

清 华 大 学

硕士学位论文摘要汇编

1 9 8 5

第二分册

微量稀土处理高炉铁水及其在钢锭模中的应用

铸 工 专业研究生 王昆林 指导教师 王遵明

高炉铁水直接浇注钢锭模, 由于具有节省能源、生产工艺简单和提高钢锭模使用寿命、降低模耗等优点而日益受到人们的重视。但由于其机械性能较低, “石墨漂浮”严重等原因, 影响钢锭模使用寿命的进一步提高, 妨碍了高炉铁水的普遍应用。根据我国灰口铸铁生产研究状况以及我校对少量稀土合金处理高炉铁水及其在钢锭模生产中的初步探讨, 国家科委于 1983 年下达了“微量稀土灰口铸铁和微量稀土处理高炉铁水的应用与研究”重点攻关课题。本研究是该课题的一部分, 采用少量稀土硅铁合金处理高炉铁水, 以提高其材质水平, 进一步提高高炉铁水钢锭模的使用寿命。这对我国丰富的稀土资源的推广应用, 改变我国灰铸铁的落后面貌, 提高经济效益, 都具有十分重要的意义。

本试验研究工作主要包括: 高炉铁水硅、锰之间最佳化学成分组合的研究; 微量稀土处理高炉铁水中, 稀土硅铁合金加入量与硅、锰成分间最佳组合的研究; 高炉铁水组织、性能特点的研究; 微量稀土处理不同硅、锰含量高炉铁水的效果, 稀土在高碳当量高炉铁水中作用的研究, 稀土高炉铁水的断面敏感性, 稀土高炉铁水的常温性能和高温性能的测定; 微量稀土高炉铁水钢锭模的生产试验及其使用寿命的标定, 稀土高炉铁水钢锭模的技术经济分析等。

研究表明: 高炉铁水的最佳化学成分分配比是: 碳 4.0%, 硅 1.6% (本钢硅 1.0%, 鞍钢硅 0.9%), 锰 1.0%, 磷 0.06%, 硫 0.03%。微量稀土处理高炉铁水的最佳成分组合是: 碳 4.0%, 硅 1.6% 左右, 锰 0.8%, 磷 0.06%, 硫 0.03%, 附加 0.25% 稀土硅铁合金 (含稀土 21.6%)。稀土和锰之间的关系是: 随着铁水含锰量的降低, 为了获得最佳孕育效果, 要加入较多的稀土合金, 反之, 含锰量增加, 可减少稀土合金的加入量。首钢、本钢和鞍钢高炉铁水组织、性能的共同特点是: 金相组织中石墨形态以 A + C + D 为主, 分布不均匀, 石墨片长度等级 3 ~ 5, 长度为 100 ~ 400 μm , 基体以珍珠体为主, 含量在 85% 左右, 同时含有少量铁素体, 共晶团数量在 200 个/ cm^2 左右, 机械性能中抗拉强度值较低, 为 9 ~ 15 kg/mm^2 , 布氏硬度值也较低, 为 110 ~ 150。微量稀土合金加入到不同硅、锰含量的高炉铁水中, 其抗拉强度 δ_b 值与稀土合金加入量间的关系均呈现“双峰值现象”, 这是稀土加入铁水后影响了铁水的凝固过程, 使其金相组织和机械性能发生了一系列变化的结果。微量稀土处理高炉铁水, 材质断面敏感性小, 具有良好的高温性能, 不仅保持了高炉铁水弹性模量低, 残留内应力小, 导热性能好等优点, 而且提高了它的高温抗拉强度, 是制造钢锭模的理想材料之一。稀土高炉铁水钢锭模的试验结果表明: 加入 0.25% 稀土硅铁合金 (含稀土 26 ~ 29%) 的钢锭

模与未加稀土的高炉铁水钢锭模比较,使用寿命从 66.12 次提高到 75.82 次,提高寿命 14.67%,模耗从 16.13 公斤/吨钢降低到 14.07 公斤/吨钢,模耗降低了 12.77%。按上述成果估算,首钢铸造厂正式投产后,仅用稀土硅铁合金处理高炉铁水生产钢锭模与高炉原铁水钢锭模相比,即可取得年 50 万元的经济效益。若能严格控制高炉铁水碳当量在 4.35~4.55% 范围内,在其它成分不变下,使用寿命还可有所提高,模耗进一步降低,取得更大的经济效益。

答辩日期:1985 年 2 月 11 日

高碳当量薄壁灰铸铁的孕育

铸工 专业研究生 曾效舒 指导教师 黄惠松

改善灰铸铁的机械性能一般可以用降低铁水碳当量,然后进行孕育处理的方法达到。也可以在铁水中加入合适的合金元素,提高灰铸铁的硬度和强度,或者耐热性,耐蚀性和耐磨性等。

降低铁水的碳当量需要加较多的废钢,这使熔炼温度升高,增加了熔炼时的困难。同时低碳当量铁水流动性差,凝固收缩增加,并造成产生应力的条件,增加铸件缺陷。加入合金元素于铁水中虽可使铸铁具有较高的机械性能和用于高碳当量铁水中能生产出具有高强度的薄壁铸件,但是由于合金元素稀缺,昂贵,同时要求铁水过热温度高,所以通常加入合金元素提高高碳当量铁水的机械性能是不经济的。

以往认为石墨化孕育只能提高亚共晶铸铁的机械性能,而对共晶或共晶成分的铸铁作用不大,但是用微量稀土硅铁合金对高碳当量铸铁的孕育明显地提高了强度。

为了弄清强度提高的原因,确定在冲天炉生产条件下用稀土硅铁孕育的最佳工艺规范,我们研究了不同稀土加入量对高碳当量和低碳当量铸铁性能和组织的影响。

在实验室中用不同量的稀土硅铁处理了模拟冲天炉几种不同碳当量的高硫铁水,检查了试样的性能,组织和白口倾向。并测试了比重。

试验结果表明用稀土硅铁处理碳当量小于 4.0%,4.0~4.2%,大于 4.3% 到 4.5% 的高硫铁水,当加入量为 0.15% 时,能显著地使低碳当量铸铁的 D 型石墨转变为 A 型石墨,使共晶团数提高 50~100 个/cm²。使高碳当量铸铁的平直,粗大的 A 型石墨转变成弯曲,较短的 A 型石墨,使共晶团数提高 100 个/cm² 左右、并且不会使基体中的铁素体增多。

对上述各碳当量成分的铸铁,使抗拉强度最高时的稀土硅铁加入量不一样。低碳当量条件下,加入 0.2~0.7%,提高抗拉强度 5~8 kg/mm²。中碳当量条件下,加入 0.4% 左右,提高抗拉强度 2~4 kg/mm²。高碳当量条件下,加入 0.4~0.8%,提高

抗拉强度 $2-3 \text{ kg/mm}^2$ 。稀土灰铸铁的抗拉强度与原铁水的 C/Si 和含硫量有关。当碳当量为 $3.8\sim 4.2\%$ 时, C/Si 在附近时, 抗拉强度高。当碳当量为 $4.2\sim 4.4\%$ 时, C/Si 在 2.6 时比小于 2.6 时的抗拉强度高。在相同稀土硅铁加入量条件下, 提高低硫铸铁的抗拉强度的幅度比高硫铸铁的大。

微量稀土硅铁孕育有很强的去白口能力。对于上述不同碳当量成分的铁水, 加入量仅为 0.15% 时, 能完全消除阶梯试样 3mm 壁厚处的共晶渗碳体。但是加入量过多时, 则使共晶渗碳体增加。

当加入 0.1% 左右的稀土硅铁时, 能提高铸铁的比重。

用稀土硅铁处理冲天炉高碳当量高硫铁水生产了大量暖汽片。暖汽片是薄壁铸件, 最薄处为 2.5mm 左右。未用稀土硅处理的铁水生产的暖汽片材质差, 抗拉强度低, 保证工作压力为 4kg/cm^2 。但是由于新建工程中高层建筑逐渐增多, 要求提供承压较高, 保证工作压力 6kg/cm^2 以上的暖汽片。为此, 进行了稀土灰铸铁生产暖汽片的实验和试生产。

生产实验证明稀土灰铸铁比原铁水的抗拉强度高 $2-3.5\text{g/kmm}^2$ 。出厂暖汽片可保证工作压力 8kg/cm^2 以上。用稀土灰铸铁生产的高压暖汽片已开始应用于高层建筑。

答辩日期: 1985 年 5 月 13 日

烧结型醇基铸铁涂料研究

铸 造 专业研究生 张 平 指导教师 于震宗

本研究对醇基铸铁涂料的悬浮稳定剂、若干常温性能, 耐火填料以及高温抗激热开裂性能等进行了较为全面的试验研究, 找到了新的悬浮稳定剂和耐火填料体系, 运用了新的检测方法和装置, 在对醇基涂料各种性能的影响因素进行分析的基础上, 给出了控制及改善的措施。

悬浮剂是铸造涂料的重要组元之一。本研究对可能被用作醇基涂料悬浮稳定剂的材料进行了试验。

采用悬浮性、引发性和分散性为指标, 对国内主要有有机膨润土产品及其引发剂进行了比较和筛选, 推荐临安有机土 (YJ-4) 等 3 种有机土作为醇基铸造涂料的悬涂剂而醇酸稀料等液体为引发剂, 同时提出了有机膨润土浆的配制工艺及参数。提出了用 OT (双十八烷基二甲基氯化铵) 为有机处理剂, 直接制备有机土的具体工艺及参数, 并以悬浮稳定性为指标, 对 11 种有代表性的用直接法制备的有机膨润土进行了比较, 筛选出黑山钠质土 (17-4) 等 5 种悬浮性较好的膨润土的推荐品种。

钠质膨润土是水基涂料常用的悬浮剂, 不能直接用于醇基涂料, 但此类膨润土与水形成的胶体, 尽管遇到乙醇时会产生絮凝, 然而仍有相当程度的分散性和悬浮性。试验

结果表明,经适当活化和充分水化的钠质和锂质膨润土浆,都可以用作醇基涂料的悬浮剂,锂质膨润土浆效果更佳。另外,还以悬浮稳定性为指标对几十种膨润土进行了筛选。推荐镇江土(8—9)等6种膨润土为适于制成钠质润土浆的品种;推荐凌源土(17—10)等5种膨润土为适于制成锂质膨润土浆的品种,同时提出了配制工艺及其参数。

在合理使用下,上述四类悬浮剂都可基本满足醇基铸造涂料的要求。

醇基涂料以醇类为溶剂,故与水基涂料性能及其检测方法有明显区别,如在流变性方面等,而溶剂渗失和点燃起泡则是醇基涂料独有的问题。

在对多种检测方法进行了试用对比后,提出了检测醇基涂料溶剂渗失性的方法——盛砂玻璃管法,并运用此法对醇基涂料中各组元在溶剂渗失上的作用进行了较系统的研究。经过对50种不同醇基涂料的测试,证明盛砂玻璃管法是可行的,具有较灵敏、复现性好、操作简便等特点,同时指出采用有机膨润土悬浮剂以及适当增加聚乙烯醇缩丁醛等的加入量,有利于减少溶剂渗失量,从而改善涂料的涂敷性能。另外,对渗失机理及其影响因素进行了讨论。

在确定了点燃起泡的检测方法和评级标准后,对40种不同的醇基涂料进行了测试,得到了涂料各组元对点燃起泡的影响,并以减弱燃烧,控制成(泡)膜和提高型(芯)透气性等方面提出了减少乃至消除起泡的措施。以讨论方式分析了点燃起泡发生的机理。

醇基涂料在使用粘度,固液比,溶剂性质及涂敷与干燥方法上与水基涂料不同,不宜盲目挪用水基涂料的流变模式。在对33种各具不同特点的涂料进行了数原模拟式的选择试验后,根据计算机处理结果,认为滨汉模式可以做为使用粘度下醇基铸造涂料流变曲线的模拟模式,相关系数超过0.99。有了合适的流变模式,可更简便地得到涂料的流变曲线及流变变数。

耐火填料是铸造涂料防粘砂等缺陷的关键组元。长期以来,铸铁涂料多以石墨粉等外烧型材料作为填料,故一直存在石墨粉粘附于铸件表面形成粘灰和石墨灰严重污染环境时问题。浅色烧型铸铁涂料是解决上述问题的有效措施。

根据烧型铸铁涂料的特点及陶瓷物理化学的理论,详尽讨论了上述涂料使用的条件及烧型的机理,提出了烧结点试验和模拟浇注试验的方法,指出耐火填料起始烧结温度和烧结温度范围两个概念对烧结温度和烧结温度范围两个概念对烧型涂料研制有十分重要的意义,因为它们与涂料的烧结情况是对应的。发现了几种有效的烧型涂料脱壳剂。详细探讨了影响烧结试验结果的因素,铸件烧注时涂层烧结成壳的机理和脱壳的机理。

本研究提出了长石粉烧型耐火填料体系并使用新的试验方法,从几百个配方中得到了在工厂较大批量生产试验中取得良好效果的涂料配方。其中CL—2配方为长石—铝矾土二元白色烧型涂料,DS系列配方为长石铝矾土—滑石三元白色烧型涂料,它们的成本与石墨粉涂料相当,但浇注结果更好,可替代石墨粉涂料用于铸铁中小件生产。DS系列三元烧型铸铁涂料具有较好的适应性和可调整性,可望在更广的范围内得到应用。

抗激热开裂性能是涂料重要的高温性能之一。本研究改进了激热试验的方法,并对

十几种不同的涂料进行了试验,研究了影响涂层激热开裂的因素,指出可采取加高温粘结剂的方法改进涂料的抗激热开裂性能。

答辩日期: 1985 年 5 月 23 日

熔模铸造用耐火计分料的粒度研究

铸造专业研究生: 贾小黎 导师: 于震宗

世界上熔模铸件正向“高、精、广”方向发展。我国民用熔模铸件,无论是精度还是表面光洁度,与国际水平都有较大差距。熔模铸造是一个多工序生产过程,但模壳质量是影响铸件质量的关键。研究表明,熔模铸造涂料用耐火粉料(以下简称)的粒度组成,对于涂料、型壳和铸件的表面质量都有重大影响。目前,由于国内粉料粒度的检测方法的问題,不能有效地控制粉料的粒度状况,其质量很不稳定,直接影响到精铸生产和铸件质量。因此,粉料粒度问題已成为国内熔模铸造行业急待解决的课题之一。

用沉降天平测定粉料的粒度分布,其测定原理与涂料流体动力学特征接近,所用设备及操作较简单,结果具有代表性和重现性好的边点。但由于传统的图研法处理沉降曲线,费工费时,误差大,妨碍了该方法的应用。本文:分析了现有几种对沉降曲线进行数据处理的方法,根据沉降曲线的特点,建立了多参数分段拟合的新数学模型。该模型不仅具有较高的拟合精度,而且能适用于各类型沉降曲线。该法大大减少了沉降曲线处理的时间,提高了检测结果的精度;同时为扩大沉降天平的使用和技术改造创造了条件。

在国产 TZC—2 型自动记录颗粒测定仪的基础上,配备 Z80 单板机和接口控制盒 9 组成智能化的新沉降天平。该仪器由计算机自动采集沉降信息,运用 SJ 法,对数据进行处理,计算并打印出粉料的粒度分布及有关系数。新仪器使沉降天平的优点得到进一步发挥;实现了从数据采集、数据处理及检测过程的自动化,为有效地检测和控制粉料的粒度组成打下基础。

对于沉降检测中易出现的沉降曲线失真现象,本文提出系数准则法,指导检测者较快地选定沉降介质浓度以防止失真现象。

运用上述成果,定量地、系统地检测了国内有代表性厂家的 60 余种石英粉料及 30 余种人工淘洗粉、人工级配粉的粒度分布及其有关性能。借助计算机,对涂料性能和粒度分布间的关系进行了回归处理,提出衡量精铸用粉粒度分布的四项指标:重量平均粒径 D_{NL} , 重量分布均方差 Q_{NL} , 紧实密度 ρ_j 和 100 克粉的总表面积 S ; 同时给出了精铸用较好粉料四项指标的具体范围: $D_{NL} = 30 \pm 5 \mu\text{m}$, $Q_{NL} > 15.0$, $\rho_j > 1.36 \text{g/cm}^3$, $S = 2 \sim 25 \text{M}^2$, 并探讨了粉料粒度分布和涂料工艺性能的关系。涂料粘度主要和粉料的分散程度有关;粉料越分散或镶嵌越好,则粘度越小。小于 $20 \mu\text{m}$,特别是小于 $10 \mu\text{m}$

的粉,对涂片重影响很大。在此基础上,经大量试验,定量的研究了精铸用较佳粉料的粒度分布。人工级配是获得性能较稳定,质量较好粉料的重要途径之一。论文首次指出人工级配中粘度的存在,并提出人工级配粉的原则。论文指出,粉料的粒度分布,不仅影响涂料性能,更重要的是影响铸件表面质量,尤其是铸件表面光洁度。采用人工级配粉,可明显提高涂粉液比,改善铸件表面光洁度。

将研制出的较好粉用于北京内燃机总厂精铸分厂,经半年的生产实践,证明该粉能大幅度地提高涂料的粉液比(1:1.3~1.45);涂料性能稳定,便于控制,使铸件表面光洁度提高了一级。

粉料的现场控制手段,必须具备设备简单,重现性好,便于操作,适于现场用应,检测迅速等特点。结合我国具体情况,参考粉末冶金行业经验,经过试验和摸索,提出通过检测粉料工艺性能:紧实密度 ρ_j 和松装密度 ρ_s ,迅速、半定量地鉴别石英粉粒度分布状况和粗细的新方法。该方法可以作为精铸用石英粉生产厂和使用厂控制粉料粒度的一种简易方法。

答辩日期:1985年10月26日

小辊模顶拔工艺力能参数研究

压力加工专业研究生 杜学刚 指导教师 陆其仁、叶庆荣

目前在实际钢瓶顶拔工艺中应用的辊模都是大辊模,研究工作也都是针对大辊模进行的。所谓大辊模一般有3~4个辊子,辊子直径约等于或大于杯坯直径。这样,辊模直径就要达到杯坯直径的3~4倍,辊模宽度则基本与杯坯直径相等。这种模具体积大,造价高。如果要减小辊子直径及模具尺寸,则将受到辊模结构的限制。

小辊模是一种新型模具。它外形尺寸小,结构简单,加工容易,成本低廉,可直接取代环模而不需更新设备。本文对小辊模顶拔工艺的力能参数进行了理论分析和实验研究。

本文首先以实验为依据,对顶拔过程变形区的边界条件作出了较为接近实际的假设,并推导了顶拔过程力参数的计算公式。得到单位压力为:

$$p = \frac{2k}{\delta_a} \cdot \left[\left(1 + \delta_a \cdot \frac{p_c}{2k} \right) \left(\frac{h}{h_c} \right)^{\delta_a} - 1 \right] \quad h_a \leq h < h_c$$

$$p = p_d \cdot \left\{ 1 + \delta_n \cdot \left[(\mu_2 h_d - \mu_1 h_n - \mu_2 h_n) \cdot \ln \frac{h_d}{n} + \mu_1 (h_d - h) \right] \right\} - 2k \ln \frac{h_d}{n} \quad h_c \leq h < h_d$$

$$p = \frac{2k}{\delta_b} \left\{ \left[1 + \delta_b \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{2k} \right) \right] \cdot \left(\frac{h}{h_b} \right)^{\delta_b} - 1 \right\} \quad h_d \leq h \leq h_b$$

其中:
$$p_c = p_d \cdot \left\{ 1 + \delta_n \cdot (\mu_2 h_d - \mu_1 h_n - \mu_2 h_n) \cdot \ln \frac{h_d}{h_c} + \mu_1 (h_d - h_c) \right\} - 2k \cdot \ln \frac{h_d}{h_c}$$

$$p_d = \frac{2k}{\delta_b} \left\{ \left[1 + \delta_b \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{xb}}{2k} \right) \right] \cdot \left(\frac{h_d}{h_b} \right)^{\delta_b} - 1 \right\}$$

$$\delta_a = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2}} \quad \delta_b = -\frac{\mu_1 + \mu_2}{\operatorname{tg} \frac{\alpha_d + \alpha_b}{2}} \quad \delta_n = \frac{1}{(h_d - h_n) \operatorname{tg} \frac{\alpha_c + \alpha_d}{2}}$$

μ_1 为辊子表面摩擦系数, μ_2 为芯棒表面摩擦系数, h_c 、 h_d 、 h_n 分别为 C 点、D 点及分流点 n 的壁厚, h_d 为入口处壁厚, h_o 为出口处壁厚。

顶推力为:

$$Q_d = 2k \cdot \pi \cdot D \cdot h_d \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\delta_a} + \frac{p_c}{2k} \right) \cdot \left(\frac{h_a}{h_c} \right)^{\delta_a} + \frac{1}{\delta_a} \right] + \mu_2 \cdot \bar{p} \cdot \pi \cdot d \cdot l \\ + 1 \cdot 1 \cdot \mu_2 \cdot \delta_s \cdot \pi \cdot d \cdot (L - l) \ln \left(\frac{2h_a}{d} + 1 \right)$$

其中: D 为平均中径, d 为芯棒直径, L 为顶拔长度, l 为变形区长度, $\bar{p}$ 为平均单位压力。

应用所推导的公式, 由计算机计算并绘出了一系列曲线, 分析了各工艺参数对顶拔过程力参数的影响。分析表明: 辊子半径, 变形量, 后张力以及芯棒与杯坯接触表面摩擦系数对顶拔过程的力参数影响比较明显, 辊子与杯坯接触表面的摩擦系数对顶拔过程力参数影响不大。

运用本文推导的公式, 可以在已知工艺参数情况下预测能否实现稳定的顶拔过程, 不产生轧出现象; 或者, 应用这些理论分析, 可以在制定或设计辊模顶拔工艺过程时合理选择工艺参数。因此, 对工厂生产有一定的指导作用。

其次, 本文对小辊模顶拔的力能参数进行了实验研究, 运用电测法对辊子受力, 顶推力, 前张力, 单位压力及单位摩擦力进行了测试。并将顶推力曲线数值积分, 得到了能耗曲线, 对设备能耗进行了一些分析。实验得到的结果与理论分析的论断基本吻合。

最后, 本文着重对小辊模顶拔的特点进行了分析。将小辊模顶拔与大辊模顶拔及环顶拔的力参数进行了比较, 发现:

(1) 在相同变形程度下小辊模顶拔时的顶推力与大辊模顶拔时相差不多。

(2) 在相同变形程度下, 小辊模顶拔时的顶推力比环模顶拔时有所下降, 并且延伸率愈大时这种差别愈明显。当延伸率大于 1.2 时, 小辊模顶推力比环模下降了 12% 以上。这样, 由于顶推力的下降, 在顶拔相同变形程度, 相同长度的杯坯时所消耗的能量也要下降, 可以降低产品成本, 或在相同设备参数条件下提高变形程度。

(3) 小辊模顶拔时, 模具受力比大辊模顶拔有大幅度下降, 下降幅度在 50% 以上, 这就可以节约模具材料, 降低模具造价。

(4) 无后张力顶拔时, 小辊模顶拔的前张力比大辊模顶拔时略有上升; 带后张力顶

拔时,小辊模顶拔的前张力比大辊模顶拔时略有下降。

本文对小辊模顶拔时的变形也进行了一些探讨。小辊模顶拔时,压下量沿周界分布不均匀性随着辊子数目的增多而减小,在辊子数目 $n > 12$ 后这种减小便不很明显,因此,辊子数目 12 取个比较合适。小辊模顶拔时,金属不仅有径向流动,而且还有轴向流动和切向流动。金属的轴向流动沿模断面的分布是不均匀的,每边对称点处速度最大,边缘处速度最小。当延伸率很大时杯坯角隙处出现凸棱,影响后续工序的加工。因此推荐延伸率可大于 1.3,最大不超过 1.4。

小辊模简化了结构,节约了加工制造费用。如果工厂在将环模顶拔改为辊模顶拔时采用小辊模,可直接使用现有设备,节约大量基建投资。

由此得出结论:小辊模顶拔在力能,变形和结构等方面都有很多优点。而且投资小,见效快,值得发展与推广。

小辊模是国内首次出现的新事物,国际上也未见有资料报导。它已表现出了很大的优越性与很强的生命力。当然小辊模顶拔工艺在理论上和实践上还有待于今后进一步研究发展。

答辩日期:1985 年 3 月 18 日

用云纹研究轴对称挤压

压力加工专业研究生 肖 颖 指导教师 曹起骧 叶绍英

挤压工艺是金属成形的一个重要方面,可生产棒材,管材及各种复杂断面形状的型材,广泛应用于工业、农业、国防、民用等部门。对挤压工艺虽已进行过较多的研究,但目前国内挤压制品中仍存在不少缺陷,如表面裂纹、粗晶,扭曲等以及模具的磨损,开裂,致使成材率和模具寿命均低于国外,本论文综述了国内外挤压工艺的研究现状和一些常用的理论、实验方法及存在的问题。

密栅云纹法 (*Moire Method*) 是一种较新的实验应力分析方法,在研究塑性成形工艺方面有其独特的优越性。用云纹法研究挤压过程从 70 年代中开始,前人已积累了一些研究成果,但大多限于平面挤压问题,特别是用光电扫描云纹法测量挤压筒壁上的接触应力和摩擦分布规律则尚无先例。

本文用光电扫描云纹法与塑性理论相结合,分析了实心圆棒料的正挤压过程,得到了变形体内部的位移速度场,应变速度场,应力场及挤压筒壁上的接触应力分布,为合理设计工艺过程和模具提供了科学依据,

在应力应变的分析中,将变形区分成了 A、B、C 三个区。可以看到,这三区内金属的应力应变状态有所不同,同时,由应力场可以看到,在变形区内的绝大部分区域,金属受三向压应力,这是挤压过程的特点之一,根据实验结果,本文对轴对称分析中常用的

$\sigma_\theta = \sigma_R$ 的假设作了分析, 表明对于轴对称挤压问题, 这种假设是不合适的。

金属挤压过程中, 挤压筒壁要承受相当高的工作内压和交变应力, 同时还承受很大的接触摩擦, 许多研究工作者进行大量的研究工作, 主要采用的是“压力销”法“弹性元件法”及“间接方法”, 这些方法虽各有特点, 但也存在不少缺点, 本文所采用的光电扫描云纹法具有 1) 不需要设计专门的实验装置, 实验简便且经济, 2) 可以同时得到内部应力应变分布及接触面上的应力分布, 3) 可以在实物上进行, 4) 测点多, 便于总结规律等优点。挤压筒壁上的接触应力与(1)润滑条件, (2)金属流动速度, (3)金属的流动极限 σ_s 及表层金属的变形硬化程度, (4)工具形状, (5)正压力大小, (6)工具的表面光洁度等因素有复杂的关系。本实验只有(1), (4), (5)三因素是变化的, 其他保持稳定。用光电扫描云纹法得出了不同工艺条件下挤压筒壁上的接触正压力 q 和剪应力 τ 及 τ 与 q 的初步关系曲线。实验结果表明, 在不同的接触变形区段, q 与 τ 的关系不同。当 q 较小时 ($q < 3.4\sigma_s$), τ 值随 q 的增大而上升, τ 与 q 接近库仑定律 $\tau = \mu q$ ($\mu = 228$); 当 q 增大到一定值时 ($q \geq 4.5$), τ 不再变化, 保持为常数,

(本实验中 $\tau = K$); 在这两个阶段中存在一过渡区, τ 与 q 成一定关系。本文还就润滑条件, 变形程度一凹模角度对接触应力的影响作了定量分析。

本文中, 也对工艺条件对挤压力及应力应变分布的影响作了定量讨论。实验结果表明随着润滑条件的恶化, 变形程度的提高及凹模角度的增大 1) 金属的流动不均匀性增大, 2) 挤压力上升, 3) 变形体内部的静水压力增大, 4) 凹模角部的刚性区增大, 5) 凹模出口边缘角部区域的 $\bar{q}_t$ 及其变化梯度增大。其中接触摩擦的改变对挤压过程的影响最为明显。如当润滑条件由 M_0S_2 变为干摩擦时, 挤压力上升了 68.5%; 而其中直接由外摩擦引起的占 74%, 因此, 从力能消耗和变形均匀性的角度来看, 降低接触摩擦是有利的, 因此研究适合于不同金属挤压的润滑剂和工具表面涂层是重要的研究课题。

对于挤压制品常见的粗晶及表面裂纹等缺陷, 本文作了一些初步讨论, 认为与激烈变形区 C 的存在有很大关系。如果能减小 C 区特别是凹模出口角部区域的 ε_t 值及其变化梯度, 如出口处采用小圆过渡等, 将会减小产生上述缺陷的可能性。

由于挤压变形很不均匀, 因而云纹图形复杂。云纹的变化不仅表现在密度上, 且也表现在方向上。为解决以上困难, 本文在数据的采集及处理方法上作了很多尝试, 得出了适合于挤压过程云纹数据采集及处理方法; 为了准确而迅速地处理实验数据, 编制了计算机程序 (MCE), 可以得出变形体内部的位移速度场, 应变速度场及应力场和边界接触应力等物理参量。本文对实验精度用三种方法进行了校核, 误差均在 10% 以下, 表明是满足工程要求的。

答辩日期: 1985 年 6 月 6 日

制动器发热的研究与优化设计

压力加工专业研究生 毕庶信 指导教师 杨津光、何德誉

一、引言

离合器—制动器在工作过程中存在着严重的发热问题，这个问题使压力机不能正常工作，发热的危害主要表现在：① 使摩擦块磨损量增加，增加了维修费用，降低了生产率；② 使制动角增大，压力机的寸动不好；③ 使轴承膨胀，不能正常工作；④ 使摩擦盘断裂破坏。解决这个问题的关键在于准确地计算发热温度的情况下，了解各种因素对发热的影响，找出影响发热的主要原因，改进传统的设计方案。显然，解决了这个问题，不仅使压机的可靠性和生产率有较大提高，而且在经过优化设计以后，寿命会有较大增加，维修费用会进一步降低，这对于现代化的机械生产无疑具有重要意义。

二、摩擦制动器发热温升的理论分析

无论是对于镶块式制动器，还是片式制动器，在工作过程中都存在一个瞬时温升过程和体积温升过程，体积温度随制动器工作的延长连续上升，到某一阶段后由于散热平衡而趋于稳定。而瞬时温升则随每次制动过程有一定的升降，这个升降差是瞬时温升，每次制动的瞬时温升基本是相同的。

1. 摩擦镶块式制动器的体积温升和瞬态温升分析

制动器发热就在于每次离合器脱开后全部制动热几乎全部转化为热能，为摩擦盘表面所吸收使之温度升高，在经过假设和简化以后，引出付立叶方程：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

利用有限差分方法，可以对摩擦盘内任一时刻，任一位置的温度进行计算。为此，编制了计算瞬时温升和体积温升的程序。用户只要将制动器的有关数据输入进去，很快就可以得到制动器的温升曲线，在计算瞬时温升和体积温升时，最主要的区别就在于热流不同，体积温升的计算用制动器 n 个工作周期的平均值：

$$q = \frac{\eta C_n J \omega_o^2}{240 F}$$

在计算瞬时温升时，则用制动过程中的实际值

$$q = - \frac{A}{2FK_1} \left(\frac{A}{(1+X)J} t^{2x+1} - \omega_o t^x \right)$$

2. 摩擦片式制动器的体积温升和瞬态温升分析

与镶块式制动器不同的是：摩擦片式制动器有多片，而且有主动片，从动片之分，所以热量应根据主动片材料和从动片材料的热物理特性分配。此外，片式制动器在研究过

程中如果单独抽出一片来研究,可以发现,它是两边散热,两边吸热,而不象块式制动器的摩擦盘一边吸放热,一边与空气自由对流换热。

根据以上区别,可以容易地根据付立叶方程导出求解片式制动器发热的公式,所编写的温升程序参阅正文附录4。

三、实验装置和测试方法

为了了解制动器的发热特性,并检验理论计算是否正确,在J31—160闭式单点压力机的离合器—制动器实验台上进行了温升实验。实验中测量了制动角、制动功,瞬时温度和体积温度。制动角与制动功的测量采用遥测应变仪和示波器传统方法进行,现将体积温升和瞬时温升的测试方法叙述如下:

1. 平均体积温升的测量

测试元件用镍铬镍铝热电偶,测试仪器用电位差计,根据每一时刻测出的毫伏数,查热电偶分度表,即可得到在不同时刻测点的温度。

2. 瞬时温升测试

瞬时温升过程很短,一般只有 $0.1\sim 0.2S$,为了准确地测出在这样短的时间内温度的变化,专门设计了ABC1210数据采集电路,并编制了专门的软件,分述如下:

1) 硬件:本电路采用12位精度ABC1210转换芯片,与多路开关CD4052相联,因此能同时进行多路采集,放大器采用频带宽,精度高稳定性好的输入输出相隔离的SF—80放大器经过组装以后,本电路以 $250KHZ$ 的频率运行,每次转换时间为 $48\mu S$ 。如果有必要,本电路还可以以 $500KHZ$, $24\mu s$ 的速度采集数据。

2) 软件:上述电路配备了 $0.5K$ 字节的汇编程序。本程序首先进行多路数据的采集。然后进行 $20ms$ 延时。在数据采集完以后,调用16进制除法程序求出温度然后将十六进制调整成十进制,程序最后自动将采集数据按四位整数,两位小数打印输出。

瞬时温升的测试设计了一套专用装置将EU—2型镍铬镍铝铠装热电偶直接镶在制动盘的表面上,即使热电偶接受周围的热流,又使其参与摩擦。

3. 测试的误差分析

体积温升的测试存在仪器误差,热电偶本身的制造误差和现场静电感应误差;瞬时温升测试存在单板机的软硬件误差,热电偶装置的误差,电源及现场的静电干扰误差等,所有这些误差经过分析,或者可以忽略,或者可以排除。因此,测试结果是可信的。

四、理论与实验结果的比较及各种因素对温升的影响

1. 体积温升的测试和理论计算结果

为了尽可能全面地反映各种因素对制动器发热的影响,共设计了九组实验,分别改变了转动惯量、摩擦块数目、结合次数、比压间隙等对制动器温升的影响。通过画出各组实验的理论和实验曲线可以看出:① 体积温升曲线一般呈抛物线型,在四个小时左右达到稳定;② 理论计算与实验结果吻合较好;③ 对温升影响较大的分别为转速,转动惯量、结合次数等。而比压及摩擦数目却几乎没有影响。

2. 瞬时温升的理论计算和实验结果

根据绘制的曲线可以看出, 理论结果与实验数据吻合较好。证明本文所采用的一系列计算公式是正确的。此外, 通过计算机模拟计算可以发现: 实际接触面积和制动时间对瞬时温升有巨大影响, 在制动器的设计和制造中必须予以充分关注。

五、制动器的优化设计

无论是考虑摩擦块的磨损特性, 还是轴承的工作温度, 都需要使制动器在小于某一个温度的范围内工作。论文的前几部分找到了计算体积温度和瞬时温度的方法使对制动器以瞬时温升为目标函数的优化设计为可能。

在优化设计选择了制动器摩擦盘的内、外径、重叠系数转速为设计变量, 以制动角和体积温度为稳式约束函数进行优化设计。优化中保证体积温度小于某一限值, 这一上限值应考虑到轴承的工作温度以及摩擦材料的临界温度, 在此基础上使瞬时温度最小。

优化程序采用复合形法, 复合形法是在非线性约束条件的 n 维空间内, 取 $2n$ 个顶点构成复形, 然后对复合形的多顶点函数值逐一进行比较, 不断地丢掉坏点, 逐次向最优优点。

本优化程序用于对任意压力的镶块式制动器进行优化, 并具有检验功能, 程序即可以由用户提供一个初始点, 也可以由计算机自动产生, 输出时用户可以有可行解、次优解、最优解三部分选择。

优化设计程序有十二个子程序。论文中写明了各子程序的功能, 并附有优化设计总框图和程序调用关系图。论文中也详细地给出了数据的输入输出说明, 并附有两个算例。

六、结论

论文对摩擦制动器采用现代数值方法先进的测试手段进行了计算和测试, 结果令人满意, 论文在实验的基础上, 分析了各种因素对发热的影响, 对减小发热, 提出了新的看法。以减小发热为目标的优化设计程序通过两个算例的验证说明: 运行可靠, 功能较强, 可以在生产设计中运用。

答辩日期: 1985. 年 9 月 25 日

LT50 钢焊接热影响区氢致延迟裂纹的研究

焊接专业研究生 曾小明 指导教师 罗志昌 田 燕

多年来人们对焊接热影响区的氢致延迟裂纹进行了大量的研究。从解决一般的生产性问题, 对宏观分析产生氢致延迟裂纹的原因, 已解决了某些问题, 有相当的进展。然而从探讨产生氢致延迟裂纹的实质, 或从微观的裂纹行为的机理方面仍处于发展阶段。

本文采用拉伸试验、三点弯曲试样裂纹开裂和扩展的动态观察试验,三点弯曲试样裂纹开裂时的临界应变值的测试以及恒位移紧凑拉伸试验等试验方法,在热模拟电解充氢的条件下和焊接条件下,对 LT50 钢和对比材料 30CrMo 钢氢致延迟裂纹的行为和形成机理进行了较深入的研究。主要研究内容包括:氢对低合金高强钢机械性能的影响;氢致裂纹的开裂扩展的动态行为;氢致裂纹开裂和扩展与滑移变形和显微组织的关系;氢和显微组织对裂纹开裂时的临界应变值 ϵ_{cr} 的影响以及氢对临界应力强度因子门槛值和裂纹扩展速率的影响。并讨论了硫化物对氢致裂纹行为的影响和氢致延迟裂纹的形成机理,提出了一个氢致准解理开裂模型的设想。

实验表明,LT50 钢氢致延迟裂纹的开裂和扩展与滑移变形和显微组织有关,一般情况下,微裂纹是在滑移变形最大的地方沿着滑移线的方向形成,常沿板条开裂。然后微裂纹与主裂纹之间以穿板条和阶梯沿板条的形式连接,裂纹的扩展是不连续的。裂纹以锯齿形的轨迹向前扩展,裂纹的扩展速率随扩散氢含量的增加而增加。氢致延迟裂纹的断口是典型的氢致准解理开裂的断口,裂纹的开裂与塑性变形息息相关。当材料发生屈服之后才能发生氢致准解理开裂,当试样的扩散氢含量大于 0.7ml/100g 的数值时,拉伸试样的断裂模式要发生转变,由完全是韧窝形式的断裂转化为韧窝加准解理形式的断裂。氢促使 LT50 钢发生准解理开裂是出现宏观氢脆现象的主要原因。

本文通过 LT50 钢研究了氢致准解理开裂的本质。结果表明,氢对低合金高强钢的屈服强度没有明显的影响,氢的引入大幅度地降低了材料的延伸率和断面收缩率。氢致开裂的临界应变值 ϵ_{cr} 随试样维化硬度的增加而下降,随扩散氢含量的增加而下降。从断裂力学推出裂纹开裂的微观参数 ϵ_{cr} 与临界应力强度因子门槛值 $K + h$ 存在着 $\epsilon_{cr} \propto K_{+h}^{\frac{2}{1+h}}$ 的关系,由于 $K + h$ 随扩散氢含量的增加而下降, ϵ_{cr} 表明随扩散氢含量的增加而下降。因此从宏观氢脆现是和微观氢脆现象都说明氢不是促进塑性变形而是降低了材料的塑性变形能力,氢是致脆而不是致塑。

关于氢致滞后塑性变形现象,本文通过实验证明,氢致裂纹在试样内部起裂,氢致滞后塑性变形与裂纹在试样厚度方向上呈指甲状分布有关,是氢致裂纹在试样内部的延迟扩展造成的。并给出了表面八字变形带形成过程的示意图。氢致滞后塑性变形不是氢致裂纹开裂的充分必要条件。从裂纹开裂的应变判据 $\epsilon < \epsilon_{cr}$ 的条件来看,强调氢使 ϵ_{cr} 下降更符合试验事实。

本文对氢致准解理开裂的断口采用腐坑抗法腐蚀断口表面发现氢致准解理断口的晶体学平面是 (110) 滑移面,氢致准解理开裂是滑移面和氢的相互作用之下出现的。根据 J.K.Tien 的观点,位错的运动对氢的输送比氢的浓度扩散更为有效。因此可以认为,位错的运动对氢的输送造成了氢在 (110) 滑移面的聚集,促进了裂纹沿 (110) 滑移面的开裂。并给出了氢致裂纹沿 (110) 滑移面开裂过程的示意图。

综上所述:氢致准解理开裂的临界条件是临界应变条件和临界氢浓度条件,氢致脆而不是致塑,位错的运动造成了氢在 (110) 滑移面的聚集,并在位错塞集的地方形成 (110) 滑移面的微裂纹,使裂纹沿 (110) 滑移面开裂。

此外,本文对 LT50 钢氢致裂纹的研究表明,氢对 LT50 钢硫化物的敏感性随试

样扩散氢含量的不同而表现出不同的规律,充氢电流密度为 $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 时氢对硫化物最为敏感。

最后本文对氢致延迟裂纹的形成机理的研究现状,主要的观点和结论进行了综合分析。

答辩日期:1985 年 1 月 24 日

国产低合金结构钢焊接区热变脆化的研究

机械系焊接专业研究生 马 杭 指导教师 苏毅、严鸢飞

所谓热应变脆化一般是指钢材在经历 $200^\circ\text{C}-\text{Acl}$ 高温塑性应变循环后断裂韧性降低的现象。低合金结构钢焊接区的热应变脆化是焊接接头韧性降低的原因之一,为了提高低合金结构钢焊接结构的安全可靠性,防止低应力脆断事故的发生,开展对国产低合金结构钢焊接区的热应变脆化倾向及其主要影响因素的研究,进而提出控制脆化程度的工艺措施,是十分必要的。

本研究采用裂纹张开位移(COD)试验方法,测定了国产 19MnR 钢、15MnVN 钢手弧焊焊接接头以及 14MnMoNbB 钢母材经过热应变处理后的断裂韧性对温度的关系曲线($\delta-T^\circ\text{C}$ 曲线)。采用的热应变处理方法有三种:1. BWN 方法,即从模拟焊接区缺陷的焊前开缺口焊接试板上切取 COD 试样的试验方法,焊前缺口在焊接纵向应力作用下经历了热应变循环;2. BNP 方法,即从带有实际未焊透缺口的焊接试板上切取 COD 试样的试验方法,未焊透缺口在焊接横向应力作用下经历了热应变循环;3. RHP 方法,即对已加工好的 COD 试样进行双向热预弯处理的试验方法,试样缺口经历了人为条件下的模拟热应变循环。采用正交设计法安排了 RHP 试验,并对 RHP 试样缺口顶端局部区域的热应变变量进行了加载时的二维弹塑性有限元计算。

试验结果表明:三种试验用钢材的热应变脆化敏感性以 16MnR 钢最严重,15MnVN 钢次之,而 14MnMoNbB 钢母材的热应变脆化倾向较小。钢材热应变脆化敏感性不同的原因主要是钢中氮元素存在的状态不同。随着钢材强度级别的提高,钢中合金元素的种类和含量增加,钢中自由状态的氮含量减少,所以钢材的热应变脆化敏感性下降。以 16MnR 钢为例,在手弧焊条件下其母材、焊缝和过热区经热应变后的脆性转变温度分别比原始母材上升达 50°C , 100°C 和 70°C 左右。对 16MnR 钢,焊后去应力退火除了可消除宏观焊接残余应力外还可消除热应变脆化的不良影响,所以对 16MnR 钢重要焊接结构的后热处理是有益的。

试验结果还表明,在一定的试验条件(温度范围 $250^\circ\text{C}-450^\circ\text{C}$,应变变量范围约 $2.0\%-8.7\%$)下,热应变量的变化是钢焊接区脆化程度的主要影响因素,其脆性转变

温度随着热应变量的增大而显著上升, 相对说来, 应变温度的变化对脆化程度的影响不显著。由于焊接区裂纹之类的应变集中源的存在是导致该区产生显著脆化的热应变量的根源, 所以从热应变脆化的角度来看, 防止焊接区在焊接过程中产生缺陷具有十分重要的意义。

从三方面对 BW_n、BNP 和 RHP 三种小型热应变脆化试验方法的分析比较表明, 三种方法均可考核钢焊接区的热应变脆化问题, 而且试验结果有较好的一致性。BWN 方法的特点是模拟缺陷经历了实际焊接热应变循环的作用, 适于热应变脆化的工程评定; BNP 方法的特点是真实缺陷, 具有实际背景, 但只适于考核手弧焊条件下熔合区的热应变脆化倾向; RHP 方法的特点是温度和应变可以控制, 适于对热应变脆化影响因素的规律性研究, 而且方法相对简便。

本研究在利用计算机方面作了有益的尝试和工作, 主要有: 1. 进行了二维弹塑性有限元计算, 为 RHP 试验的定量化提供了参考数据。2. 原始数据处理, 即 COD 值的计算。3. 通过对 P—V 记录曲线(载荷——张开位移)的符号分类和建立试验点打印程序, 使试验点群在表示断裂韧性值大小的同时又可区分断裂类型。4. 建立了有较好适应性的 δ —T℃ 曲线的数学表达式, 为数据进一步处理(正交分析)和计算机作图提供了方便。

本研究的工作还有: 1. 结合缺口顶端硬度试验和部分断口形貌的扫描电镜观察, 从宏观力学性能变化的角度提出了热应变脆化降低钢焊接区低温断裂韧性的表象说明。2. 进行了裂纹断裂韧性和缺口断裂韧性的对比试验; 16MnR 钢和 15MnVN 钢母材疲劳裂纹试样的脆性转变温度分别比各自的缺口试样高 21℃ 和 13℃。3. 进行了试样韧带分布残余应力对转脆温度影响的试验, 结果表明残余应力对韧窝起裂机制的 $\delta = 0.1$ mm 时的转脆温度基本上没有影响。4. 试验中发现: 结 507 和结 606 两种焊条的焊缝低温断裂韧性均与母材相差较多, 这说明国产钢材焊接材料的匹配问题应当受到足够的重视。

论文的附录包括试验设备, 试验数据, 有关的计算公式和计算程序。

答辩日期: 1985 年 6 月 10 日

刷镀快速镍及镍—钨(50)强化及再强化机理的研究

金属材料及热处理专业研究生 庄际春 指导教师 安志义

本论文的题目是根据装甲兵技术学院的要求和我们自己的文献阅读而确定的。刷镀工艺是近年来发展起来的电镀新工艺。它有许多传统工艺所不具有的优点。例如, 对于大型零件的现场修复和选择性的局部电镀, 刷镀要比槽镀方便得多。而且刷镀层的硬度较槽镀镀层的更高。所以在一般的情况下, 它有着更好的耐磨性能。另外, 几乎所有的

刷镀镀层在 200℃ 左右加热时,发生再强化。正是因为这些优点,刷镀工艺在我国的推广和应用中已收到了很大的经济效益。但到目前为止,几乎所有的研究工作只限于刷镀工艺。即使在国外的文献中也没有看到涉及其机理的文章。鉴于刷镀镀层的强化,再强化的特性,我们认为有必要从机理上弄清强化和再强化的原因,这对改进镀液是很重要的。(例如添加剂的选择)除此以外,装甲兵技术学院曾对电压和磨损量的关系做过一些研究,得到一些曲线。在本论文后面的一部分,我们将对这些曲线做出定性的解释。因为我们认为这对改进刷镀工艺是大有裨益的。

本论文可分为三个部分。第一部分是硬度实验。第二部分是 通过 X 光的傅立叶分析和金相显微镜和 TEM 对硬度实验中得到的两条曲线所做的定量或定性的解释,也就是关于强化和再强化机理的探索。第三部分是关于镀层耐磨性的分析。

对其强化机理,我们采用了射线的傅立叶分析方法,给出了定量或半定量的结果。我们得到:刷镀镀层的强化机理是位错亚结构。其位错密度约为每平方厘米 $10^{11} \sim 10^{12}$ 条。位错胞的平均尺寸约为 0.06mm。并用透射电镜对部分结果加以证实。

对于再强化,我们提出了假设:再强化的机制是氮原子扩散到位错而产生的钉扎。由此得出的结论与实验比较符合。关于再强化,成都农机学院对铁合金做过一些研究。他们认为再强化是析出强化机理。他们并没有给出析出物是什么。并且,再强化是刷镀镀层的普遍现象。所以对于纯金属镀层也用析出强化来解释是比较牵强的。因而用 Cottrell 气团的解释是比较合适的。

此外,本文还对实验所得的电压和磨损量的关系做了定性的解释。指出电压过低或过高所产生的耐磨性下降分别是内应力较大和组织疏松所致。并对提高耐磨性做了一些尝试。

答辩日期:1985 年 3 月 2 日

低合金高强钢双相组织强韧性及应力腐蚀特性研究

金属材料专业研究生 董晓源 指导教师 王天宰

本文以低合金结构钢 30CrMnSi 和 40CrNiMo 为材料,采用亚温淬火和等温处理工艺,分别将 30CrMnSi 和 40CrNiMo 处理成马氏体 (M) + 铁素体 (F) 双相组织和马氏体 (M) + 下贝氏体 (B_T) 双相组织。(M + F) 组织的处理成不同形态和不同数量,均在 200℃ 回火。(M + B_T) 组织的 B_T 处理成不同数量,在不同温度回火。

实验中对不同组织的试样测定了单轴拉伸、断裂韧性 K_{IC} 及应力腐蚀门槛值 K_{ISCC} 。并用光学显微镜及扫描电镜观察了起裂区的断口形貌,断口形貌与不同形态的金相组织的对应关系,断裂过程中的起裂地点和裂纹走向与组织的对应关系。

为分析双相组织的力学性能,推导了双相组织受力后的应力应变场;提出了双相组