

金属的可焊性试验方法

吳世初編著

中国工业出版社

75
292

金屬的可焊性試驗方法

吳世初編著

310510/10

中國工業出版社

本书介绍目前世界各国在工业生产上和研究工作中鉴定结构金属材料的可焊性时应用的直接与间接的试验方法，共54种，并对每种方法作了适当的评价，提出了适用于我国工业生产上的应用范围。

本书可供科学研究单位、学校、工厂的焊接工作者参考。

金属的可焊性试验方法

吳世初 編著

机械工业出版社编辑部编辑 (北京郑州胡同 141 号)

中国工业出版社出版 (北京佳美胡同 10 号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第 110 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ · 印张 $4 \frac{7}{8}$ · 插页 1 · 字数 105,000

1964 年 6 月北京第一版·1964 年 6 月北京第一次印刷

印数 0,001—5,840 · 定价(科六)0.70 元

*

统一书号: 15165 · 2864(一机-600)

序 言

“焊接”是工业生产部門中的重要工艺之一，在祖国偉大的社会主义建設中起着巨大的作用。随着祖国鋼鐵工业的飞跃发展，新的优质鋼种不断地出現，大力支援了广大农业和工业战綫上日益增长的需要。鋼鐵品种的大量增加，有关各种鋼材的可焊性問題便成为急待解决的課題。从冶金工作者的角度来看，應該多生产一些强度高，同时其可焊性也良好的鋼种，从焊接工作者的角度上来看，則应选择最适当的焊接规范进行生产而获得性能良好的焊接接头。

目前世界上先进的工业国家所应用的可焊性試驗方法很多。最近除了可焊性直接試驗方法之外，可焊性間接試驗方法也得到了应有的重視，在一些国家中已逐步用它来代替可焊性直接試驗方法。同时，鋼材的脆性破坏問題也在各国当作重要問題进行着大量的和广泛的研究。

我国在 1962 年春天在上海机械工程学会焊接专业組內进行了关于鋼材可焊性方面的学术活动，編者当时参考了国内外有关书刊，介紹了目前国内外应用的可焊性試驗方法。鉴于这些試驗方法还未能在国内工业生产上广泛运用，故感到有繼續推广介紹的必要，嗣后，又进一步搜集了更新的資料充实了內容（包括低合金高强度鋼、高合金鋼、鋁合金、鑄鉄等的可焊性直接与間接的試驗方法）。书內所介紹的方法归納起来共計 54 种，并对这些試驗方法作了分析。由于編者水平有限，不免有疏漏与謬誤之处，尚希讀者批評指正。

最后，編者謹对本书所引用的文献的著者們深致謝意。

編著者于上海

07197

目 次

序 言

第一章 引 論..... 1

第一节 可焊性定义和分类..... 1

第二节 高温裂纹和低温裂纹..... 3

1 高温裂纹..... 3

2 低温裂纹..... 5

1) 低温裂纹——5 2) 热影响区裂纹和冷却速度——9

第三节 脆性破坏概論..... 13

1 鋼材的脆性破坏..... 13

2 脆性破坏的特征..... 13

3 缺口..... 15

4 鋼材的延性破坏和脆性破坏..... 16

5 脆性破坏的机理..... 16

1) 自延性到脆性的破坏形式的转变——16 2) 在缺口底部产生的三轴拉应力——18 3) 裂纹的扩张——18

6 冷脆性转变温度..... 19

7 冶金各因素对缺口脆性的影响..... 21

1) 化学成分——21 2) 脱氧方式——22 3) 细化晶粒——23 4) 热轧——23 5) 热处理——23 6) 鋼板的方向性——24 7) 冷加工时效——25 8) 疲劳——25

8 焊接对缺口脆性的影响..... 26

1) 焊着金属——26 2) 焊条种类的影响——26 3) 热影响区——26 4) 焊接规范——27 5) 预热和后热处理——28 6) 时效——29 7) 其他——29

第二章 可焊性直接試驗方法..... 30

第一节 施工上的可焊性試驗方法..... 30

1 裂纹試驗方法的选择及其与生产联系的問題..... 30

2 焊缝和热影响区的裂纹試驗方法(不需特殊試驗裝置)..... 32

Yelro

- 1) V型坡口对接裂紋試驗(鈹研式)——32
 - 2) 沟槽拘束对接裂紋試驗(手冢式)——35
 - 3) 初层焊接拘束对接槽裂紋試驗——36
 - 4) 可变拘束长槽对接裂紋試驗——36
 - 5) CTS裂紋試驗——37
 - 6) 击破試驗——42
 - 7) 基洛夫工厂試驗——43
 - 8) 焊层下裂紋試驗——44
 - 9) I. I. W. 最高硬度試驗——45
 - 10) 渐变厚度硬度試驗——48
 - 11) 十字形接头試驗——50
 - 12) 双T字形裂紋試驗——53
 - 13) T字形热裂紋試驗——54
 - 14) I. I. W. T 字形热裂紋試驗——56
 - 15) Hind 填角焊裂紋試驗——57
 - 16) 金茲布尔格和特拉仁什多克裂紋試驗——58
 - 17) 巴东研究所角焊縫裂紋試驗方法——59
 - 18) 刚性节点角焊縫試驗——60
 - 19) Fisco 試驗——61
 - 20) 圓棒試驗——63
 - 21) X形裂紋試驗——65
 - 22) 巴东拘束对接裂紋試驗——65
 - 23) 窗形拘束对接裂紋試驗——67
 - 24) 撕裂試驗——68
 - 25) 环形鑲块裂紋試驗——69
 - 26) 环形槽裂紋試驗——70
 - 27) 分块环形槽裂紋試驗——71
 - 28) 环形堆焊試驗——72
 - 29) B. W. R. A. 銘鏤不銹鋼裂紋試驗——72
 - 30) Lehigh拘束裂紋試驗——73
 - 31) 魚骨状可变拘束裂紋試驗——75
 - 32) N. R. R. T. 可变拘束对接裂紋試驗——78
 - 33) B. W. R. A. 封閉对接裂紋試驗——78
 - 34) Finger裂紋試驗——79
 - 35) 調质高强度鋼热影响区裂紋試驗(埋弧自动焊)——80
 - 36) 埋弧自动焊裂紋敏感性試驗——81
 - 37) 确定薄鋼料气焊时产生高温裂紋的傾向——83
 - 38) 鑄件焊接裂紋試驗——83
- 3 焊縫和热影响区的裂紋試驗方法(使用特殊的試驗裝置)84
- 1) Murex高温裂紋試驗裝置——84
 - 2) Прохоров裂紋試驗裝置——91
 - 3) 日本金屬材料技术研究所裂紋試驗裝置——95
- 第二节 使用性能上的可焊性試驗方法98
- 1 焊接热影响区的延伸性試驗98
 - 1) 纵向焊道弯曲試驗——98
 - 2) T形弯曲試驗——103
 - 3) 加热敏感性試驗——104
 - 4) 焊道試驗——105

2 焊缝金屬和焊接接头的缺口脆性試驗	107
1) 苏联乌克兰科学院电焊研究所的冷脆性試驗——	108
2) Kinzel纵向焊珠缺口弯曲試驗——	109
3) Lehigh 纵向焊珠缺口弯曲試驗——	111
4) 横向焊珠缺口弯曲試驗——	112
5) Kahn 焊接缺口撕拉試驗——	114
6) N. R. L. 爆破試驗和落錘試驗——	118
第三章 可焊性間接試驗方法	124
第一节 以碳当量方法評定鋼的可焊性	124
1 碳当量方法的应用	124
2 碳当量公式	126
第二节 連續冷却变态曲綫 (C. C. T. 曲綫)	133
第三节 ННН法 (急速热膨胀試驗)	139
1 厚度在15毫米以上的板鋼和非板鋼的試驗	139
2 厚度小于15毫米的板鋼的試驗	140
附录 I 各种裂紋試驗方法汇总表	142
附录 II 各国主要高强度低合金鋼的化学成分和机械性能 (請見书末)	
参考文献	144

第一章 引 論

第一节 可焊性定义和分类

所謂可焊性，就是在一定材料、工艺和結構条件下，材料焊接后，創造出必要质量的焊接接头的性能。

一般地說，我們在焊接生产上日常所碰到的焊接缺陷，可分为下述几种：

1. 焊縫金屬的缺陷：

- 1) 裂紋（火口裂紋，热裂紋等）；
- 2) 气孔；
- 3) 夹杂物（夹渣，脫氧生成物或氮化物）；
- 4) 咬肉。

2. 母材和热影响区的缺陷：

- 1) 裂紋（焊层下裂紋等的冷裂紋）；
- 2) 晶粒粗大；
- 3) 析出脆化。

在焊接結構物使用过程中对其性能有影响的物理和化学方面的因素为：

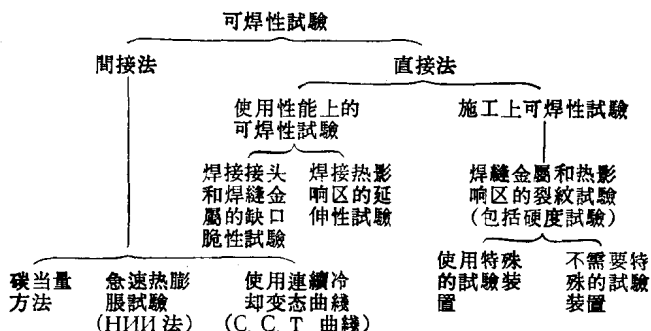
- 1) 强度；
- 2) 延伸性；
- 3) 缺口脆性；
- 4) 疲劳和蠕变强度；
- 5) 耐蝕性、导磁性、加工性等特殊性能。

在上述各种因素中，对結構鋼的可焊性有特別重要意义

者为焊缝金属裂纹，由于焊接热影响引起的母材硬化和裂纹（施工上的可焊性）及焊接接头和焊缝金属的缺口脆性以及热影响区的延伸性（使用性能上的可焊性）。

评定某些钢材的可焊性时，目前国内外所采用的可焊性试验方法是很多的，但按其目的和试验的性质来看可作如下分类（表1）：

表1 可焊性试验方法分类



对我们焊接工作者来说，在实际焊接生产中直接有关系的是可焊性直接试验方法。

关于可焊性试验方法的应用，各国各有不同的风格。就苏联和日本而言，则施工上的和使用性能上的可焊性试验方法都采用。就美国而言，似乎对于钢材经焊后缺口脆性研究特别感到兴趣。英国近年来所进行的可焊性试验都着重于裂纹的研究，因此形成一种倾向，即把使用性能上的可焊性看作为次要的^[1]。捷克对可焊性试验的看法较特殊，即只重视焊接接头的冲击韧性试验，至于其他的可焊性试验方法几乎未予采纳^[2]。按这个文献的意图来看，其对象好像是炼钢厂而不是进行施工的制造厂。目前，我国已有二个可焊性试验方法标准草案^{[3][4]}。但这些文件，只着重地提出了不需特殊

裝置的、施工上的和使用性能上的可焊性試驗方法。

如何正確地掌握和应用可焊性試驗方法，創造适合于我國情況的可焊性試驗方法，是一個迫切需要解決的任務。為此，廣泛地了解國外应用的可焊性試驗方法及其實質，是必不可少的一個步驟。

本書匯集了各國當前鑑定結構金屬材料時所应用的所謂直接的和間接的可焊性試驗方法，並加以簡單的評論，同時提出了应用的範圍。這裡應當說明的，書中所介紹的內容只限於焊接方法為電弧焊、自動焊和氣焊，未包括電渣焊、接觸焊等。另外，對使用特殊試驗裝置的裂紋試驗方法，作了較詳細的討論。

第二節 高溫裂紋和低溫裂紋

1 高溫裂紋^[5]

高溫裂紋是指金屬結晶時產生的裂紋，人們稱它為結晶裂紋，這種裂紋在顯微鏡下觀察時可發現具有晶間破壞的性質，在裂紋的斷面上發現有明顯的氧化色彩。高溫裂紋有縱向的，也有橫向的，也有產生在斷弧處的火口裂紋。關於高溫裂紋產生的原因和溫度範圍，現在的說法還不很一致，概括地歸納起來，可分為三種。

第一種說法，認為高溫裂紋是在液固態或固液態時產生。至於在金屬完全凝固後產生高溫裂紋的情況，則認為只有在晶粒間有大量雜質富集時才會產生，不能認為是一般工程材料的典型情況。持有這種見解的人認為高溫裂紋的產生是由於金屬中的某些部分不能承受拉伸變形所引起的。並認為在焊接熔池中的結晶，是從未熔化的母材開始，而向着散熱相反方向生長的，因此已結晶的晶粒是不能在剩余的未結晶的

母液中任意移动的。若在冷却时晶粒間沒有熔合（当液固态时），而晶粒由于从液态变成固态时以及冷却时的收縮在一定条件下，这样的收縮就可能導致在相对生长的晶粒之間产生裂紋，而不是只有在固态时才能产生的。

第二种說法，认为高溫裂紋产生在金屬的固液态溫度范围，他們认为，当金屬凝固和冷却期間，拉应力达到一定大小时，而晶粒間还存在液态薄膜的話，就可能产生高溫裂紋。这时，因为是处于固液态，所以存在有未凝固的液态薄膜的晶粒的空間是封閉的。若是这时由于收縮而使这里的空間扩大而沒有其他物质来补充的話，原来存在在这里的液态金屬的量就可能填不滿这个空間，在这种情况下就会导致开裂。但是当金屬全部凝固时，晶間結合情况大大加强，塑性也有增加，那就不会产生高溫裂紋了。

第三种說法，认为金屬在高溫及固相綫附近有一个高溫脆性区域的溫度范围，在这溫度范围内金屬的强度及塑性陡降，假如这时金屬所受的变形大于金屬所能承受的极限变形，就会产生高溫裂紋。但这个溫度区究竟包括那些金屬状态？是液固态？固液态？还是固态？則沒有作明确的說明。对于这个溫度区間內金屬强度及塑性陡降的原因，則认为或許是由于晶界上有尚未凝固的低熔点的杂质所引起的，或許是由于扩散变形的发展所引起的。

至于高溫裂紋問題，各国过去和現在都进行了不少工作，但这方面的問題还没有得到一致的意見。关于裂紋分类方法也不很一致，有人把高溫裂紋定义为“溫度在 200°C 以上时在金屬中产生的裂紋”，而在 200°C 以下溫度范围时产生的裂紋則认为是低溫裂紋。此外，也有人把裂紋分为“热裂紋”（即在高溫 A_3 以上产生的裂紋；最可能产生裂紋的溫度范

圍是固相綫附近。)、“溫裂紋”(在奧氏體分解溫度範圍內產生的裂紋)及“冷裂紋”(低溫產生的裂紋)三種。

可能導致高溫裂紋的幾個因素是：化學成分，冷卻速度，被焊工件的剛度，被焊工件所處的應力狀態和承受的變形速度等。

2 低溫裂紋^[6]

1) 低溫裂紋

鋼的焊接熱影響區受到從熔點直至室溫的所有溫度範圍的加熱循環，特別是當它的受熱溫度超過鋼變態點(A_1)時，它對鋼組織和性能影響是很重要的。其中被加熱到約 1250°C 以上的區域，被稱為粗粒區域，這裡呈現粗大的網狀組織(魏氏組織)或較硬和較脆的馬氏體組織。這些部分，一般說來是性能惡化最厲害的地方，並且這裡必然受到因焊接熱而產生的熱脹冷縮和由於拘束而引起的塑性變形，故而很易引起各種熱影響區裂紋。

熱影響區的裂紋，一般都是在接近室溫溫度情況下產生的所謂冷裂紋。但是在極個別的情況下，在此部分也有可能產生熱裂紋。譬如說，最近美國海軍的高韌性鋼(HY-80)厚板的热影響區中所發現的微小裂紋即被認為是熱裂紋的一種。

鋼的焊接熱影響區的裂紋產生原因與鋼在淬火硬化過程中由於馬氏體變態時的急速膨脹而引起的淬火裂紋產生的原因十分類似。因此，熱影響區裂紋的形成可說是具有淬火硬化性能的鋼所特有的現象。

在高強度低合金鋼、高碳鋼等的焊接中易于產生這種裂紋，但在低碳鋼中產生的可能性則很小。熱影響區產生裂紋

的机理不像热裂纹那样单纯而是比较复杂。按裂纹种类的不同，其产生的原因亦不同。

热影响区裂纹可分为三类（图 1）：

- A. 焊珠层下裂纹；
- B. 焊趾裂纹；
- C. 焊根裂纹。

焊珠层下裂纹（如图 1 中 A 所示），是人们最早注意到一种热影响区裂纹。这种裂纹发生在硬化性较

大的钢的焊接热影响区，它们往往与熔合线方向平行。图 1 中 A 所示垂直于熔合线方向的裂纹很少发生，它们多半产生在合金量特别高的钢内。

焊趾裂纹如图 1 中 B 所示，这种裂纹是由于焊珠表面形状不连续而引起的应力集中所造成。

焊根裂纹是在施焊对接缝或填角缝第一层焊波时，由于缺口处产生应力集中而在热影响区内发生的（图 1 中 C 所示）。这种裂纹和焊趾裂纹一样，都因缺口处应力集中而产生，故比焊珠层下裂纹更容易发生。即使使用低氢焊条焊接，也有产生这种裂纹的可能性。就低碳钢而言，裂纹大多发生在焊缝金属中而不是在热影响区。因此，我们认为这种焊根裂纹与热影响区硬化现象有很密切的关系。

焊珠层下裂纹形成的最主要的原因是氢，对于焊珠层下产生裂纹和氢的关系，目前各国专家比较一致的想法如下：

以普通手工焊条进行电弧焊时，主要存在于药皮中的氢化物受到焊接热后进行分解成为氢原子大量进入熔融状态的焊接金属中。这些氢原子随着焊接金属的逐渐凝固逸入大气。

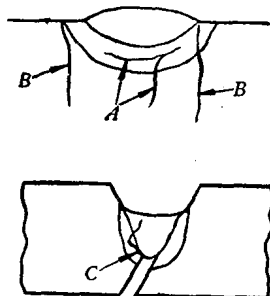


图 1

但是这只能在焊缝处的冷却速度极为缓慢时才行。对于一般焊接过程中冷却速度较为迅速的情况而言，焊接金属中一部分氢总是来不及逸出而仍留在焊接金属中。在熔融状态下，焊接金属中的氢的溶解度比固体状态下要大得多。即使同样在固体状态下，较高温度情况下的组织（奥氏体）中的氢溶解度要比低温情况下的组织（铁素体）中的溶解度大。焊接金属和母材热影响区在冷却过程中，因为前者的含碳量比后者少，所以在较高温度情况下能够结束“奥氏体→铁素体+碳化物”变态。由于此故，焊接金属中的氢的溶解度的减少现象比母材为早。这些剩余的氢，扩散到近旁的热影响区（仍为奥氏体组织），促使热影响区的含氢量增加。随着冷却过程的进展，奥氏体变成为铁素体和碳化物。这时，热影响区中氢的吸收能力显著降低。这种变态当然随着钢的成分和冷却速度的不同而不同。在低合金高强度钢中，奥氏体变成马氏体的可能性很大。大家知道这种马氏体与铁素体一样，氢的吸收能力比奥氏体小得多。同时，钢自奥氏体组织变成为马氏体组织时，由于体积膨胀而产生巨大的变态应力，另一方面，残存在热影响区内的过饱和氢，变成为分子状氢而呈现内部压力。这种内部压力随温度降低而迅速增加，到室温状态，可能达到数千或一万个大气压，这就远远地超过了钢的破断强度。如以前述的马氏体变态压力加上这种气体压力，则就促使钢破坏。H通常亦能存在于非金属夹杂物或错位等的晶格缺陷中（一原子程度大小的空隙）。当温度降低时，H变成为氢分子在这些空隙中造成压力升高而使钢中产生微小裂纹。一般被硬化的马氏体晶格易于受到由于氢而引起的脆化作用。除马氏体之外，较高温度情况下产生的其他组织由于其变态温度较高尚具有足够的韧性，故不易受到脆化作用。

将以上情况归纳起来，焊珠层下裂纹是由于以下三个主要原因而产生的（在热影响区过冷奥氏体組織中存在过饱和氢的情况下）：

- 1) 馬氏体晶格中氢的脆化作用；
- 2) 馬氏体变态时引起的动的应力；
- 3) 分子状氢的静压力。

在这种情况下所产生的裂纹通常为显微裂纹，其上重叠热应力和拘束应力等因素时，这种裂纹能扩大至目力所看得到的尺度而成为焊珠层下裂纹。

至于因缺口应力集中而引起的焊趾裂纹，其产生的原因，人們认为氢的影响并不是主要的。

焊根裂纹（Root crack）則是在施焊对接焊缝和填角焊缝第一层焊波时，由于坡口底部的缺口处热影响硬化加上应力集中而产生的。因为焊根裂纹与焊趾裂纹都是由于缺口处应力集中而引起的，故較焊珠层下裂纹更易于产生；即使使用低氢焊条或各种保护气体进行焊接，产生这类裂纹的可能性仍然很大。用低碳鋼焊条焊接时，这种裂纹通常发生在焊缝金属内，很少发生在热影响区。但是在使用低氢焊条时，則裂纹一般不在焊缝金属内而是在热影响区。因此，对于这种裂纹产生的原因，不能单纯地认为是氢的关系，主要的原因恐怕是热影响区的硬化。

至于热影响区裂纹发生的时间，則与高温裂纹有所不同，一般是在焊接完毕后的几分钟内产生。但由于氢或馬氏体变态应力而产生的裂纹，有时需经过一、二天以后才出现。

热影响区微小裂纹与鋼本身組織很难区别，因此为了正确地观察这种裂纹，有必要利用显微镜，电解研磨，电解腐蚀，以及磁性探伤等方法。

2) 热影响区裂纹和冷却速度

大家知道, 冷却速度的快慢, 对钢材焊接热影响区硬度和裂纹形成的倾向有着很大关系。但是在研究冷却速度对热影响区硬化和产生裂纹等影响时, 各国专家在测定冷却速度时所采用的温度并不一样^[7]。大致可分下列几种:

- 1) 700°C时的冷却速度;
- 2) 540°C时的冷却速度;
- 3) 300°C时的冷却速度;
- 4) 870°~500°C温度范围的冷却速度。

采用上述各种温度的理由或根据分述如下。

1) 700°C时的冷却速度

这个 700°C 温度略接近于低碳钢冷却过程中的变态温度, 在以往的一段时期内人们采用较多。

在各种规定温度下所测定的冷却速度可用下述公式表示出来:

$$CR(^{\circ}\text{C}/\text{秒}) = 0.35P^{0.8} \quad (1)$$

$$P \equiv \left(\frac{T - T_0}{I / v} \right)^{1.7} \times \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{t - t_0}{\alpha} \right), \left(\frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{英寸}}{\text{安培} \cdot \text{分}} \right)^{1.7} \quad (2)$$

其中 T ——最高温度 (°C);

T_0 ——预热温度 (°C);

I ——焊接电流 (安培);

v ——焊接速度 (英寸/分);

t ——板厚 (英寸);

t_0 和 α ——由 T 而决定的常数。

常数 T	700°C时	500°C时	300°C时
t_0	12	14	26
α	1	4	10

2) 540°C时的冷却速度

从鋼的連續冷却变态曲綫中可看出,在这个溫度附近时,鋼的变态是在最短時間內产生的。有人认为,在实际焊接热循环情况下,热影响区的硬度决定于溫度在 540°C 附近的冷却速度。

3) 300°C时的冷却速度

Cottrel等认为溫度 300°C附近的冷却状态支配着未变态奥氏体的分解和氢的解放程度,故而对焊珠层下的冷裂紋形成有密切的关系,因此采用 300°C 的冷却速度。图 2 系Mn-Mo 鋼在C. T. S. 試驗結果下得出的冷却速度和产生裂紋之間的关系。图中可看出热影响区在 300°C 时的冷却速度小于 6 °C/秒时不会产生热影响区裂紋。

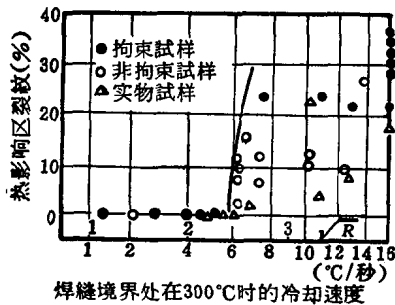


图 2 Mn-Mo 鋼冷却速度和热影响区裂紋的关系。

据英国焊接协会(B. W. R. A.)研究,为了能够定量地表示出焊接接縫的几何形状,采用热的拘束系数(TSN数)。这已考虑到 300°C 附近的冷却速度影响的因素。这样一来,将冷却速度和拘束应力单独地分离开来研究这二个因素对热影响区裂紋的影响。Cottrel 和Bradstreet提出了下述公式,以計算 300°C 的冷却速度^[8]。