

大型挖掘机结构件用钢的失效分析*

陈卓华 刘雅娣

唐国翌 苏毅

蔡其巩

(太原重型机器厂)

(清华大学)

(冶金部钢铁研究总院)

摘要 针对某寒冷地区矿山用大型焊接结构件的开裂事故，在模拟实际工况下，研究了该钢的动态断裂特性，分析了产生脆性开裂的原因。结果表明：该批15MnV钢的韧-脆转变温度对加载速率敏感。在挖掘机挑大块岩石的工况条件下所产生的动载冲击可使该钢的韧-脆转变温度升至-12℃，该值与斗杆和起重臂等结构件发生脆性开裂的环境温度相近。此外，钢的冶炼质量和处理状态对钢的断裂韧性和韧-脆转变特征有很大影响。

关键词 挖掘机，动态断裂，韧-脆转变

0 序 言

大型挖掘机是露天矿山的主要采掘设备。近几年在国内某寒冷地区矿山使用过程中，挖掘机斗杆和起重臂曾发生开裂事故，影响了正常生产。现场调研发现，开裂事故集中于冬季的11月～4月间，环境温度多在-16～-25℃。最初的开裂是在撞击大块岩石时发生的，操作人员可听到清脆的开裂声响，断口为银亮色的脆性断口。因开裂后曾进行过补焊修复使原断口遭到破坏，故本研究未能取到实物断口。其中一个起重臂经现场补焊后仅用了六天又出现开裂，以后虽经反复补焊、修复，仍不能完全正常服役。对开裂钢板复验检查，其各项指标均符合GB1591—88规定。文献〔1〕报道，静载下测得的热轧态15MnV钢板COD值的韧-脆转变温度在-30～-50℃之间，并将-30℃做为工程上应用的临界温度。但这些都无法解释斗杆和起重臂在-16～-25℃的环境下脆性开裂的事实。为此，结合矿山采掘工况，运用动态断裂力学的分析方法，对挖掘机斗杆和起重臂低温开裂事故进行了研究。

1 试验过程

试验用钢取自开裂的起重臂靠近起裂源部位（脆断料），该起重臂是用24mm和18mm厚的15MnV钢板焊接成箱形结构，开裂发生时环境温度为-18℃，裂纹长达4m，构件服役时间不足半年。为进行对比又在生产料上取成分相近的正火态钢板，它们的化学成分见表1。

*该课题为国家重大技术装备科技攻关项目，机电科攻大字75-50-101。

表1 试验用15MnV钢的化学成分(wt-%)
Table 1 Composition of 15MnV steel (wt-%)

Samples	C	Si	Mn	P	S	V	N
brittle fracture steel plate	0.18	0.33	1.49	0.030	0.032	0.10	0.0046
normalized steel plate	0.16	0.34	1.28	0.017	0.033	0.07	—

断裂韧性试验在MTS-880万能材料试验机和GRC-730示波冲击试验机上进行,采用三点弯曲法和示波冲击法,在不同温度下分别测定出0.01mm/s, 50mm/s和5530mm/s三种速率下的断裂韧性值。其中0.01mm/s是通常静态断裂韧性测试时的压头移动速率; 50mm/s是模拟挖掘机挑大块岩石工况下产生动载冲击时的撞击速率, 而5530mm/s为冲击试验加载下的速率, 可近似反映受到高速冲击或引发裂纹动态扩展的情况。所有试样均为T-L取向, 取无塑性转变温度作为韧-脆转变温度 T_{DB} 。微观分析采用金相显微镜和CSM950扫描电子显微镜等。

2 试验结果

不同加载速率下脆断料和正火料的断裂韧性与温度的关系见图1。从该图可见, 15MnV钢的断裂韧性对温度和加载速率都十分敏感, 具有明显的温度转折特征。脆断料在静载

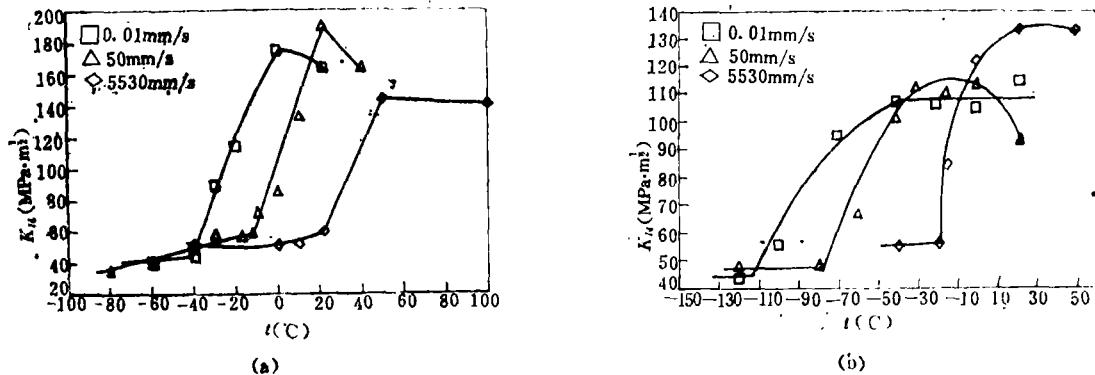


图1 不同加载速率下脆断(a)和正火料(b)断裂韧性与温度的关系

Fig. 1 Relationship between fracture toughness and temperature under varicus leading rate
(a) brittle fracture steel plate (b) normalized steel plate

下其韧-脆转变温度为-40℃, 这与用COD法测得的 T_{DB} 相近, 但与工程实际中脆断时的环境温度不符。在模拟挖掘机冲击或拨动大块岩石时的撞击速率下, 脆断料韧-脆转变温度升至-12℃, 这与该起重臂脆断时的环境温度相近。进一步提高加载速率, 脆断料的 T_{DB} 可升至22℃, 比静载时提高了62℃。而在正火料中, 静加载与高速冲击加载相比其 T_{DB} 升高了近100℃, 但即使在高速冲击加载下其 T_{DB} 仍达-20℃, 比相应条件下的脆断料降低了42℃。这

表明正火态料对脆断的抗力优于脆断料。用同一批脆断料在实验室进行正火处理后测定其动态断裂韧性的试验也证实，正火处理可以明显改善钢的抗脆断能力。

金相观察发现，脆断料组织极不均匀，碳偏析严重，铁素体晶粒粗大，平均直径约40 μm （图2）。由此可推断脆断料是热轧态钢板（这与事后调查结果相同）。而正火态料中组织不均匀性显著降低，铁素体晶粒平均直径为18 μm （图3）。

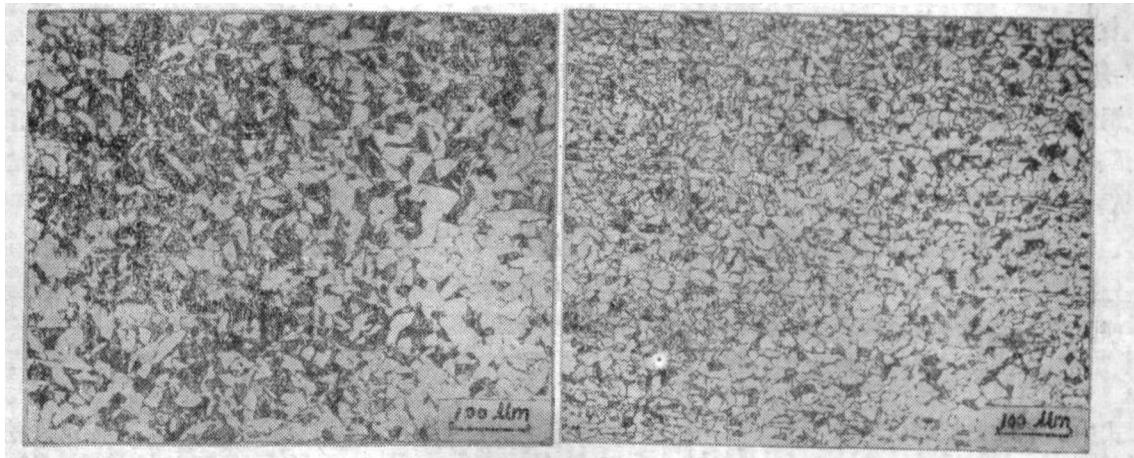


图2 脆断料的显微组织

Fig. 2 Microstructure of brittle fracture steel plate

图3 正火料的显微组织

Fig. 3 Microstructure of normalized steel plate

在冲击试样的断口上发现，无论是脆断料还是正火态料，其引发脆性开裂的最初解理起裂源都是夹杂物（MnS或含Ca的氧化物等，见图4）。但脆断料的解理单元尺寸比正火料大得多。

据调查，现场补焊时采用J506焊条，施焊时未预热（现场环境温度为-16℃）。在补焊的焊缝处取样做剖面金相检查发现，补焊焊缝质量很差，裂纹处的对接焊缝未焊透，前缘留有空洞，热影响区附近有粗大的贝氏体（图5）。

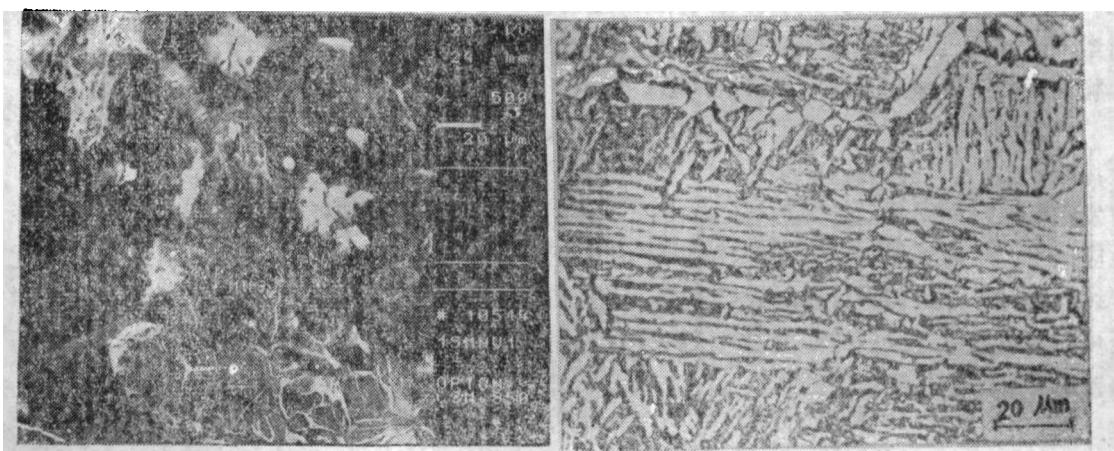


图4 脆断料中起裂源处的夹杂物

Fig. 4 Inclusions as the origin of crack in brittle fracture specimen

图5 热影响区中的粗大粒状贝氏体

Fig. 5 Microstructure of HAZ in the brittle fracture steel plate showing flaky and block bainite

3 试验结果的分析

3.1 大型挖掘机斗杆和起重臂脆断事故的断裂力学分析

长期以来，人们利用静载下测得的断裂韧性值 K_{Ic} (J_{Ic} 或COD)做为控制断裂的定量估算方法，但矿山生产实践证实，大多数脆断事故发生时的环境温度都高于用静载判据确定的韧-脆转变温度^[1]。因而用静载数据来估计动载构件的断裂安全性是不合适的。动载下15MnV钢的韧-脆转变温度急剧向高温侧移动。以图1a中-12℃为例，静载下脆断料的断裂韧性值 $K_{Ic}=120\text{MPa}\cdot\text{am}^{1/2}$ ，而模拟挖掘机撞击岩石产生动载冲击工况时，钢的动态断裂韧性降为 $K_{Ia}=58\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。因此对承受动载的工程机械用钢，动态断裂韧性应列为研究的重点。

大型挖掘机起重臂和斗杆都是箱形的焊接结构件，工作中其受力状况十分复杂，我们在分析中进行了简化和假设，即只考虑Ⅰ型裂纹的情况，并按照半无限大板边裂纹状态来处理。根据断裂力学理论，对半无限大板边裂纹有^[2]：

$$K_I = 1.12\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中 K_I 为Ⅰ型裂纹的应力强度因子， σ 为拉应力， a 为贯穿板厚的裂纹长度。如果将正常挖掘过程理想化，而近似看作符合静加载条件。由图1a可知，在-16~-25℃范围内，在静加载状态下，15MnV钢处于韧-脆转变的过渡区，相应的 $K_{Ic}=114\text{MPa}\cdot\text{am}^{1/2}$ 。根据载荷谱分析^[1]，取 $\sigma=50\text{MPa}$ ，即可求出正常工作时起重臂脆断前允许的临界裂纹尺寸 $a_c=1319\text{mm}$ 。显然这种正常工作条件下起重臂所受应力很低，即使在易发生脆断的下平台区工作，其允许的临界裂纹尺寸也相当大，故一般不应发生脆断事故。这与文献〔3〕工作应力低于34~54 MPa时一般不产生脆断的结论相符。但是实际工作中挖掘机经受冲击及撞击的工况时有发生（如铲斗挑拨大块岩石等）。假设取瞬时最大冲击力高出正常应力的4倍^[1]，即取 $\sigma=200\text{MPa}$ ，此时在上述温度范围内，因承受动载冲击，斗杆和起重臂用15MnV钢将进入韧-脆转变的下平台区，其动态断裂韧性 $K_{Ia}=58\text{MPa}\cdot\text{am}^{1/2}$ ，仍按式（1）计算可知，当板边缘存在一个深度为 $a_c=22\text{mm}$ 的裂纹，就足以引发钢板的脆性开裂。由此可见，除了设计和制造因素外，挖掘机工作过程中受到的较强烈冲击和工作环境温度进入15MnV热轧钢板的下平台脆性区是引发该起重臂脆性开裂的重要原因。

对现场补焊后使用六天又重新开裂的钢板取样分析发现，该批15MnV钢C、Mn、V含量都处于上限，其碳当量 $C_{eq}=0.454$ ，焊接冷裂纹敏感系数 $P_{cm}=0.280$ ，这与东北某矿山曾发生低温脆断事故后随焊随裂的B120C高强钢的 C_{eq} 和 P_{cm} 值相近^[4]。所以这种钢板焊接时应采用严格的施焊工艺并要进行预热。而实际现场补焊质量欠佳，很容易使补焊区沿焊缝开裂。同时补焊工艺不仅影响焊缝本身，而且在焊接热影响区形成粗大的粒状贝氏体，它们既可成为引发解理开裂的起裂源，又可促进解理裂纹的扩展^[5, 6]。因而经过补焊修复的起重臂更容易产生新的脆性开裂。

3.2 杂质元素及显微组织对断裂过程的影响

钢中的杂质元素既降低缺口韧性，也损害断裂韧性。P是急剧增加钢材冷脆性的元素，在含1.5%Cr的低碳钢中，P含量由0.001%增至0.048%时，其冷脆转变温度由-115℃提高至

0℃^[7]。P也易于偏聚在晶界附近，降低晶界的表面能，产生严重的回火脆性倾向。S在钢中形成MnS夹杂，它们尺寸较大，热轧时沿轧向拉伸变形，呈条状分布，割裂了基体组织，大大地降低断裂韧性。15MnV钢脆断料与强度级别相近，但经过喷吹处理的09MnVTiN钢相比，S、P含量高出近3倍，上平台区的 $K_I\sigma$ 值降低了2倍多^[8]。这里除了碳及合金元素的影响之外，显然与该钢的冶金质量也有重大关系。脆断料中夹杂物颗粒较大，在承受外加载荷时它们不能与基体的塑性变形相协调。当其处于缺口前缘的塑性区内，首先在夹杂物与基体的交界处脱开，形成微裂纹，同时也产生新的应力集中，构成解理开裂的起裂源。该批脆断料与目前在我国矿山机械中使用状况较好的一些进口钢板如A514、PAS60及welten80等相比较，其S、P含量高出近1个数量级^[4]。因而应对承受动载的工程机械用钢的冶金质量提出严格的要求。

根据金相观察，脆断料中组织不均匀，铁素体晶粒尺寸比正火态料大得多。解理断裂应力 σ_f^* 与铁素体晶粒直径d也具有Hall-petch关系形式^[9]：

$$\sigma_f^* = \sigma_0^* + K_f d^{-1/2} \quad (2)$$

其中 σ_0^* 是反映材料性能和温度影响的常数，而与作用应力无关。系数 K_f 主要反映界面（晶界及相界）存在对解理断裂应力的贡献。在脆断料中铁素体晶粒尺寸比正火态料大两倍以上，故脆断料的解理应力低于正火态料。因钢的解理断裂过程属于扩展控制型^[10]，当微裂纹越过界面（本文指与铁素体晶界有关的断裂单元边界）而继续扩展时，为克服由于相邻晶粒的解理面不协调以及界面本身的塑性弛豫作用而产生的阻力，就必须消耗一定的能量。铁素体晶粒越细小，解理扩展时的阻力也越大。因此正火态料晶粒的细小和碳化物的均匀分布是其韧-脆转变温度低于脆断料的重要原因。

4 结 构

(1) 15MnV钢的韧-脆转变特征对加载速率敏感，在模拟挖掘机挑大块岩石的工况条件下，脆断料的韧-脆转变温度可升至-12℃，这与斗杆和起重臂发生开裂的环境温度相近。因而动态断裂韧性应作为承受动载的工程机械用钢的重要参量。

(2) 除结构设计和制造因素外，挖掘机工作时受到过强烈撞击以及工作环境温度进入该钢的下平台脆性区是斗杆和起重臂产生脆性开裂的重要原因。

(3) 普通热轧15MnV钢板不宜用于制造在低温条件下工作并承受动载的工程机械，正火处理后虽然可以改善其抗脆断能力，但其断裂韧性值仍很低。这与该钢中杂质元素含量偏高，夹杂物较多有关。因而对承受动载的工程机械用钢的冶金质量应有严格要求。

责任编辑：吕殿恒 (1991年12月11日收到初稿)

● 考 文 献

- 蔡麟笙. 大型单斗正铲挖掘机斗柄断裂的失效分析. 机械强度, 1988, 10(3): 37~42
- 高庆. 工程断裂力学. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.
- 周惠久, 黄明志. 金属材料强度学. 北京: 科学出版社, 1989.
- 滕华元等. 高强度低合金钢在现代化矿山工程设备方面的应用. 第三届全国低合金钢学术会议论文集, 1989, 牡丹江.

- 5 J H Chen, Y kikuta et al. Micro-fracture behaviour induced by $M-A$ Constituent in simulate welding heat affected zone of HT80 high strength low alloyed steel. *Acta Metall.*, 1984, 32 (10), 1779~1788
- 6 侯纯孝. 焊接热影响区组织的解理断裂机理及断裂判据. 清华大学博士学位论文, 1985.
- 7 陈德和. 钢的缺陷. 北京: 机械工业出版社, 1977.
- 8 唐国翌. V-Ti-N微合金钢物理冶金及断裂机理的研究. 冶金工业部钢铁研究总院博士学位论文, 1990.
- 9 袁懋昶. 断裂力学理论及其工程应用(下册). 重庆: 重庆大学出版社, 1989.
- 10 V Raman and A Kumar. Nucleation and propagation of cleavage fracture in iron. *Acta Metall.*, 1981, 29(6), 1141~1149

Failure analysis of steel used in constructional elements

of heavy-duty excavators

Chen Zhuohua, Liu Yadi

(*Taiyuan Heavy Machinery Plant*)

Tang Guoyi, Su Yi

(*Tsinghua University*)

Cai Qigong

(*Central Iron and Steel Research Institute*)

Abstract The characteristics of dynamic fracture of the steel used in the constructional elements of heavy-duty excavators which worked in cold mining environment were investigated by simulating the real operation state. The reasons of brittle fracture were analyzed. It was shown that the ductile-brittle transition temperature in the 15MnV steel was sensitive to loading rate. As digger of the excavator dashed on the rocks, the ductile-brittle transition temperature of the steel could be increased to -12°C . This temperature is close to the failure environmental temperature of the steel. It was found that the metallurgical quality and treatment state of the steel had an obvious influence on its fracture toughness and ductile-brittle transition temperature.

Key words excavator; dynamic fracture; ductile-brittle transition