

这本譯文集14篇文章中，有两篇綜合介紹銅在鋼中的作用，两篇介紹銅鋼生产工艺，10篇介紹銅鋼性能。最后还附有一张世界各国生产的含銅低合金鋼化学成份与机械性能表。

本文集可供冶金厂和机械厂車間和工厂实验室从事銅鋼生产、加工与应用的研究的工程技术人員閱讀。

銅鋼譯文集

武汉鋼鉄公司 武汉大学 合譯
鋼鉄研究院 鉄道研究院

★

冶金工业部科学技术情报产品标准研究所书刊編輯室編輯

(北京灯市口71号)

中国工业出版社出版(北京东黄城根路10号)

(北京市书刊出版事业許可證出字第110号)

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

★

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $7^{1/2}$ ·插頁7·字數164,000

1963年11月北京第一版·1963年11月北京第一次印刷

印数0001—1,610·定价(10-6) 1.05元

★

統一书号: 15165·2616 (冶金-451)

前 言

通常所說的含銅鋼，若从銅的来源考虑，可以分为两大类：一类是由于含銅废鋼的循环使用，或者炼鋼采用了含銅生鉄，从而使所生产的鋼不可避免地含有一定数量的銅，如含銅的炭素鋼或低合金高强度鋼等，这类鋼更确切地說是含有残余銅的鋼；另一类是为了专门目的或某种性能需要，有意地向鋼中加入銅而发展的一些含銅鋼种，如沉淀硬化結構鋼、一部分低合金高强度鋼等。無論那一种情况，鋼中有銅存在，必然会給鋼的生产、性能以及使用带来一些新的問題。特别是前者，因为它的生产量大，影响面广，同时鋼中的残余銅含量不是日趋減少而是逐漸积累增高，因此許多国家对确定不同用途鋼的銅含量界限、充分發揮銅的有利作用和減少其不利影响、控制鋼中銅的含量、合理使用含銅鋼材以及研究銅在鋼中的作用和发展一些新的鋼种給予了很大注意，并且进行了大量研究工作。

我国有些工厂和使用单位也遇到了这样的問題，正在进行着生产、使用、性能鑑定以及发展新品种等方面的研究工作。为了給从事这方面工作的同志提供一些参考資料，我們收集了 14 篇有关含銅鋼的文章，汇编成这本文集。其中两篇綜合討論銅在鋼中的作用，两篇介紹含銅鋼的生产工艺，十篇是关于含銅鋼的性能及使用情况的文章，最后还附有一张含銅低合金鋼化学成份与机械性能表。虽然內容很不全面，有些文章也較陈旧，但是希望这本文集能对改进生产工艺、了

解銅鋼性能、合理使用含銅鋼材以及擴大含銅鋼種等方面有所幫助。

參加這本文集翻譯校對的有武漢鋼鐵公司、武漢大學、鐵道科學研究院和鋼鐵研究院的一些同志。在收集資料和組織文集譯校上，喻肇坤同志做了許多工作。

由於時間匆促以及水平所限，錯誤之處，在所難免，尚希讀者批評指正。

劉嘉禾

1963年4月

目 录

前言

1. 鋼中的銅.....	1
2. 銅鋼的沉淀硬化.....	39
3. 含銅低炭鋼的拉伸性能.....	84
4. 关于耐大气腐蚀低合金鋼的研究.....	94
5. 低合金高强度鋼的各种性能.....	105
6. 含銅鋼軌及其对横向疲劳破断的敏感性.....	121
7. 含銅鋼軌的研究.....	133
8. 銅对变压器鋼性能的影响.....	149
9. 含銅量对客車及貨車用結構鋼抗大气腐 蚀性的影响.....	155
10. 銅鋼的軋制制度和工艺特点.....	161
11. 銅在鋼氧化起皮过程中的行为及其对 鋼絲热鍍鋅的影响.....	168
12. 銅对中炭鋼热处理性能的影响.....	185
13. 銅对0.3% C 鋼馬氏体分解及淬透性的 影响.....	204
14. 含銅到1.0%的低炭鋼的再結晶、組織和硬 度.....	210
15. 国外含銅低合金高强度鋼的化学成份及机 械性能	

1. 鋼 中 的 銅

Eduard Houdremont

1. 一般资料

a. 鉄-銅系

鉄-銅系状态图列于图 1—1。純銅在从絕對零度到熔点的溫度范围内以面心立方晶格的形式存在。因此加入銅会扩大 γ -鉄区域。在鉄-銅系中，無論在 γ -区域，还是在 α -区域——銅的溶解度都随溫度发生很大的变化。銅在 γ -固溶体

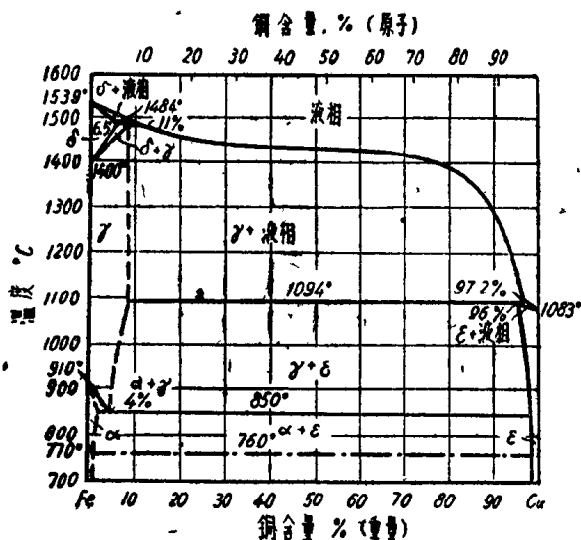


图 1—1 鉄-銅二元状态图

中的溶解度大于在 α -固溶体中的溶解度。因此，铁-铜系与铁-碳系就有着相似的对应关系。在铁-铜系中未发现有金属间化合物。在 1094° 时铜在 γ -固溶体中的最大溶解度约为 9%。

图 1-2 所示为比例尺放大后的铁-铜状态图中铁多的一端。在 850° 时，铜在 α -铁中的最大溶解度为 1.4%，而过去认为是 0.35% Cu。当温度降低时，铜的溶解度很快地减小，到室温时已低于 0.2%。

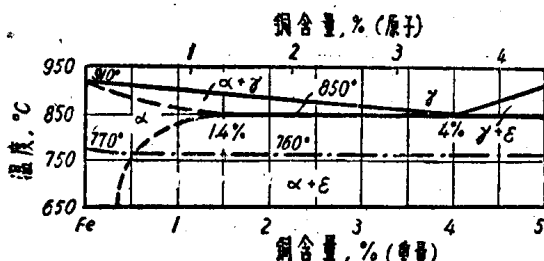


图 1-2 铁-铜系状态图中铁多的一端

关于状态图 (图 1-1) 中铜多的一端没有很大值得注意之处。但是应当指出的是，从富铜的过饱和 ϵ -固溶体中不直接析出含有少量铜的 α -固溶体，而在这种情况下有一些中间过程发生。

可以设想：具有面心立方晶格的贫铜固溶体做为中间相先析出来，然后再转变为体心立方晶格的 α -相。在冷变形时这种过程进行得特别迅速。无磁性面心晶格相的析出已被一些新的研究工作所证实，这些研究指出，当过冷到 -195° 时，转变为铁磁相的过程才能发生。

与此同时，对于原子状态的铁，它含有 6 个 3d 亚层电子，2 个 4s 亚层电子，而对于铜的情况则是：它的 3d 亚层

被 10 个电子所填满，而 4S 亚层含有一个电子。当以铜对铁进行合金化时，铜的 4S 亚层的电子将继续填充铁的 3d 亚层。因此随着铜含量的提高，居里点向更低温度方面移动。而实际上，由于溶解度有着很大的变化，居里点只有稍许降低（图 1—2），这一现象仅在比较低的铜含量的情况下才能显示出来。可以预料，铜对铁的磁饱和也会有这样的作用。根据同样的理由，在溶解区域内的磁饱和的降低较之和铜简单混合的情况应当更剧烈一些，实际观察也是这样。有关铜的 S 亚层的电子充填过渡金属未填满的外层的详细资料，可参看《特殊钢》（Handbuch der Sonderstahlkunde）一书俄译本 1959 年版第 I 卷中的“合金元素的分类”一节。

由铁-铜状态图（图 1—1）可推断出有两种不同的进行沉淀硬化热处理的可能性：

1) 在铜含量不超过 1.4% 的情况下，自 α -区域，也就是在温度不超过 850° 的情况下，进行快速冷却，在以后的回火过程中即发生过剩溶解铜的析出，从而得到沉淀硬化。

2) 将合金，特别是具有比较高铜含量的合金，自 γ -区域进行快速冷却。在这种冷却情况下，首先发生均一的 γ -固溶体转变为过饱和的 α -固溶体，在回火过程中，在相应的温度下，从过饱和 α -固溶体中析出过剩的溶解铜。从而随后发生由于转变和沉淀硬化而产生的硬化作用。

这两种热处理的可能性是 H.B. Kinnear 确定的，并由 F. Nehl 以及 H. Buchholtz 和 W. Köster 等人详尽地研究过。

由于铁-铜系和铁-碳系有相似之处，故随着铜含量的提高，在轧制状态下即能看出强度极限提高的情况。这种相似之点由图 1—3 也可看出，在该图中对铁-铜合金和铁-碳合金不同铜碳含量与强度极限、屈服极限及延伸率的关系作了

比。应当特别指出，当以铜合金化时屈服极限与强度极限之比较之铁-碳合金高得多，并且它与铁-碳合金相反，这一比例随合金元素含量的提高而增大。由于冷却速度及含有铜这两个因素，在轧后冷却时，析出过程就已在进行，从而造成屈服极限的提高。对于正火状态也同样是如此。

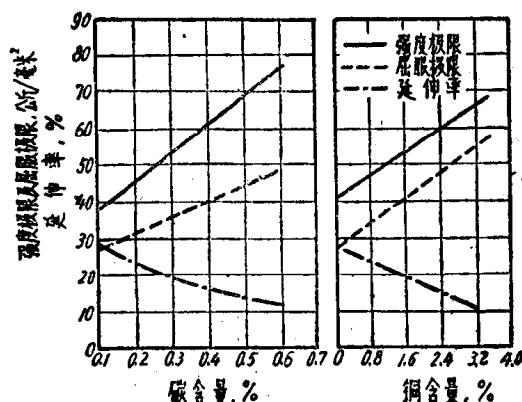


图 1—3 碳含量和铜含量与钢的机械性能的关系

(a) 自 α -区域 冷却时的弥散硬化

假如试样的横断面不很大，而铜的成份为相应于 850° 时铜在 α -相中的最大含量时，甚至用空冷的办法在室温下即可得到铜在铁中的过饱和固溶体。但若试样的断面比较大，则必须将试样在油或水中进行淬火才能得到。将被铜过饱和的 α -固溶体进行回火会引起硬度变化（图 1—4），这一变化对铜的析出过程说来是具有代表性的。如在 450° 进行约 10 小时的回火时，硬度的最大提高约为 $70H_u$ 。当回火温度再高时，随着析出过程速度的增大，硬度提高也更快。但

在这时所得到的硬度还达不到 450° 时所得到的最大硬度值。在 380° 到 400° 之間进行低温回火时，铜从过饱和 α -固溶体中的析出进行的是如此缓慢，以至于像图1—4所指出的那样，

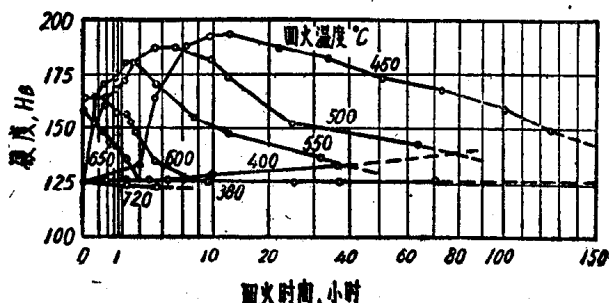


图 1—4 含铜 (1%Cu) 钢的硬度与在不同温度下进行回火时的回火时间的关系

在长达 150 小时以后硬度仍不能达到最大值。与硬度的提高相类似，在回火时机械性能也发生变化（图1—5）。由于在 500° ~ 550° 回火处理的结果，强度极限和屈服极限有着明显的提高，其中，特别是屈服极限的提高更为明显。而冲击韧性的下降，对于析出过程来说是具有代表性的特征。

随着铁-铜合金及铜钢中铜含量的不同在轧制后或是正火后，铜部份以析出状态存在，而另一部份仍保留在固溶体中。由于这种原因，对未经热处理的含铜钢或是正火状态的含铜钢在 500° 左右进行回火时，在许多情况下都能进一步提高钢的强度极限和屈服极限（图1—6）。由于铜的析出而达到最大硬度的回火温度，远远高于由于碳自 α -固溶体中析出而得到最大硬度所需要的温度。因此，对于含铜的低碳钢在淬火具有足够的激冷以后，可以分别地观察到两个回火过程（图1—7）。

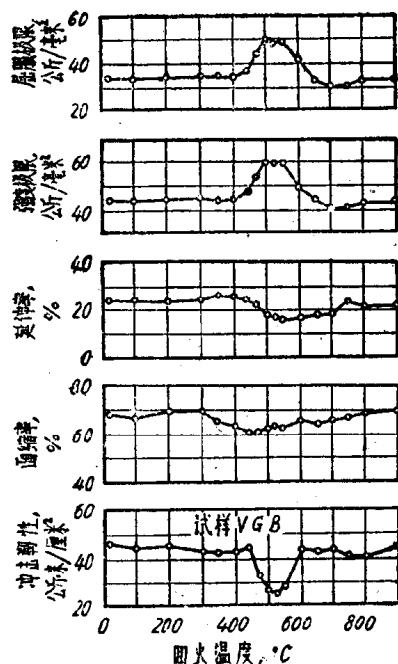


图 1—5 銅鋼 (1%Cu及 0.08%C) 的机械性能与回火温度的关系

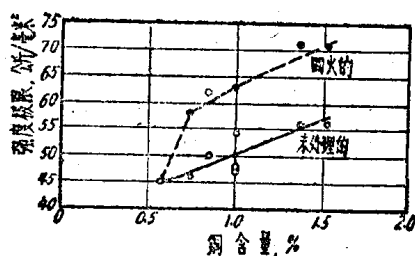


图 1—6 銅含量对未經热处理及經 525° 回火处理的鋼的强度极限的影响

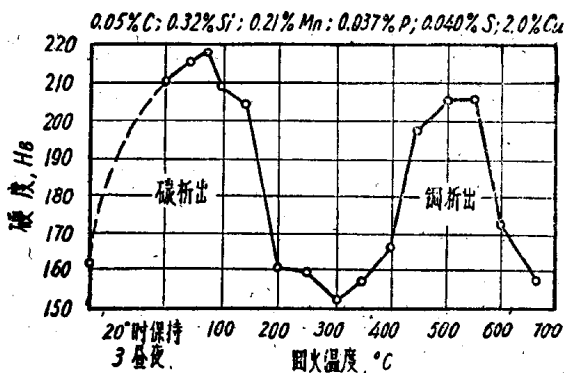


图 1—7 回火温度(回火时间半小时)对被碳与铜同时过饱和的 α -铁的硬度的影响

(6) 自 γ -区域冷却时的沉淀硬化

由图 1—8 可看出高铜含量钢在转变时的硬化和沉淀硬化的综合作用。该图表明含 5%Cu 和 0.04%C 的钢的布氏硬

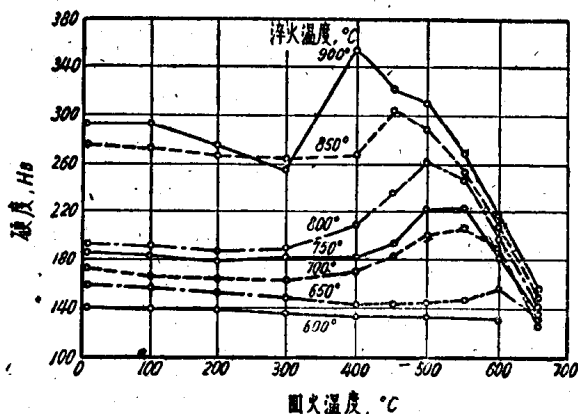


图 1—8 回火对在各种不同温度淬火后的铁铜合金 (0.04%C及5%Cu) 的硬度的影响

度与淬火温度和回火温度之间的关系。当提高淬火温度由 600° 到 900° 时，由于铜溶解度的提高，淬火状态的硬度逐渐增大，而当温度通过临界点 Ac_3 时，由于铜在 γ -固溶体和 α -固溶体中的溶解度不同，这一硬度急剧提高。在这种情况下，当着在 900° 快速冷却及随后的 400° 回火时，硬度值达到最大。在此必须指出，当进行热处理时，在发生 γ - α 转变的情况下所得到最大硬度值的回火温度，比自 α -区域淬火的情况下要低。这与研究铁-钴-镍合金沉淀硬化的结果完全附合，这一研究表明：具有 γ - α 转变的合金在回火时得到最大硬度的温度较之在冷却时不发生任何同素异构转变的合金要低〔参看《特殊钢》（Handbuch der Sonderstahlkunde）一书俄译本1959年版

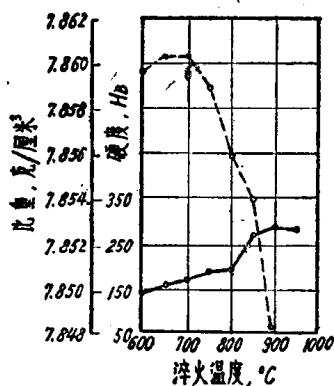


图 1—9 淬火温度对铁铜合金 (0.04% C 及 5% Cu) 的硬度和比重的影响

de) 一书俄译本 1959 年版 I 1202 页]。由此看来，由相转变所引起的内应力对铜合金的影响也是很显著的，它可以使得析出过程更早地开始进行。假如将铁铜合金自高于临界点的温度进行淬火，则与硬度的改变相似，会发现其比重的变化比自 α -区域淬火时大的多，这与晶格的破坏有关 (图 1—9)。

在各种不同的淬火过程和沉淀硬化过程中，矫顽磁力和电导率的变化与一般的情况一样 (图 1—10)。但往 АЛНИКО 磁性合金中加入铜可以改善磁性性能，因为铜加速析出过程并削弱钴的抑制作用。

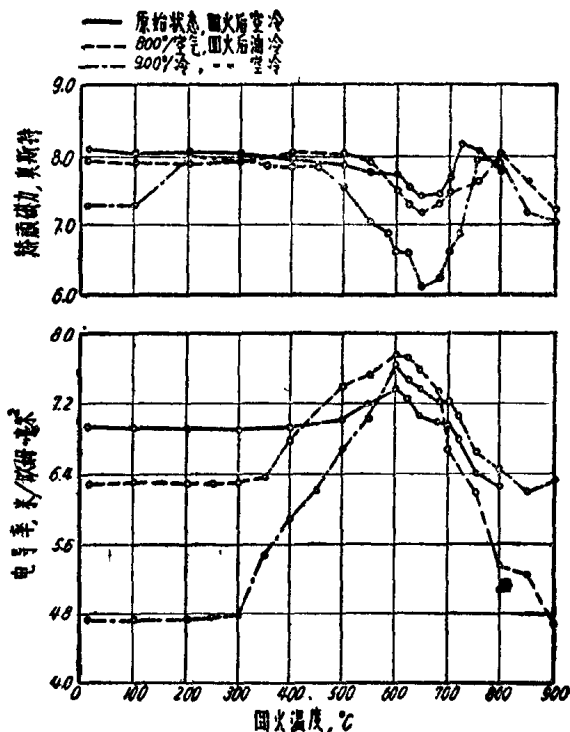


图 1-10 加热对經各种預处理的鉄銅合金 (0.04% C 和 5%Cu) 的磁矫頑力和电导率的影响

5. 鉄-銅-碳合金

銅做为合金元素來說它不影响碳化物的形成过程，其作用主要表现在淬火时的 $\gamma-\alpha$ 转变过程中。对含Cu到30%和含C到5%的鉄-碳-銅合金的研究还应給以某些修正。碳能增大鉄-銅系中銅的溶解度变化范围，并且在不大的含量时 (达0.2%C) 就已表现出强烈的影响。在鋼的一般碳含量 (达1.7%) 的情况下，就能炼成含銅高达15%的鉄-銅-碳合金。

銅使珠光体点向較低的碳含量方面移动。但是銅的加入同时也降低了相转变溫度，所以转变速度的减小以及珠光体点向較低碳含量方面的移动是否仅仅是些表面现象，这仍然是一个悬而未决的问题。当碳、銅含量都比较高时，銅有利于碳在退火时的析出。銅对铁在过冷时的转变过程的影响，正如图 1—11 中的转变曲线所表明的含有 0.5% C 及銅含量分别为 0.06% 和 1.5% 的两种鋼那样，并不很大。由曲线图可看出，加入銅后使得在珠光体区域和中間区域的转变最大值稍向時間长的方面移动，而与此同时， M_s 点的溫度实际上沒有改变。銅的加入減小了临界淬火速度，从而使得淬透性得到改善（图 1—12）。由图可以看出，即使加入不多的

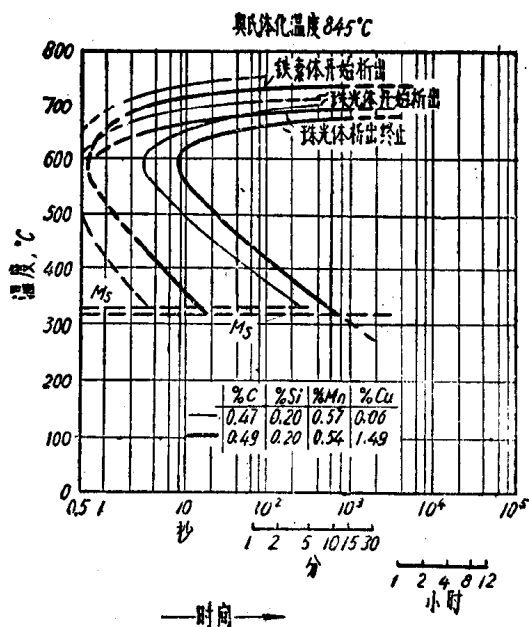


图 1—11 含銅 1.5% 鋼的等溫转变曲线与不含銅鋼的比較

銅——由0.1到0.2%——亦能显著地提高非合金工具鋼的淬透性。由于在炼鋼时采用大量廢鋼，而炉料的选择又不够細致，所以熔炼的鋼中通常都含有大約0.2%的銅。

鋼中加入达0.6%的銅，实际上不会改变鋼的过热敏感性，但当銅含量再提高时——由0.6到2%，則过热敏感性增强。例如，对于含2%銅的鋼，假設在熔炼时沒有专门进行細化晶粒的冶金处理的話，則在700°时即已呈现出开始过热的征象。往鋼中加入銅时，实际上不会改变鋼的可以达到最大硬度。

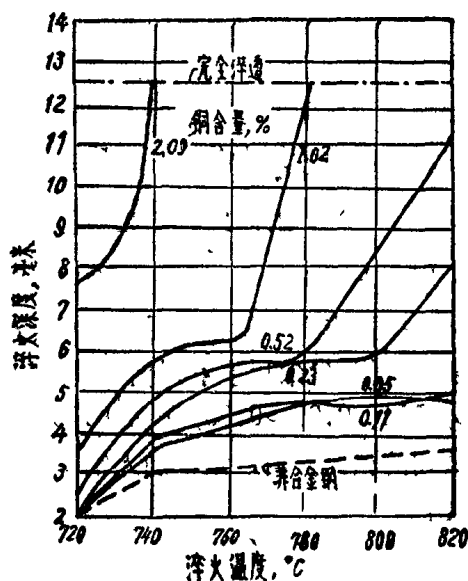


图 1—12 含炭0.9%的鋼的淬火深度与銅含量的关系

最后可以做出如下的結論：銅含量大于0.3%即可引起合金的沉淀硬化，而当含量更高时会引起转变硬化。在铁碳合金中，銅减小临界淬火速度，从而能提高淬透性。自然沒有任何理由可以把銅看做为碳化物形成元素。經淬火过的铁-碳-銅合金在回火过程中机械性能发生变化，这是由于在400~500°C温度范围内自固溶体中有銅的弥散质点析出所致。这一硬化补偿了回火处理对含碳馬氏体所产生的软化作用。

渗氮处理时（参看Специальные стали I 1448頁），銅含量超出0.5%会发生不利的影响。对这一点应特别注意，因为加入銅可以在渗氮过程中引起沉淀硬化，从而显著地改善鋼的机械性能的想法是很吸引人的。尽管銅在鋼中有上述的有利作用（沉淀硬化），但是銅在鋼中应用受局限的主要原因在于含銅鋼在热压力加工时有着形成表面裂紋的傾向。因此一般地把銅看做为鋼中的有害杂质。

2. 工具鋼和结构鋼中的銅

早在上一世紀的下半叶，在工具鋼中即已开始采用銅。例如，德国克虏伯公司为了制造用于冷軋金、銀及其它貴重金屬的軋輥，曾采用了下列化学成份的鋼：0.8%C、0.25%Si、0.3%Mn、0.05~0.06%P及0.25到0.3%Cu。根据克虏伯公司的档案資料，鋼中加入銅有助于改善它們的淬透性和磨光性。

虽然銅能提高鋼的淬透性，但到目前为止，向工具鋼中加入銅終究未能得到某些大量的应用。这主要是因为：采用另外的不带来有害作用（指热压力加工时的表面缺陷，参看本文第5节），而同时采用更为經濟的合金元素也同样能达到提高淬透性的目的。曾建議向含有硼的高速鋼中加入銅，按理想它将会防止含高鉬的高速鋼的脫碳。但是，在这种情况下，切削效率并未提高。与此同时，加入銅反而恶化了可鍛性。所以向工具鋼中加入銅实际上并未得到采用。

相反，以銅合金化的结构鋼在工业技术上具有重大的意义。鋼中加入銅的主要目的是为了得到較高的抗大气腐蝕耐久性（参看本文第4节）。大量的研究著作都已闡明了这一点，它們曾指出：鋼中含有0.2~0.3%的銅就能保証抗锈

稳定性的提高。而在大气中的腐蚀耐久性则当铜含量为0.07~0.15%时就已经提高了。由于工艺操作使钢中不可避免地都会带来铜,如现时的平炉钢就平均含有0.2%的铜(参看本文第4节),因此,专门用铜来将钢合金化从而提高腐蚀耐久性通常认为是多余之举。只是到最近才确定了铜对碳素钢及低合金钢的强度极限,特别是对屈服极限的有利影响。研究铜对钢的机械性能的作用时,必须考虑到各种钢之间的差别:含铜小于0.3%的钢,实际上不会存在由铜引起的沉淀硬化效果,而对于含铜大于0.3%的钢,由于铜所产生的沉淀硬化作用超过了转变过程及由它所引起的碳化物分配所起的作用。当铜小于0.5%时,它对强度极限及屈服极限的影响不大,特别是在退火状态下更是这样。当提高冷却速度时,这一影响增强,因为铜提高了可淬火性。对于正火状态含铜达0.5%的软钢,发现屈服极限和强度极限提高不多,与此同时,当钢中碳含量较高时这一影响加剧,虽说仍然不够大(图1—13)。当研究具有上限铜含量的ST.52型(0.16

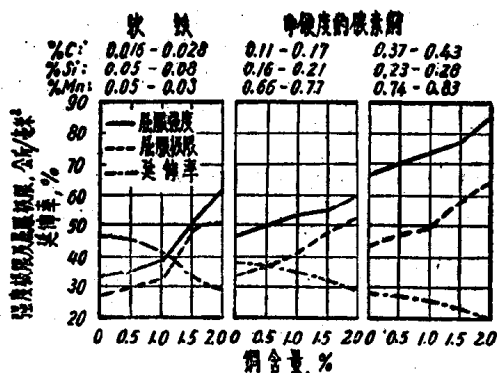


图 1—13 铜对正火软铁、碳素软钢及中硬度的碳素钢的机械性能的影响