现不稳定扩展。与 23℃和 0℃的示波冲击力-位移曲线相

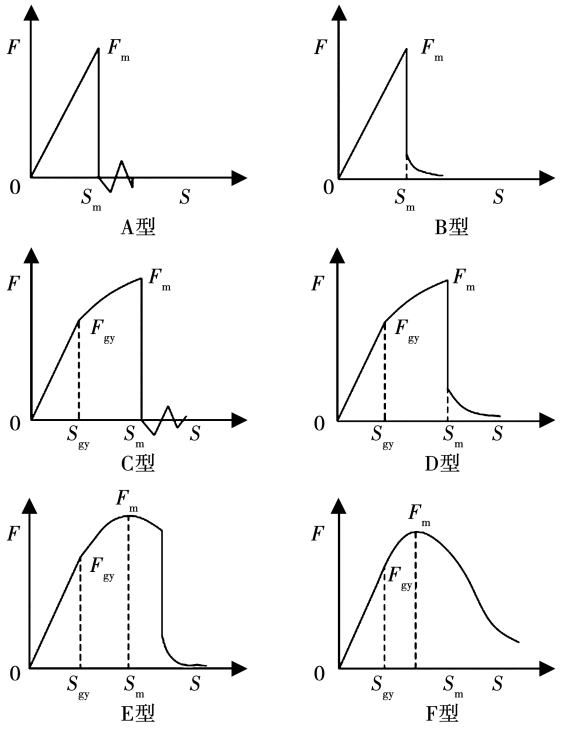

图6 6类示波冲击力－位移曲线

Fig. 6 Six types of force-displacement curves for instrument impact tests

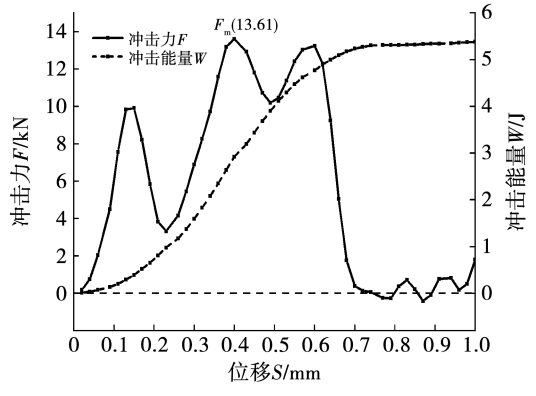

图7 23℃时S136钢的示波冲击力－位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curve of oscillographic impact for S136 steel at 23℃

比，－20℃的力－位移曲线显示了S136钢在冲击过程中裂纹稳定扩展阶段减小，不稳定扩展阶段增大。

图10为－40℃时S136钢的示波冲击力－位移曲线，在－40℃时S136钢的力－位移曲线为A型，试样的断裂为脆性断裂，在最大力F_m前发生弹性变形，最大力F_m后冲击力曲线急剧下降，裂纹产生，且无稳定扩展阶段，直接发生不稳定扩展。

图11为温度对S136钢示波冲击力－位移曲线中最大力F_m和最大力时的位移S_m的影响。由图

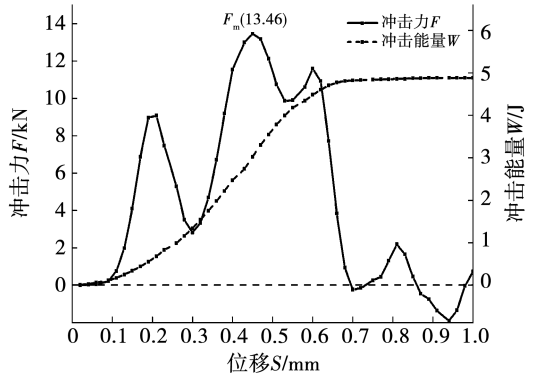

图8 0℃时S136钢的示波冲击力－位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curve of oscillographic impact for S136 steel at 0℃

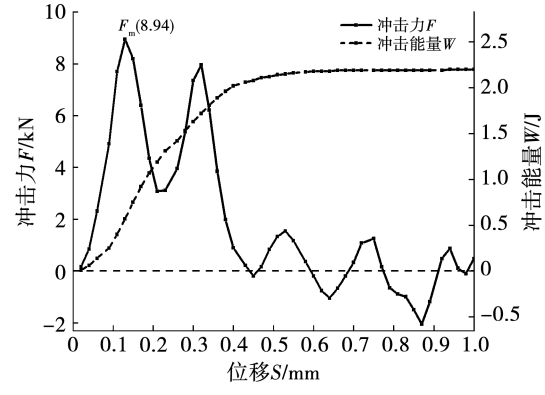

图9 －20℃时S136钢的示波冲击力－位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curve of oscillographic impact for S136 steel at －20℃

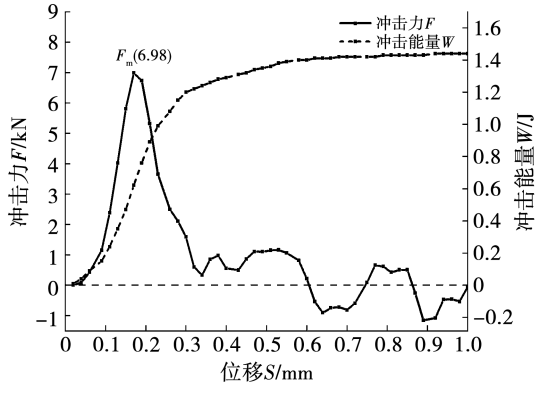

图10 －40℃时S136钢的示波冲击力－位移曲线

Fig. 10 Force-displacement curve of oscillographic impact for S136 steel at －40℃

可见，不同温度下S136钢试样可承受的冲击最大力F_m变化较大，0℃时最大，－40℃时最小。0℃后随着温度的降低，最大力F_m减小，即材料断裂过程中裂纹形成所需的应力减小。相同冲击力下，温度越

低,试样抵抗断裂的能力越弱。最大力时的位移 S_m 在 0℃到 -20℃时急剧减小,说明 S136 钢试样达到裂纹生成临界点时所需塑性变形减小。由图 9 中 -20℃力 - 位移曲线可知,最大力 F_m 前的塑性变形已经消失。

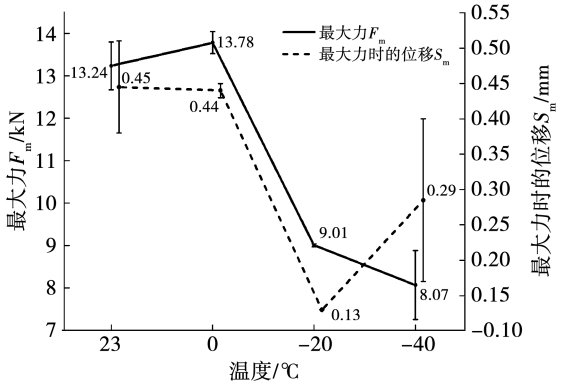

图 11　温度对力和位移特征值的影响

Fig. 11　Effect of temperature on force and displacement eigenvalues

不同温度下 S136 钢示波冲击实验能量特征值如表 1 所示。当冲击力达到最大力 F_m 时,裂纹在冲击试样的缺口处出现,F_m 之前所消耗的能量称为裂纹形成能量 W_m[18]。W_m 为力 - 位移曲线下从 0 到 S_m 的面积,表征材料的启裂性。裂纹扩展能量 W_p 为 F_m 后消耗的能量,表征材料阻止裂纹扩展的能力,冲击韧性的大小主要取决于裂纹扩展能量。总冲击能量 W_t 为 W_m 和 W_p 之和。

表 1　示波冲击实验能量特征值

Tab. 1　Energy eigenvalues of instrument impact test

实验序号	温度/℃	总冲击能量 W_t/J	裂纹形成能量 W_m/J	裂纹扩展能量 W_p/J
1	23	5.32	2.64	2.68
2		5	3.23	1.77
1	0	5.35	2.99	2.36
2		4.82	3.02	1.8
1	-20	2.08	0.57	1.51
2		1.93	0.58	1.35
1	-40	1.41	0.62	0.79
2		2.18	1.79	0.39

能量特征值与温度的关系如图 12 所示。总冲击能量 W_t 和裂纹扩展能量 W_p 随温度的降低而降低。温度从 0℃降至 -20℃后,总冲击能量大幅度下降,表明 -20℃是 S136 钢断裂特征的转化点。裂纹形成能量 W_m 随温度的降低先增大后减小,再增大,在 -20℃时值最小。在 -20℃后裂纹形成能量 W_m 增大,无明显变化规律,具有一定离散性。23℃时裂纹扩展能量 W_p 最高,此时 S136 钢的冲击韧性最大,裂纹扩展的速率较慢。随着温度的降低,裂纹扩展能量 W_p 逐渐降低,裂纹扩展速率加快。表明温度越低,S136 钢的冲击韧性越低,发生脆性断裂的倾向越大。

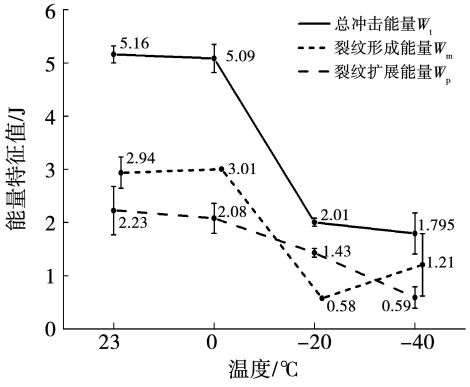

图 12　温度对能量特征值的影响

Fig. 12　Effect of temperature on energy eigenvalues

3.2　温度对剪刀下锜可承受冲击载荷的影响

剪刀下锜可承受的冲击载荷是衡量下锜冲击性能的重要指标,对快速救援剪刀的剪切能力有重要影响,其计算公式为

$$F = S_w \bar{\sigma} \tag{1}$$

式中:F 为可承受冲击载荷;S_w 为下锜承载截面面积(由图 2 可知 S_w 为 925 mm^2);$\bar{\sigma}$ 为平均冲击应力。平均冲击应力 $\bar{\sigma}$ 可通过下式得到:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sigma_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{F_{mi}}{S_a}}{n} \tag{2}$$

式中:σ_i 为第 i 个试样的冲击应力,F_{mi} 为第 i 个试样的最大力;S_a 为试样的 V 型缺口处截面面积(由图 3 可知 S_a 为 80 mm^2)。

图 13 为温度对 S136 钢平均冲击应力 $\bar{\sigma}$ 和剪刀下锜可承受冲击载荷 F 的影响示意图。温度为 23℃和 0℃时,S136 钢冲击实验产生的平均冲击应力和剪刀下锜可承受的冲击载荷相差不大,在该温度区间内温度对剪刀下锜冲击性能的影响较小。0℃时剪刀下锜所能承受的冲击载荷最大,此时剪刀下锜的冲击性能最好。在 -20℃和 -40℃时,S136 钢冲击实验产生的平均冲击应力和剪刀下锜所能承

受的冲击载荷出现急剧下降，-40℃时剪刀下锷所能承受的冲击载荷最小，冲击性能最差。随着温度的降低，剪刀下锷的冲击性能下降明显。

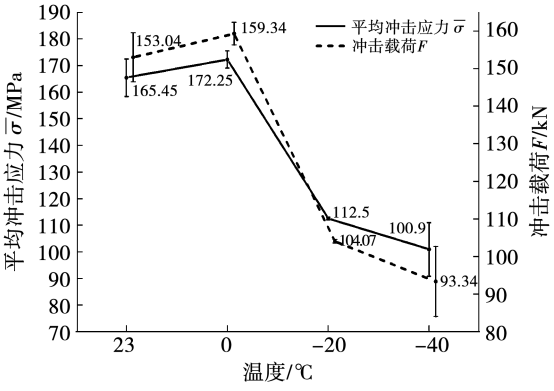

图 13 温度对试样平均冲击应力和剪刀下锷冲击载荷的影响

Fig. 13 Effect of temperature on the average impact stress of the specimen and the impact load of the scissors lower blade

4 结 论

本文通过示波冲击实验，研究了温度对快速救援剪刀下锷材料 S136 钢的冲击性能的影响规律，进而分析了温度对剪刀下锷的冲击性能的影响，得到以下结论：

1）S136 钢裂纹扩展能量 W_p 在23℃时为 2.23 J，在 -40℃时为 0.59 J，裂纹扩展能量 W_p 逐渐减小，表明 S136 钢的冲击韧性逐渐降低；

2）随着温度的降低，快速救援剪刀下锷抗断裂性能下降，剪刀下锷的断裂形式由韧脆性断裂向脆性断裂转变；

3）0℃为剪刀下锷冲击性能的转折点，在 0℃以下随着温度的降低，剪刀下锷可承受的冲击载荷急剧降低，-20℃ 和 -40℃ 时剪刀下锷冲击载荷比 0℃时有明显下降，冲击性能下降明显。

参 考 文 献：

[1] 左明秀，项海波，陈兴宽，等. 一种开关机构及火药动力快速救援剪刀：CN202122859591.6[P]. 2022-07-26[2024-05-08].

[2] 左明秀，项海波，陈兴宽，等. 一种快速救援剪刀：CN202111399812.4[P]. 2022-02-25[2024-05-08].

[3] 丁一明，许天旱，林宏. 温度对 U165 超高强度钻杆钢冲击韧性的影响[J]. 钢铁研究学报，2019，31(12)：1086.
DING Yiming，XU Tianhan，LIN Hong. Effect of Temperature on the Impact Toughness of U165 Ultra High Strength Drill Pipe Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research，2019，31(12)：1086.

[4] 李泽文，刘拥军，何轩. 环境温度对地铁转向架用 P355NL1 钢强韧性的影响[J]. 金属热处理，2017，42(3)：155.
LI Zewen，LIU Yongjun，HE Xuan. Influence of Ambient Temperature on Strength and Toughness of P355NL1 Steel for Metro Bogie[J]. Heat Treatment of Metals，2017，42(3)：155.

[5] 唐辉. TA15 钛合金不同温度下的静强度性能研究[J]. 热加工工艺，2016，45(12)：74.
TANG Hui. Research on Static Strength Performance of TA15 Ti Alloy at Different Temperatures[J]. Hot Working Technology，2016，45(12)：74.

[6] 封辉，杨天爽，杨明，等. X80 管线钢不同实验温度下冲击性能研究[J]. 石油管材与仪器，2017，3(5)：43.
FENG Hui，YANG Tianshuang，YANG Ming，et al. Study on Impact Properties of X80 Pipeline Steel at Different Temperatures[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments，2017，3(5)：43.

[7] 仵金玲，刘思雨，张彪，等. 连接温度对 W/Ni/Kovar 真空扩散连接接头界面结构及结合强度的影响[J]. 材料导报，2024，38(4)：143.
WU Jinling，LIU Siyu，ZHANG Biao，et al. Effect of Welding Temperature on the Interface Microstructure and Bonding Strength of W/Ni/Kovar Joint by Vacuum Diffusion Welding[J]. Materials Reports，2024，38(4)：143.

[8] DONG F，YU K，YU J，et al. Effects of Environmental Temperature on the Mechanical Properties of Polyethylene Fiber-engineered Cementitious Composites[J]. Structural Concrete，2022，23(5)：3114.

[9] RATHORE D K，PRUSTY R K，RAY B C. An Assessment of Mechanical Performance of CNF Modified Glass Fiber/Epoxy Composites under Elevated Temperatures[J]. Materials Science Forum，2020，978：311.

[10] GHORBANPOUR S，MCWILLIAMS B A，KNEZEVIC M. Effects of Environmental Temperature and Sample Pre-straining on High Cycle Fatigue Strength of WE43-T5 Magnesium Alloy[J]. International Journal of Fatigue，2020，141：105903.

[11] 周天宇，于宇新，商学欣，等. 预制裂纹对 X70 管线钢冲击韧性和断裂机制的影响[J]. 中国特种设备安全，

2024,40(S1):71.
ZHOU Tianyu, YU Yuxin, SHANG Xuexin, et al. Influence of Prefabricated Crack on Impact Toughness and Fracture Mechanism of X70 Pipeline Steel[J]. China Special Equipment Safety, 2024,40(S1):71.

[12] 张庶鑫,李娜,蔺卫平,等. X90 管线钢示波冲击特征值的研究[J]. 焊管, 2017, 40 (1): 41.
ZHANG Shuxin, LI Na, LIN Weiping, et al. Instrumented Impact Characteristic Value Research on X90 Pipeline Steel[J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(1): 41.

[13] 李小陶. 示波冲击曲线浅析[J]. 理化检验(物理分册),2020,56(10):18.
LI Xiaotao. Analysis of Oscillographic Impact Curve[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A: Physical Testing), 2020,56(10):18.

[14] 管红亮. 示波冲击实验技术的分析与研究[J]. 机械, 2018,45(S2):64.

[15] 蔺卫平,仝珂,任继承,等. 高钢级管线钢示波冲击实验研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (4): 93.
LIN Weiping, TONG Ke, REN Jicheng, et al. Study on Instrument Impact Experiment of High Grade Pipeline Steels [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (4): 93.

[16] 邢希金, 刘婉颖, 武广瑗, 等. 低温下 N80 钢油套管冲击韧性和断口特征研究[J]. 材料保护, 2023, 56 (11): 53.
XING Xijin, LIU Wanying, WU Guangai, et al. Study on Impact Toughness and Fracture Characteristics of N80 Steel Oil Casing at Low Temperature[J]. Materials Protection, 2023, 56(11): 53.

[17] 刘飞, 曾德智, 施太和, 等. 4145H 石油钻铤钢示波冲击性能研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34 (2): 157.
LIU Fei, ZENG Dezhi, SHI Taihe, et al. Study on Oscillography Impact Property of 4145H Drilling Collar (DC) Steel[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34 (2): 157.

[18] 唐丽英, 李江, 詹英杰, 等. 实验温度及热老化对 Incoloy 800H 合金冲击性能的影响[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 49.
TANG Liying, LI Jiang, ZHAN Yingjie, et al. Effects of Test Temperature and Thermal Aging on Impact Performance of Incoloy 800H[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 49.

(编辑:温泽宇)