PD_1 重轨钢的动态断裂韧性

程育仁 张祖光 杨桥生

（北方交通大学） （攀枝花钢铁研究院） （兰州铁道学院）

本文测定了不同矫直工艺条件下及两种不同温度下的PD_1重轨钢的K_{Id}值；并将K_{Id}值和相应的K_{Ic}值及门坎值ΔK_{th}值进行分析比较，指出PD_1重轨钢对加载速率敏感；在脆性转变温度区对温度非常敏感；K_{Id}值较好地反映PD_1重轨钢的疲劳性能。

一、前言

国际焊接学会第十次委员会和英国动态试验临时工作组在“关于动态韧性测量的一些建议”[1]中认为，公路和铁路运输的加载速率相当于冲击或落锤的加载速率，即夹头的位移速率$\dot{\Delta}$（$\frac{d\Delta}{dt}$）为10^4mm/s，结构裂纹尖端的应力强度因子速率$\dot{K}$（$\frac{dk}{dt}$）接近$10^4 MNm^{-3/2}/s$。文献〔2〕指出，当一个具有扁疤的车轮通过钢轨的接头时，其行车速度为45m/s(162KM/h)，车轮载荷为0.1MN (10.2t)。理论分析表明，在螺栓孔处裂纹尖端的应力强度因子速率$\dot{K}$约为$8\times10^4 MNm^{-3/2}/s$，这是一个很苛刻的运行条件。实践表明，这种苛刻的运行条件是造成钢轨脆断的主要原因。例如损伤轨中有50%以上是属于螺拴孔裂纹[3]，在无缝线路中有80%断轨发生在各类焊接接头的低塌处。究其原因，一方面是由于接头部位的不平顺或低塌，引起了很大的高频力P_1[4]，另一方面由于在接近冲击的加载速率F_1，材料的屈服强度σ_{y_s}增加，断裂韧性显著下降，当然在无缝线路中焊接接头的断裂和焊接工艺是密切相关的。

文献〔5〕指出，屈服强度σ_{y_s}小于825 MPa(84.07kg·f/mm²)的体心立方金属对加载速率非常敏感。文献〔5〕认为，测定这类金属在冲击载荷下的断裂韧性，即动态断裂韧性K_{Id}非常必需。英国铁路曾对BS.11标准轨进行了系统的动态断裂韧性测定，并认为BS.11标准轨钢对加载速率不敏感[2]，这就是说慢加载下（即加载速率$\dot{K}\leqslant2.5MNm^{-3/2}/s$）的$K_{Ic}$试验可以代表各种加载速率下的断裂韧性试验。而美国铁路对AREA标准轨的动态试验表明，这种轨钢对加载速率是敏感的，其$K_{Ic}=1.4K_{Id}\pm5\%$[6]，因此美国铁路在断裂分析中一般都采用K_{Id}，而不用K_{Ic}。

我国对各种轨钢已进行了相当广泛的断裂力学试验，测试了K_{Ic}值、裂纹扩展速率da/dN及门坎值ΔK_{th}，但对轨钢的动态断裂韧性论及很少。一些迹象表明，我国各种轨钢对加载速率是敏感的，例如

核伤断裂轨，用正常的轨钢K_{IC}值计算其核伤面积约占轨头面积的50%左右[7]，而大多数核伤轨的核伤面仅占轨头面积的20%左右，这说明在列车的动态加载下，断裂韧性显著地下降。

为了了解加载速率对轨钢断裂韧性的影响，本文利用文献[8]的试验方法，对PD_1重轨钢进行了动态K_{Id}的测定。试验表明，各种不同矫直工艺下的PD_1重轨钢对加载速率和温度都是敏感的。

二、试样和试验方法

PD_1重轨钢的化学成份及力学性能见表1、2。

化　学　成　份　　表 1

成　份	C	Si	Mn	P	S	V	Ti
含　量，%	0.65～0.76	0.23～0.27	0.92～1.06	0.013～0.019	0.021～0.024	0.014～0.088	<0.010

常　规　力　学　性　能　　表 2

σ_{ys}，kg·f/mm²（MPa）	σ_b，kg·f/mm²（MPa）	δ，%	ψ，%	a_k kg·f·m/cm²	a_k—40℃ kg·f·m/cm²
46～55（451～540）	92～100（903～981）	10—12	19～22	1～1.6	0.4～1.0

试样取自轨头，先按标准规范进行K_{Ic}试验和门坎值测定，然后压断，利用原试样加工成方形断面的K_{Id}试样，其尺寸见图1。试样一共三种，其B×W分别为15×15mm²，16×16mm²，20×20mm²。

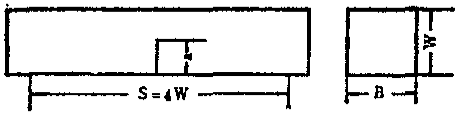

图1　K_{Id}试样

这三种尺寸的试样按文献[5]提供的动态屈服强度的计算公式：

$\sigma_{yd}=\sigma_{ys}+21kg\cdot f/mm^2$　(207MPa)

若σ_{ys}取低限为46kg·f/mm²　(451MPa)，则$\sigma_{yd}=67kg\cdot f/mm^2$，并取$K_{Id}$为150 kg·f/mm$^{3/2}$，代入$B\geqslant 2.5(K_{Id}/\sigma_{yd})^2$，得B≥12.5mm，故三种尺寸的试样均满足平面应变条件，实际断口也证实全部试样满足此条件。线切割及预制疲劳裂纹均按STAME399—81标准制备，断纹长度按文献[8]的要求保持在0.45～0.55的范围内。

然后利用冲击试验机加载，经过特制的支座式载荷传感器，将载荷信号通过宽频放大后，送至示波器，照相记录下P—t曲线，最后利用能量法、冲量法或标定法计算出P_{max}，并将P_{max}代入K_{Id}表达式，算出K_{Id}值[8]。

三、试验结果

两种不同温度下的K_{Id}测定值见表3，不同疲劳门坎值下的K_{Id}测定值见表4。

四、讨　论

1.PD_1重轨钢对加载速率敏感

文献[5]指出，不利的加载速率产生和增加局部的突进（pop—in）现象，动

两种不同温度的 K_{Id} 值 表 3

试样	K_{Id}, kg·f/mm$^{\frac{3}{2}}$ 10℃	K_{Id}, kg·f/mm$^{\frac{3}{2}}$ 20.5℃ 测量值	均值	标准差	K_{Ic}, kg·f/mm$^{\frac{3}{2}}$ 常温 测量值*	均值	标准差
1	94.83	132.7	132.7		157.7, 169.6 155.2, 150.2 159 , 147.4	156.52	7.79
2	121				206.1, 192.6 151.7, 159.7 167.6, 141.4	169.85	24.81
3	107.1	114.87, 128.18 109.79, 132.70	121.39	10.82	185.6, 162.4 168.3, 161.9 157.5	167.14	11.01
4	118	110.48, 146.44 176.8	144.57	33.20	180.6, 184.3 182.1, 199.9 194.5	188.28	8.47
5	131	159.15, 182.0 149.96, 176.6	166.93	14.93	186.8, 190.0 180.8, 182.6 207.6	189.56	10.71

* K_{Ic}值取P_{max}值进行计算

态断裂试验自动地揭示了局部脆性地区的所有不利因素，这样动态断裂试验比慢加载的静态断裂韧性试验能更充分地揭示轨钢的夹杂物和偏析等冶金缺陷，因此K_{Id}值可作重轨钢的技术性能指标。

2.K_{Ic}和K_{Id}的近似关系

经过线性回归计算，在常温下（10～20℃）PD_1重轨钢K_{Id}值和K_{Ic}有以下近似关系：

$$K_{Ic} = 82 + 0.704K_{Id} \qquad (1)$$

其相关系数$q = 0.9129 \geqslant 0.878 = q_{1-0.05}$。可以说，$PD_1$重轨钢的$K_{Id}$和$K_{Ic}$存在弱相关，其置信系数$\alpha = 0.05$。

K_{Ic}值和K_{Id}值还可以近似为：

$$K_{Ic} = 1.333K_{Id} \qquad (2)$$

这和文献〔6〕AREA标准轨的关系式是相近的。K_{Ic}和K_{Id}的关系曲线见图2。

3.文献〔9〕指出，各种轨钢的K_{IC}值和K_{Id}值在脆性转变温度区内均随温度增加而增加。将表3中10℃和20.5℃的K_{Id}的均值画在文献〔9〕所提供的BS.11等轨钢的K_{Id}的温度特征曲线中（图3），可以看出不同矫直的PD_1重轨钢介于英国的EN—15HiSi（中强、高延性）和BS.11之间。

文献〔5〕认为在K_{Id}的温度特性曲线

不同门坎值下的K_{Id}值　　表 4

试样	K_{Id} 值 $kg\cdot f/mm^{\frac{3}{2}}$ 测量值	均值	标准差	门坎值 ΔK_{th}* $kg\cdot f/mm^{\frac{3}{2}}$
6	110.2, 105.2 104.5, 96.7	104.15	5.58	32.8
7	102.0, 104.0 101.3, 103.0	102.58	1.18	32.53
8	114.0, 110.0 133.0, 134.0	122.75	12.53	34.34
9	130.0, 126.7	128.35	2.33	33.40
10	184.7, 181.8	183.25	2.05	45.77
11	133.0, 132.6	132.8	0.28	36.78

* 应力比R=0.1

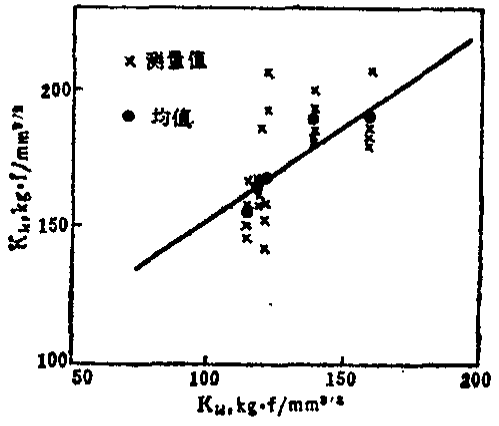

图2　常温下的K_{Id}和K_{Ic}的关系

的脆性转变温度区中，曲线的斜率为中、低强度钢的特征，从图4可以清楚看出PD_1重轨钢的斜率高于其它各种轨钢，也就是PD_1重轨钢具有更大的温度敏感性。因此测定K_{Id}的温度特性曲线是有意义的。

（4）疲劳门坎值ΔK_{th}和裂纹扩展速率da/dN是反映重轨钢疲劳特性的两

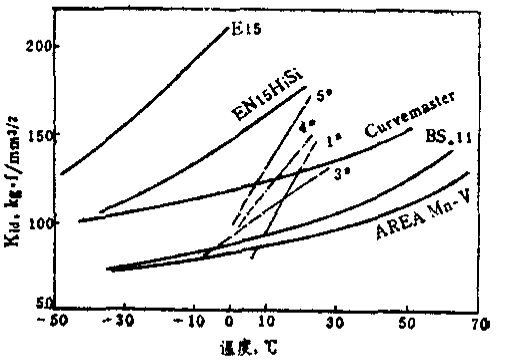

图3　几种轨钢K_{Id}的温度特性曲线

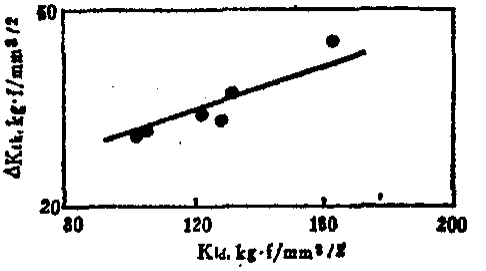

图4　K_{Id}和ΔK_{th}的关系

个重要参数，一般说来K_{Ic}值和ΔK_{th}并无确定关系，常因材质而异。从图4中可看出PD_1重轨钢的K_{Id}和ΔK_{th}存在着明显的关系，经过线性回归计算

$$\Delta K_{th} = 14.52 + 0.166 K_{Id} \quad (R = 0.1) \qquad (4)$$

其相关系数$q = 0.9647 > 0.917 = q_{1-0.01}$。由此可见相关性极显著，置信系数$\alpha = 0.01$。

五、结　论

1.PD_1重轨钢对加载速率敏感，在常温下$K_{Ic} \approx 1.333 K_{Id}$。

2.在脆性转变温度区，PD_1重轨钢K_{Id}值对温度非常敏感，并高于其它各种轨钢。

（3）PD_1重轨钢的K_{Id}和门坎值ΔK_{th}相关性极显著，因此K_{Id}值可反映该钢种的疲劳性能。

（下转第61页）

四、结束语

普通铁矿氧化焙烧有很多优越性，而磁化焙烧将是不利的，但对钒钛磁铁矿来讲，磁化焙烧比传统的氧化焙烧更为有利。这是钒钛矿本身结构的特点所决定的，因此在综合利用钒钛磁铁矿的研究中，应引起足够的重视。可以深信，随着对磁化焙烧的深入研究，一定能找到更为广泛的应用。

参考文献

〔1〕冀春霖、陈厚生，东北工学院学报，4（1975）。
〔2〕冀春霖、陈厚生、詹庆霖，钢铁，5（1979）。
〔3〕王敏杰、邓朝枢，钢铁钒钛，4（1981）。
〔4〕攀枝花铁精矿氧化球团高炉冶炼试验组，攀枝花铁精矿氧化球团高炉冶炼试验总结（内部资料），1979.10.
〔5〕四川冶金研究所等，四川冶金，7（1980）。
〔6〕冀春霖、陈厚生，钒钛磁铁矿球团的抗压强度（内部资料），1977，12.
〔7〕陈厚生，红格铁精矿铁钛钒铬分离试验研究报告之一——先提钒铬试验报告（内部资料），1978，12.
〔8〕陈厚生，用芒硝代替苏打从红格矿中提取铬的研究（内部资料），1978，12.
〔9〕詹庆霖、冀春霖、陈厚生，钢铁，8（1983）。
〔10〕冀春霖、陈厚生，钒钛磁铁矿球团竖炉还原的物理化学特点（内部资料），1976，10.
〔11〕何其松，钢铁，4（1983）。
〔12〕东北工学院，攀枝花钒钛磁铁矿资源综合利用科学研究进展简报（内部资料），6（1978）。
〔13〕昆明冶金研究所等，高炉冶炼钒钛磁铁矿高钛型泡沫渣生成机理及消除办法的研究（内部资料），1980，1，
〔14〕代振义，钢铁钒钛，2（1982），24—30.

（上接第40页）

参考文献

〔1〕国际焊接协会、英国动态试验临时工作组，关于动态韧性测量的一些建议，断裂力学（二），科学技术文献出版社重庆分社，1978.
〔2〕鞍钢钢铁研究所技术情报研究室，钢轨钢译文集，1974.
〔3〕高嘉年，车轮、钢轨材质的研究趋向，铁道学报，1（1983）。
〔4〕Frederick, C.D., The effect of Wheel and Rail Irregularities on the Track, Heavy Haul Railways Conference Proceedings, 1978.
〔5〕Pellini, W.S., Principles of Structure Integrity Technology, 1976.
〔6〕Besuner, P.S., Rail Analysis, Vol. 1, Fracture Mechanics, 1976.
〔7〕程育仁，断裂力学在钢轨研究上的应用，铁道标准设计通讯，1980，2。
〔8〕杨桥生，动荷断裂韧性K_{Id}测试方法的研究，兰州铁道学院1981年研究生毕业论文，1982.
〔9〕Stone, D.H., An Introduction to the Fracture Mechanics of Railroad Rails, Proc.Symp. on Railroad Track Mechanics, 1975.