

一九五六年全國鐵道科學工作會議

論文報告叢刊

(8)

金屬疲勞問題研究

人民鐵道出版社

編 言

1956年全国铁道科学工作会议征集了技术报告、总结、论文三百余篇。它的内容,包括铁路业务的各个方面,基本上显示着全体铁路技术人员和有关高等学校教师几年来在科学技术方面辛勤劳动的成果。对现场实际工作有参考价值,对铁路新技术的采用和发展方向,有启示作用。为此,刊印丛刊,广泛流传,保存这一阶段内的科技文献,以推动科学研究的进一步开展。

会议以后,我们对全部文件进行一次整编工作,然后组织部内设计总局、工程总局、工厂管理局、人民铁道出版社、车务、商务、机务、车辆、工务、电务各局、铁道科学研究院、北京、唐山铁道学院、同济大学、大桥、定型、电务等设计事务所的有关专业同志对每篇内容仔细斟酌,选择其中对目前铁路业务有广泛交流意义,或是介绍铁路新技术方向、和系统的经验总结,将性质相近的文件合订一册,单独发行。为了避免浪费,凡是其他刊物或是以其他方式刊印过的文件,除特殊必要外,一般都不再刊载。出版顺序根据编辑和定稿的先后,排定丛刊号码,交付印刷,并无主次之分。

苏联铁道科学代表团在会议期间曾经做过九次学术报告,我们已将文字整理,编入了丛刊。

文件中的论点,只代表作者意见,引用或采用时,还应由采用人根据具体情况选择判断。

丛刊方式还是一种尝试,我们缺少经验,希望读者提供意见,逐步的改进。

铁道部技术局

1957年2月

目 录

車軸的疲勞問題.....	章武华 尹令昭 吳金一 (2)
金屬的疲勞問題.....	曾訓一 章武华 (14)
破錘彈簧鋼的疲勞性能.....	邓 洋 (52)

車軸的疲勞問題

章武華 尹令昭 吳金一

目 录

1. 車軸輪座部分的橫裂紋
2. 車軸的疲勞試驗
3. 車軸疲勞裂紋的形成原因
4. 裂紋軸的再用問題
5. 簡短的總結

一、車軸輪座部分的橫裂紋

在車輛輪對檢修時，用電磁探傷器探測落輪後的車軸，經常在輪座部分近輪轂內側處出現橫裂紋（即疲勞裂紋），按照部令規定，車軸任何部分有橫裂紋時便報廢。因這個原因而報廢的車軸，數量是十分驚人的。據了解，到50年3月止，某一車輛段便堆存了3000根報廢車軸，而且每天都有5根以上車軸在探傷時顯示出橫裂紋。

其它各廠段也堆存了很多報廢車軸。

統計了某一車輪廠876根裂紋車軸，得出下面的規律：

（1）車軸裂紋多發生在軸的輪座部分，在876根軸中，只發現3根車軸在軸頸上出現裂紋；並且在這3根軸中間有2根軸裂紋發生於軸頸圓弧處；在軸中部出現裂紋的僅有2根；

（2）輪座上的裂紋多位於輪轂左右端面內側。特B軸（876根中佔66.08%）上，裂紋大部分位於輪轂端面右內側，其它各類車軸，裂紋大多出現於輪轂左內側，也有同時在輪轂左右二端面內側出現裂紋的；

（3）裂紋有成一圈的、有斷斷續續成一圈的，也有成一小段的。裂紋的深度為0.5~4.5公厘。裂紋的長度與深度間並無任何比例關係。裂紋深度多數為0.5~2公厘；深度達4.5公厘的軸很少。

特B型軸和帶肩的C軸出現橫裂紋的最多，這顯然是軸的設計有問題。

因為橫裂紋是藏在輪轂內部的，非經落輪後才得用電磁探傷器探測。但是也有一些方法來初步判斷輪對軸的輪座部分有否裂紋。輪座部分有裂紋的標誌是〔1〕：

(1) 塗在交接面的塗料凸起来——輪座與輪殼的交接面塗有塗料，如果輪座部分出現裂紋，裂紋二表面互相磨擦，磨下粉末來，並從下壓擠塗料，使塗料皮凸起。但塗料突起也可能是由於別的原因，例如塗料里有水、小石、凝塊，在天气热的时候，水份膨脹使塗料皮凸起。所以，要區別塗料皮凸起的原因，還須用探針把塗料皮挑破，只有在發現鉄銹時才表明輪座部分有裂紋；

(2) 軸與輪殼交界處發現鉄銹（現廠叫透銹）——時間增長，裂紋發展，磨下來的氧化的金屬粉末（銹）愈積愈多，最後，塗料皮受不了粉末壓力而破裂，鉄銹就出來了；

(3) 軸與輪殼間有間隙——在裂紋很深，快要斷軸時發現。此時，主軸的截面因裂紋而變弱，已使金屬彎曲屈服，軸與殼間有了間隙，探針能自由刺入；

(4) 二輪箍內邊或輪輞內邊間的距离增大3~5公厘（貨車），2~3公厘（空車）（正常時大1公厘），增大距离也是由於有裂紋的軸，在靜壓下彎曲程度增大。

二、車軸的疲勞試驗

到目前為止，在討論車軸疲勞問題的文獻中，都常引用 T.V.Buckwalter, O.J.Horger, 及 W.C.Sanders [2] 的實驗數據，本文也把他們的工作作一簡單介紹。

在 O.J.Horger 等的工作中，使用了專為試驗車軸實物而設計的試驗機，試驗機和二根受試的車軸都可以在圖1中看到，其示意圖如圖2 試驗機設計為對稱的同時可以試驗二

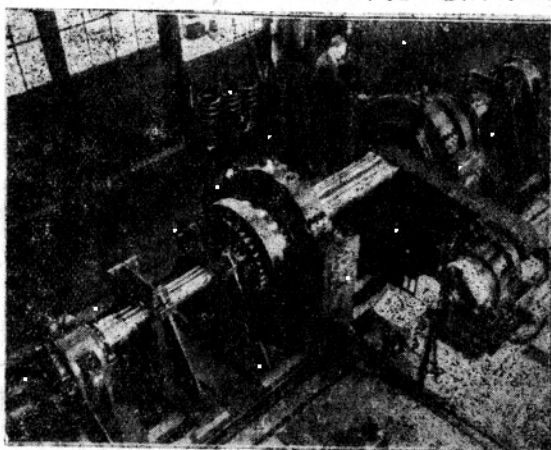


圖1. 車軸實物疲勞試驗機

根車軸，車軸為旋轉的懸臂樑，一端壓配合着一個車輪，經34個螺栓把輪及軸固定在試驗機上；另一端則通過彈簧加負荷在軸上，壓配合車輪一端的軸頸伸入試驗機的迴轉軸的空穴中，與迴轉軸不相觸，試驗機由100馬力的電動機驅動，每分鐘轉1100次。

在試驗過程中發現車軸的疲勞斷裂有着三個相。這一點可從圖3來解釋，圖3上車軸的 $S-N$ （應力—轉數）曲線把車軸的壽命分為三個區域：A，B 和 C，分別由曲線2和曲線3所

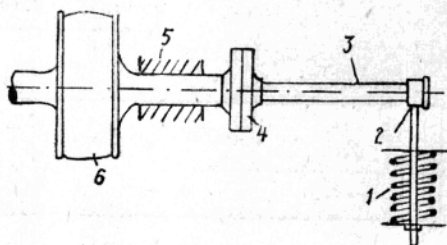


圖2. 1—彈簧；2—軸承；3—車軸；4—車輪；5—軸承；6—皮帶輪。

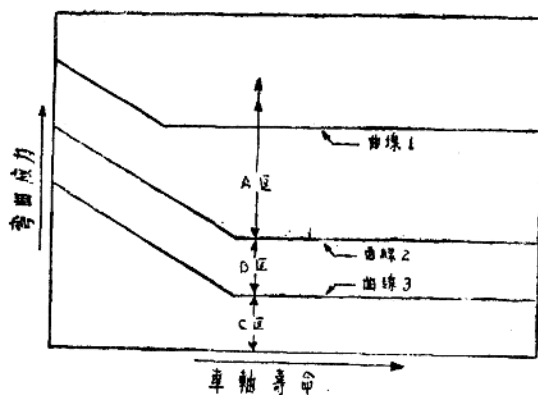


圖3. 車軸疲勞的三相

示，軸是原尺寸的，輪幅的長縮短了，而輪殼、輪幅、輪輞的截面和壓配合的強度都與實際條件一致。

隔開，曲線1代表沒有壓配合車輪的軸的 $S-N$ （應力—轉數）曲線，曲線2代表壓配合車輪軸的疲勞強度，指出當應力及壽命條件在A區時，車軸斷裂，曲線3也代表壓配合車輪軸的，指出在曲線3以上的應力和壽命條件（B區），疲勞裂紋將會形成但不會發展，在C區，車軸不會有裂紋。

O.J.Horger 等試驗了機車的動輪軸，試驗的輪軸如圖4所

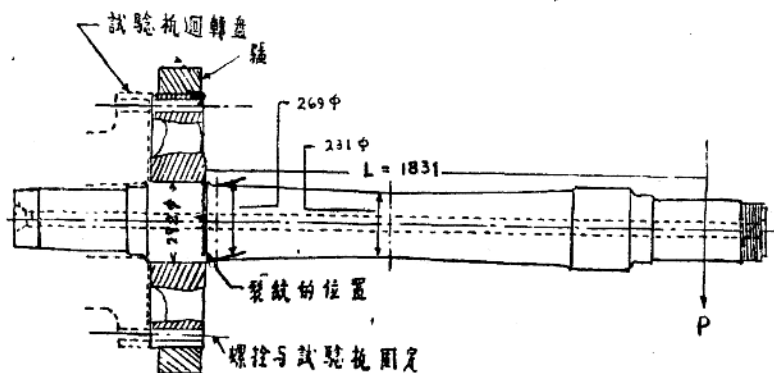


圖4 受試的輪軸裝置

292φ公厘的電氣機車驅動車軸的材料是鑲鋼，其化學分析與機械性能如表1。

表 1

化學分析：

C%	Ni%	S%	P%
0.24	3.10	0.02	0.03

機械性能：

屈服點 公斤/公厘 ²	抗張強度 公斤/公厘 ²	延伸率%	断面收縮率%	硬度 Hb	疲勞強度 (6公厘φ) 公斤/公厘 ²
42~48.3	64~66.5	25~30	67.5~70.6	192	38.8

O.J.Horger 進行了二組車軸的試驗，一組車軸是輪座部分經過轆壓；一組車軸未經轆壓。轆壓的條件為：車軸轉速25~50轉每分鐘；壓轆走刀0.9公厘/轉；轆壓力11300公

斤；轆徑255公厘；轆型直徑38公厘。

試驗結果列在表2。

表 2

軸 号	配合量 公厘	配合压力 噸	軸的弯曲应力 公斤/公厘 ²	寿 命		裂紋深度 公 厘
				轉数(百万)	千公里*	
未 轆 压 軸						
9545	0.43	147	13.4	5.7	33	116
9540	0.41	138	9.8	19.8	112	10.3
9549	0.41	122	8.4	28.7	163	52
9550	0.41	154	7.4	83.8	467	1.6
轆 压 軸						
9555	0.34	161	13.4	143.5	816	11.1
9553	0.33	158	7.4	140.5	800	0.4
9554	0.31	174	13.4	48.5	276	—
9542	0.33	186	7.4	48.5	276	—

* 設輪徑为1830公厘

轆压軸与未轆压軸的比較則可列成表3。

表 3

弯 曲 应 力 公斤/公厘 ²	軸总轉数 $\times 10^6$		$\frac{N_2}{N_1}$	裂紋深(公厘)		$\frac{t_2}{t_1}$
	未轆压軸 N_1	轆压軸 N_2		未轆压軸 t_1	轆压軸 t_2	
13.4	5.7	143.5	2.5	116	11.1	0.1
7.4	83.7	140.5	1.7	1.6	0.4	0.25

試驗的数据不够，而且沒有一直試驗到軸斷，不能描出圖3的三条曲線。№. 9540軸（輪座未轆压）在9.8公斤/公厘²弯曲应力下，出現10.05公厘深的裂紋，顯然在这一应力下車軸將斷裂，可以說圖3上的曲線2約为9.8公斤/公厘²。

№9550軸在7.4公斤/公厘²这样低的应力下出現裂紋，可以認為圖3上的曲線3在7.4公斤/公厘²以下。

轆压軸的輪座上也出現裂紋，但裂紋的發展速度較之未轆压軸的慢得很多，在13.6公斤/公厘²这样大的应力下，在其試驗寿命为未轆压軸試驗寿命的2.5倍时，裂紋的深度只及未轆压軸的 $\frac{1}{10}$ ，在7.4公斤/公厘²应力下，当轆压軸的試驗寿命为未轆压軸的1.75倍时，其裂紋深度只及未轆压軸的 $\frac{1}{4}$ 。

試驗应力並不与車軸在实际使用中所承受的应力相同。應該注意到，無論是未轆压軸或轆压軸，都在很低的应力下开始出现疲劳裂紋。

三、車軸疲劳裂紋的形成原因

为什么車軸在7.4公斤/公厘²的交变弯曲应力（只及原材料小試样的疲劳强度的 $\frac{1}{4}$ ）

就出現疲勞裂紋呢？在壓配合的一些機械零件——如齒輪、轉子等，也都有着這等使軸料的持久極限降低很多的事實，所以我們就先就壓配合工件的疲勞問題進行一些討論。

先可以把已有的發表在文獻上的數據 [3] [4] 總結一下。這樣的總結可以用表 4, 5, 6, 7 來說明：

表 4

N°	試樣形狀	持久極限		
		Kg/mm ²	% 試樣材料持久極限	應力集中係數
1		24.1	≈ 100	
2		13.4	56	1.8
3		13.4	56	1.8

表 5

N°	壓配合型式	材 料		配合壓力 Kg/mm ²	註	持久極限		
		試 樣 ^a	材 料 ^a			Kg/mm ²	% 試樣材料持久極限	應力集中係數 K
1		中炭鋼 ^c	灰炭鋼 ^d	6.6		16.8	55	1.8
2		"	"	12.4		16.8	55	1.8
3		"	"	21.9		16.1	53	1.9
4		"	"	"	鋼 瓦	27.0	73	1.1
5		"	"	"		21.9	72	1.4
6		"	"	"	"	24.4	103	1.0
7		"	"	"	r = 0.04"	16.8	55	1.8
8		"	"	"	r = 0.12"	19.0	62	1.6
9		"	"	"		17.5	59	1.7
10		"	硬 質 工 鋼			13.7	47	2.2
11		"	軟 質 工 鋼	0.74		26.3	86	1.2
12		Cr-Ni 鋼 ^e	熱 C 鋼 ^f	9.4		20.8	39	2.6
13		熱 C 鋼 ^g	"	12.4		14.6	57	1.8
14		中 C 鋼 ^h	"	9.4		28.3	60	1.7
15		"	"			13.7	≈ 46	≈ 2.1

a—試樣 14公厘Φ

c—0.57%C; 0.29%Si; 0.55%Mn; 0.02%P; 0.03%S 持久極限 30 公斤/公厘²

d—0.06~0.13%C; 0.5%Mn (Max); 0.35%Si (max)

e—非金屬材料

f—0.25~0.40%C; 0.35%Si (max); 0.40~0.80%Mn; 0.55~0.95%Cr;

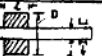
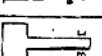
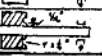
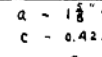
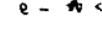
3.25~3.75%Ni 淬火回火 持久極限 53.4 公斤/公厘²

g—0.11~0.16%C; 0.4%Mn (max); 0.35%Si (max) 650°C 退火

持久極限 25.6 公斤/公厘²

h—0.44%C鋼，軋制狀態 持久極限 30 公斤/公厘²

表 6

N°	配合型式	材 料		配合壓力 Kg/mm ²	註	持久極限		
		試 樣 ^a	材 料 ^a			Kg/mm ²	% 試樣材料持久極限	應力集中係數
1		中炭鋼 ^c	中炭鋼 ^c	30.0	d = 2 1/2" D = 3 1/2" l = 1 1/2"	15.8	68	1.5
2		"	"	≈ 11.7	d = 1 5/8" D = 2 1/2" l = 1 1/2"	11.5	50	2.0
3		"	"	≈ 0.65	"	16.1	69	1.4
4		"	"	"	D = 3 1/2"	10.2	44	2.3
5		"	"	"	D = 3 1/2"	12.1	52	1.9
6		"	"	≈ 8.8	D = 3 1/2"	13.7	59	1.7
7		"	"	≈ 4.4	鋼 瓦 厚 300 Kg	16.8	75	1.2

a—1 1/8"

c—0.42%C, 0.62%Mn, 0.15%Si, 0.02%S, 0.017%P 持久極限 23.2 Kg/mm²

e—鋼 < 21.5 H/mm²

表 7

No.	试样形状	材料		配合压力 Kg/mm ²	辗压力 Kg	疲劳强度 σ_b /mm ²			
		轴	毂			A 不辗压	B 辗压	C % 差	应力集中 A/B
1		S.A.E 1045	Cr-Ni-Mn	3.2	0	25.1	11.0	144	2.3
2		2文	表面硬化		600	"	24.1	99	1.0
3		0.45-0.50 % C	化		1200	25.1	24.8	99	1.0
4						29.2	"	85	1.2
5						25.1	17.5	35	2.9
6				2.3	0	25.1	17.5	35	2.9
7					600	"	35.0	70	1.4
8					1200	25.1	20.5	81	1.2
9						29.2	"	70	1.4
10		2.6% Ni ⁴			0	33.6	17.5	26	3.8
11		" C			0	35.1	11.7	33	3.0
12		Cr-Ni-Mn ⁶			0	44.3	11.7	26	4.9
13									

从这些表可以知道:

- (1) 压配合轴的疲劳强度只有原轴材料的56%;
- (2) 外形与压配合试样相同的实体试样, 其疲劳强度与压配合试样的疲劳强度相等;
- (3) 配合压力较小的试样, 其疲劳强度大于配合压力较大的试样, 但在一定的配合压力以上, 疲劳强度与配合压力无关;
- (4) 一些设计上的减小应力集中的措施, 如毂上开槽、毂边开圆根、加粗轮座部分, 只能提高疲劳强度30%;
- (5) 表面辗压可以提高轴的疲劳强度2.3倍。

根据 A.M. Wahl 等人的研究[4][5][3], 压配合件使轴变弱的原因可以用图5来表示, 其基本因素是: (1) 压配合工件使轴的形状犹如一截面突然变化的整体轴, 截面变化处的圆根很小, 引起在截面突变处的应力集中; (2) 在毂的边缘, 配合压力达最大值, 如图5a所示。这一压力在轴弯曲使毂边压在轴上时更加严重; 如图5b所示; (3) 在交变的弯曲应力下, 轴的纤维交变地拉伸、压缩, 毂在轴上极微量地滑动, 这样引起的摩擦腐蚀使轴变弱。实际上也在压配合工件的边沿发现大量的锈皮。

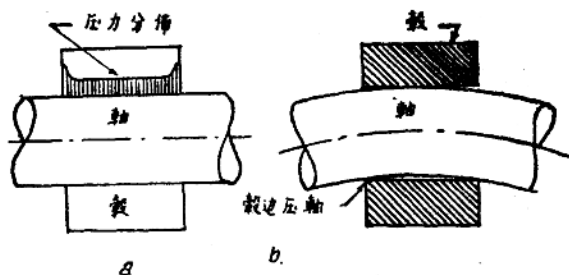


图 5.

由于实验数据不足, 及因车轴疲劳问题的复杂性, 目前还不能确定二个原因——应力集中和摩擦腐蚀——何者对降低轴的疲劳强度起基本作用。

不正确的压装轮轴的过程, 将车轴表面擦伤; 加工以后在车轴轮座表面留下小斑或刀痕; 都使应力集中的情况加重。

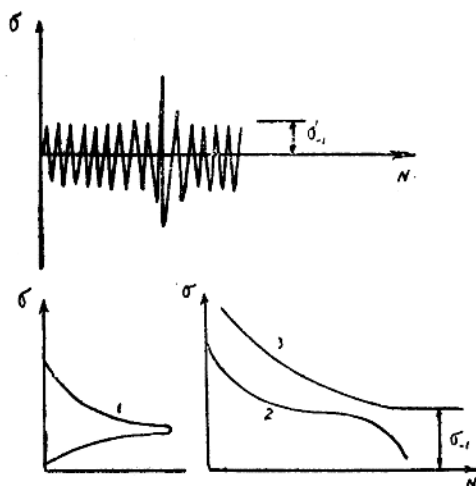


圖6. 偶然因素作用下的過負荷：1——應力作用頻率曲線；2——頻率曲線的總和；3——疲勞曲線。

現時應用的車輛軸計算法只是計算垂直的靜負荷，沒有考慮到車軸在長期運行中的全部複雜交變應力。這一計算也沒有考慮到尺寸因素的影響和應力集中的影響等等。

因此，在現用的計算方法中，車軸的允許應力是很低的，車軸輪座部分的允許應力僅只500公斤/公分²。

實際上，車軸在運行中所產生的基本應力是低的，但一些偶然因素如：線路不良、彈簧不良、彈簧碰軸、裝載不均、過載、輪箍上有疤，使車軸承受數值較大、次數較少的過負荷。車軸的交變應力振幅的變化可以用圖6來表示[6][7]。

多次過應力的效果積累，使車軸產生裂紋，繼續的過應力使裂紋加深。但是受了壓配合的限制，裂紋的發展是緩慢的。

四、裂紋軸的再用問題

由於車軸因橫裂紋而報廢的數量很大，新軸有供不應求的趨勢，所以，有裂紋的車軸是否可以在旋削去除裂紋後再用的問題，引起了普遍的興趣。

從裂紋軸上取下50公厘直徑試樣的疲勞試驗，尚待進行。這裡先提出7公厘直徑小試樣的疲勞試驗結果和一般機械性能試驗結果。

試驗用的4根車軸都是特B型軸，其化學成分如表8。

表8

軸 號	化 學 成 份， %				
	碳	錳	矽	硫	磷
1	0.38	0.82	0.21	0.01	0.04
2	0.45	0.74	0.21	0.05	0.02
3	0.39	0.77	0.19	0.03	0.02
4	0.45	0.79	0.21	0.02	0.02

在軸的二輪座部分近裂紋處取50公厘直徑的試樣，7公厘直徑的疲勞試樣、沖擊試樣和拉力試樣；試樣在軸上的位置如圖7所示。自左右輪座部分取下的試樣，分別標以1和—2。

拉力試驗：用蘇聯ГОСТ 1497-42的標準試樣，直徑為10公厘，標距為50公厘，試驗結果列在表9。裂紋軸的抗張性能仍合乎規格。

沖擊試驗：試樣為ГОСТ 1524-42標準梅氏缺口試樣。在室溫25°C下進行試驗。試驗結果列於表10。

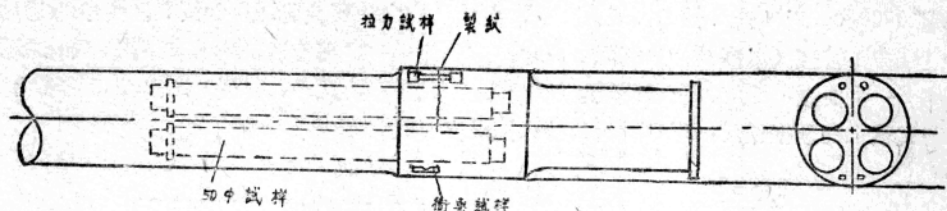


圖 7.

表 9

軸 号	屈 服 点 公斤/公厘 ²	抗 拉 强 度 公斤/公厘 ²	引 伸 率 %	断 面 收 缩 率 %	硬 度 H _B
1—1	28.82	58.87	27.28	47.65	174
1—2	29.63	59.63	28.24	48.90	
2—1	—	62.89	21.75	37.68	183
2—2	27.21	60.32	18.03	38.91	
3—1	26.63	56.86	27.66	45.40	159
3—2	27.21	57.93	28.39	47.00	
4—1	27.22	58.60	24.94	44.91	159
4—2	29.63	60.53	27.07	46.11	

表 10

試样号	冲 击 韌 性 公斤/平方公分 (八个样的平均值)
1—1	4.478
1—2	4.406
2—1	4.008
2—2	5.072
3—1	3.432
3—2	2.715
4—1	2.681
4—2	2.172

从同一軸上取出的样品，其冲击值相差甚大，在金相显微镜下可以看到，是由于晶粒大小相差很多（圖 8）。在軸的不同長度位置，顆粒大小不一，可能是由于在鍛造过程中，沿軸長度的不同位置的鍛压比不同。因为結果參差較大，所以我們用 8 个試样的冲击值求出平均的試驗值。

Fumio Oshiba 的研究指出[8]，疲劳伤害降低材料的冲击韌性，但減低得不显著。当然，在我們的試驗中，数据參差很大，不能看出这样的問題。

疲劳試驗：試样为摩尔式，弧形試样的弧半徑为 80 公厘，最小直徑为 7 公厘。試样在車制后，以專用的砂輪研磨消除橫向刀痕，表面上的磨痕与試样軸平行。試驗机轉速为每

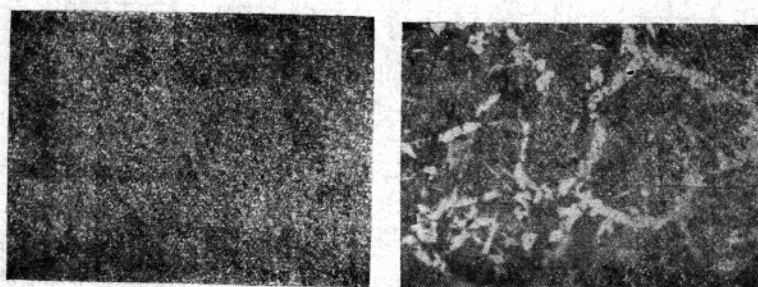


圖 8.

分鐘10000次。以4—2軸为代表的S—N曲綫（应力—轉数曲綫）如圖9。圖中的虛綫为过应力伤害綫（以高於持久極限的应力，預先作用一定轉数后，仍具有原来的持久極限值的S—N曲綫，当应力或者轉数超过伤害綫，就会导致試样的断裂）。以我們的試驗結果与文献上的数据相比，可知材料的持久極限沒有改变。

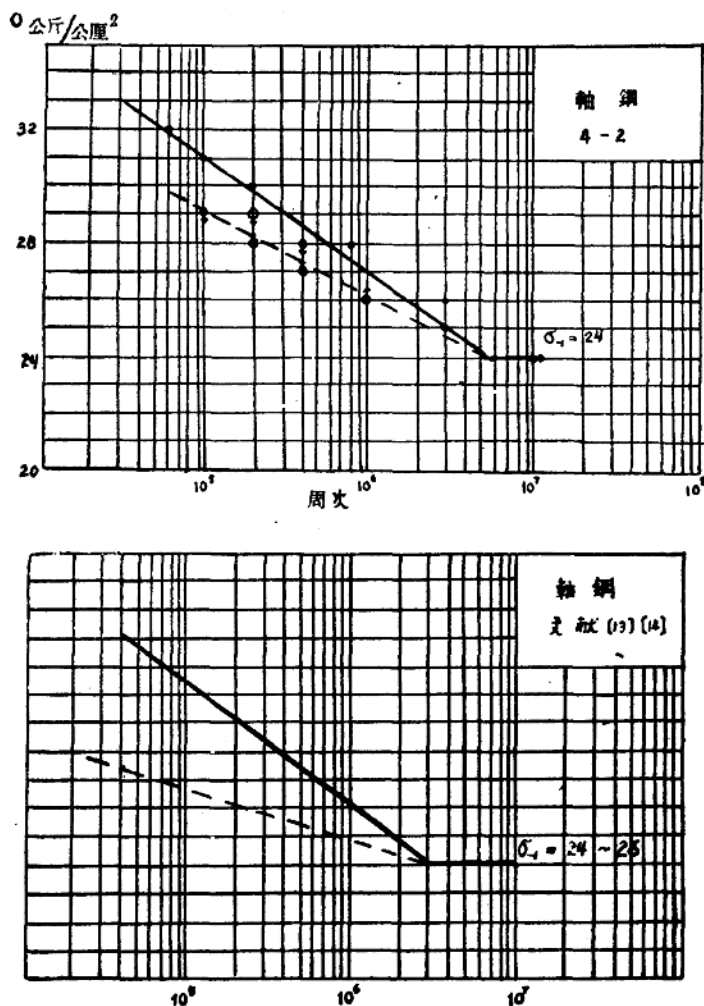


圖9. 軸鋼的S—N曲綫和伤害綫

在考慮發生疲勞裂紋的車軸在旋制后再利用是否安全的問題時，先來了解一下疲勞裂紋的形成过程和金屬疲勞的基本理論是必要的。

苏联烏克蘭科学院Н.Н.Афанасьев[9]为了研究疲勞裂紋的形成的过程，設計和制造了一种特殊的疲勞試驗机，整个机器的体积很小，可以裝在大型的蔡司金相显微鏡的样品台上。

在金相显微鏡下观察Armco純鉄的疲勞裂紋的發生和發展过程，看到：

1. 在交变負荷下，随周次增加及負荷振幅增加，滑移綫（金屬的塑性变形是通过金屬薄層沿着一定的結晶面的滑移来实现的，滑移面与样品表面的交綫成滑移綫）漸漸出現，繼續增加周次，滑移綫变寬，直至發生裂紋，但几乎不出現新的滑移綫。

2. 重新磨光的原試样，在繼續承受交变負荷时，仍在原来出現滑移綫的地方出現滑移綫（在不多次的交变应力后）。

3. 实验証明，由試样邊緣發生的滑移綫之一將变为裂紋。

4. 随交变周次的增加，裂紋躍进式地在試样中傳播。

5. 在裂紋末端發生很大的应力，使在裂紋末端引起小束滑移綫，这样的滑移綫在交变負荷下又变为裂紋。

根据上述，可以这样来想像裂紋的發生：

在应力振幅超过疲劳極限的第一个应力周期，金屬發生塑性形变，使品格扭歪，塑性形变过程开始时很快，在繼續增加負荷周次时变化很少，金相显微镜下看不到滑移綫，或是看到很弱的滑移綫。

在这一阶段，承受应力（形变）最大的弱顆粒發生强化（在塑性变形的过程中，金屬对变形的阻力与时俱增，这种现象称为强化）。

顆粒强化及屈服極限提高，使作用在顆粒上的应力提高。虽然是形变振幅保持不变，由於在个别的「有缺陷的」局部顆粒内应力提高，可能形成帶有裂口的滑移，形成沿滑移面的顆粒「松动」。这一过程的示意图相当於圖10。

当顆粒的二部份互相滑移一个距离 δ 时，在滑移面 ab 、 cd 、 ef 等处，發生沿 bc 、 de 等面的裂痕，促使形成裂口 bb' 、 dd' 、 ff' 等。显然，現在滑移面变弱了，因为它的截面 AB 減小了。在交变形变之下，裂口数目增加，如圖10中虛綫所示。这样就解釋了为什么滑移綫开始加寬直到沿它出現裂紋，也說明为什么在重新磨光后又很快在原地發生滑移綫，显然，原来地方已經「松动」了。

沿滑移綫松动的最后阶段——沿滑移綫形成裂紋，其大意如圖11所示。

Н.Н.Афанасьев認為[10]，金屬多晶体的性質是十分不均匀的，金屬由結晶体、晶粒間界、晶粒間的孔穴和非金屬夾雜物組成，結晶体本身又是不均匀的，因为晶体內部偏析和它們的生長条件各各不同，而且結晶体又是各向異性（金屬晶体的物理、机械和其它性能在沿晶体的各种不同方向上是不一致的）的物質。故而在金屬的組織中只有一部份結晶体或晶体內的一小块才多少是均匀的。Н.Н.Афанасьев 就把这些晶体內的均匀部份称为「顆粒」，每一顆粒是机械性能和应力状态一致的，而各各顆粒則有不同的机械

性态和应力状态，因而在金屬承受負荷时，各顆粒承受的应力是不一样的。当按整个截面积算来的名义应力还低於彈性極限时，某些顆粒已經可能塑性变形了。由於交变塑性变形和这些顆粒在交变負荷之初發生了应变硬化、彈性極限降低的Bauschinger效应，在相当負荷周次后，虽然是低於 σ_0 或 τ_0 ，最弱顆粒的塑性与硬化就可能消失了，促使形成个别的、晶体內的微細裂紋，不过，發生在个别晶体內的單独的微細裂紋，它的危害也仅只相当於

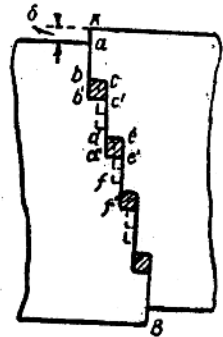


圖 10.

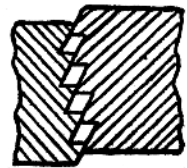


圖 11.

金屬晶体中原来的缺陷，微細裂紋的进一步發展或是停止生長，还取決於晶体顆粒間應力的重新分佈。

X射綫及金相的研究指出，靜力負荷与交变負荷下，塑性形变的机构是同样性質的，在二种情形下，都观察到晶体的滑移和晶格的扭歪，但也有着差別，在靜負荷下，塑性形变是均匀地波及絕大多數的晶体，然而，交变負荷的結果，滑移綫只集中在个別的顆粒，即使在一个晶体的範圍內也是分布不均匀的。

在交变負荷下滑移的出現可能僅只是切應力的結果，滑移促使最弱的顆粒強化。最弱的顆粒直到局部作用应力 S 的直达到 S_T 时才断裂。由於最弱顆粒断裂而引起的变化可能被較强顆粒的強化所抵消，於是微細裂紋的發生、長大便停止，当然也有更大的相反的可能性，微細裂紋漸漸發展，連成一条裂紋穿过一組顆粒、穿过整个晶体、穿过晶粒間界，由此时开始，在晶体中不再發生另外的微細裂紋，因为切应力有利於疲劳裂紋的發展。故而，疲劳的第一階段是选择性強化，或是在某一应力下漸漸減緩、或是引起最弱顆粒断裂($S=S_T$)，由微細裂紋連合成的裂紋沿垂直於主作用張應力的方向長大。微細裂紋發生、發展及連合的过程乃是疲劳的第二階段，也被称为「疲劳松动」(Усталостное Разрыхление)，強化与松动二过程的斗争，决定了疲劳的發展。

因为疲劳过程集中於唯一的裂紋的長大，發生断裂並不对其余体積的金屬的性質有任何影响。

由此可以相信、軸的再利用是完全可以的，而且旧軸再用需要經過再結晶处理也是完全不必要的。

國外的研究数据，我們也來介紹一下。

美國的H.F. Moore在1929年时，研究了車軸的疲劳裂紋的問題[11]。Moore發現，当把有裂紋的鐵路車軸旋小再用时，必須旋削至裂紋底部以下1.6公厘。从裂紋以下的材料包括上說的1.6公厘在內取疲劳試样，其持久極限較原材料稍低。但是如果不包括这1.6公厘，持久極限是正常的。

所以，重要的問題是：这1.6公厘看起來良好的、实际上是危險的材料是什么？及如何來決定是否把这样一層材料去除了？

据我們看來，如果用上述H.H. Афанасьев的理論來解釋，这1.6公厘正是疲劳裂紋端部应力較高引起一束滑移綫，成为金屬变弱的地方。

H.F. Moore又指出，承受过交变負荷的材料在金相檢驗时看不到明顯的变化，在軟鋼中才能看到某些顆粒顯示出微弱的滑移綫，表示这些特殊的顆粒开始發生了塑性流动，但这样的塑性流动局限於極小的局部，对整个材料不起作用，即使是顯著地因过負荷而损伤的材料，在金相檢驗时也看不出什么，讓顯微鏡來告訴我們材料是否损伤了或是恢复了是一个难题，甚至是不可能的。

关于輪座部分旋削去除裂紋后的車軸再运用的可能性，苏联铁道运输科学研究院[12]認為，在裂紋發展初期形成的、不深的裂紋是允許去除的，同时應該去除裂紋下面的金屬層不少于0.5公厘深。他們建議，去除裂紋的輪座部分最好經過軋压強化以补偿因輪座部分直徑減小所帶來的損失。

在前面提到的車軸实物疲劳試驗中，可以看到在7.4公斤/平方公厘这样低的应力下，还出現1.6公厘深的裂紋。所以，可以認為在2公厘以下深度的裂紋，都是裂紋發展初期

的、不深的裂紋。

目前，裂紋車軸的裂紋深度多数在 2 公厘以下，所以，允許旋削再用可以节省大量鋼材。

五、总 結

車軸最常在輪座部分出現橫裂紋，因为这一原因，每年有大量的車軸报废，由于裂紋隱匿在輪轂下面，引起檢查中的一些困难，現在虽然有一些經驗的方法来判斷推測，但还有待創造一种有效的探伤工具，俾能很方便地探測帶輪軸的裂紋。

車軸的实物試驗和对压配合工件的疲劳强度研究，都証明压配合工件使軸材的疲劳强度显著降低。使軸材变弱的基本因素是：应力集中和摩擦腐蚀。不正确的压裝車輪的过程，將軸的表面擦伤、車軸表面上留下的刀痕，都使应力集中的程度加重。

一些偶然的因素，使車軸在运行中承受的次數虽少数值甚大的过負荷。过負荷影响的累积，使疲劳裂紋發生，在其后繼續承受过負荷时，裂紋發展。

因为疲劳过程集中于唯一的裂紋的長大，發生断裂並不对其余体积的金属性質有任何影响，疲劳裂紋軸在旋去裂紋后再用是可能的。

当裂紋深度小于 2 公厘时，可以把裂紋旋去，軸再利用，同时應該去除裂紋以下不小于 0.5 公厘的金属層。

軸旋小再用时，必須严格注意探伤作業，以能真正决定裂紋已經完全旋去。

参 考 文 献

- [1] В.М.Чернышев, Причины Образования Трещин в Вагонных Деталях, 1953.
- [2] T.V.Backwalter, O.J.Horger, W.C.Sanders, Locomotive axle testing, Trans. A.S.M.E. Vol. 60, 1938.
- [3] R.E. Peterson, A.M.Wahl, Fatigue of Shaft at Fitted Members with a Related Photoelastic Analysis, Trans. A.S.M.E. Vol. 57, 1935.
- [4] O.J.Horger, J.L. Maubetsch, Increasing the Fatigue Strength of Press-Fitted Axles assemblies by surface rolling, Trans. A.S.M.E. vol. 58, 1936.
- [5] O.J. Horger, Stressing Axles and Other Railroad Equipment by Cold Rolling, 『Surface Stressing of Metals』, ASM 1948.
- [6] Р.С.Николаев, Причины Поломок Деталей Подвижного Состав и Рельсов, 1954.
- [7] Л.А.Козлов, Расчёт и испытание на прочность при неустановившемся режиме переменной напряженности, 『прочность при неустановившихся режимах переменных напряжений』, 1954.
- [8] Б.А. Дроздовский и Я.Б. Фридман, О методике оценки чувствительности материалов к трещинам, заводская лаборатория 5, 1955.
- [9] Н.Н. Афанасьев, Статическая теория усталостной прочности металлов, 1953.
- [10] Н.А. Шапошников, Механические испытания металлов, 1951.
- [11] Battelle Memorial Institute, Prevention of the Failure of Metals Under Repeated Stresses, 1949.
- [12] 苏联铁道运输科学院 1956 年 6 月給本院的来信。
- [13] А.И.Скаков и З.В. Калашникова, Статистический анализ прочности вагонных осей, 『Прочность при неустановившихся режимах переменных напряжений』, 1954.
- [14] Г.В. Ужик, Методика испытаний металлов и деталей машин на выносливость, 1948.

金屬的疲勞問題

曾訓一 章武華

本稿是應鐵道部工廠管理局於今年二、三月間在北京所舉行的彈簧熱處理訓練班的需要而寫的講義。這次付印時，在文字上作了部份修改。稿內概括地討論了金屬疲勞問題的各个方面，也列入了我們研究所得的有關的一些材料。

金屬的疲勞知識，對鐵路技術工作者是極端重要的，機車車輛彈簧是在反復負荷下工作的，其他部件如車軸、搖連桿、勾貝桿、曲拐銷，以及鋼軌、橋梁等也是在反復負荷下工作的。由於這些部件或結構的疲勞破壞而招致損失之大，是鐵路工作者所熟知，也說明了研究金屬疲勞的重要意義。

最後應該說明，我們在這方面的研究工作伊始，知識有限，加以脫稿倉卒，書中可能有缺點和錯誤，歡迎指正。

本文第一、二章由曾訓一執筆，三、四章由章武華執筆。 筆者 1956.4.

目 录

一、引論

二、作为表征强度的疲勞極限的特征

- §1. 疲勞極限與靜力學性質間關係
- §2. 疲勞極限與周期特征間關係
- §3. 過應力與鍛煉的影響
- §4. 中間回火和休息的影響
- §5. 熱處理的影響
- §6. 表面強化的影響
- §7. 表面質量的影響
- §8. 尺寸效應和形狀因素
- §9. 周圍介質的影響
- §10. 夾雜物的影響
- §11. 晶粒大小的影響
- §12. 應力的頻率的影響

三、疲勞試驗方法与試驗機

疲勞試驗方法

- §1. 選擇材料
- §2. 選擇試樣的形狀
- §3. 試樣(半成品)的熱處理
- §4. 試樣的機械加工
- §5. 試驗前試樣的檢查
- §6. 試驗前試驗機的校正
- §7. 試樣安裝在試驗機上
- §8. 決定第一個及隨後試樣的負荷
- §9. 選擇試驗基數

疲勞試驗機

- §10. 疲勞試驗機的分類
- §11. 對疲勞試驗機的要求
- §12. 常用的疲勞試驗機

四、金屬疲勞的理論

一、引 論

金屬是重要的工程材料，對於金屬強度問題的研究具有非常重要的意義。

金屬的強度表現取決於它的工作條件，如應力狀態、形變速度、工作溫度等。

一工件承受不随時間而变化的即恒定的負荷称为靜負荷。如果工件的負荷是随時間而变化的,即時而大、時而小、時而為正、時而為負,則这种負荷称为交变負荷或反复負荷。

以下我們所要討論的金屬的疲勞現象指的便是金屬長期在交变負荷或反复負荷作用下於一定条件引致破坏的过程,与此相应,所謂金屬的持久性指的是金屬抵抗長期交变負荷或反复負荷作用的能力。

金屬的疲勞現象是在十九世紀初發現的,十九世紀中叶,德國 August Wöhler 首先在柏林對金屬的疲勞問題進行了系統的研究,當時他所用的試驗機轉速每分鐘只72轉,使得這位勤勞的工程師費去了12年工夫才完成他的試驗,这样,對疲勞現象的某些基本規律得出了結論。

百多年來,研究金屬的疲勞問題的學者是很多的,然而人們對疲勞問題本質的了解還是很不深入的。近十多年蘇聯學者在提高金屬的疲勞性能的措施上、在承受反复負荷作用工件的設計計算方法的改善上、在建立疲勞問題的理論上作出了許多貢獻。

現在我們首先來討論疲勞現象的基本特征。

在多次反复負荷作用下破坏,即疲勞破坏,与一次(例如抗張試驗下)或有限次負荷下破坏是不同的,它具有以下三大特征:

1. 疲勞破坏通常沒有外在的(宏觀的)顯著塑性形变的跡象,即便是塑性良好的金屬亦然,這从圖1可以明顯看出,同一材料(機車曲拐銷0.41%O)抗張試驗破坏時呈杯錐狀斷口,而疲勞試驗破坏時($\sigma = \pm 27.8$ 公斤/公厘², $N = 576,300$)却表現為脆性斷裂。

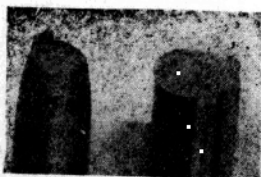


圖1 抗張試驗與疲勞試驗破坏斷口的比較*

2. 引起疲勞破坏的應力常較靜力載荷下的彈性限度還低,例如上述曲拐銷材料的抗張強度 σ_s 、屈服點 σ_s ,分別為61.2, 34.6公斤/公厘²,而 σ_{-1} (σ_{-1} 的意義以下指出)只有24.6公斤/公厘²。

3. 對應力集中因素特別敏感。

經受疲勞的工件,它所受的應力(包括法應力即張壓應力 σ ,剪切應力 τ 或複雜應力)可以是時間的一定函數(例如常見的簡諧律),但也可以具有偶然性質,此外工件有時周期地經受不同的時間函數的應力的交变作用,这样便構成所謂不定疲勞問題。

表示周期性應力变化的特征是:應力時間曲線的形狀、最大與最小應力,此外還有振動頻率。對持久性影响最大的是應力大小,至於曲線形狀的影响迄未研究出來,至於頻率的影響則無定論。

對每一循环來說,應力变化的特征是 σ_{max} 、 σ_{min} 、 σ_m 、 σ_a 、 r 和 R ,其中—— σ_m 是平均應力, $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$;

σ_a 是振幅應力, $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$;

r 是振幅系数, $r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$;

R 是振動範圍, $R = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a$ 。

基本應力周期及其特征列如表1。

* 圖1,2及其有关的原始材料是吳金一同志供給的。

基本应力周期

表1

周期名称	特征	r	周期曲线图形式
静力	$\sigma_m = \sigma_{max} = \sigma_{min} \geq 0$	$r = +1$	
对称周期	$\sigma_{max} = -\sigma_{min} = \sigma_a$ $\sigma_m = 0$	$r = -1$	
应力变号非对称周期			
1. 应力变号张应力周期	$\sigma_m > 0, \sigma_{max} > \sigma_{min} $	$r < 0$	
2. 应力变号压应力周期	$\sigma_m < 0, \sigma_{min} > \sigma_{max}$	$r < 0$	
应力不变号周期			
1. 应力不变号张应力周期	$\sigma_m > 0, \sigma_{max} > \sigma_{min} > 0$	$r > 0$	
2. 应力不变号压应力周期	$\sigma_{max} < 0, \sigma_{min} < 0$ $\sigma_m < 0, \sigma_{max} < \sigma_{min} $	$r > 0$	
应力不变号脉动式周期			
1. 脉动式张应力周期	$\sigma_m = \sigma_a = \sigma_{max}/2, \sigma_{min} = 0$ " > 0 "	$r = 0$	
2. 脉动式压应力周期	$\sigma_m = \sigma_a = -\sigma_{min}/2, \sigma_{max} = 0$ " < 0 "	$r = -\infty$	

上表应力符号用法应力 σ ，实际上剪应力的基本周期同。

在周期应力作用下，样品破坏时所經歷的周期数与样品所受应力大小有关，疲劳試驗的目的便是求出这种关系，表示这种关系的曲线通常叫疲劳曲线，在英美多叫S-N曲线，S表示应力，N表示在应力S反复作用下样品破坏的周期数，为了紀念研究金屬疲劳問題的先驅，这种曲线也常被叫做Wöhler曲线。圖2便是这种曲线的一例，注意圖的坐标为半对数坐标，圖上帶有箭头的点表示試样未断。

疲劳曲线也有以 $\lg \sigma - \lg N$ 或 $\sigma - N$ 或 $\sigma - 1/N$ 表示者，但以半对数坐标表示法最普遍，在以 $\sigma - \lg N$ 或 $\lg \sigma - \lg N$ 表示时，疲劳曲线通常是由两条折线組成，而其中一条是水平线。

疲劳曲线主要用来求疲劳极限，所谓疲劳极限指的是在无限次反复負荷下样品所能經受的最高最大应力。例如圖2水平线所指的应力24.6公斤/公厘²。如果疲劳曲线的坐标是 $\sigma - 1/N$ 則曲线縱坐标($1/N = 0$ 即 $N \rightarrow \infty$)的应力为疲劳极限。

对黑色金屬來說，疲劳曲线在 $N = 2 \times 10^6$ 次后漸趋水平，如样品經 $N = 10^7$ 次后未断，