

提高小钎杆寿命的径途

机械工程系 林鼎文

提 要

本文着重从小钎杆的疲劳特性,内孔强化,冶金质量,防腐与表面强化等方面,论述提高国产55SiMnMo小钎杆使用寿命的途径。文中指出:提高钎钢抗过负荷能力和循环韧性,采用高淬透性合金管作内孔衬管,并使衬管与基体完全粘合;减少钢中的夹杂物与疏松等缺陷,以及防腐配合表面强化等是提高小钎杆寿命的重要措施。

经过十多年来的努力,我国研究成功的55SiMnMo钢小钎杆,以其独具特色的合金毛管强化内孔的方法,使国产小钎杆的寿命由平均进尺只有20~30米的落后状态,提高到100~150米,接近国际先进水平。但是,目前这种新钎杆不仅质量尚不稳定,而且潜力也还没有充分发挥出来,如寿命高的进尺可达三四百米,而低的仍然只有二三十米,多数在百米左右。如何使国产钎的寿命进一步提高和稳定,是个正待深入研究解决的问题。

小钎杆主要是用于浅孔凿岩,它是一种传递冲击功的细长杆件,其工作条件极为恶劣,凿岩时,在凿岩机约2000次/分的高频冲击下,承受着轴向多冲压缩、扭转和交变弯曲应力的复合作用,同时还受着矿水的腐蚀及岩石和岩浆的剧烈磨擦,所以使用寿命之短(几小时至十几小时),是一般机械零件所罕见的。

影响钎杆使用寿命的因素很多而且复杂,如钎钢的材质,冷轧方法与质量,锻钎和热处理,表面强化与防腐措施,凿岩条件与正确使用和保管等等。本文仅就钎杆对疲劳性能的要求,内孔强化,冶金质量,防腐与表面强化等方面对小钎杆寿命的影响谈点看法。

一、提高钎钢过负荷抗力和循环韧性

小钎杆除了少量因钎尾炸顶或堆顶失效之外,绝大多数都是在领盘前400毫米区域内,由于疲劳断裂而失效,因此,长期来人们往往是着眼于提高钎钢的疲劳极限,以期延长钎杆的使用寿命。但是,事实又常说明,单纯强调提高钎钢疲劳值,并不一定能达到预期的目的,有的甚至适得其反。如对55SiMnMo小钎杆进行等温淬火、淬火加中低温回火、高频表面淬火等强化措施,提高了钎钢 σ_{-1} 值,凿岩结果,其寿命却只有二三十米,远不如正火处理的寿命高〔1〕。我们和新抚钢厂曾共同试过用高强度,高淬透性的42SiMn₂WMoV钢制作B22毫米小钎杆,并采用电渣重熔纯化材质,钎杆进行整体正火,杆体硬度达HRC50~56,其寿命没有一支超过二十米,平均寿命只有十七米,断裂均在杆体的正常位置上,断口不是外疲劳,就是脆断,这是为什么?小钎杆到底需要什么样的疲劳性能呢?

1、小钎杆的疲劳特性

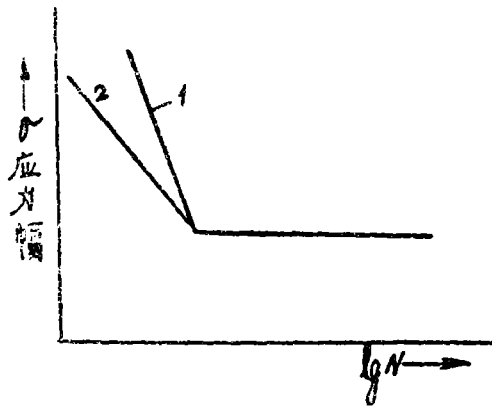
正确判断小钎杆的疲劳性质,对解决钎杆过早发生疲劳断裂是十分重要的。

众所周知,应力疲劳与应变疲劳对材料性能的要求是有所不同的,应力疲劳主要是要求材料的强度应高一些,而应变疲劳则应重视材料的塑性和韧性。

由于凿岩过程中钎杆所受的应力是极其复杂的,其应力幅又是凿岩条件的一个随机函数,所以要准确地测出钎杆凿岩时的受力情况,据以判断钎杆的疲劳特性是困难的。我们根据凿岩技术条件和目前小钎杆的使用寿命,估算其疲劳断裂时,应力循环周次一般在 $10^4 \sim 10^6$ 之间,如果据此判断小钎杆的疲劳特性,则应属于应变疲劳,或者介于应变疲劳与应力疲劳之间。在岩石软,风压低的条件下,钎杆受力小,其寿命甚至可高达四五百米,在这种条件下,钎杆的疲劳性质就比较接近应力疲劳。而在岩石硬,裂隙多,风压又高的条件下,钎杆受力大,寿命短,应变疲劳特征就更为明显。大量的试验也说明,不同凿岩条件下,钎杆疲劳性质是有所不同的,所以对性能要求也就不同,如凿硬岩,钎杆硬度应该低些,而凿软岩则钎杆硬度应该高一些。

2、疲劳极限与抗过负荷持久值

肯定小钎杆的疲劳特性属于应变疲劳,或介于应变与应力疲劳之间,其疲劳裂纹就是在过负荷条件下发生和发展的。因此,单纯追求钎钢的高 σ_{-1} 值,就不能收到预期的效果,而是应注意材料的抗过负荷能力,即疲劳曲线斜线部分的斜率(如图一)。图中曲线①的斜率比②大,在相同的循环周次情况下,可以承受更大的应力,具有更大的抗过负荷能力。



图一 疲劳过负荷曲线比较示意图

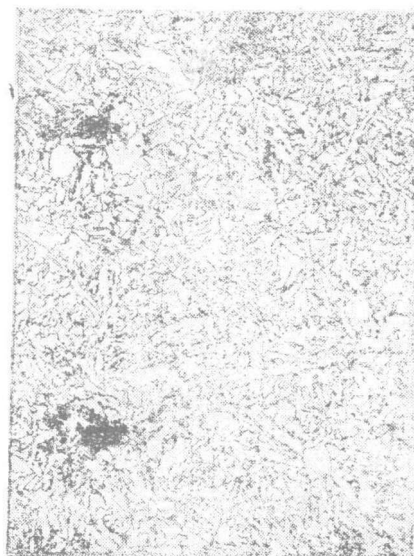
疲劳强度高的材料,其抗过负荷能力不一定高,因为抗过负荷能力与材料的塑性、韧性有着密切的关系。提高材料强度(也提高了 σ_{-1} 值),又会导致塑、韧性的降低,所以只注重提高 σ_{-1} 值,对小钎杆寿命的影响,往往适得其反。淬火加中低温回火,选用42SiMn₂WM₀V钢作小钎杆等就是明显的例证,所以对小钎杆而言, σ_{-1} 值只要中等水平就可以了,而强调材质抗过负荷持久值,对钎杆寿命的影响则会更有意义。

8、疲劳裂纹发展抗力

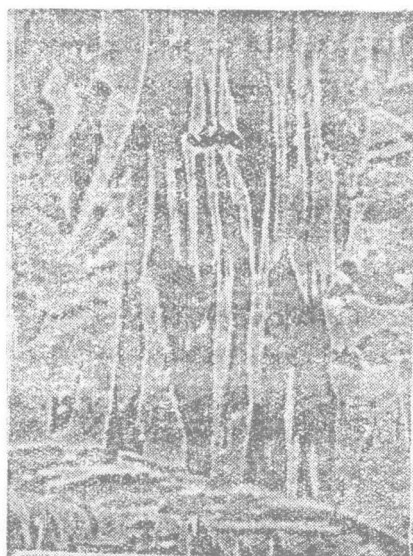
钎杆是在轧制状态下使用的,表面存在大量的缺陷,这些缺陷可以说是钎杆已实际存在的许多疲劳裂纹核心。因此,钎杆的寿命就不是决定于产生疲劳裂纹的抗力,而主要地是取

决于材料对疲劳裂纹发展的抗力,即疲劳裂纹扩展的速率 $\frac{da}{dN}$ 。对55SiMnMn钎钢测量 $\frac{da}{dN}$ 的结果,证实了这一看法的正确性〔2〕。

55SiMnMn钢小钎杆正火状态之所以具有最佳的使用寿命,主要是与它具有特殊上贝氏体组织有关,这种组织是由30%左右的富碳奥氏体和铁素体所组成(见图二)。奥氏体条片具有阻止疲劳裂纹扩展的作用〔3〕,所以 $\frac{da}{dN}$ 值就较低,其失稳断口也呈韧窝型为主的韧性断口(见图三a)。当正火贝氏体再经400℃以上回火时,奥氏体发生分解,组织转变为回火贝氏体(见图四),虽然 σ_s 和 σ_{-1} 值提高了,但奥氏体的作用消失了, $\frac{da}{dN}$ 值随之升高(见图五),断口呈解理的脆性状态(见图三b),钎杆的使用寿命也就大为降低,普遍发生早期折断。

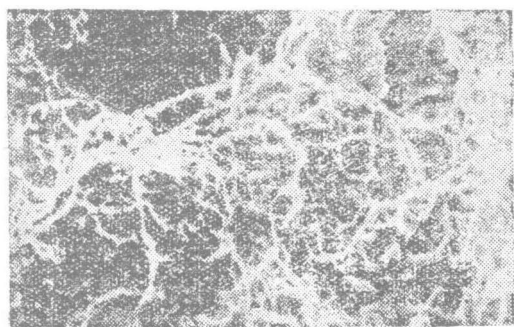


a 500x

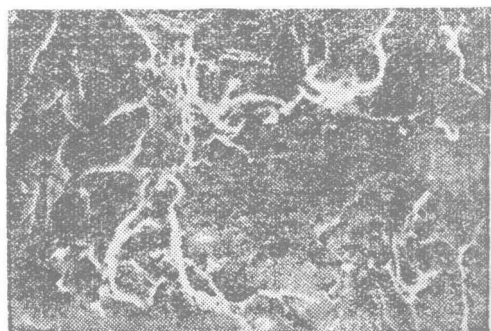


b 电子扫描 3000x

图二 55SiMnMn钢正火上贝氏体组织

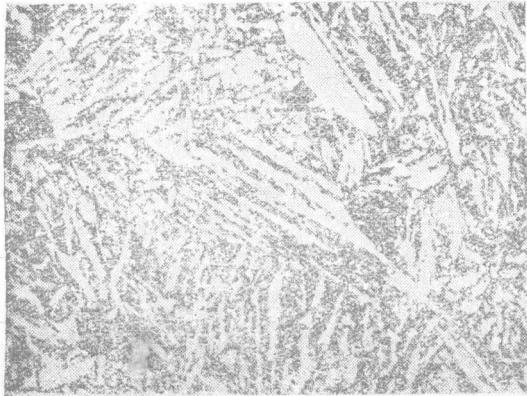


a 正火

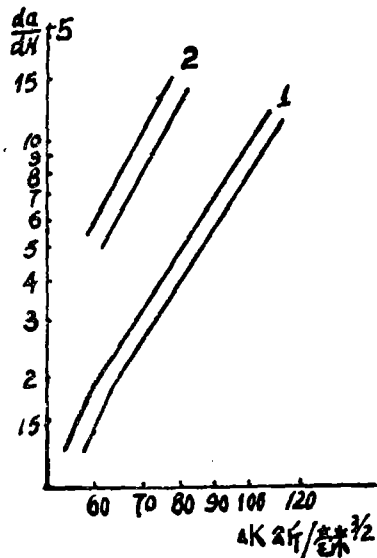


b 400℃ 回火

图三 正火和 400℃回火的断口电子扫描全相特征



图四 55SiMnMn钢回火贝氏体组织 630x

图五 55SiMnMn钢正火和回火
贝氏体的疲劳裂纹扩展速率

①900。正火

②900℃正火+400℃回火

由于目前测定 $\frac{da}{dN}$ 或断裂韧性 K_{IC} (或 G_C) 仍然不很方便, 文献〔4〕的作者根据 K_{IC} (G_C) 公式:

$$K_{IC} = \sqrt{-\frac{\pi}{8} - KB\sigma_F \epsilon_F^2 E}$$

$$\text{或 } G_C = -\frac{\pi}{8} KB\sigma_F \epsilon_F^2$$

其中 $K \approx 0.5$ (常数), B 为试样厚度, σ_F 材料的断裂真应力。 ϵ_F 为断裂真应变。认为可以用材料的基础力性 $\sigma_F \times \epsilon_F^2$ 值的大小来估计钎杆的疲劳寿命, 因此, 也为生产中检验钎钢质量提供方便, 不过这一结论还需进一步研究, 从我们多年的实际凿岩对比试验结果来看,

$\sigma_F \times \varepsilon_F^2$ 值高的钎杆, 寿命并不一定长。如淬火加500~600℃回火的钎杆, $\sigma_F \times \varepsilon_F^2$ 值最高, 但在凿岩试验中, 多数寿命并不高, 只有在岩石软、风压低的情况下才具有较高的使用寿命。所以 $\sigma_F \times \varepsilon_F^2$ 值可能只有在应力疲劳或接近应力疲劳的情况下, 才能反映小钎杆的疲劳寿命。

4、循环韧性

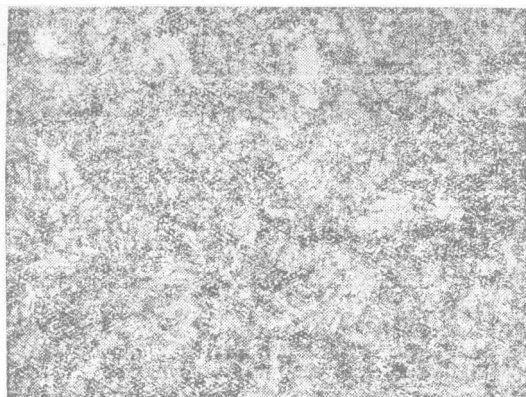
循环韧性是材料在抵抗疲劳损害方面的一个独立性能指标, 它反映了在微观范围内削弱应力峰的能力, 与疲劳缺口敏感度有联系〔5〕。

循环韧性是代表材料在变动应力下, 以不可逆方式吸收变形功而不破坏的能力。循环韧性愈高, 材料吸收外加载荷所产生的变形功的能力愈大, 愈能缓和应力峰, 疲劳裂纹就不易发生和发展。

一种材料循环韧性高, 消震性能好, 但 σ_{-1} 并不一定高, 例如铸铁。

钎杆是在高频冲击条件下作业, 应防止应力波叠加和产生共振, 钎杆表面又极为粗糙, 存在大量微裂纹, 希望降低钎杆的缺口敏感度, 减少应力集中系数, 因此, 要求钎杆材质具有较强削弱应力峰值的能力, 即较好的循环韧性。55SiMnMn。小钎杆正火贝氏体和回火贝氏体两种组织状态之所以寿命差别很大, 与其循环韧性不同有关。

另一例证, 细化晶粒对钎杆寿命的影响。细化晶粒能使材料的正断抗力 S_{0T} 升高, σ_{-1} 也随之提高。可是在实际试验中常常观察到晶粒很细小的钎杆, 其寿命反而不如晶粒粗一点的钎杆好。因为, 晶粒细化会使循环韧性下降, 缺口敏感度升高, 对钎杆的应变疲劳是不利的, 所以晶粒过细反而不好。分析国外产的寿命较高的 95CrMo 小钎杆的组织, 其晶粒度和组织也都比较粗大(见图六), 钎杆断口一般呈结晶状。

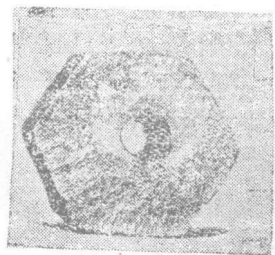


图六 瑞典 95CrMo 小钎杆全相组织500x

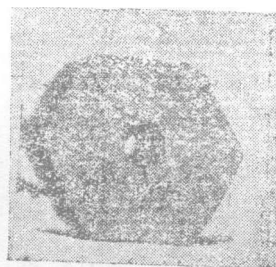
从上述的分析讨论可以看出, 小钎杆的疲劳特性基本上属于应变疲劳, 或介于应变与应力疲劳之间, 所以在保证 σ_{-1} 值具有中等水平条件下, 提高钎钢抗过负荷能力和循环韧性, 将会更有效地延长杆钎的使用寿命。

二、内孔强化

小钎杆的疲劳断裂，常见的有内疲劳和外疲劳二种（如图七），内劳起源于内孔壁，外劳则起源于外表面。



a、内疲勞



b、外疲劳

图七 小钎杆的疲劳断口

钎杆通常是以内疲劳断裂占多数,尤其是寿命低的,常常是百分百的内疲劳,这与凿岩时内孔通入一定压力的矿水腐蚀作用有关〔6〕。

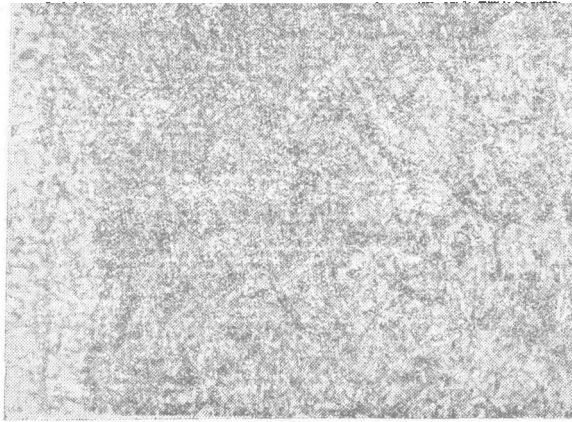
钎杆外表面的强化是比较容易解决的，通过喷丸，滚轧和渗碳等化学热处理，均可收到良好的效果，但是内孔由于孔径小，上述的强化办法就不适用。国外主要是采取防腐措施，消除矿水对内孔的腐蚀作用。国内则在内孔衬入合金毛管，成为复合中空钢，以达到强化内孔提高寿命的目的。〈表一〉是几种不同冶轧方法生产的小钎杆凿岩对比试验的结果。

妻 一

冶 轧 方 法	试验钎数(支)	平均寿命(米)	断 口 疲 劳 性 质		备 注
			内劳(支)	外劳(支)	
热穿—热轧	15	44.6	15		国 产 钎
热穿—冷拔	11	59.3	10		
钻孔+衬管热轧	9	55.8	9		
普炭管铸管—热轧	15	29	15		
合金毛管铸管—热轧	65	203	24	26	
钻孔—热轧	14	280	7	5	国外成品钎 95CrMo

1、合金毛管的强化作用

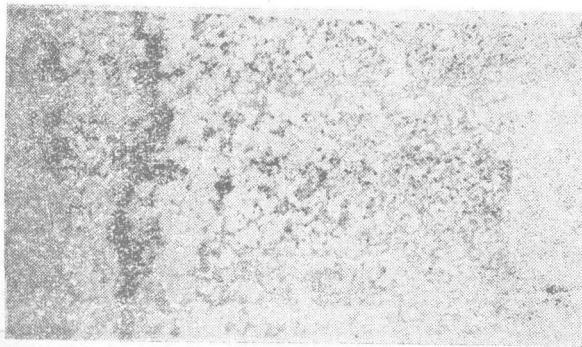
表一说明：在国产钎中，合金毛管——热轧法生产的中空钎钢具有最佳的使用寿命，其原因是合金毛管的材质为40MnMoV钢，它属于高淬透性的合金钢，B22毫米小钎杆正火后，其40MnMoV内管组织基本上为马氏体组织（见图八），使内孔获得强化的结果。



图八 小钎杆正火后的40MnMoV内管组织500x

目前对于合金毛管对内孔的强化作用的认识还不一致,有的认为这种强化效果,主要是内管马氏体强度高的缘故,而与残余应力无关〔7〕。我们以为内管马氏体相变所造成的有利压缩应力的作用更为重要,因为在腐蚀介质中,不论钢的强度高低,其疲劳极限基本上相同,大约在12~14公斤/毫米²〔8〕。钎杆属典型的腐蚀疲劳,而在没有防腐措施的情况下,40MnMoV毛管仍然使钎杆具有较高使用寿命这一事实,说明强度的影响不应是主要的因素。至于曾在合金内管表面测得残余拉应力的现象也并不奇怪,因为40MnMoV毛管的内表面都存在一定深度的脱炭层。

对合金毛管强化机理认识不同,反映在生产上的技术措施也就有所不同。如铸锭时,合金毛管就有清洗与不清洗二种做法。不清洗的理由是,毛管表面存在大量氧化皮,阻碍了内管与基体的粘合,它们之间存在的间隙,将成为阻止内疲劳裂纹发展的鸿沟。其实,内管与基体不粘合,不但有益的残余压应力不能产生,而且造成基体内壁产生不同程度的脱炭(如图九),疲劳裂纹常起源于此,反而削弱了内孔的疲劳抗力。凿岩对比试验结果也说明,合金毛管与基体不粘合,内孔强化效果较差,内疲劳破断显著增加,经过清洗,粘合好,内孔得到较好强化,内疲劳就大为减少(见表二)。

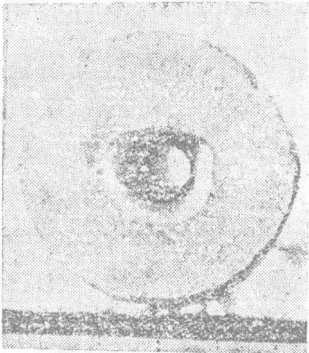


图九 内管未经清洗,基体脱炭情况300x

表 二

合全毛管表面状态	试验钎数(支)	内劳数(支)	外劳数(支)	平均寿命(米)
未经清洗	26	18	8	165
经过清洗	24	6	18	203

“钻孔加衬管热轧”的平均寿命之所以只有55米，其原因也是由于内管与基体没粘合，锻制领盘时很容易产生喇叭孔，钎杆便普遍地在领盘中部断裂（如图十），其断裂性质，均为内疲劳断裂。



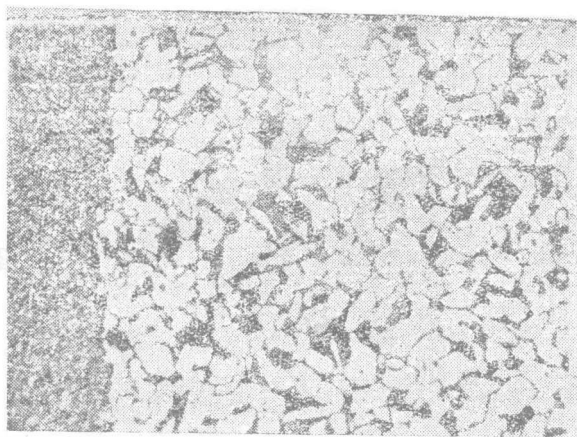
图十 钻孔+衬管的小钎杆领中断裂的喇叭口

上述事实说明，要使合金毛管对内孔能起到良好的强化作用，其材质必须是高淬透性的，钎杆正火后，内管大部分为马氏体组织的钢种为好。如用 42SiMn₂WMoV 钢毛管就比 40MnMoV 的寿命高且稳定。要充分发挥合全毛管的强化作用，毛管与基体应紧密粘合，管内壁不得有裂纹，钎杆的寿命才能稳定。

2、脱炭的有害影响

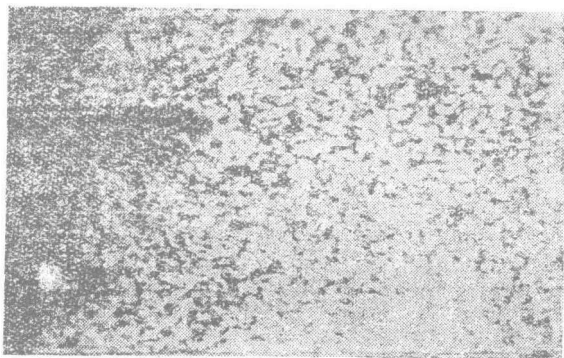
表面脱炭对疲劳寿命是极为有害的，钎杆也不例外，钎杆内孔的脱炭比外表面脱炭危害性更大。

多年来的大量试验都说明：以普炭管作内衬管的钎杆寿命最低，普管钎之所以寿命低，主要是内管相当于钎杆内孔存在严重脱炭层（如图十一），这层低炭组织不仅强度低，而且造成内孔处于不利的拉应力状态，严重削弱了内孔的疲劳抗力，所以寿命低，且百分百的内疲劳断裂。



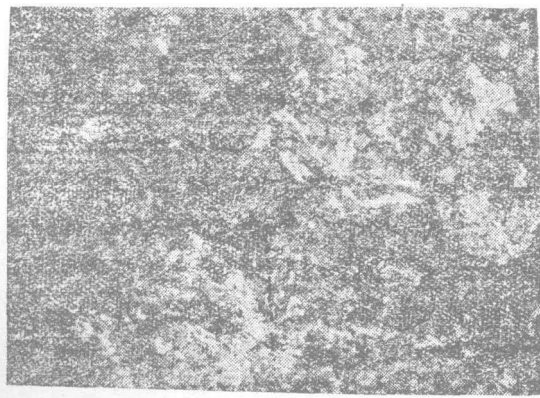
图十一 普管钎杆正火后的内管组织 300x

“热穿——热轧”和“热穿——冷拔”的钎杆寿命低，也是同内孔脱炭有关，它们都百分百内疲劳断裂。如热穿——冷拔钎杆，虽然内孔最为圆正，外形尺寸也最为规则，但由于冷拔制中间需经多次退火，造成内孔严重脱炭（见图十二），自然钎杆的寿命也就不高。



图十二 热穿——冷拔钎内孔脱炭情况300x

表一所列的“钻孔——热轧”组，系国外 95CrMo 成品钎，其凿岩寿命最高，其中一个



图十三 国外 95CrMo 小钎杆内孔组织 500x

重要原因是钎杆内孔基本上不存在脱炭层(见图十三),所以内孔没被削弱,而且实测钎杆内孔壁的残余应力为42公斤/毫米²压应力。

目前在国内的钎钢生产中,对于严格控制内孔脱炭的重要性认识还不足,这是今后进一步提高和稳定钎杆寿命必须注意的问题。

三、进一步提高冶金质量

通过合金管强化钎杆内孔,提高钎杆寿命,这是我国钎钢生产独具特色的新发展,但是铸管——热轧法必须采用小锭型,低温浇注,以防烫化管子,现在生产上一般是采用105公斤不带保温帽的小方锭,因此,钢锭内部便存在大量的夹杂、疏松缩孔等缺陷,轧制后依然保留在钎钢中。

钢中夹杂物和疏松的有害作用是肯定的,但是对钎杆寿命的影响有多大,却缺乏仔细的观察研究,甚至存在着不同看法。曾有人从循环韧性角度出发,认为疏松夹杂可以提高抗震性能,降低疲劳缺口敏感度,阻碍疲劳裂纹的发展,所以不但无害,而且有益。

疏松夹杂等肯定会削弱钢的强度,降低被劳极限,特别是对抗过负荷能力的损害更大,疲劳裂纹也常起源于这些缺陷尖角处〔3〕。

众所周知,疲劳对于表面缺陷是非常敏感的,表面状态对钎杆的疲劳强度影响很大〔9〕所以国外的钎钢生产,一直采取比较严格的技术措施。如采用大锭型,真空浇注,钢坯表面扒皮,钻除钢锭心部的疏松夹杂物等,轧材时采取可控气氛加热,防止表面脱炭,钎钢材质好,加之完善的制钎工艺,钎杆的寿命也就比较高和稳定。钻孔法之所以在国外成为长期的钎杆生产的主要方法,其冶金质量高,能保证钎杆高寿命则是个重要原因。

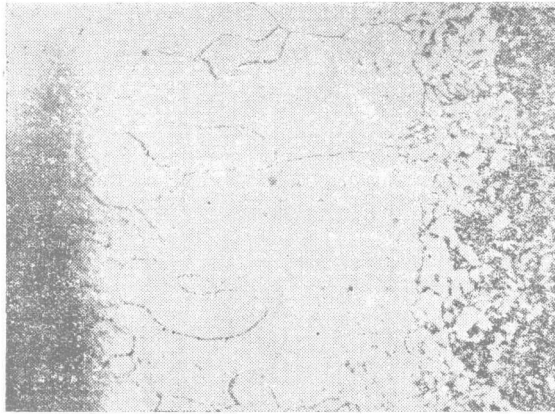
国产55SiMnMo小钎杆寿命之所以不稳定,与其冶金质量不高有着密切的关系,如不解决这个先天不足的因素,要想进一步提高和稳定小钎杆的寿命是困难的。

四、防腐与表面强化

钎杆多数是属于腐蚀疲劳破断,所以防腐是一种有效和重要的措施。瑞典SANDVIK钎子厂研究出磷化——挂腊处理保护内孔的方法,作为延长钎杆寿命的重要措施之一。而FA-GERSTA SECOROC钎子厂则声称该厂用不锈钢作内衬管,使钎杆的寿命大幅度提高。

钎杆防腐,主要在于内孔。防腐可以防止或延缓疲劳裂纹的产生和发展。但是,用于合金毛管的55SiMnMo小钎杆,防腐却看不出有明显的效果,只有对普碳管或内孔脱碳较严重的钎杆,才有延长钎杆寿命的良好效果。这种奇特的现象说明,合金毛管对内孔的强化,提高了钎杆的抗腐蚀疲劳能力,使钎杆原先较薄弱的环节,便由内孔转移到外表面。尤其是当外表脱炭较重时(如图十四),钎杆就更易产生外疲劳。当合金毛管钎进行表面强化时,防腐才能显出它延长寿命的作用,相反,表面强化对普管钎则看不出有明显的效果,因为钎杆最薄弱环节不在外表面而是在内孔。

所以,合金毛管钎杆的防腐处理,必须与外表面的强化措施相结合,才能收到提高钎杆使用寿命的良好效果。



图十四 小钎杆外表面严重脱炭组织300x

提高小钎杆寿命的途径还有许多方面,如锻钎,热处理以及正确使用等等,这些方面已在资料〔10〕作了较详细叙述。

参 考 文 献

- 〔1〕新抚钢厂、广东工学院、冶金部北京钢铁研究院协作组《55SiMnMo钢22六角小钎杆生产工艺初步探讨》“新金属材料”1976第二期。
- 〔2〕刘正义、林鼎文、黄振宗《55SiMnMo钢的上贝氏体形态及其机械性能》“华南工学学报”1979年第二期。
- 〔3〕刘正义等《55SiMnMo钢小钎杆断口初步分析》1980年1月“交流资料”。
- 〔4〕李承基《断裂力学在钎具(小钎杆)疲劳破断分析中的应用(二)“钎钢”1979年第三期。
- 〔5〕金属机械性能教材编写组《金属机械性能》P95~97(1975.2)
- 〔6〕B. B. ЭРМЛАВ.《ИЗВЕСТИЯ ВЫСШНИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГОРНЫЙ ЖУНАЛ》
- 〔7〕黎炳雄、洪达灵《钎钢内壁强化的初步研究》1979年“内部资料”。
- 〔8〕H. B. 托马晓夫《金属腐蚀及其保护的理论》中国工业出版社,1964年华保定,余伯年等译。
- 〔9〕内山道良、关不二雄“铁与钢”1956年8月P652~655。
- 〔10〕北京钢铁研究院,新抚钢厂,贵阳钢厂,广东工学院机械系《影响55SiMnMo小钎杆使用寿命的几个因素》,“广东工学院学报”1977年第一期。